

TESIS DOCTORAL

2019

**MODELO DE EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD
DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS DE
URBANIZACIÓN MEDIANTE
ALGORITMOS GENÉTICOS**

SIMÓN MARTÍNEZ RUIZ

INGENIERO INDUSTRIAL

**PROGRAMA DE DOCTORADO
EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

DIRECTORA: DRA. DÑA. CRISTINA GONZÁLEZ GAYA

CODIRECTOR: DR. D. ANTONIO HOSPITALER PÉREZ

*A mis padres
A Marbel*



PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
E.T.S. INGENIEROS INDUSTRIALES

TÍTULO:

Modelo de evaluación de la sostenibilidad de soluciones constructivas de urbanización mediante algoritmos genéticos

AUTOR:

Simón Martínez Ruiz

DIRECTORA:

Cristina González Gaya

CODIRECTOR:

Antonio Hospitaler Pérez

RESUMEN:

Las áreas industriales se establecen en parcelas entorno a viales dotados de infraestructuras asociada. Las soluciones constructivas empleadas, utilizan materiales y maquinaria que originan impactos ambientales a lo largo de sus ciclos de vida. A su vez, estas soluciones y sus componentes causan impactos ambientales que pueden medirse mediante indicadores de sostenibilidad. El concepto de sostenibilidad está estrechamente vinculado al desarrollo sostenible, que se define como "desarrollo que satisface las necesidades del presente, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". El gran número de soluciones posibles y disponibles para este problema de ingeniería real, pasa por identificar la mejor solución posible para una sección viaria determinada que es el generador del entorno urbano, y para ello se propone emplear un conjunto de técnicas heurísticas, que conceptualizan el problema como un problema de optimización combinatoria. Dicho problema es puramente discreto. El sistema elegido se basa en un método de algoritmo genético que jerarquiza a los individuos en función de tres indicadores de sostenibilidad: emisiones de CO₂, energía embebida y coste económico. En este documento, se evalúan las posibles soluciones constructivas utilizando un algoritmo genético multiobjetivo de tres objetivos que considera los criterios mencionados anteriormente, y aborda la sostenibilidad en la planificación urbana. El procedimiento se aplica a tres funciones objetivo (emisiones de CO₂, coste económico y energía integrada o embebida) para cada solución posible. Utilizamos el algoritmo

genético de clasificación no dominado (NSGA-II) para implementar la optimización de objetivos múltiples en MATLAB. Se muestran resultados adicionales para un paseo aleatorio y un algoritmo de búsqueda multi-objetivo. Este estudio se han considerado 26 variables de diseño, con diferentes rangos de variación, a los que se ha aplicado el algoritmo genético indicado que genera una enorme población de soluciones que constituyen los resultados para los frentes de Pareto definidos. Nuestro método muestra que el enfoque óptimo resuelve de manera efectiva un problema de planificación de proyectos de objetivos múltiples en el mundo real.

PALABRAS CLAVE:

Parques industriales, Ecodiseño, Planificación urbana, Sostenibilidad, Algoritmos genéticos, Optimización multiobjetivo



PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
E.T.S. INGENIEROS INDUSTRIALES

TÍTULO:

Modelo de evaluación de la sostenibilidad de soluciones constructivas de urbanización mediante algoritmos genéticos

ABSTRACT:

Industrial areas are set up on plots of roads and associated infrastructure. These use materials and machinery that have environmental impacts, and thus require constructive solutions throughout their lifecycles. In turn, these solutions and their components cause environmental impacts that can be measured by sustainability indicators. The concept of sustainability is closely tied to sustainable development, which is defined as “development that meets the needs of the present, without compromising the ability of future generations to meet their own needs”. The large number of possible and available solutions means that identifying the best one for a given road section must employ a set of heuristic techniques, which conceptualize the issue as a combinatorial optimization problem that is purely discrete and non-differential. The system chosen can be based on a genetic algorithm method that differentiates individuals based on three sustainability indicators: CO₂ emissions, embedded energy (also known as embodied energy, defined as the energy expended to manufacture a product), and economic cost. In this paper, we supplement traditional cost analyses using a three-objective multi-objective genetic algorithm that considers the aforementioned criteria, thus addressing sustainability in aggregate planning. The procedure is applied to three objective functions—CO₂ emissions, economic cost and embedded energy—for each possible solution. We used the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) to implement multi-objective optimization in MATLAB. Additional results for a random walk and multi-objective search algorithm are shown. This study involved 26 design variables, with different ranks of variation, and the application of the algorithm generates results for the defined Pareto fronts. Our method shows that the optimal approach effectively solves a real-world multi-objective project planning problem, as our solution is one of the Pareto-optimal solutions generated by the NSGA-II.

KEYWORDS:

industrial parks; eco-design; urban planning; sustainability assessment; genetic algorithms; multi-objective optimization

Agradecimientos

Esta tesis doctoral es el resultado de varios años de investigación y desarrollo profesional en el ámbito de la ingeniería de proyectos y del encaje medioambiental de los mismos.

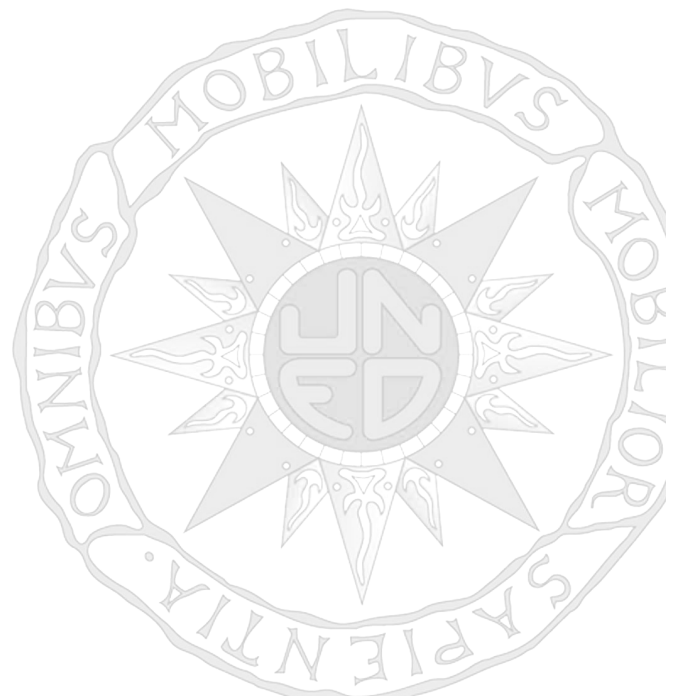
Han sido muchos los años de trabajo compaginados con la intensa actividad profesional, en los que la ayuda, el apoyo y las contribuciones de familia, amigos, profesores y colegas de profesión han contribuido de forma decisiva a no perder la esperanza de llegar a la meta.

Quiero dar las gracias a Toni, mi amigo y referente, porque han sido muchos los años hasta llegar aquí. Sin tí, esto no habría sido posible.

Quiero agradecer especialmente a mi Directora de Tesis, Cristina, por los ánimos y empuje decisivo para mantener inquebrantable el interés en la culminación de los objetivos.

Por último, me gustaría dar las gracias a mi familia, Marbel, por el apoyo, cariño, aguante y por ser como son. Espero que éste logro personal que supone concluir una etapa académica al más alto nivel, sirva para alentar sueños y objetivos de todos los miembros de la familia.

INDICES



INDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	
1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación, antecedentes y objetivos del trabajo de investigación.....	2
1.3. Objetivo del trabajo.....	3
1.4. Organización del trabajo.....	3
2. URBANISMO INDUSTRIAL Y SOSTENIBILIDAD	
2.1. El urbanismo y la sostenibilidad.....	7
2.2. Ciudad tradicional.....	8
2.3. Ciudad industrial.....	9
2.4. El urbanismo moderno.....	10
2.5. Urbanización funcionalista y de baja densidad.....	11
2.6. Signos de insostenibilidad.....	13
2.6.1. Impactos funcionales.....	14
2.6.2. Impactos ambientales.....	14
2.6.3. Impactos sociales.....	14
2.6.4. Impactos económicos.....	14
2.7. El urbanismo ecológico.....	15
2.8. Iniciativas de urbanismo ecológico.....	16
2.9. Las certificaciones, antecedentes y modelos.....	17
2.10. El urbanismo industrial.....	22
2.11. La implantación de espacios urbanos.....	25
2.11.1. Diseño.....	27
2.12. Elementos de la sección transversal.....	28
2.12.1. Carriles de circulación rodada.....	29
2.12.2. Aceras.....	31
2.12.3. Medianas.....	35
2.12.4. Arcenes.....	36
2.12.5. Bandas de estacionamiento.....	37
2.12.6. Carriles especiales.....	39
2.13. Anchura total de la sección transversal.....	40
2.14. Sistemas de colección de instalaciones en ingeniería urbana.....	41
2.15. Elementos de una sección viaria.....	45
2.16. Alcantarillado.....	46
2.17. Distribución de agua.....	53
2.18. Red de incendios.....	54
2.19. Red de suministro de gas.....	55
2.20. Redes de telecomunicaciones.....	55
2.21. Energía eléctrica.....	58
2.22. Alumbrado público.....	61
2.23. Jardinería, riego y mobiliario urbano.....	63
2.24. Aceras.....	66
2.25. Bandas de aparcamiento.....	67
2.26. Firmes y pavimentos.....	70
2.27. Señalización vertical y horizontal.....	80

3. OPTIMIZACIÓN. ALGORITMOS GENÉTICOS	
3.1. Definiciones básicas.....	85
3.2. Métodos tradicionales.....	88
3.3. Métodos modernos.....	89
3.4. Computación evolutiva.....	92
3.4.1. Programación evolutiva.....	93
3.4.2. Estrategias evolutivas.....	93
3.5. Programación genética.....	94
3.6. Algoritmos genéticos.....	94
3.6.1. Algoritmo genético simple o canónico.....	95
3.6.2. Población inicial.....	97
3.6.3. Codificación.....	98
3.6.4. Función de adaptación o Fitness.....	104
3.6.5. Función de selección.....	107
3.6.6. Función de cruce.....	113
3.6.7. Función de mutación.....	118
3.6.8. Función de inserción.....	121
3.6.9. Criterio de parada.....	122
3.7. Computación evolutiva. MOGA.....	123
3.7.1. Modelos evolutivos que generan poblaciones de soluciones no dominantes.....	126
4. IMPLEMENTACION DEL MODELO. PRUEBAS BÁSICAS	
4.1. Implementación de un algoritmo genético.....	131
4.2. Funciones seleccionadas.....	133
4.3. Test y resultados.....	135
4.3.1. Consideraciones previas.....	135
4.3.2. Test de población.....	137
4.3.3. Test de número de generaciones.....	140
4.3.4. Test de probabilidad de cruce.....	141
4.3.5. Test de probabilidad de mutación.....	143
4.3.6. Test de mutación y cruce simultáneamente.....	144
4.3.7. Test de Sharing.....	145
4.4. Mejoras.....	146
4.5. Evaluación de los Algoritmos Genéticos.....	150
4.5.1. Evaluación On-Line.....	150
4.5.2. Evaluación Off-Line.....	150
4.5.3. Problemas específicos.....	151
4.5.4. Sharing.....	153
5. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	
5.1. Introducción.....	155
5.2. Estado del conocimiento en planificación urbana industrial.....	155
5.3. Diseño de espacios industriales.....	162
5.4. Técnicas de optimización.....	163
6. APLICACIÓN PRÁCTICA	
6.1. Definición del problema.....	167
6.1.1. Efectos negativos de un mal diseño y concepción de la sección viaria urbana.....	167
6.1.2. Espacio de búsqueda del problema.....	167
6.2. Justificación uso Algoritmos Genéticos.....	169

6.3. Especificaciones del código.....	170
6.3.1. Codificación utilizada y métodos de selección, cruce y mutación.....	170
6.3.2. Sistema de Fitness y penalización.....	171
6.4. Algoritmo NSGA-II.....	172
6.5. Aplicación práctica.....	173
6.5.1. Paseo aleatorio (random walk).....	174
6.5.2. NSGA-II para la optimización multiobjetivo.....	177
6.6. Resultados y conclusiones.....	184
7. CONCLUSIONES Y LINEAS DE DESARROLLO FUTURO	
7.1. Introducción.....	185
7.2. Trabajo realizado.....	187
7.3. Concepción de las infraestructuras.....	187
7.4. Evaluación de las infraestructuras.....	188
7.5. Estudio de la sostenibilidad en la etapa de implantación.....	192
7.6. Conclusiones personales.....	192
7.7. Investigaciones futuras.....	194
7.8. Contribución al conocimiento.....	196
8. BIBLIOGRAFÍA.....	197
ANEXOS.	
Anexo A. Codificación	
Anexo B. Código fuente	
Anexo C. Código fuente con restricciones	
Anexo D. Valores de sostenibilidad	

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2.

- 2.1. Plano de Barcelona. 1849. Manuel Sauri y Josep Mata. Guia General de Barcelona.
- 2.2. Etapas de la urbanización. 4ª etapa de la urbanización. Timerime.com.
- 2.3. Sección vial propuesta por Eugène Henard en 1910.
- 2.4. Ciudad Universitaria de Caracas. Arqº. Carlos Raúl Villanueva
- 2.5. Zonificación PAU II-4. Sanchinarro. Madrid
- 2.6. Vista aérea infraestructuras Parque Logístico Industrial Tordesillas
- 2.7. Eco Village “Coral Reef” Vincent Callebaut
- 2.8. LEED for Neighborhood Developmet
- 2.9. BREEAM Communities
- 2.10. CASBNEE for Urban Development
- 2.11. Perfil de las certificaciones según temas
- 2.12. Modelo de certificación de actuaciones urbanas. Primer paso: condicionantes preexistentes. Ministerio de Fomento
- 2.13. Evaluación de planeamiento urbano. Segundo paso: ordenación
- 2.14. Evaluación de actuaciones urbanísticas. Certificación final.
- 2.15. Análisis sostenibilidad proyecto de urbanización. Aplicación Gobierno Vasco. Grupo Sprilur.
- 2.16. Índice de sostenibilidad por puntos de evaluación proyecto de urbanización. Grupo Sprilur. IHOBE.
- 2.17. Polígono Industrial de Landaben. Pamplona
- 2.18. Parque industrial en Benacazón. Sevilla. Buró 4 arquitectos.
- 2.19. Standard Cross section of street. Engineering News and American Railway Journal. Vol. XXXVI. No.9. 1896
- 2.20. Sección viaria. Adaptación propia
- 2.21. Sección viaria.
- 2.22. Anchuras recomendadas de carriles de circulación
- 2.23. Capacidad portante en vías urbanas. Manchón et al. 1995
- 2.24. Capacidad portante de vías de sentido único. Manchón et al. 1995
- 2.25. Acera peatonal con rebaje. Manual Fundación ONCE
- 2.26. Anchura de bandas de estacionamiento. Dimensiones. Neufert.
- 2.27. Diseño de zonas de aparcamiento
- 2.28. Anchura de secciones transversales de viales
- 2.29. Sección viaria para uso industrial. Vía colectora local
- 2.30. Prismas de instalaciones en una sección viaria
- 2.31. Galería registrable de losa vista

- 2.32. Galería visitable de servicios. Aeropuerto de Málaga
- 2.33. Galería visitable de servicios. Universidad Jaime I de Castellón.
- 2.34. Elementos integrantes de una sección viaria genérica. Elaboración propia
- 2.35. Sistema de instalación tubería de PVC saneamiento
- 2.36. Materiales de canalización de saneamiento.
- 2.37. Acometida de imbornal de evacuación de aguas pluviales
- 2.38. Materiales para tuberías de saneamiento. Comparativa.
- 2.39. Materiales para tuberías de saneamiento. Comparativa.
- 2.40. Elementos de hormigón para redes de saneamiento. Catálogo IVA Sorigué
- 2.41. Canalizaciones y pozo de registro de materiales poliméricos para redes de saneamiento.
- 2.42. Tapa de fundición para arqueta de saneamiento
- 2.43. Sección pozo de saneamiento
- 2.44. Tapa normalizada de pozo de saneamiento. Alzado y planta.
- 2.45. Materiales para tuberías de distribución de agua
- 2.46. Hidrante para enterrar. Boca siamesa y tapa de fundición
- 2.47. Materiales de tuberías red contra incendios
- 2.48. Sistema de instalación acometida de gas. Elementos.
- 2.49. Materiales tuberías infraestructura de gas
- 2.50. Infraestructuras para red de telecomunicaciones
- 2.51. Arqueta Tipo H prefabricada para red de telecomunicación. Telefónica.
- 2.52. Canalización prefabricada de hormigón. ADIF
- 2.53. Arqueta prefabricada de hormigón. ADIF
- 2.54. Material elementos infraestructura de telecomunicaciones
- 2.55. Conductor eléctrico apantallado alta tensión
- 2.56. Sección constructiva instalación líneas Baja y Media Tensión.
- 2.57. Materiales líneas enterradas Alta y Media Tensión. ADIF
- 2.58. Envolvente centro de transformación prefabricado hormigón.
- 2.59. Planos estructura y contenido centro transformación MT/BT
- 2.60. Sistemas de alumbrado exterior LED y LED con fuente captación fotovoltaica
- 2.61. Cimentación prefabricada y arqueta prefabricada para alumbrado exterior. Punto de luz
- 2.62. Báculo de farola de madera
- 2.63. Materiales de los elementos del sistema de alumbrado exterior.
- 2.64. Paquete de divulgación del plan para mejorar las calles de San Francisco. Departamento de Planificación de San Francisco. California. 2008
- 2.65. Especies arbóreas indicadas para espacios urbanos. Green Leaf España
- 2.66. Jardinera configurada con encintado de piezas de bordillo. Riego por goteo
- 2.67. Toma de acoplamiento rápido para riego y baldeo.
- 2.68. Acera con banda señalizadora. Manual de vados y pasos peatonales. Fundación ONCE.
- 2.69. Acera de taco de piedra natural.

- 2.70. Materiales configuración aceras
- 2.71. Dimensiones mínimas recomendadas para plazas de aparcamiento. Instrucción Vía Pública del Ayuntamiento de Madrid
- 2.72. Banda de aparcamiento construida con adoquín drenante
- 2.73. Banda de aparcamiento construida con hormigón drenante
- 2.74. Materiales habituales bandas de aparcamiento
- 2.75. Elementos de aparcamiento para bicicletas
- 2.76. Estructura de un firme flexible y de un firme rígido
- 2.77. Propiedades y tipologías de firmes
- 2.78. Acciones transmitidas por el tráfico a la estructura de un firme
- 2.79. Materiales para la formación de explanadas. Norma 6.1. Secciones de firme. Orden FOM 3460/2003.
- 2.80. Categorías de tráfico pesado
- 2.81. Clasificación española de suelos. PG-3
- 2.82. Tipos de explanada admisibles
- 2.83. Materiales utilizables en explanadas. Instrucción de carreteras.
- 2.84. Tipología de suelos. Simbología SUCS
- 2.85. Aglomerado asfáltico a partir de NFU reciclado
- 2.86. Temperaturas de puesta en obra de un pavimento asfáltico y uno de hormigón. IECA.
- 2.87. Texturas superficiales firmes de hormigón. IECA
- 2.88. Clasificación de mezclas bituminosas. Kraemer. 1999
- 2.89. Clasificación de los reciclados in situ en frío. Kraemer, 1999
- 2.90. Denominación simbólica de materiales. Instrucción de carreteras
- 2.91. Catálogo de secciones de firme para categorías de tráfico pesado T00 a T2 en función de la categoría de la explanada. Instrucción de Carreteras.
- 2.92. Materiales para la formación de un firme.
- 2.93. Señalización horizontal
- 2.94. Materiales empleados en señalización vertical y horizontal

CAPÍTULO 3.

- 3.1. Frente de Pareto de una función con dos variables
- 3.2. Fragmento de una función con múltiples máximos y mínimos.
- 3.3. Clasificación de los algoritmos evolutivos
- 3.4. Algoritmo genético expresado de forma abstracta como un conjunto de métodos
- 3.5. Algoritmo genético expresado de forma abstracta como un conjunto de métodos
- 3.6. Criptógrafo. Máquina alemana de cifrado Lorenz utilizada en la Segunda Guerra Mundial
- 3.7. Rueda de Jefferson para la generación de soluciones de elementos de una sección viaria
- 3.8. Descubrimiento estructura ADN. Revista Nature 25 de abril de 1953
- 3.9. Glosario de términos codificación molécula ADN. Instituto Nacional de medicina genómica. Secretaría de Salud. México.
- 3.10. Representación individuo.

- 3.11. Ejemplo de la relación directa entre genotipo y fenotipo
- 3.12. Ejemplo diferentes individuos que pueden aparecer
- 3.12. Algoritmo genético. Pesos.
- 3.14. Ruleta con probabilidades de los cuatro elementos que componen la población
- 3.15. Representación de la distribución de probabilidad que ofrece la selección por ruleta y la selección por rango.
- 3.16. Operador de cruzamiento basado en un punto
- 3.17. Ejemplo del funcionamiento del operador de cruce en un punto
- 3.18. Ejemplo del funcionamiento del operador de cruce en dos puntos
- 3.19. Funcionamiento del operador de cruce uniforme
- 3.20. Efectos del coeficiente α en el operador de cruce baricéntrico
- 3.21. Permutación de genes dentro de un cromosoma

CAPÍTULO 4.

- 4.1. Diagrama esquemático del mecanismo de generación de individuos del NSGA-II
- 4.2. Representación gráfica de las funciones A,B,C,D,E
- 4.3. Tiempo de proceso para diferentes longitudes de cromosomas binarios
- 4.4. Precisión en los resultados para diferentes longitudes de cromosoma
- 4.5. Resultados del test de población en la función A (Codificación real)
- 4.6. Resultados del test de población en la función A (Codificación binaria)
- 4.7. Resultados del test de población en la función B (Codificación real)
- 4.8. Resultados del test de población en la función B (Codificación binaria)
- 4.9. Resultados del test de población en la función C (Codificación real)
- 4.10. Resultados del test de población en la función C (Codificación binaria)
- 4.11. Resultados del test de generaciones en las funciones A, B y C
- 4.12. Efectividad del Algoritmo Genético en función de la probabilidad de cruce utilizada
- 4.13. Efectividad del Algoritmo Genético en función de la probabilidad de mutación utilizada
- 4.14. Efectividad del Algoritmo Genético con diferentes combinaciones de probabilidad de cruce y probabilidad de mutación
- 4.15. Efectividad y tiempo de proceso del AG en el test de Sharing
- 4.16. Resultados para las funciones A, B y C con y sin mejoras (real)
- 4.17. Resultados para las funciones A, B y C con y sin mejoras (binario)
- 4.18. Resultados medios normalizados para la función E
- 4.19. Ejemplo de espacios de búsqueda particulares donde los AG's no funcionan correctamente
- 4.20. Función demasiado irregular (Ruggedness)
- 4.21. Espacio de búsqueda con una gran sección neutral
- 4.22. Efectos de utilizar el Sharing

CAPÍTULO 5.

- 5.1. Sección viaria generadora de un vial urbano longitudinal

CAPÍTULO 6.

- 6.1. Rango de valores de cada alelo
- 6.2. Vial industrial
- 6.3. Ejemplo de codificación con posible solución
- 6.4. Paseo aleatorio (random walk) CO_2 vs E
- 6.5. Paseo aleatorio (random walk) Energía vs Coste económico
- 6.6. Paseo aleatorio (random walk) Emisiones CO_2 vs Energía
- 6.7. Frente de Pareto para dos funciones
- 6.8. Identificación frente de Pareto para RW E/ CO_2
- 6.9. Identificación frente de Pareto para RW E/Coste
- 6.10. Identificación frente de Pareto para tres objetivos RW E/Coste/ CO_2
- 6.11. Frente de Pareto individuos dominantes E/ CO_2
- 6.12. Ampliación frente de Pareto Tres planos
- 6.13. Sección viaria óptima solución

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3.

- 3.1. Clasificación métodos de optimización.
- 3.2. Representación decimal, binaria y en codificación Gray de los 8 primeros números naturales.
- 3.3. Individuos integrantes en la sección viaria y variabilidad de los mismos
- 3.4. Lista de algoritmos genéticos multiobjetivo

CAPÍTULO 4.

- 4.1. Valores óptimos de la probabilidad de cruce.
- 4.2. Valores óptimos de la probabilidad de mutación

CAPÍTULO 6.

- 6.1. Límites del espacio objetivo de soluciones.
- 6.2. Pesos de la función objetivo
- 6.3. Solución óptima OP-A
- 6.4. Solución óptima OP-B
- 6.5. Solución óptima OP-C

CAPÍTULO 1

INTRODUCCION



1 | INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El desarrollo de un entorno urbano requiere de un proyecto, que entraña una actividad creativa, fundamentada principalmente en el razonamiento, la experiencia y el conocimiento. Tiene la finalidad de lograr soluciones óptimas, mediante aplicación de técnicas eficientes para el diseño y desarrollo de productos o sistemas.

En los proyectos de diseño de espacios urbanos, donde las exigencias actuales de sostenibilidad, eficiencia, seguridad, economía y exigencias legales y reglamentarias, son determinantes, para lograr soluciones de un punto de equilibrio en atención a los criterios perseguidos.

La búsqueda de ese punto, implica la aplicación de metodologías tendentes a lograr que sea el óptimo, es decir, el mejor para nuestro diseño.

Dicho punto óptimo, se manifestará como un mínimo o máximo en una función objetivo, $f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \dots x_n)$, donde $x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \dots x_n$, pueden representar las variables o criterios a optimizar, para maximizar o minimizar dicha función objetivo.

En los problemas de optimización, las variables de la función objetivo que identifican al problema, es decir $(x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \dots x_n)$, pueden estar relacionadas entre sí por una serie de leyes, de manera que los procesos de optimización quedan restringidos a aquellos conjuntos de variables que confirman dichas leyes.

A esta serie de leyes se le denomina restricciones, las cuales definen los límites adecuados de funcionamiento para el problema en estudio.

La función objetivo y las restricciones formarán el denominado modelo, que representa una simplificación de los elementos esenciales y de funcionamiento del problema a optimizar (ver capítulos 2, 3, 5 y 6).

Además de la formulación de un modelo, es necesaria la aplicación de una metodología de búsqueda del punto óptimo, como ha sido expresado. La metodología de búsqueda, o de optimización, puede tratarse de algún algoritmo informatizado, como los llamados algoritmos genéticos, desarrollados por Holland en 1975 (Goldberg, 1989).

El fin que se persigue con la aplicación de éstos, es explorar y explotar todos los posibles puntos que integran el campo de soluciones, de forma rápida y eficiente, empleando como mecanismo de evaluación la función objetivo y las respectivas restricciones. Estos algoritmos eficientes de optimización, emplean técnicas metaheurísticas (heurísticas mejoradas) como mecanismos de búsqueda.

Las técnicas metaheurísticas, consisten en procesos amplios, dirigidos e inteligentes, pensados para explorar y explotar determinadas áreas, o todas de un espacio de soluciones, y que representan actualmente, un gran avance en las

metodologías para la resolución de problemas, donde no es posible identificar soluciones óptimas por simple revisión exhaustiva.

Actualmente se emplean técnicas de fronteras de Pareto, que consisten en determinar un punto (óptimo de Pareto), que maximice el nivel de satisfacción de un criterio sin perjudicar a los otros. Esta fue originalmente propuesta por Francis Isidro Edgeworth y posteriormente generalizada por Wilfredo Pareto (González, 2005).

La construcción y aplicación de un algoritmo genético, para un problema de optimización, implica especificar algunos componentes como:

- Una representación para las soluciones potenciales del problema sobre la cual se define en espacio de búsqueda (codificación).
- Un método para generar la población inicial de soluciones potenciales.
- Una función objetivo que evalúe las soluciones en términos de su adaptación al entorno, es decir, la que asigna a cada individuo de la población, el valor de adecuación que indica la idoneidad de este con respecto al resto de la población (ver capítulo 2 y 3).
- Una actuación sobre los individuos (reproducción, cruzamiento y mutación), procurando que las modificaciones que resulten ventajosas se propaguen y las malas desaparezcan.
- Una condición de terminación que determine cuándo el proceso ha encontrado una solución óptima y no puede mejorar más la adaptación de los individuos al medio.

Los algoritmos genéticos requieren para su aplicación de representaciones codificadas como un cromosoma. Cada cromosoma tiene varios genes que corresponden a los parámetros del problema en cuestión.

En la naturaleza, los cromosomas se encuentran ubicados en parejas en el interior del núcleo celular, y los genes son una secuencia de nucleótidos, es decir, fragmentos de ADN en una determinada localización del cromosoma. Este conjunto, formará el genotipo del individuo (cromosoma), que se manifestará también como un fenotipo. El fenotipo representa las características tangibles u observables del individuo, es decir, los rasgos morfológicos.

Posteriormente, para evaluar la adaptación del fenotipo al entorno se emplea la función objetivo y las restricciones. Como se ha comentado, los cromosomas están constituidos por genes que son las N variables del problema, a su vez cada gen puede estar constituido por n dígitos cuyo valor representa un alelo. Alelo significa literalmente la forma alternativa, es decir, la variación alternativa de un determinado gen y por lo tanto de un rasgo característico.

1.2. Justificación, antecedentes y objetivos del trabajo de investigación

El entorno urbano donde se desenvuelven actualmente las organizaciones (industriales, comerciales, logísticas,..), con sus normativas de producción, calidad ambiental y seguridad, hace que sea necesario enfocar los diseños de polígonos industriales en función de éstas.

Esta circunstancia supone mantener un alto nivel de calidad, cumplimiento reglamentario y de compromiso medioambiental, con costes económicos que deben

ubicarse dentro de un rango permitido, lo que implica reducir los costes de implantación.

Para la reducción de los costes de implantación buscando a la vez el cumplimiento de los criterios de sostenibilidad, es necesario diseñar la ordenación (los espacios urbanos) que permitan interconexión de los elementos del medio (edificios e industrias), su abastecimiento, la garantía de circulación e interrelación y el mínimo impacto posible.

1.3.- Objetivo del trabajo

Como se ha comentado anteriormente, en el diseño de un espacio urbano (espacio urbano industrial en particular) es necesario considerar todo un conjunto de factores que permitan el correcto, eficiente y seguro funcionamiento del entorno que depende de él y que será implantado en el área urbana que defina.

Entre estos factores está el mínimo impacto en su entorno. Dicho impacto puede ser conocido y evaluado a partir de un índice de sostenibilidad basado en criterios que estén asociados a indicadores relacionados con el mismo. Tal es el caso de los niveles de emisión de CO₂, de la energía embebida en los materiales de construcción y elementos integrantes de dicho entorno urbano, de la cantidad de recursos necesarios para conseguirlos, como el agua y de los factores que altera su fabricación, uso y eliminación (efectos sobre la salud humana, eutrofización, procesos carcinogénicos, etc.).

La interacción entre la implantación de un área urbana, dentro de un entorno natural, en relación a la sostenibilidad y al coste económico que lleva implícitos, obliga a plantearnos, desde el punto de vista de la optimización, la búsqueda de un punto de balance, lo cual conduce a un problema combinatorial entre éstos.

El objetivo principal del trabajo es desarrollar un modelo que permita evaluar soluciones óptimas que permitan conocer soluciones sostenibles y económicas.

1.4. Organización del trabajo

El desarrollo del trabajo sigue una metodología que parte del estudio y análisis del problema a resolver, sustentada en el análisis de la bibliografía relacionada para conocer las teorías, bases y el funcionamiento de los modelos existentes (Capítulos 2,3, y 5) ya sea en sus características generales como en las particulares.

Capítulo 2 (Urbanismo industrial y sostenibilidad). En este capítulo se exponen en un primer apartado los criterios y herramientas de sostenibilidad existentes en la actualidad utilizados en campos similares o afines a urbanismo, para pasar posteriormente a analizar los criterios y aspectos de diseño y construcción de espacios industriales, de las infraestructuras y elementos constructivos que integran una sección viaria como generador de la trama urbana destinada a albergar actividades productivas o de servicios.

Capítulo 3 (Optimización y algoritmos genéticos). Este capítulo muestra una recopilación documental relativa a la metodología de búsqueda de los algoritmos genéticos. Se estudia todo lo concerniente a sus características principales y las

propuestas de algunos autores para su aplicación, en temas de optimización de problemas de ingeniería civil (codificación). También se analizan las últimas tendencias para su aplicación, así como otras metodologías para efectos comparativos. Se justifica la metodología adoptada NSGA-II.

Capítulo 4 (Implementación metodológica y pruebas básicas). Se analizan diferentes aspectos que permiten fusionar el diseño urbano, la construcción del espacio urbano y la optimización mediante algoritmos genéticos. Se realiza un recorrido por algunos desarrollos anteriores, que incluyen algunos aspectos de ambos temas. En este capítulo se desarrolla la metodología propuesta. Partiendo de los estudios y análisis previos, se elabora un modelo que tiene como finalidad optimizar los costes ambientales basados en tres objetivos a minimizar (emisiones de CO₂, consumo energético de la solución y coste económico de la misma), para una sección viaria nueva.

El modelo facilita una evaluación de los posibles costes que tendría que asumir un proyectista o decisor administrativo o privado, como resultado de las decisiones tomadas por los planificadores en la etapa de prediseño del entorno urbano.

A los efectos de poder validar el funcionamiento del modelo o algoritmo, se proponen y desarrollan una serie de experimentos. Estos experimentos permiten evaluar el potencial y la capacidad para la obtención de buenas soluciones.

Capítulo 5. (Estado del conocimiento). Consiste en la recopilación bibliográfica del estado del arte relacionado con el concepto de mantenimiento, tipos de mantenimiento, gestión, políticas, indicadores, tipos de fallos, selección de planes de mantenimiento, modelos para la optimización de las acciones de mantenimiento aplicando algoritmos genéticos y sus formas de implementación. Se describen los modelos para tres niveles: componente, sistema y planta.

Capítulo 6. Aplicación práctica. Se desarrolla en este capítulo de forma íntegra el problema para una sección viaria industrial de 20 metros de anchura, dotada de infraestructuras de abastecimiento y evacuación de agua, infraestructura eléctrica, de comunicaciones, de gas, así como de tránsito peatonal y rodado. Dicho elemento se analiza desde el punto de vista de su estructura y variabilidad, asemejándolo a un individuo con una estructura genética sometida a variabilidad, mutación y diversidad de manifestación de los elementos que la pueden componer.

En el contexto que nos ocupa, el proceso de búsqueda del individuo más apto, se lleva a cabo a través de la actuación sobre los diferentes individuos que se obtienen a lo largo del proceso, los cuales llevan asociado un valor en una función matemática, es decir, la función objetivo para la optimización.

La metodología parte de una población inicial formada por un conjunto de individuos, donde cada uno de ellos, representa una posible solución al problema de optimización.

A través de la aplicación de los llamados operadores genéticos, selección/reproducción, cruce y mutación, se encontrarán a lo largo del proceso evolutivo individuos más aptos, garantizando así que en las generaciones siguientes estos representen mejores soluciones. Este proceso iterativo concluye cuando se ha alcanzado cierto nivel de calidad establecido inicialmente, o cuando se llega a la convergencia de las soluciones (ver apartado 4.12).

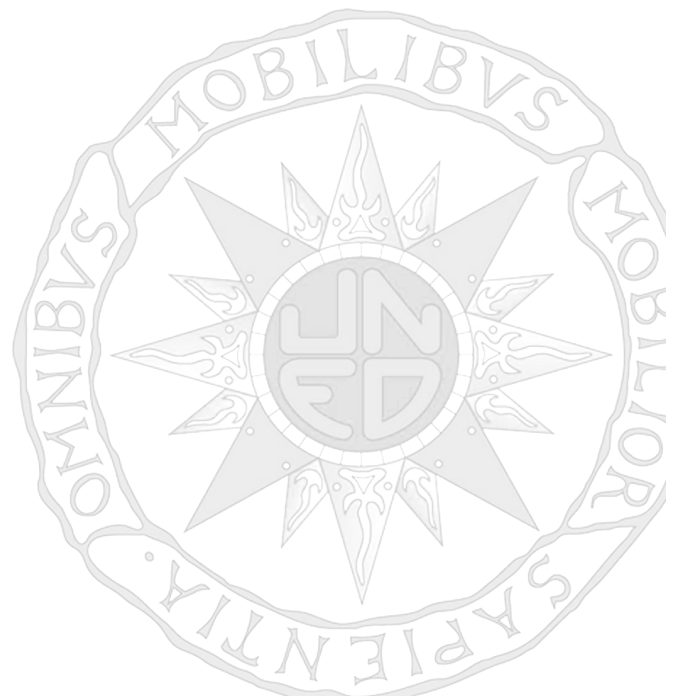
Capítulo 7. Conclusiones y líneas de desarrollo futuro. Por último, se presentan las conclusiones, así como también se discuten, las posibles estrategias que se deben desarrollar en el futuro, con la finalidad de superar algunas limitaciones actuales de la metodología propuesta.

Capítulo 8. Bibliografía. Se presenta la bibliografía consultada durante el desarrollo del trabajo de investigación.

Anexos. Se exponen los códigos fuente empleados, las bases de datos empleadas, la codificación adoptada, para el problema estudiado.

CAPÍTULO 2

URBANISMO INDUSTRIAL Y SOSTENIBILIDAD



2 | URBANISMO INDUSTRIAL Y SOSTENIBILIDAD

2.1. El urbanismo y la sostenibilidad

Las ciudades y sus entornos urbanos e industriales son los principales centros de las actividades productivas, de las interrelaciones entre personas y actividades y de las decisiones económicas, y por lo tanto donde se concentran crecientes cantidades de población alterando profundamente el entorno físico para atender las necesidades de sus habitantes.

Es en este entorno también donde se verifican de modo más agudo las problemáticas e impactos emergentes del modelo urbano, productivo y político heredado de la sociedad industrial y todavía practicado en la actualidad, en el cual se priorizan los intereses económicos y financieros en detrimento de los aspectos sociales o medioambientales. A pesar de la infinidad de señales de alerta que se han venido percibiendo en los asentamientos urbanos contemporáneos, durante toda la evolución histórica del proceso de urbanización y formación de las ciudades, se han observado signos de insostenibilidad, pero nunca con el alcance o intensidad con que se verifican actualmente.

El origen de los asentamientos humanos y la urbanización se remonta en la historia evolutiva humana al paso del cambio de modelo económico cazador y recolector, de subsistencia, a otro modelo económico de base productiva. En el modelo primero en el cual el hombre suplía sus necesidades de subsistencia con la caza y recolección, sin tecnologías de transporte se hacían imposibles las grandes concentraciones de personas. Sin embargo, con la llamada revolución agrícola, las necesidades de subsistencia pasaron a suplirse con la producción agrícola de alimentos, permitiendo a su vez la conformación de las primeras comunidades una vez que la condición de nómadas no era ya necesaria para la supervivencia de los hombres.

Hasta el establecimiento de las primeras civilizaciones y ciudades pasaran milenios, resultando posible cuando el desarrollo de las técnicas agrícolas, la producción e intercambio de excedentes y la especialización productiva, permitieron liberar a parte de las personas de las actividades productivas, en ese momento histórico el crecimiento de la población se desconecta de la capacidad productiva del entorno cercano, se desarrollan las actividades manufacturadas por las personas liberadas del proceso productivo, se intensifican las relaciones comerciales entre las

comunidades, y consecuentemente se produce la consolidación las primeras ciudades.

2.2. Ciudad tradicional

Las ciudades tradicionales o preindustriales, presentaban un sistema de base orgánica, con la capacidad productiva limitada por el flujo de energía solar disponible, se utilizaban los recursos de la biosfera empleando el trabajo humano para elaborar los productos que deberían suplir las necesidades de las personas, de modo tal que se hacía necesario adecuar el ritmo de la producción a la recuperación de la matriz natural. Se buscaba necesariamente el cierre de los ciclos de los materiales para garantizar la disponibilidad de los recursos necesarios para el mantenimiento y supervivencia de la sociedad. No obstante, a pesar de las limitaciones productivas impuestas por la capacidad de la biosfera, las sociedades establecidas en las ciudades seguían experimentando crecimiento poblacional lo que llevo a la búsqueda de medios técnicos para proveer los recursos necesarios para suplir las necesidades del creciente número de habitantes de las ciudades.



Fig.2.1. Plano de Barcelona. 1849.

Fuente: Manuel Saurí y Josep Matas. *Guía General de Barcelona*

2.3. Ciudad industrial

El acceso a los combustibles fósiles y los avances tecnológicos que siguieron a la invención de la máquina a vapor, permitieron aumentar la capacidad productiva a niveles incomparables a los anteriormente posibles, transformando definitivamente los sistemas productivos y económicos de la sociedad.

“El desequilibrio entre el volumen de población y la capacidad productiva pre-industrial provoca grandes problemas de escasez y subidas de precios en los productos básicos, fenómeno claramente descrito por Adam Smith....La revolución industrial es la respuesta de la tecnología a las nuevas necesidades de producción y uso de los recursos naturales.”



*Figs.2.2. Etapas de la urbanización. 4ª etapa de la urbanización. Fuente: timerime.com
“Líneas del tiempo”*

Las ciudades industriales de finales del siglo XVIII y principio de del siglo XIX ya no presentaban restricciones para la aportación de los recursos necesarios, permitiendo el establecimiento de un nuevo modelo social, basado en el incremento continuado de la producción que, a su vez, alimenta el ideal de progreso y crecimiento de las sociedades modernas occidentales.

Del modelo productivo industrial, consumidor del combustible fósil y excretor de inmensas cantidades de residuos, emergen ininidad de problemas ambientales además de los problemas de saturación, insalubridad y segregación social de las ciudades.

En diversas ciudades, la burguesía dominante en el momento, intentando solucionar principalmente los problemas de insalubridad, descubre la necesidad de

introducir reformas urbanas, para principalmente dotar las ciudades de infraestructuras y saneamiento a fin de lograr la llamada “higienización” de las ciudades.

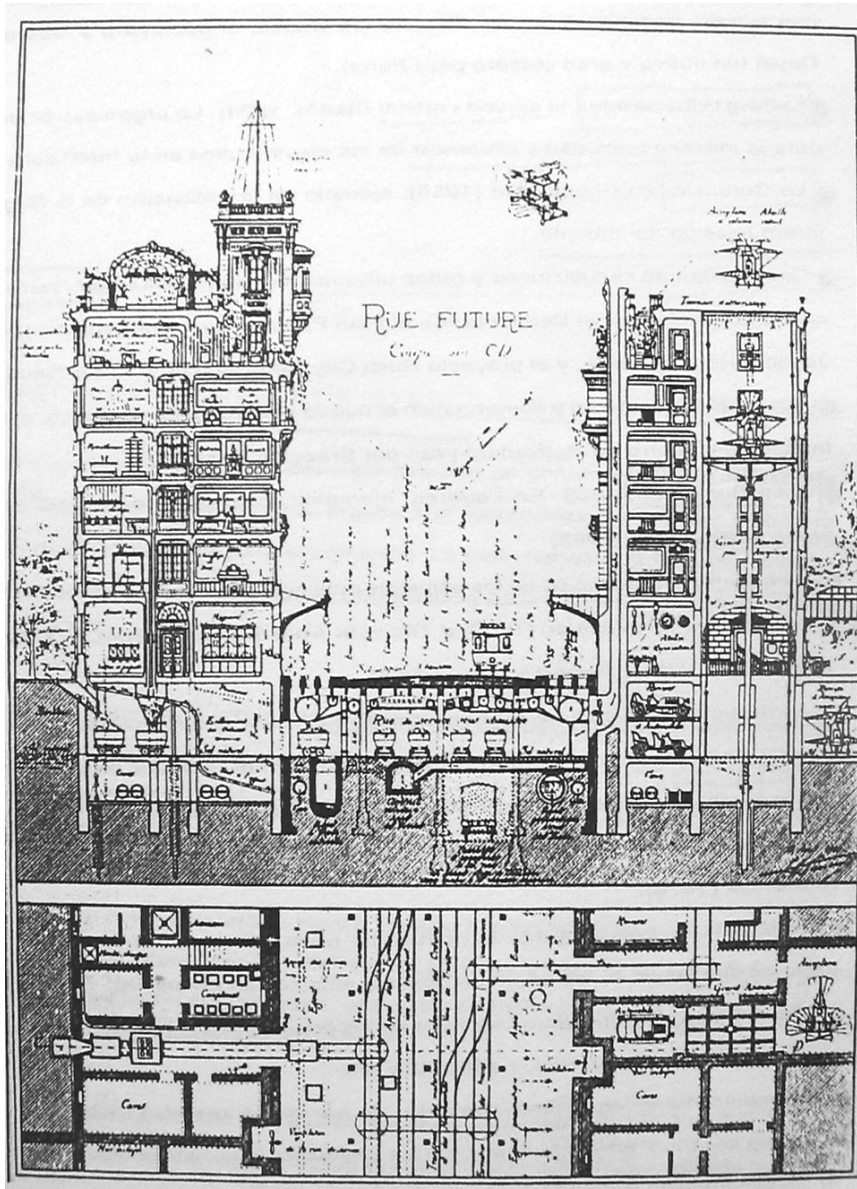


Fig.2.3. Sección vial propuesta por Eugène Henard en 1910

2.4. El urbanismo moderno

A pesar de la gran concentración de personas en las ciudades industriales, hasta principios del siglo XX las ciudades se circunscribían dentro de sus límites administrativos, la organización interna era prioritaria y la comunicación entre núcleos urbanos se establecía fundamentalmente por medio del ferrocarril. No obstante, con la acumulación de capital en las ciudades y las oportunidades de empleo, se iniciarán en muchos países procesos de migración masiva de personas del campo a la ciudad, en busca de mejores condiciones de vida, incrementando todavía más la demanda de viviendas y espacio para la ubicación de la creciente población.

El proceso de expansión de las ciudades hacia la periferia y formación de las metrópolis se hace posible esencialmente por el desarrollo de nuevas tecnologías que permitieron el alargamiento de las líneas de transporte, y posteriormente, con la incorporación del coche como medio de transporte masivo accesible a gran parte de la población urbana.

Además de estos factores eminentemente tecnológicos, la influencia de los conceptos de la Ciudad Jardín y los principios del Urbanismo Moderno desarrollados en la Carta de Atenas, formulados por urbanistas y técnicos para resolver los problemas de las ciudades industriales, son determinantes para el desarrollo de un nuevo modelo de urbanismo, implementado en muchas ciudades.

2.5. Urbanización funcionalista y de baja densidad

El modelo propuesto por los urbanistas modernos pretende entre otras cosas estructurar el territorio según usos y funciones, a partir de las redes de movilidad que a su vez acaban por determinar y marcar el ritmo de crecimiento y extensión urbana.



Fig.2.4. Ciudad Universitaria de Caracas. Arqº. Carlos Raúl Villanueva

La zonificación pasó a ser utilizada como forma de ordenar físicamente la ciudad, segregando, dispersando y también seleccionando las actividades urbanas. Los Ángeles y Nueva York fueron las primeras ciudades que efectivamente implementaron las estrategias de planificación funcionalista y de baja densidad, pero en seguida también las ciudades europeas y más tarde e incluso actualmente las ciudades latinoamericanas. En menos de medio siglo, muchas ciudades han duplicado o incluso triplicado la ocupación de suelo urbano respecto a su historia anterior.

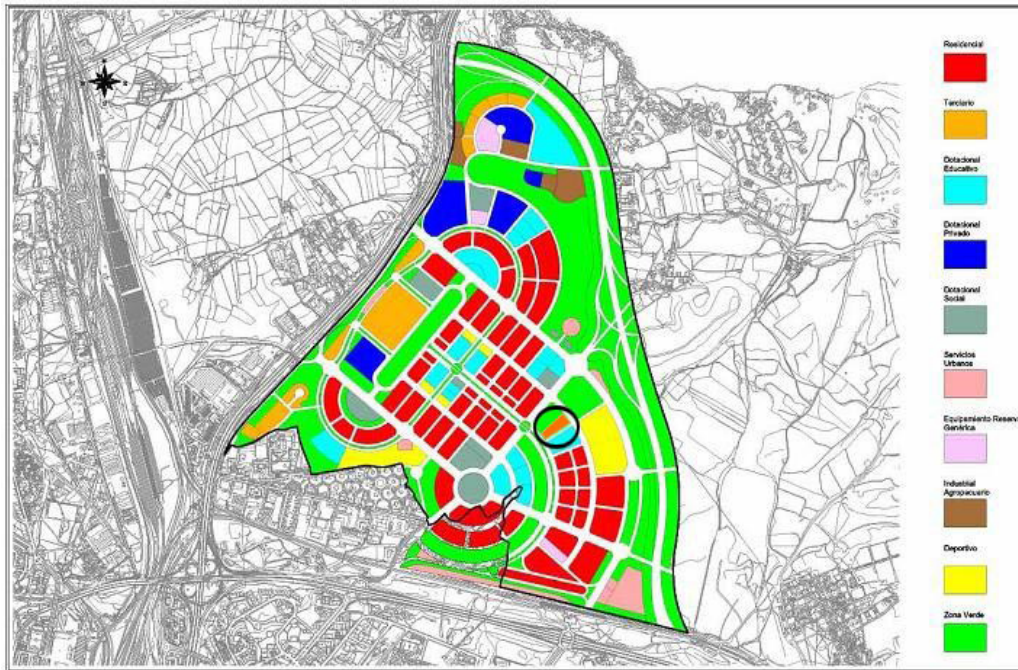


Fig. 2.5. Zonificación PAU II-4 Sanchinarro. Madrid

Para ejemplificar la magnitud del expansionismo que alcanzaron las ciudades durante la segunda mitad del siglo pasado, derivado del modelo funcionalista de ocupación del territorio sumado a los intereses especulativos de la economía de mercado, en la Provincia de Barcelona se consumió más suelo para urbanización en el último cuarto del siglo pasado que en toda su historia, con un ritmo medio de 3 ha/día entre los años de 1972 a 1992.

A pesar de haber sido implementado por medio de políticas y planeamiento urbano, el modelo de urbanización funcionalista y prioritariamente de baja densidad en algunas ciudades americanas, en muchos otros lugares ha sido resultado de actividades de auto organización que respondían a iniciativas individuales y obedecían a necesidades o intereses particulares, sin ningún vínculo con la dinámica social, agravando todavía más los problemas emergentes del proceso de urbanización.

Los espacios naturales predominantes anteriormente, se convierten en muchas localidades en islas en medio a las tramas urbanas, infraestructuras y edificaciones. El paisaje pasó a ser caracterizado por la repetición y acumulación de múltiples urbanizaciones, cadenas de rotondas, grandes superficies comerciales, parques temáticos, salas multicines, etc., que independientemente de las características del lugar podían repetirse en cualquier territorio. La forma urbana deja de representar el contenido cultural o simbólico de la colectividad que habita y que supuestamente debería sentirse identificada y reconocida en él.

Rueda define que la urbanización difusa de baja densidad extensivamente desarrollada en las últimas décadas del siglo XX y actualmente en algunos países

latinoamericanos, se sostiene en base a un creciente coste de recursos y tiempo de desplazamientos. La ciudad monofuncional se vacía de contenido, se convierte en asentamiento humano una vez que las calidades y características intrínsecas de la ciudad no son verificadas en los entornos urbanizados, el espacio público pierde toda relevancia.



Fig. 2.6. Vista aérea infraestructuras Parque logístico industrial de Tordesillas

2.6. Signos de la insostenibilidad

Las ciudades, por sus características intrínsecas, son sistemas insostenibles, dependientes del entorno físico para mantenerse, sujetas fundamentalmente al acceso a los recursos naturales para satisfacer tanto las necesidades esenciales para la supervivencia de las personas, como para producir las utilidades satisfactorias de las necesidades socioculturales.

A medida que los sistemas urbanos modernos se alejan y destruyen las fuentes de recursos y suministro de los desechos que producen, se intensifican los problemas e impactos. Cuando sumados a los problemas sociales y económicos resultantes del modelo de urbanización difusa, se percibe muy nítidamente la crisis y la insostenibilidad del modelo urbano dominante.

La dificultad de acceso o agotamiento de los recursos básicos, la pérdida de biodiversidad, la contaminación ambiental, la aceleración del cambio climático, la segregación y exclusión social, la pobreza, entre otros, son algunos de los problemas e impactos que se viven en las ciudades actuales, llegando a alcanzar diversos ámbitos del sistema urbano, el funcional, el ambiental, el social e incluso el económico.

2.6.1. Impactos funcionales

En el modelo urbano difuso y de baja densidad se evidencian una condición y funcionalidad urbana parcial, que cubre apenas los requerimientos funcionales de los intereses individuales, provocando además la eterna obsolescencia de los servicios e infraestructuras, la dependencia y el uso masivo de los sistemas de locomoción, la saturación frecuente de la red y la consecuente congestión y pérdida de tiempo. Sumado a todo eso, usualmente, para resolver estos problemas se invierte en el incremento y ampliación de las redes de infraestructura, lo que implica mas consumo de suelo y recursos para luego estar saturados nuevamente.

2.6.2. Impactos ambientales

Se podrían listar centenares de impactos ocasionados por el modelo de urbanización, entre ellos principalmente se identifican: la extensiva ocupación de suelo y la consecuente pérdida del potencial productivo, la fragmentación e insularización del espacio natural por las redes de movilidad, con la consecuente pérdida de la biodiversidad; el aumento de la polución atmosférica por el incremento de la movilidad de las personas; el aumento de la demanda energética y de agua potable debido a la tipología edificatoria, etc.

2.6.3. Impactos sociales

Se percibe en las ciudades actualmente una nítida fragmentación social del territorio, la formación de guetos que emerge de la libre ocupación del suelo por los intereses especulativos, desconecta el tejido social presente en las ciudades tradicionales, homogeniza el territorio, en tanto que la diversidad sociocultural es prácticamente inexistente. El espacio público deja de existir como espacio comunitario donde el individualismo supera el sentido de comunidad, con eso se reducen drásticamente las posibilidades de encuentro y comunicación entre las personas de diferentes grupos sociales, se limita el sentido de vecindad con la consecuente fractura de la estabilidad social.

2.6.4. Impactos económicos

Existen diversas investigaciones que contrastan los costes económicos de las urbanizaciones de baja densidad con los de las ciudades tradicionales. Indovina (*Francesco Indovina*) identifica que los costes de los servicios e infraestructuras pueden llegar a ser 4 veces superiores. Borba y Mercade concluyen que los costes de mantenimiento pueden llegar a ser 6 veces superior a los costes de mantenimiento de la ciudad tradicional, lo que explica, por ejemplo, el déficit de servicios e instalaciones que presentan algunas urbanizaciones de baja densidad. Terradas apunta que los problemas socioambientales que emergen actualmente en las ciudades y la sociedad son consecuencia de la ausencia de consciencia sistémica de los fenómenos implicados en la esfera urbana y que reconocer y comprender la complejidad del

fenómeno urbano es básico, además concluye que es necesario un urbanismo profundamente renovador que se desarrolle a partir de una nueva cultura urbana.

Girardet sobre el mismo enfoque apunta que en la sociedad actual existe una especie de ceguera productivista impide de reconocer que las actividades urbano-industriales son el origen de la mayoría de los grandes problemas ecológicos que se viven en las ciudades. Verifica que cualquier planeamiento que busca compatibilizar la justicia y la sostenibilidad tendrá que descansar también sobre una nueva cultura que supere la desconexión radical entre la “devoradora fiesta urbana y la crisis socio-ecológica” que vive la sociedad.

Gaja, comenta que estamos en este momento frente a una situación análoga, *“en la que no podemos, o queremos, percibir las abundantes señales que el ecosistema planetario nos manda de, que no puede más, que lo hemos literalmente agotado.”*

Los desafíos que la sociedad debe enfrentar van más allá de reconocer que es necesario medidas para remediar la situación de degradación socio ambiental que se encuentran las ciudades, es necesario reconocer la existencia de límites y que cualquier sistema no puede crecer indefinidamente, reconocer que el *“desarrollismo sin freno, alentado por la conjunción sinérgica de factores económicos, financieros, legislativos, políticos, y urbanísticos”* se acaba.

En el ámbito del urbanismo, además de establecer los límites para la actividad, se hace necesario buscar transformar y aprovechar las enormes extensiones de tejidos urbanos han sido producidos en las últimas décadas, de modo que tornarlas viables, compatibles con los ideales de la sostenibilidad.

2.7. El Urbanismo Ecológico

A medida que los problemas emergen y los impactos del modelo de urbanismo, producción y consumo de las ciudades alcanzan los diversos ámbitos y escalas, se establece poco a poco el consenso de que es necesario reducir los impactos y preservar el medio ambiente para garantizar la supervivencia de la sociedad. En el ámbito del urbanismo específicamente desde el principio del siglo pasado, cuando comenzaran las propuestas y conceptos del urbanismo funcionalista, han existido iniciativas lideradas por expertos en la materia para promover principios y conceptos de un urbanismo mas responsable con el medio ambiente y el entorno social, no obstante, pocas de las propuestas alcanzaran algún éxito.

En las décadas de los 60/70 han sido implementadas, de modo centralizado, muchas nuevas urbanizaciones planeadas a partir de los principios del urbanismo moderno, pero a medida que las comunidades se establecían y se reconocían las debilidades socio ambientales del modelo, surgían movimientos en contra del proceso de urbanización, hasta el punto que comunidades pasaran a manifestarse contra sus propios planeadores, conduciendo a la paralización de obras viales e incluso a la demolición de algunos conjuntos residenciales construidos.

Como consecuencia del descontentamiento de las personas respecto al modelo de urbanización implementado en muchas ciudades americanas y la progresiva concienciación de los problemas ambientales y sociales emergentes al modelo, han surgido algunos movimientos que de algún modo buscaban promover nuevos conceptos y estrategias para el planeamiento y el urbanismo. Actualmente se identifican muchas iniciativas y acciones para principalmente para reducir los impactos o promover la eficiencia de las actividades, sin embargo, las iniciativas que proponen o buscan efectivamente cambiar o sustituir esos modelos son muy reducidas, prácticamente no alcanzan notoriedad por la sencilla razón de que no son viables económicamente a corto plazo o no responden a los intereses de los grupos dominantes.

2.8. Iniciativas de Urbanismo Ecológico

Actualmente la utilización del término “Urbanismo Ecológico”, con sus variables, se hace cada vez más popular, pero en muchos casos las propuestas, así etiquetadas, están vacías de contenido ecológico, y apenas responden superficialmente a las preocupaciones ambientales presentes en la consciencia de las personas o son reconocidas por la sociedad.



Fig. 2.7. Eco village “Coral Reef” Vincent Callebaut

Las propuestas más difundidas y conocidas se desarrollaron en Estados Unidos y proceden fundamentalmente de movimientos y colectivos organizados fuera de la esfera política como respuesta al proceso de urbanización dispersa “*Spro*” experimentado por las principales ciudades a mediados del siglo XX. Entre las

propuestas para el urbanismo se encuentran el *New Urbanism*, el *Smart Grow* y las *Ecovillages* o *Eco-communities*.

2.9. Las certificaciones, antecedentes y modelos

Dado a la extensiva proliferación de los sistemas de certificación en las últimas décadas, en casi todos los sectores de actividades, se hace necesario conocer los antecedentes del fenómeno para finalmente comprender la naturaleza y finalidades de estos.

El intenso proceso de urbanización del territorio experimentado en las últimas décadas ha colaborado en el incremento masivo del consumo de recursos, la creciente pérdida de biodiversidad y la fragmentación de los espacios naturales, con el consecuente deterioro de la calidad de vida tanto del entorno urbano, como del entorno rural próximo.

Las certificaciones son un ejemplo de las iniciativas que pretenden colaborar en el desarrollo de actuaciones en el sector de la construcción y del urbanismo, encaminadas a la consecución de objetivos medioambientales o de sostenibilidad. Pretenden estimular la competitividad “verde” en el mercado y elevar la cantidad de los productos y servicios introduciendo nuevos criterios y valores en las actividades productivas.

Las certificaciones existentes en la actualidad en materia de urbanismo son, en el ámbito internacional:

- BREEAM Communities
- CASBEE for Urban development
- LEED for Neighborhood for Development

En el ámbito nacional, existen guías y manuales diversos, relacionados con el planeamiento urbanístico con criterios de sostenibilidad, editados tanto por la administración central como por diversas autonomías, los más relevantes son:

- SPRILUR (Ihobe, Gobierno Vasco)
- GUÍA DE CERTIFICACIÓN DE URBANISMO ECOLÓGICO (Agencia de ecología urbana de Barcelona y Ministerio de Fomento)

Datos generales certificación LEED



Organizaciones: U.S. Green Building Council (USGBC)
 Congress for the New Urbanism (CNU)
 Natural Resources Defense Council (NRDC)

País: Estados Unidos

Fecha de Creación: 2007- version piloto; 2009: version final

Proyectos certificados: 240 (version piloto)

Sitio web: <http://www.usgbc.org/>



Ilustración 1: Marcas LEED Gold y LEED Silver

Fig. 2.8. LEED for Neighborhood Development

Datos generales certificación BREEAM



Organizaciones: BRE Global Ltd

País: Reino Unido

Fecha de Creación: 2008; version piloto, 2009

Proyectos certificados:

Sitio web: <http://www.breeam.org>

Fig.2.9. BREEAM Communities

Datos generales certificación CASBEE



Organizaciones:	Institute for Building environment and Energy Conservation (IBEC)
País:	Japón
Fecha de Creación:	2007; revision
Proyectos certificados:	
Sitio web:	http://www.ibec.ir.jp/CASBEE

Fig. 2.10. CASBEE for Urban Development

En el *sistema español*, la metodología de certificación se basa en un sistema de evaluación a partir de 74 indicadores, de los cuales 30 corresponden a la evaluación de las características del emplazamiento o condiciones preexistentes en el contexto de la urbanización, y los 44 restantes, pertenecen a la evaluación de la propia propuesta de ordenación (Guía metodológica para los sistemas de auditoría, certificación o acreditación de la calidad y sostenibilidad en el medio urbano (Ministerio de Fomento, 2012).

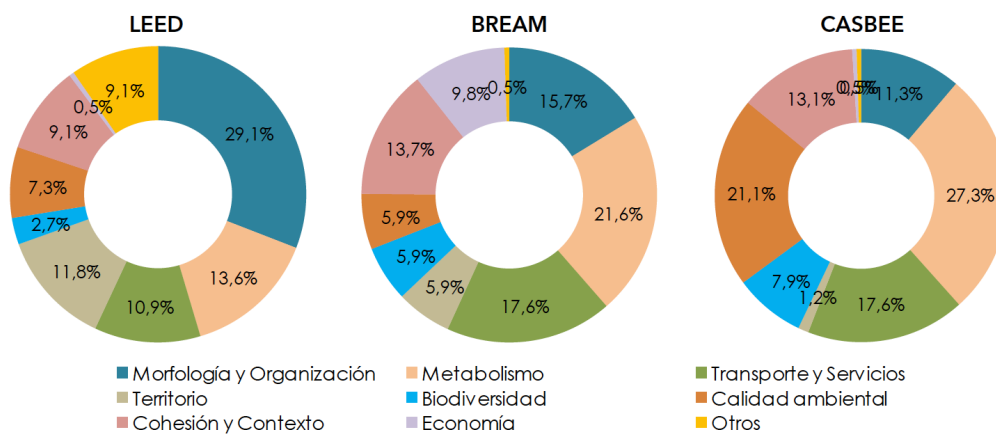


Fig. 2.11. Perfil de las certificaciones según temas

La certificación es el proceso mediante el cual un tercero da garantía escrita que un producto, proceso o servicio es conforme a unos requisitos específicos. En este proceso intervienen tres partes diferenciadas, el organismo normalizador, que elabora las normas técnicas que sirven de base a la certificación, el organismo certificador, entidad independiente que garantiza el cumplimiento de las normas por parte del solicitante de la certificación y el organismo certificado, la entidad objeto de certificación que puede una persona jurídica, un producto o una persona.

Las certificaciones de urbanismo son procedimientos para introducir pautas y criterios de sostenibilidad tanto en los procesos de planeamiento y de proyecto de nuevos barrios como en la rehabilitación de espacios urbanizados o construcciones finalizadas. Estos instrumentos se conciben como una guía metodológica de ayuda a los agentes de la planificación para medir y acreditar la sostenibilidad de sus propuestas de ordenación según unos principios y estándares predefinidos.

Las certificaciones posibilitan el reconocimiento de proyectos urbanos, en relación a los beneficios ambientales, sociales y económicos para la comunidad local y para planificadores, promotores y responsables políticos. Éstas pueden ser de carácter obligatorio o voluntario. La certificación obligatoria surge a través de la legislación, vía ley o reglamento que determina el cumplimiento obligatorio de normas o especificaciones técnicas y establecen la realización de procedimientos de certificación como medio de prueba de dicho cumplimiento. Las certificaciones voluntarias pueden o no tener su origen en un marco normativo. Normalmente las lleva a término una organización independiente que verifica que una empresa, productos o servicios específicos respetan los criterios establecidos en normas o especificaciones técnicas. Se conceden por un plazo determinado.

Las certificaciones de urbanismo a nivel internacional se realizan mediante un panel de evaluación de prerequisites (de obligado cumplimiento) y de indicadores. El método de evaluación verifica la consecución del grado de aproximación a los criterios y parámetros establecidos.

La certificación o acreditación finaliza con la emisión de un certificado y concesión de una etiqueta o sello con validez exclusiva para la etapa urbanística que ha sido evaluada y certificada.

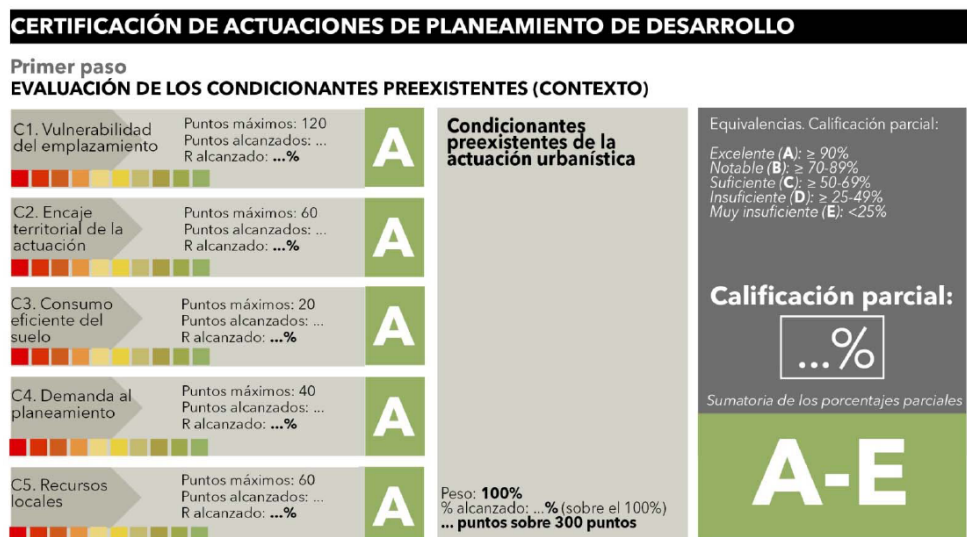


Fig.2.12. Modelo de certificación de actuaciones urbanas. Primer paso: condicionantes preexistentes. Ministerio de Fomento.



Fig.2.13. Evaluación de planeamiento urbano. Segundo paso: ordenación.

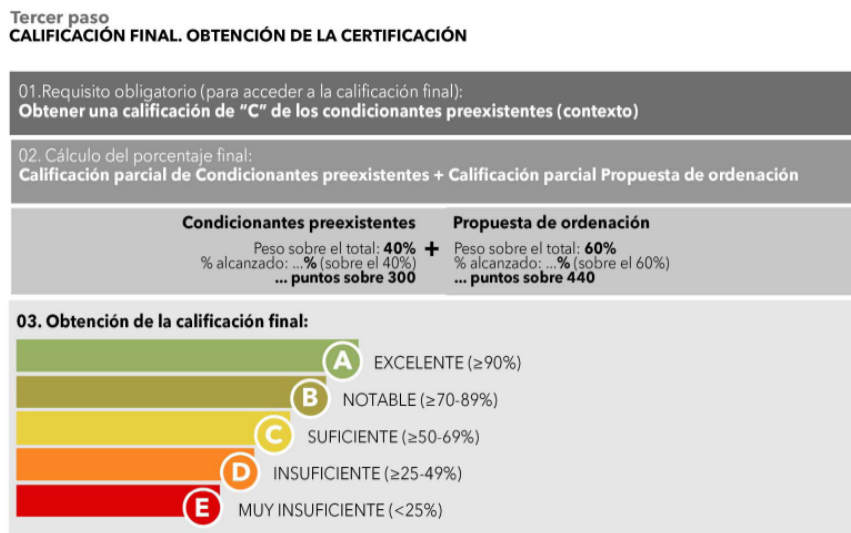


Fig.2.14. Evaluación de actuaciones urbanísticas. Certificación final.

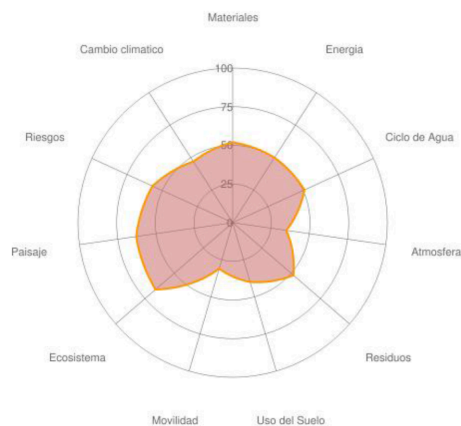


Fig.2.15. Análisis sostenibilidad proyecto de urbanización. Aplicación Gobierno Vasco. Grupo Sprilur.

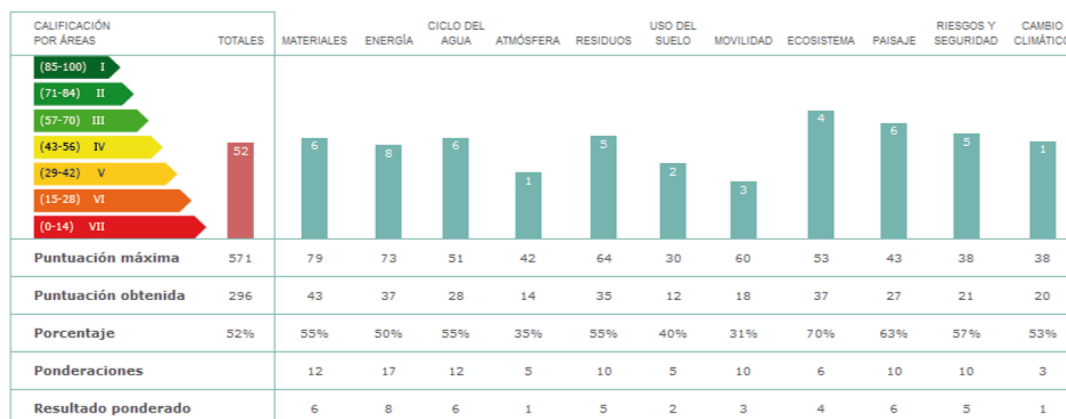


Fig.2.16. Índice de sostenibilidad por puntos evaluación proyecto de urbanización. Grupo Sprilur. IHOBE

2.10. El Urbanismo industrial

Los polígonos industriales son espacios funcionales especializados del territorio donde se concentran un cierto número de empresas y actividades industriales. Esta concentración permite compartir recursos, servicios, evitar los inconvenientes e incompatibilidades derivados de las localizaciones urbanas tradicionales, componer espacios versátiles y autónomos que se adapten con facilidad a los cambios económicos o productivos, y aumentar la competitividad de las empresas. En la actualidad los polígonos industriales suelen incluir, aunque en proporciones variables, actividades logísticas, comerciales y de servicios. Por esta razón se tiende a usar la denominación más gráfica de polígonos de actividad económica. En cualquier caso, se trata de áreas en donde se localizan actividades económicas –en suelo calificado como industrial, terciario o mixto– que comparten una serie de características constitutivas básicas.

Los principales efectos ambientales relacionados con la actividad industrial son: degradación del entorno e impacto paisajístico, pérdida futura de uso del suelo, exposición a productos tóxicos y riesgos derivados de la generación de residuos peligrosos, contaminación de suelo, aire, agua, vertidos de residuos sólidos, emisión de gases de efecto invernadero y de gases que agotan la capa de ozono, vertidos líquidos, ruido, contaminación lumínica y efectos relacionados con el transporte.

Además, hay que tener en cuenta que en los polígonos se concentran industrias y, aunque controlen sus repercusiones ambientales, realizando los tratamientos requeridos para mantenerse dentro de los límites autorizados, las cantidades resultantes de la incidencia global pueden, en ocasiones, desbordar la capacidad de asimilación del entorno receptor. Es un aspecto negativo que se compensa con la

aplicación de medidas que no suelen ser viables si se abordan individualmente en cada una de las empresas.

Los parques ecoindustriales (EIPs) nacieron para responder a estas prioridades urgentes, gracias a su naturaleza innovadora, capaces de combinar objetivos ambientales, como la reducción profunda de emisiones y el consumo de recursos y energía, con objetivos económicos.

Una de las primeras y más famosas definiciones de un parque ecoindustrial fue formulada por Lowe, Moran y Holmes [11] como "una comunidad de empresas manufactureras y de servicios que buscan un mejor desempeño ambiental y económico mediante la colaboración en la gestión de cuestiones y recursos ambientales". , incluida la energía, el agua y los materiales.

Un EIP también busca beneficios para las comunidades vecinas para asegurar que el impacto neto de su desarrollo sea positivo.

En definitiva, los EIP han gozado de amplia atención desde sus primeras teorizaciones, y hoy en día, los planificadores industriales de todo el mundo los observan con gran interés, ya que se consideran una alternativa real a los parques industriales tradicionales en los que vale la pena invertir; De hecho, desde principios de los años noventa, cuando se acuñó el término "parque industrial ecológico" [15], se han llevado a cabo muchos experimentos, primero en los Estados Unidos y Canadá y, posteriormente, en Europa, Asia y el Sur. . África, también, lo que lleva a varias prácticas interesantes [16].

Los parques ecoindustriales se basan en ciencias profundamente vinculadas a la sostenibilidad: la disciplina que principalmente apoyó la implementación del concepto EIP fue la ecología industrial, basada en principios como la eficiencia energética (que debe considerarse como el uso eficiente de los recursos naturales para satisfacer a los humanos necesidades), circuitos cerrados de materiales (en términos de equilibrar entrada y salida minimizando, a través de la reutilización, la cantidad total de material industrial que se deposita o pierde en procesos intermedios) y, sobre todo, la simbiosis industrial (se ven procesos e industrias)) como sistemas que interactúan en lugar de componentes aislados en un sistema de flujos de materiales, energía e información) [17]. Estos enfoques, basados principalmente en intercambios de empresa a empresa, describen solo algunas de las muchas características posibles de un EIP.

Si consideramos, por ejemplo, la China Circular Economy (CE), que se introdujo en 1998 como una nueva estrategia para el desarrollo sostenible, que integra la producción más limpia y la ecología industrial en un sistema más amplio que engloba las empresas industriales, pudieron identificar muchas más estrategias. Implementaciones de EIP, como desarrollo de sitios preservando características naturales locales, contratando empresas comprometidas con la eficiencia de recursos y baja contaminación, logrando apoyar el éxito financiero, ambiental y social de las compañías de EIP y un fuerte vínculo con las comunidades circundantes desarrollo económico, programas sociales y ambientales [18]. En este marco, un tipo de enfoque de planificación ecológica comienza a romperse [19] hacia la planificación de áreas

industriales, que va más allá de la idea tradicional de "acabar con el gasoducto" de control de la contaminación y trata de fomentar el "pensamiento como un ecosistema". [20].

Más recientemente, se ha propuesto un enfoque de planificación ecológica adicional para implementar EIP, integrado principalmente en una dimensión espacial. La nueva perspectiva, que proporciona la ecología del paisaje [21]. Con la introducción de la ecología industrial en 1989 [22], el desarrollo industrial se colocó en una nueva perspectiva. Esta nueva perspectiva establece que los complejos industriales deben diseñarse para parecerse al ecosistema natural lo más cerca posible. El desarrollo industrial debe parecerse al ecosistema natural porque en ese sistema, la energía y los recursos se usan de manera óptima y no hay desechos. En los últimos años, la atención de los proyectos de desarrollo de parques ecoindustriales (EIP) ha crecido enormemente entre los gobiernos y las industrias nacionales y regionales en muchos países. Se cree que una EIP bien planificada y en funcionamiento tiene el potencial de beneficiar a la economía y aliviar sustancialmente la presión ambiental en y cerca de la ubicación de su desarrollo [23].

Este beneficio mutuo para la economía y el medioambiente mencionado anteriormente, está claramente establecido en la definición de EIP utilizada por la EPA de EE. UU. [24]: "EIP es una comunidad de empresas manufactureras y de servicios que buscan un mejor desempeño ambiental y económico colaborando en la gestión y reutilización ambiental cuestiones".

El desarrollo de EIP se basa principalmente en el concepto de ecología industrial. Frosch y Gallopoulos discutieron el concepto de ecología industrial por primera vez. En su artículo " Estrategias para la fabricación " [25], definieron un ecosistema industrial como un sistema en el que: " se optimiza el consumo de energía y materiales, se minimiza la generación de desechos y los efluentes de un proceso.

Si en la fase de diseño se tienen en cuenta estas circunstancias se pueden evitar algunos problemas y facilitar acciones que permitan solucionarlos o, al menos, reducirlos.

Entre otros, el diseño atendería criterios que permitan:

- La conservación de las principales funciones ecológicas del entorno y del paisaje.
- Aprovechar las condiciones ambientales favorables y controlar las desfavorables.
- Favorecer la cooperación y el intercambio entre las distintas empresas instaladas.
- Prever la oferta de servicios ambientales comunes.
- Racionalizar el consumo de recursos naturales y prevención de la contaminación.
- Avanzar en la eficiencia y ahorro energético.
- Propiciar la separación en origen de los residuos.

- Reducir el uso de materiales tóxicos y peligrosos sustituyéndolos, en su caso, por otros alternativos.
- Facilitar una movilidad sostenible.
- Emplear tecnologías y desarrollar transformaciones menos negativas para el medio ambiente.



Fig.2.17. Polígono Industrial de Landaben. Pamplona.

2.11. La implantación de espacios urbanos

En esta fase se deben desarrollar ciertas actividades que pueden conllevar algunas afecciones ambientales como son:

- destrucción de hábitats,
- eliminación de vegetación,
- compactación y pérdida de suelo,
- desorganización del sistema hídrico,
- modificación del paisaje,
- alteración de yacimientos arqueológicos,
- interrupción de vías pecuarias y caminos rurales,
- generación de residuos,
- contaminación del aire por emisiones de gases, humos y polvo,
- contaminación del suelo por derrames de hidrocarburos, aceites, grasas y disolventes, contaminación del agua por vertidos,
- cambios microclimáticos,
- creación de barreras para la fauna y la ganadería,
- consumo de recursos,
- introducción de especies alóctonas,
- disminución de calidad de vida por aumento de ruidos y tráfico...



Fig. 2.18. Parque industrial en Benacazón (Sevilla). Buró4 Arquitectos

Durante la etapa de urbanización y construcción de infraestructuras la aplicación de medidas correctoras posibilitará la reducción de estos efectos negativos al igual que la adopción de buenas prácticas ambientales orientadas al ahorro y al aprovechamiento de los recursos y a la gestión ambientalmente correcta de los residuos.

En líneas generales, la ejecución correcta de las obras, según criterios técnicos y ambientales, hace necesario contar con:

- Proyecto de urbanización, proyectos de obras y, en su caso, proyecto de demolición.
- Estudio de seguridad y salud.
- Planificación.
- Adopción de las medidas protectoras y correctoras requeridas para la protección del medio ambiente.
- Priorización de empresas constructoras que tengan implantado un Sistema de Gestión Medioambiental.

2.11.1. Diseño

Más que en el propio trazado o en el perfil longitudinal, a menudo fuertemente condicionados por las reservas de suelo de la planificación urbanística, es en la definición de la *sección transversal* donde se precisan las funciones que cumple cada vía y su nivel de articulación con el entorno, además de su capacidad. De ahí que, **la elección de la sección transversal constituya la principal decisión en el proceso de proyecto de vías en áreas urbanizadas.**

La sección transversal de una vía en un determinado punto debe responder, simultáneamente, a dos tipos de solicitudes. Por una parte, a las que derivan del entorno concreto en que se ubica, por otra, a las que provienen de su pertenencia a un determinado itinerario. Las últimas parecen animar al mantenimiento de una sección homogénea a lo largo de todo el desarrollo longitudinal de una vía, mientras las primeras parecen reclamar una sección variable en función del entorno concreto atravesado.

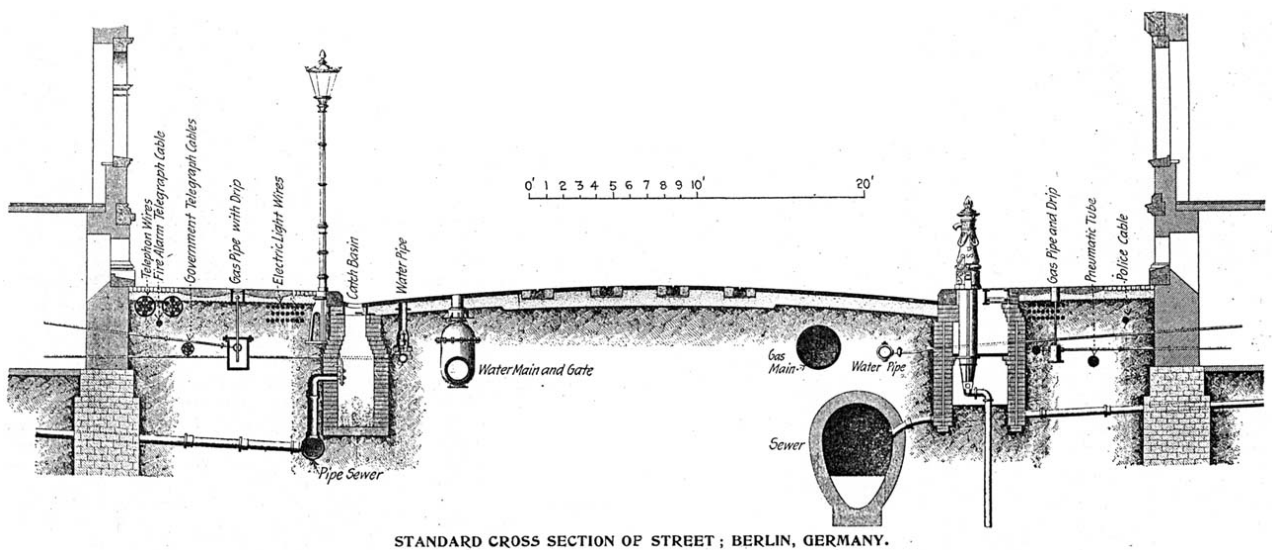


Fig. 2.19. *Engineering News and American Railway Journal*, Volume XXXVI, No. 9 (27 Aug. 1896), p. 140.

Una de las tareas principales del proyectista es tratar de conjugar, mediante la adecuada elección de la sección transversal de cada tramo, la necesaria continuidad de los itinerarios, funcionales y formales, con su ineludible adaptación al entorno concreto.

Como factores a tener en cuenta en la elección de la sección transversal deberán considerarse, al menos:

- La clase de vía, el itinerario al que pertenece y su velocidad de referencia.
- La intensidad de tráfico rodado y peatonal previstas.
- La configuración física, los usos del suelo y la edificación en su entorno.
- El trazado de los servicios infraestructurales a disponer.
- La posible necesidad de ampliación o modificación en el futuro.

Asimismo, y aunque ello sea algo muy habitual, la sección de una vía urbana no tiene por qué ser simétrica. No sólo las solicitaciones a cada lado pueden ser diferentes (presencia de edificación sólo en una, por ejemplo), sino que, cuestiones de orientación y soleamiento pueden hacer más confortable un lado u otro para algunos usuarios o resultar más adecuados para distintos acondicionamientos. La no simetría en la sección de las calles también es una medida recomendable en ocasiones para mejorar los niveles sonoros ambientales, al favorecer la reducción del efecto cañón.

Finalmente, debe observarse que, en muchas ocasiones, la señalización no es garantía suficiente de que la división de la sección en diversos elementos con funciones precisas sea respetada por los usuarios. Por ello, puede ser conveniente que la separación entre los referidos elementos adquiera la suficiente consistencia material para evitar físicamente el acceso de los usuarios indeseables en cada elemento (travesías de calzada por peatones, invasión de aceras o calzadas especiales por vehículos, estacionamientos en calzada, etc).

2.12. Elementos de la sección transversal

En la actualidad, son elementos habituales de la sección transversal de las vías en áreas urbanizadas:

- Los carriles de circulación rodada
- Las aceras
- Las medianas
- Los arcenes
- Las bandas de estacionamiento adosadas a la calzada
- Los carriles o calzadas especiales
- Las instalaciones longitudinales de cada una de las infraestructuras de servicios que discurren normalmente por el subsuelo y que se representan como los llamados prismas o bulbos de instalaciones y alternativamente por galerías de servicio.

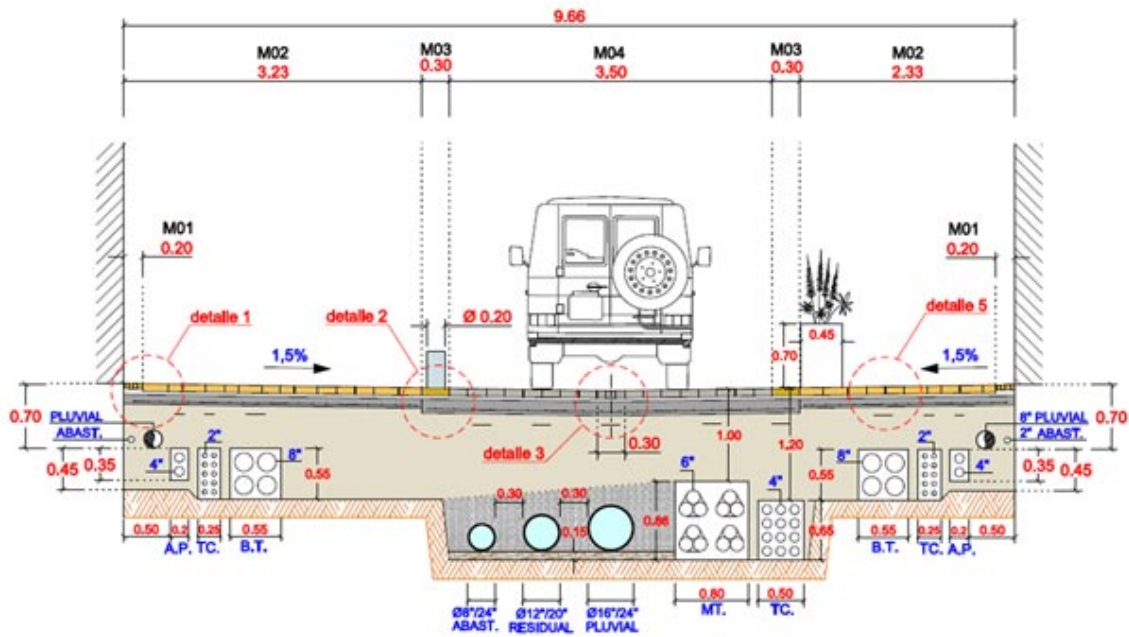


Fig. 2.20. Sección viaria.



Fig. 2.21. Sección viaria.

2.12.1. Carriles de circulación rodada

Definición y tipos

Los carriles de circulación rodada son bandas longitudinales previstas para la circulación de una fila de vehículos. Pueden ser de uso general o reservarse para la el movimiento exclusivo de cierto tipo de vehículos (autobuses, bicicletas, vehículos de alta ocupación), lo que los convierte en calzadas o plataformas reservadas.

Los parámetros de número y anchura constituyen los determinantes claves de la capacidad de la vía para la circulación rodada.

Anchura de carril

La anchura de los carriles influye en su capacidad para la circulación rodada y en la velocidad de los vehículos, por lo que ésta deberá ajustarse a los objetivos de la vía.

Con objeto de dotar de homogeneidad a la red viaria madrileña, se establecen las siguientes anchuras de carril, medidas entre ejes de marcas viales o entre éstas y el bordillo:

Anchuras de carril		
Tipo de vía	Recomendada (m)	Mínima (m)
Metropolitana, A-100	3,75	3,50
Metropolitana, A-80	3,50	3,50
Urbana, 80	3,50	3,25
Urbana, 60	3,50	3,00
Colectora	Residencial: 3,50 Industrial: 3,75	3,00 3,25
Local acceso	Residencial: 3,00 Industrial: 3,75	2,75 3,25

Fig.2.22. Anchuras recomendadas de carriles de circulación

Número de carriles

El número de carriles en una vía es función básicamente de la capacidad con que se quiere dotar a la misma. En áreas urbanizadas, con intersecciones a nivel, la capacidad de una vía viene determinada fundamentalmente por la capacidad de dichas intersecciones, por lo que el número de carriles no basta para el cálculo de su capacidad.

En áreas urbanas con intersecciones nivel, estimar la capacidad de las intersecciones principales y, a partir de ella, decidir el número y anchura de los carriles necesarios.

Capacidad en V/h de vías urbanas de doble sentido de circulación											
Anchura (m)	6	7	7.5	9	10	12	13.5	15	18	20	22
Autovía								3000		4500	
Red secundaria	1200	1350	1500	2000	2200	2000	2200	2400	3000	3300	3600
Colectora, distribuidora local y calles céntricas	500 a 800	600 a 1000	750 a 1200	900 a 1600	1100 a 1800	800 a 1200	900 a 1350	1000 a 1500	1300 a 2100	1500 a 2300	1600 a 2600

Fig.2.23. Capacidad portante en vías urbanas. Manchón. F, Santamera, J. 1995

Capacidad en V/h de vías urbanas de un sentido de circulación										
Anchura (m)	6	7	7.5	9	10	11	12	13.5	15	
Autovía			3000			4500			6000	
Red secundaria	2200	2200	2400	3000	3300	3600	4000	4400	4800	
Colectora, distribuidora local y calles céntricas	800 a 1300	950 a 1450	1100 a 1600	1650 a 2150	1900 a 2400	2150 a 2650	2500 a 3000	2800 a 3350	3200 a 3700	

Fig.2.24. Capacidad de vías urbanas de sentido único. Manchón. F, Santamera, J. 1995

Aunque, normalmente, el número de carriles de una calzada de circulación es par, con idéntico número de carriles en un sentido y otro de circulación, en áreas urbanas o suburbanas, puede haber dos excepciones a esta práctica que deben considerarse en todo proyecto.

Pendiente transversal

La calzada se dispondrá con una inclinación transversal mínima del 2% hacia cada lado a partir del eje de la calzada.

2.12.2. Aceras

Definición y tipos

Las aceras son bandas longitudinales laterales elevadas respecto a la calzada y reservadas para el tránsito de peatones. Constituyen el elemento mayoritario de las redes e itinerarios peatonales urbanos.

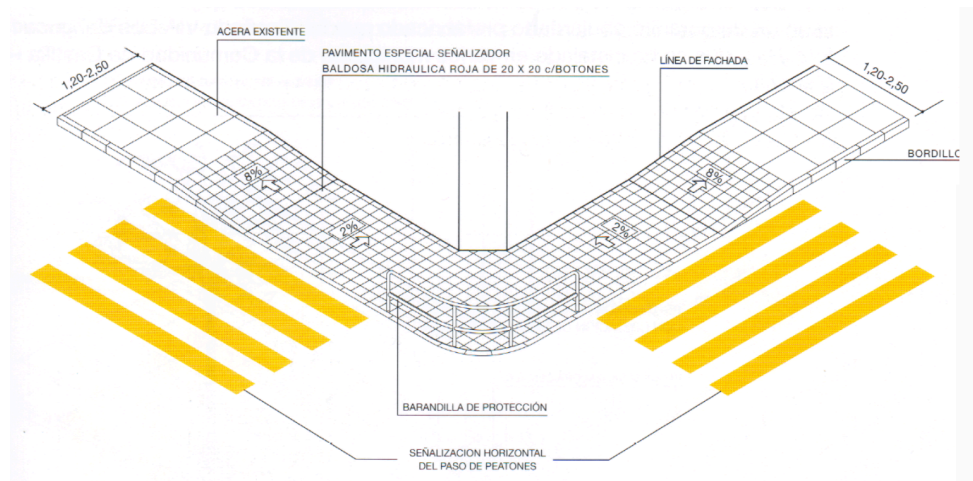


Fig.2.25. Acera peatonal con rebaje. Manual Fundación ONCE

Su anchura, altura de bordillo y acondicionamiento determinan su capacidad y grado de adecuación a las necesidades del tránsito, estancia y relación social de los peatones.

Las aceras deben diseñarse para cumplir algunas de las siguientes funciones:

- Encauzar el movimiento y estancia de los peatones.
- Servir de punto de acceso de los peatones a los diversos medios de transporte (vehículos, taxis, autobuses, metro, estacionamientos subterráneos, etc).
- Servir de soporte al alumbrado, la señalización y otros servicios públicos (correos, teléfonos).
- Albergar actividades comerciales, como quioscos (prensa, lotería, etc), terrazas de cafés, etc.
- Alojar la vegetación urbana, árboles y arbustos, que humanizan y cualifican la ciudad.
- Acoger manifestaciones colectivas (exposiciones, concursos, ventas especiales, ferias, etc).
- Servir de cobertura a diversas infraestructuras urbanas.

En el diseño de las aceras, deberá por tanto atenderse:

- Al conjunto de exigencias que derivan de las funciones concretas que cumple cada tramo.
- A la continuidad de los itinerarios peatonales, en especial, a los Itinerarios peatonales principales.
- A la variedad de sus usuarios y a sus capacidades y necesidades respectivas: niños, adultos, ancianos, personas con discapacidades motoras, personas con coches de niño, bultos o maletas, etc.
- A la configuración y pavimentación propia de cada grupo de usuarios.

Anchura

Para el cálculo de la anchura de las aceras deberá considerarse:

- La clase de vía, la velocidad de circulación rodada y el tránsito peatonal previsible.
- La pertenencia de la acera a un Itinerario Peditivo Principal.
- Las exigencias suplementarias que suponen los usos del suelo y la edificación previstos en sus bordes y su intensidad (edificabilidad, densidad, etc.).
- Los requerimientos de los servicios infraestructurales que deban alojarse en ella conforme a las especificaciones de la reglamentación y normativa de aplicación.
- Aspectos paisajísticos y de diseño urbano.

En calles comerciales o con fuerte densidad edificatoria y mezcla de usos o en aquellas a las que den frente instalaciones comunitarias con importante generación de movimientos peatonales (escuelas, espectáculos, centros culturales, hospitales, museos, etc) o en los tramos de calle inmediatos a estaciones de ferrocarril, bocas de metro, etc, el proyectista deberá calcular la anchura necesaria para que el tránsito peatonal previsto pueda circular con comodidad. Para ello se realizará el oportuno estudio, que podrá basarse en cualquier texto técnico sancionado por la práctica, como el Manual de Capacidad en Carreteras, de la Asociación Técnica de Carreteras, tomando como nivel de servicio el "C", como mínimo para la intensidad media, y el "D" para la intensidad en hora punta. En los casos en que la estimación del tránsito previsible resulte claramente incierta, en estos tramos de calle, se utilizarán como mínimas las anchuras de acera recomendadas en la presente instrucción.

En vías de carácter residencial y, en general, en las vías locales, se cumplirán los mínimos establecidos en la presente Instrucción. En cualquier caso, la capacidad de una acera debe calcularse para su sección útil, es decir, una vez deducidas de su anchura total la de los obstáculos existentes (buzones, báculos, kioscos, etc), así como las bandas de afección de sus extremos, debidos a la proximidad a la calzada o a la de barreras físicas de edificación o vallado. La anchura mínima de la sección útil será de 1.5 m. En caso de indeterminación de los obstáculos, se tomarán como anchura de estas bandas:

La anchura de acera necesaria para el tránsito peatonal, deberá corregirse al alza en función de otras actividades peatonales que puedan desarrollarse sobre ella, tales como detención frente a escaparates, colas a la entrada de establecimientos comerciales o comunitarios, relación social en puntos singulares, salidas de salas de locales de espectáculos y asimilados, espera frente a pasos de peatones, etc.

Finalmente, en tramos que pertenezcan a calles con una sección unitaria a lo largo de todo su desarrollo, constituyan unidades formales o de perspectiva, o cuenten con un acondicionamiento homogéneo (hileras de arbolado, franjas verdes de

separación de la calzada, etc), el proyectista tratará de mantener la continuidad de dichas características.

Se establece como anchura de acera en los nuevos tramos viarios del suelo urbanizable o en los planeamientos de desarrollo, en suelo urbano, medida perpendicularmente desde el bordillo exterior en cualquier punto, la siguiente:

En suelo urbano, cuando se trate de planes o proyectos de remodelación o adaptación del viario existente, la anchura mínima de una de las aceras podrá reducirse a 2 m, manteniéndose la otra en un mínimo de 2,50. En aceras que pertenezcan a la red de Itinerarios Peatonales Principales, la anchura mínima será de 6 m.

Pendiente longitudinal

Se recomienda evitar pendientes superiores al 5%, siendo obligatoria la construcción de sendas especiales para peatones, con pendientes inferiores al 8%, cuando la pendiente de la calzada supere el 8%. Cuando, excepcionalmente, en las aceras, sea necesario disponer escalones, no se permitirán los constituidos por un único peldaño y, en cualquier caso, contarán con rampa alternativa que cumpla la pendiente mínima establecida y los requisitos de accesibilidad.

Altura de aceras

Las aceras deberán ir siempre delimitadas con bordillos.

Como norma general, los bordillos tendrán la altura necesaria para no ser montables por los vehículos ligeros. Para ello se establece una altura mínima de 14 cm, no recomendándose alturas superiores a los 16 cm. Se recomienda una altura de 14 cm, con un mínimo absoluto de 10 cm. Se utilizarán bordillos montables, reduciéndose su altura por debajo del mínimo establecido, hasta enrasarlos con la calzada, en los pasos de peatones.

Podrán utilizarse, también, bordillos montables en las entradas a garajes, en las que podrán llegar a enrasarse con la calzada. Intersecciones y curvas de calles locales de acceso, donde la reducción del radio de giro para reducir la velocidad de circulación impida el giro de los vehículos pesados (basuras, bomberos, mudanzas, etc). Estas aceras montables se acompañarán de señalización especial: línea amarilla continua que delimite la banda de circulación autorizada para vehículos convencionales. También en recintos de templado de tráfico, cuando el enrasamiento de calzadas y aceras forme parte de un proyecto global de urbanización, que garantice la protección del espacio peatonal con respecto a la circulación rodada.

2.12.3. Medianas

Definición y tipos

Las medianas son bandas longitudinales de la calzada, cerradas a la circulación rodada, que separan distintas corrientes de tráfico. La anchura, localización y configuración (elevada, a nivel, deprimida) de las medianas son los principales condicionantes de su funcionalidad.

Las medianas pueden cumplir diversos objetivos. Entre ellos:

- Separar circulaciones, mejorando con ello la seguridad del tráfico automóvil.
- Evitar el deslumbramiento nocturno.
- Proteger los giros a la izquierda.
- Servir de refugio a los peatones en el cruce de calzadas.
- Contribuir a la mejora paisajística de las vías mediante su acondicionamiento.
- Servir al tránsito y la estancia peatonal, cuando actúan como bulevares.
- Servir de cobertura a infraestructuras urbanas.

Desde el punto de vista de su situación en la sección existen dos tipos básicos de medianas:

- *Centrales*, que separan sentidos opuestos de circulación.
- *Laterales*, que separan circulaciones del mismo sentido, resolviendo los conflictos entre el tráfico de paso y el local, que circula por las vías de servicio por ellas configuradas.

Por su configuración, pueden clasificarse en:

- *Elevadas*, el tipo más frecuente en vías urbanas, que constituyen plataformas situadas por encima de la rasante de la calzada, acondicionadas y normalmente equipadas con bordillos.
- *A nivel*, habitual en autovías y autopistas, constituidas, bien por terreno natural con plantaciones, bien por una franja de calzada con señalización específica.
- *Barreras*, el tipo más frecuente en autovías y autopistas urbanas con fuertes condicionantes de suelo, constituidas por un elemento vertical, de diversos materiales, cuyo objetivo es separar circulaciones.

Criterios de implantación

Todas las vías metropolitanas y las urbanas con velocidad de referencia de 80 km/h irán provistas de medianas para la separación de circulaciones. En las vías urbanas con velocidad de diseño de 80 km/h, que cuenten con accesos directos, las medianas serán laterales y definirán vías de servicio.

Se recomienda la utilización de medianas laterales en todas las vías urbanas y distritales, con alta intensidad de tráfico e importante proporción de tráfico de paso, cuando atraviesen áreas de alta densidad edificatoria (frentes de fachada de varias

plantas) o áreas de alta generación de viajes (áreas comerciales, centros terciarios, etc)

Con generalidad, se recomienda la utilización de medianas centrales en vías urbanas y distritales, con tres o más carriles por sentido, que no presenten tráficos desequilibrados en los períodos punta, que haga recomendables sistemas de gestión reversible de los carriles centrales.

En vías colectoras locales y distritales de dos carriles por sentido se recomiendan medianas que permitan el tránsito peatonal y su acondicionamiento como bulevares. Para que los bulevares sean fácilmente accesibles a los peatones se recomienda que la anchura de las calzadas laterales no supere los 7 metros.

En vías urbanas, distritales, locales colectoras y locales de acceso, se utilizará el tipo de mediana elevada. Será obligatoria la construcción de una mediana capaz de ofrecer refugio al cruce de peatones en todas las nuevas vías no metropolitanas con anchuras de calzadas superiores a 14 metros, considerándose recomendable a partir de los 12.

2.12.4. Arcenes

Definición y tipos

Los arcenes son bandas longitudinales comprendidas entre el borde de la calzada y la acera, la mediana o la arista de la plataforma. Aunque característicos de las carreteras en medio rural, los arcenes mejoran la seguridad en las vías rápidas urbanas, separando la calzada de circulación rodada de las aceras, las medianas o de las vallas de cierre de la vía, y permiten la detención de vehículos averiados, la circulación de los de emergencia y, en ocasiones especiales, aumentos de capacidad de la vía utilizándolos como carril adicional.

Se distinguen dos tipos de arcenes, los exteriores, situados entre la calzada y la acera o la arista de la plataforma y los interiores, situados entre cada calzada y la mediana, en vías con sentidos de circulación separados. El parámetro fundamental de definición de los arcenes es su anchura.

Criterios de implantación

La construcción de arcenes es obligatoria en todas las autopistas y autovías. También será obligatoria la construcción de arcenes en todas las vías cuando discurren por suelos no urbanizables o urbanizables sin desarrollar. Asimismo, será obligatoria la construcción de arcenes en vías urbanas de velocidad 80, cuando las medianas laterales sean practicables para peatones. En el resto de vías urbanas y distritales, que no dispongan de bandas de estacionamiento, se considera conveniente la construcción de arcenes que separen la circulación rodada de las aceras.

2.12.5. Bandas de estacionamiento

Definición y tipos

Son bandas situadas junto a las aceras, en los laterales de la calzada, que se reservan y acondicionan para el estacionamiento de vehículos.

Constituyen un elemento característico de la sección de las vías en áreas urbanizadas, no siempre acondicionado como tal, y en cuya ausencia los conductores utilizan a menudo los arcenes, los carriles de circulación e, incluso, las aceras y medianas para estacionar sus vehículos. La disposición de los vehículos que admiten, su delimitación, separación de calzada y aceras, así como su acondicionamiento, determinan su operatividad. De acuerdo con la disposición de los vehículos, en relación al bordillo, se distinguen tres tipos de bandas de estacionamiento:

- En línea, cuando los vehículos se disponen paralelamente al bordillo.
- En batería, cuando se disponen perpendicularmente al bordillo.
- Oblicuo, cuando el eje longitudinal del vehículo forma un ángulo entre 0 y 90° con la línea del bordillo, normalmente de 30°, 45° o 60°.

De acuerdo al vehículo tipo para el que se diseñan, puede hablarse de estacionamientos para vehículos pesados y para vehículos ligeros. Los primeros no deben ir asociados a la sección de una calle, salvo en áreas industriales. Cada tipo requiere una anchura mínima de banda de estacionamiento y una anchura mínima de calzada de acceso, que permita las maniobras necesarias. Asimismo, cada tipo proporciona distintos aprovechamientos de línea de bordillo y de superficie vial.

Anchura

Se establecen las siguientes anchuras para las bandas de estacionamiento de vehículos ligeros adosadas a las aceras:

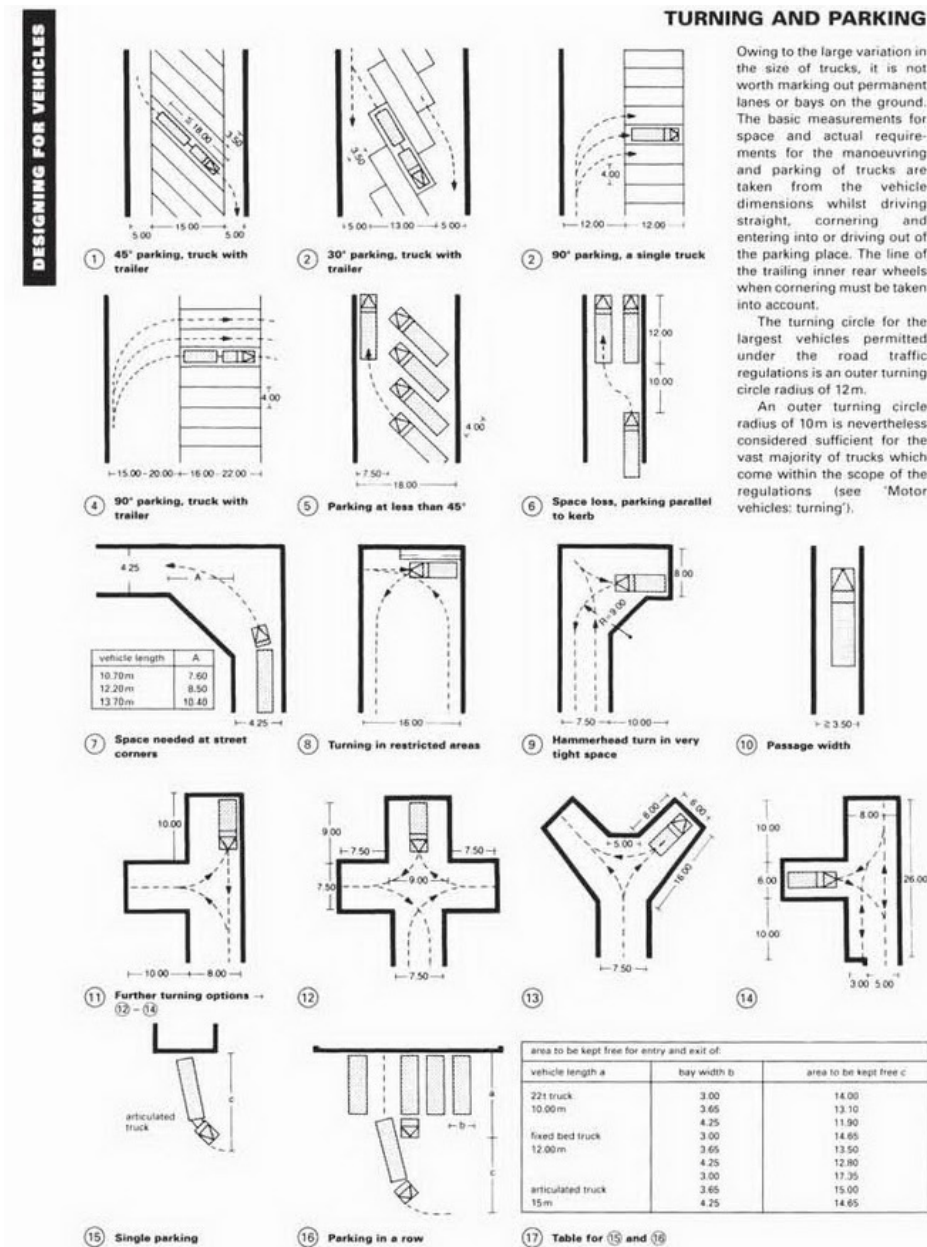


Fig.2.26. Anchura de bandas de estacionamiento. Dimensiones. Neufert

Pendiente transversal

La pendiente transversal de las bandas de estacionamiento se situará entre el 2 y el 2,5%.

Criterios de implantación

No se permitirán bandas de estacionamiento en los nuevos tramos de la red viaria Principal, salvo que se localicen sobre vías de servicio, físicamente separadas del tronco principal.

Excepcionalmente, podrán autorizarse bandas de estacionamiento en línea, en vías distritales.

En vías locales colectoras, podrán diseñarse bandas de estacionamiento en línea. En vías locales de acceso, podrán establecerse bandas de estacionamiento en línea, batería y ángulo.

Las bandas de estacionamiento adosadas a las aceras se delimitarán mediante el avance de éstas sobre la calzada y deberán dejar libre de estacionamiento las proximidades a las intersecciones, respetando las siguientes distancias mínimas, medidas desde el punto equivalente en el bordillo a la esquina de cada intersección:

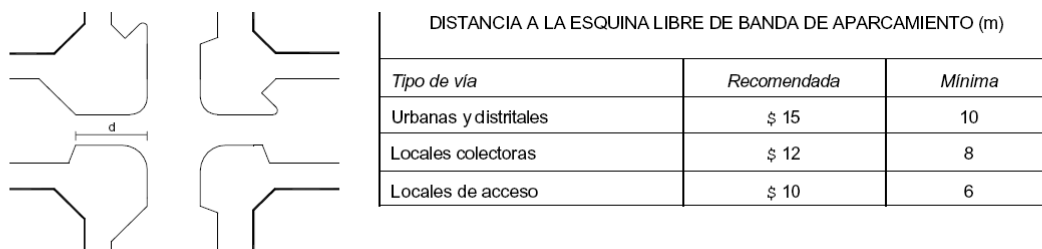


Fig.2.27. Diseño de zonas de aparcamiento

2.12.6. Carriles especiales

Definición y tipos

Los carriles o calzadas especiales son bandas de la sección transversal reservadas para la circulación exclusiva de ciertos tipos de vehículos. Pueden integrarse en la calzada general, discurrir por una calzada independiente o sobre las aceras y constituyen uno de los instrumentos más eficaces para promover la utilización de ciertos vehículos, en particular los que permiten una menor ocupación de vía pública por viajero (autobuses, tranvías, bicicletas, etc), y potenciar el cambio modal hacia los mismos.

Su localización y anchura constituyen sus parámetros determinantes.

Los tipos de carriles reservados integrados dentro de la sección de una vía son:

- Carriles-bus, reservados para la circulación de autobuses.
- Carriles Bus/VAO, reservados para la circulación de autobuses y vehículos de alta ocupación.
- Carriles bici, reservados para la circulación de bicicletas.
- Carriles bus-bici, reservados para la circulación conjunta de autobuses y bicicletas.

Carriles reservados. Criterios de implantación

Los carriles-bus y los carriles bus/VAO establecidos dentro de la sección de una vía tienen como objetivo potenciar la utilización de los autobuses y aumentar la ocupación de los vehículos particulares gracias a las ventajas de circulación que ofrecen menor congestión y, por tanto, reducción de los tiempos de recorrido. En consecuencia, la inclusión de un carril bus o bus/VAO en la sección de una vía se considera funcionalmente justificada cuando la intensidad previsible en el mismo, durante el período punta, medida en personas transportadas, sea mayor que la estimada para los carriles convencionales. Los carriles-bici tienen por objeto proteger y promover la circulación ciclista, por lo que su implantación no suele decidirse, exclusivamente, en función de las intensidades de tráfico ciclista previsible, sino que, puede derivar de otro tipo de consideraciones.

En la implantación de carriles especiales con separación física deberá estudiarse su incidencia en el acceso de vehículos de emergencia, con objeto de garantizarse el cumplimiento del RPICM en cuanto a la distancia entre el vehículo de emergencia y la fachada o bien garantizando el acceso a los edificios por otras vías que cumplan con estos requerimientos.

2.13. Anchura total de la sección transversal

La anchura total de la sección transversal de las vías será el resultado de sumar la anchura de cada uno de los elementos que la compongan.

Con independencia del resultado del cálculo anterior, la anchura mínima total de los tramos viarios en suelo urbanizable o en los planeamientos de desarrollo en suelo urbano será:

<i>Anchura total de la sección transversal (m)</i>	
Tipo de vía	Mínima (m)
Urbana	20,00
Local, colectora o de acceso	12,50

Fig.2.28. Anchura de secciones transversales de viales

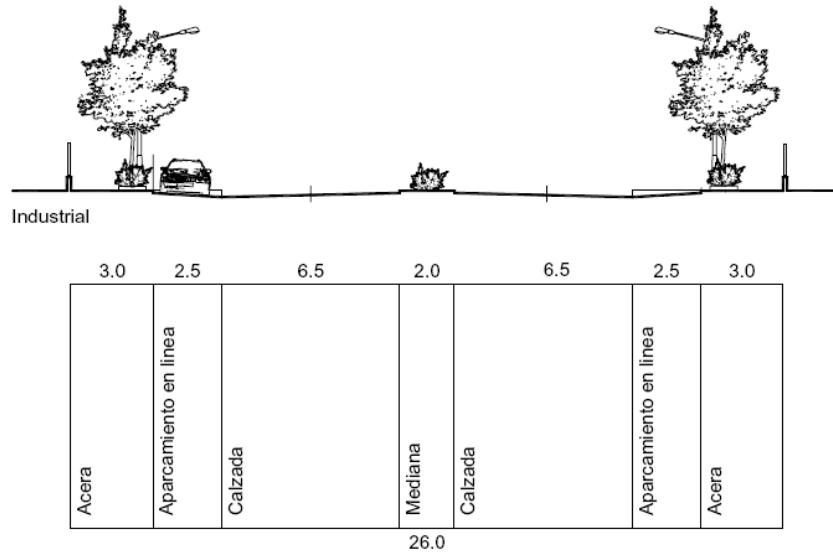


Fig.2.29. Sección viaria para uso industrial. Vía colectora local.

2.14. Sistemas de colección de instalaciones en ingeniería urbana

El sistema más habitual de colección de instalaciones e infraestructuras en ingeniería urbana es el de los bulbos o prismas de instalaciones.

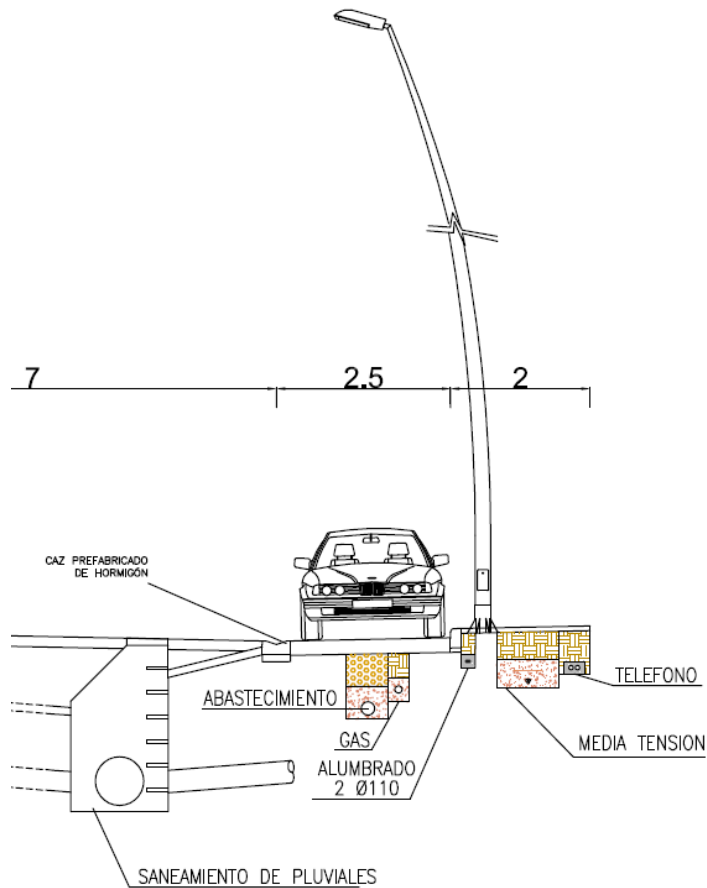


Fig.2.30. Prismas de instalaciones en una sección viaria.

Es necesario considerar en este punto alternativas de diseño que pudieran aportar óptimas soluciones desde los puntos de vista de la seguridad, de la sostenibilidad y de la economía. En este sentido, los trabajos de Cantó Perelló, J. y Cano Hurtado, J.J., recogen la clasificación de los distintos sistemas de colección de las infraestructuras de urbanización clasificados en función de su practicidad, transitabilidad uso y método constructivo.

En función de su practicabilidad y transitabilidad, tendremos:

- Galerías visitables
- Galerías registrables
 - Galerías registrables de losa vista
 - Galerías registrables de losa enterrada

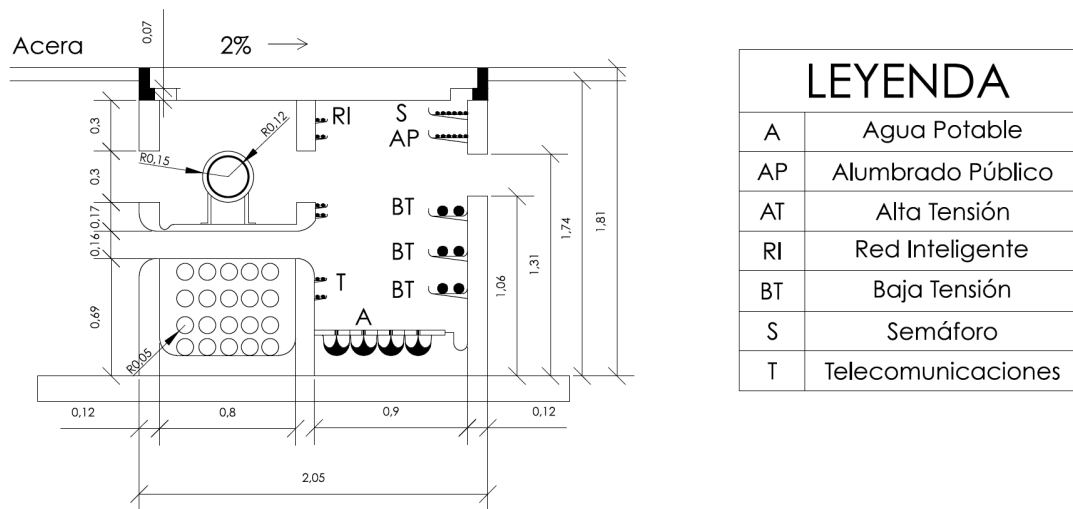


Fig. 2.31 Galería registrable de losa vista

En función de su uso, se tiene:

- Galerías de transporte
- Galerías de distribución
- Galerías de Cruce
- Galerías específicas

En función de sus características constructivas:

- Galerías de hormigón in situ
- Galerías de hormigón prefabricado
- Galerías de hormigón mixtas

En ciudades donde se encuentran implantados estos sistemas de distribución de infraestructuras, se definen 4 tipos en función del tamaño y características geométricas (Tipo 1, tipo 2, tipo 3 y tipo 4), siendo las tres primeras visitables y la cuarta semivisible

El espacio subterráneo marca la organización en la superficie. Nace así el urbanismo en tres dimensiones, en el que un buen desarrollo del espacio superficial necesita de una cohesión con la ordenación del subsuelo urbano. A finales del siglo XIX, Belgrand, Ingeniero Director de "Las Aguas y Alcantarillas de París", apunta la utilidad de la red de alcantarillado, como galería para conducción de servicios tales como el agua potable, gas, etc.. Aparecen así las galerías de servicio como elemento integrador y coordinador de las instalaciones urbanas.

La sensibilización cada día mayor de los estamentos competentes acerca del valor económico del subsuelo público, promete impulsar con fuerza el uso de las galerías de servicio en un futuro cercano como alternativa a otros sistemas tecnológicos de distribución de infraestructuras urbanas. La rentabilidad económica de la galería de servicios va creciendo con el transcurso del tiempo, al permitir un mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo mucho menos costoso, sin embargo, en su contra muestra un coste inicial mayor que el enterramiento tradicional. Pero el momento en el que la galería se muestra más beneficiosa, es a la hora de reponer las instalaciones urbanas (aproximadamente a los 25 años de vida), ya que la galería permite una reposición fácil y con costes muy bajos, mientras que el enterramiento necesita una nueva inversión de capital.

Es casi imposible el establecer un modelo definido de galería de servicios, dada la diversidad de características existente entre las ciudades, y en éstas entre sus distintas zonas. Sin embargo, se apuntan una serie de recomendaciones a tener en cuenta en el diseño de una galería de servicios. Las galerías de servicio son sistemas de colección de instalaciones urbanas que, por sus características y dimensiones, permiten un fácil acceso en cualquier punto de su recorrido para realizar la instalación, mantenimiento o reparación de las instalaciones que albergan. Su tipología es amplia, y sus criterios de clasificación son variados.

Se debe considerar el caso en que hace su aparición una nueva red de servicios, o bien una nueva canalización de una ya existente, en estos casos el enterramiento tradicional obliga a una nueva obra civil, mientras que en una galería de servicios la instalación no resulta prácticamente costosa. Un ejemplo lo tenemos en las nuevas líneas de cable de fibra óptica instaladas en nuestras ciudades.

En primer lugar, y como ya se ha comentado en el punto anterior, es recomendable el uso de galerías visitables por sus condiciones de accesibilidad. Dentro de la galería, la distribución en su sección de los distintos servicios urbanos, puede seguir un mismo esquema general. En éste se disponen las redes eléctricas de baja y alta tensión, comunicaciones, fibra óptica y redes propias de la galería en bandejas ancladas a las paredes laterales. Los conductos de agua potable se situarán

sobre la solera, dispuestos sobre caballetes o anclados a las paredes laterales. Las conducciones de gas aparecen en pocos casos, dada su peligrosidad, recomendándose su enterramiento en una zanja o canal técnico a un costado de la galería.

El alcantarillado no aparece en el interior de la galería en numerosos casos. Sin embargo, las pioneras galerías de servicios de la ciudad de París, fueron diseñadas como sistema de alcantarillado, al mismo tiempo que permitían el transporte de otras redes. En Francia, el ejemplo de París fue seguido por muchas ciudades, que diseñaron su red de alcantarillado para permitir el paso de los servicios urbanos. Este sistema mixto, alcantarilla-galería, sigue aún hoy en día en uso en numerosas ciudades, su gran ventaja es el ahorro económico que supone, ya que como el Barón Haussman apuntó, tan solo es necesario un dimensionamiento mayor de los conductos de la red de alcantarillado.

De todas formas, en la década de los setenta, el sistema descrito fue abandonado en algunas ciudades francesas como Lyon por el enterramiento tradicional. La causa de este cambio de modelo, fue las pésimas condiciones de trabajo e higiene existentes en el interior de estas galerías. En la actualidad, la ciudad de Lyon se encuentra estudiando la vuelta al modelo de galerías de servicios, al haber fracasado el enterramiento tradicional como modelo de conducción de las instalaciones urbanas.

Se debe tener en cuenta la experiencia de todas estas ciudades, si se desea realizar un óptimo diseño de una red de galerías de servicios. En particular, desearíamos resaltar la sección de galería de servicios empleada por la ciudad de Rouen, donde se incluye el alcantarillado en el interior de la galería, éste transcurre en la parte inferior en un canal especialmente diseñado para él, y cubierto con una losa de hormigón para impedir la contaminación que pudiera causar a la galería de servicios. Este alcantarillado aporta la ventaja de su registrabilidad, y si fuera necesaria una sección mayor, podría extenderse tanto como se desee en la parte inferior de la galería de servicios.

Se debe también distinguir entre sistemas de alcantarillado unitario o separativo. En el segundo caso, los conductos de aguas usadas tienen menor diámetro, y pueden ser incluidos en el interior de las galerías sin más, mientras que las aguas pluviales podrían hacerlo en conductos exteriores. Para el sistema unitario, el conducto puede aumentar excesivamente de tamaño, y esto puede imposibilitar su paso por la galería. Queda claro, que las galerías no pueden asumir el papel de los grandes colectores urbanos. De todas formas, el problema siempre queda sujeto a la necesidad de pendientes que pueda tener la red de alcantarillado, y que puede ocasionar la imposibilidad de su inclusión en las galerías de servicios.

El intento de unificar el alcantarillado y la galería de servicios, tiene como objetivo el reducir los costes de construcción de este sistema urbano de colección de instalaciones. Por lo tanto, el emplear este tipo de disposiciones no deja de ser la búsqueda de un óptimo económico, que llevará a redes de galerías donde se debe intentar combinar el alcantarillado con el resto de servicios urbanos, sin embargo, si este criterio no prima sobre la calidad y la sostenibilidad, a nuestro juicio aspectos

mucho más importantes, no será necesaria la búsqueda de una integración tan íntima entre el alcantarillado y la galería de servicios.



Fig. 2.32. Galería visitable de servicios del Aeropuerto de Málaga



Fig. 2.33. Galería visitable de servicios Universidad Jaime I de Castellón

2.15. Elementos de una sección viaria

Para una sección viaria en general, se puede realizar una definición de cada grupo de elementos recogidos en sus correspondientes zonas, agrupados por prismas, canales o galerías y que pueden contar con una variabilidad de formas, materiales y combinaciones que hacen que el campo de soluciones posibles, sea de una magnitud excesiva.

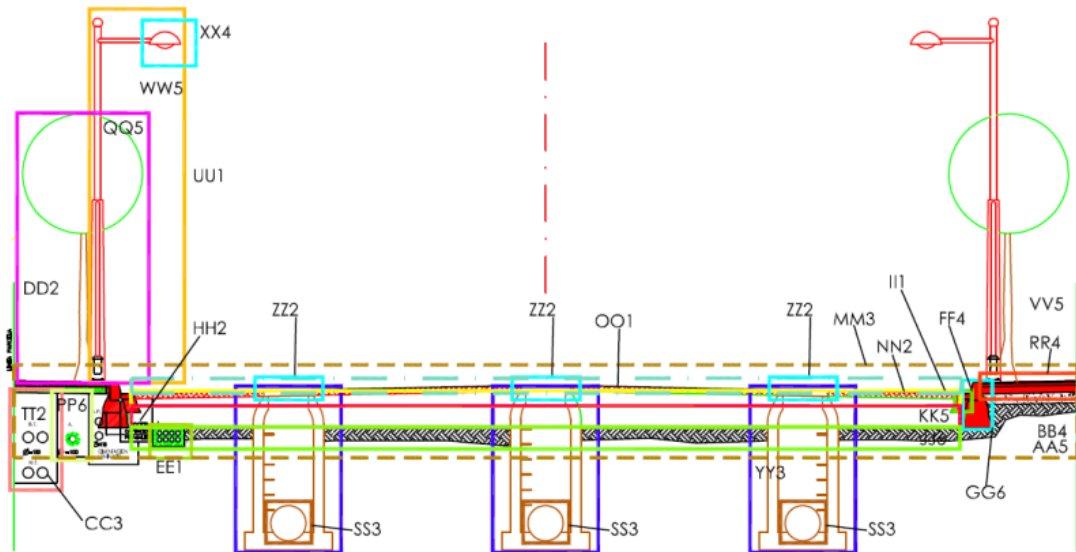


Fig.2.34. Elementos integrantes de una sección viaria genérica. Elaboración propia.

2.16. ALCANTARILLADO

Las diferentes posibilidades existentes para configurar una red de alcantarillado son, atendiendo al tipo de agua residual a evacuar:

- **Redes Unitarias.** Cuando pueden transportar conjuntamente aguas fecales y aguas pluviales (recogiendo tanto acometidas de aguas fecales como acometidas de bajantes y sumideros).
- **Redes Separativas.** Cuando se establecen dos redes independientes, una red por la que discurren exclusivamente aguas fecales y otra red por la que discurren exclusivamente aguas pluviales o aguas fecales diluidas provenientes de aliviaderos.
- **Redes Separativas Simples.** Cuando se construye exclusivamente una red de fecales, permitiendo que las aguas de lluvia discurren sobre las calzadas hacia cauces y zonas no urbanizadas, sin introducirse en la Red de Saneamiento.

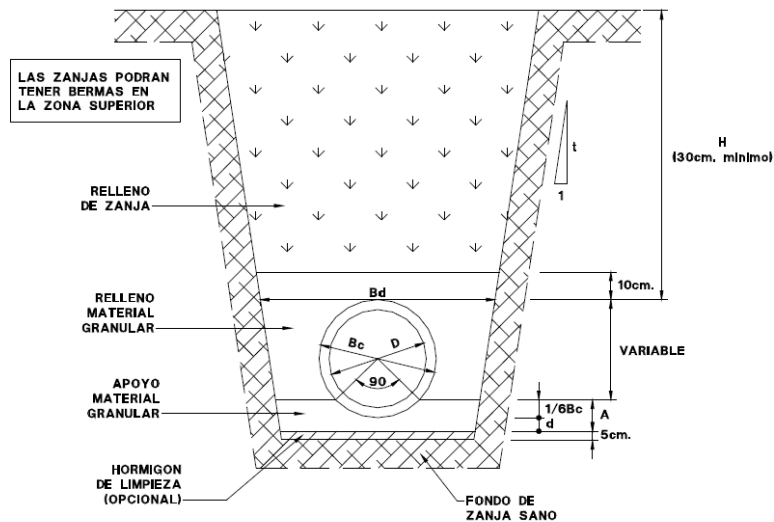


Fig.2.35. Sistema de instalación tubería de PVC saneamiento

En el sistema de Saneamiento se diferencian los siguientes tipos de conducciones:

- **Conducciones de alcantarillado.** Son las que configuran las redes que evacuan las aguas desde las acometidas domiciliarias.
- **Colectores.** Son los que tomando las aguas desde las conducciones de alcantarillado las transportan hasta los Emisarios.
- **Emisarios.** Son las conducciones que transportan las aguas residuales (por gravedad o bombeo) desde una Red local hasta su Fosa Séptica, o hasta la Estación Depuradora de Aguas Residuales más cercana.

Los materiales posibles son:

Material de tuberías
PVC color GRIS compacta UNE EN 1456
PVC color TEJA compacta UNE
PE HD
Polipropileno PP
PRFV
Amianto-cemento
Hormigón en Masa
Hormigón armado
Gres
Hormigón camisa chapa
Fundición dúctil
Material de los pozos de registro
Hormigón prefabricado
Polietileno
Fábrica de bloque de hormigón
Fábrica de ladrillo cerámico
Hormigón in situ
Polipropileno
Material de arquerías de conexión
Hormigón prefabricado
Fábrica de ladrillo cerámico
Hormigón in situ
PVC
Polietileno
Polipropileno
Fundición dúctil
Material de sumideros e imbornales
Hormigón prefabricado
Fábrica de ladrillo cerámico
Hormigón in situ
PVC
Polietileno
Polipropileno
Fundición dúctil
Tapas de arquetas y pozos
Hormigón armado
Fundición dúctil

Fig.2.36. Materiales de canalización de saneamiento

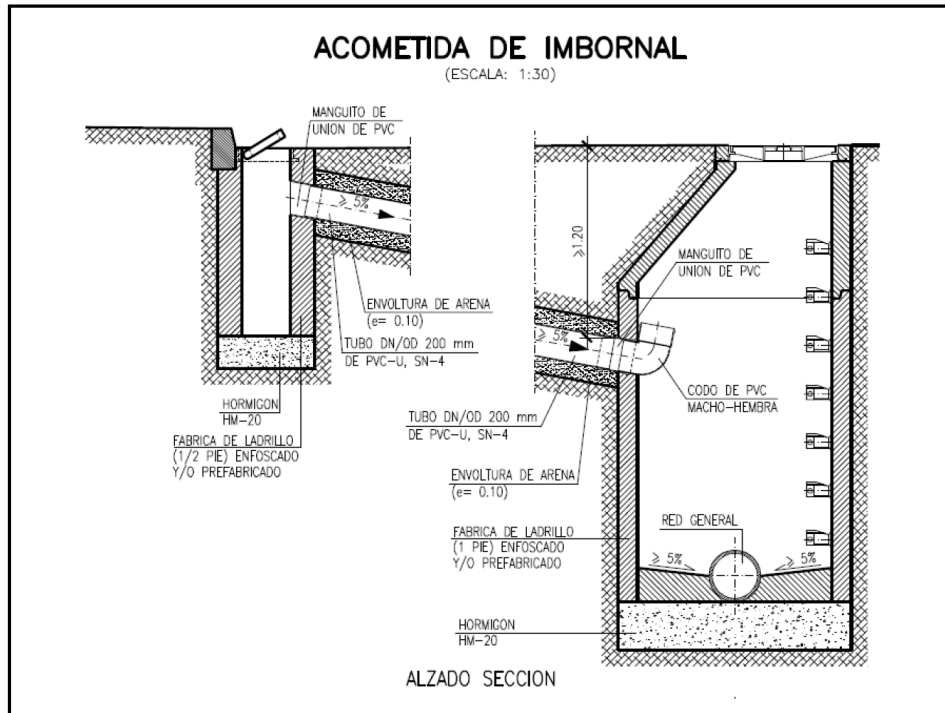


Fig. 2.37. Acometida de imbornal de evacuación de aguas pluviales

MATERIAL	DIÁMETROS (mm)	INCONVENIENTES	VENTAJAS
HORMIGÓN	En masa: 300-400 Armado sin camisa: 500-2000 (ovooidal) 500-3000 (circular)	<ul style="list-style-type: none"> • Ataques químicos de aguas residuales transportadas. • Vertidos a altas temperaturas son perjudiciales. • Elevado peso tubos: instalación más difícil y mayor nº de uniones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se fabrican a medida. • Son económicas.
FIBROCEMENTO	Se han usado mucho pero hoy día está prohibida su comercialización y utilización. (Orden 7/12/2001).		
GRES	Circular: 100-1400 Ovooidal: 200-900	<ul style="list-style-type: none"> • Frágil ante impactos puntuales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resist. agresividad química y abrasión mecánica y soportan Tª extremas (-10 a 70 °C): adecuadas para A.R.I. • No se corroe por acciones bioquímicas: adecuadas para R. separativa. • Bajo coeficiente de dilatación térmica y baja rugosidad hidráulica: permite altas velocidades de circulación.
FUNDICIÓN DÚCTIL	80-1200	<ul style="list-style-type: none"> • Sensibles a la corrosión por ácidos y al ataque del SH₂: proteger mediante revestimientos interiores y exteriores 	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia a la presión interior. • Buena estanqueidad. • Lisas

Fig. 2.38. Materiales para tuberías de saneamiento. Comparativa.

MATERIAL	DIÁMETROS (mm)	INCONVENIENTES	VENTAJAS
PLÁSTICOS	PVC-U: entre 110 y 1000 mm PVC-U estructurado: hasta 1500 mm PE: hasta 2000 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Prestaciones mecánicas menores que las de hormigón y metálicos. • Alto coef. dilatación térmica: sus caract. mecánicas disminuyen con la T° (Resist. a 50° se reduce al 60%). • Envejecimiento (50 años de vida útil): propiedades mecánicas (E y σ a tracción) disminuyen con el t°. Dimensionar para valores a 50 años: a corto plazo sobredimensionados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ligeros. • Económicos. • Resist. a ataques químicos. • Baja rugosidad. • Flexibles. • Buen comportamiento bajo heladas. • No favorecen desarrollo hongos y algas. • Para mejorar propiedades mecánicas frente a cargas exteriores: aligeramientos en su pared, tubos de pared estructurada que aumentan la resistencia al aplastamiento con menos material.
POLIÉSTER REFORZADO DE FIBRA DE VIDRIO	200-2500	<ul style="list-style-type: none"> • Coste económico. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se fabrican a medida adaptándose a las necesidades de cada proyecto. • Muy flexibles. • Muy resistentes a la corrosión y la abrasión. • Gran capacidad hidráulica. • Muy impermeables. • Admite una amplia gama de pH. • Garantizados hasta temperaturas de 35° y pH de 1 a 10.

Fig. 2.39. Materiales para tuberías de saneamiento. Comparativa.



Figura. 2.40. De catálogo ICA sorigué. Elementos de hormigón para redes de saneamiento.

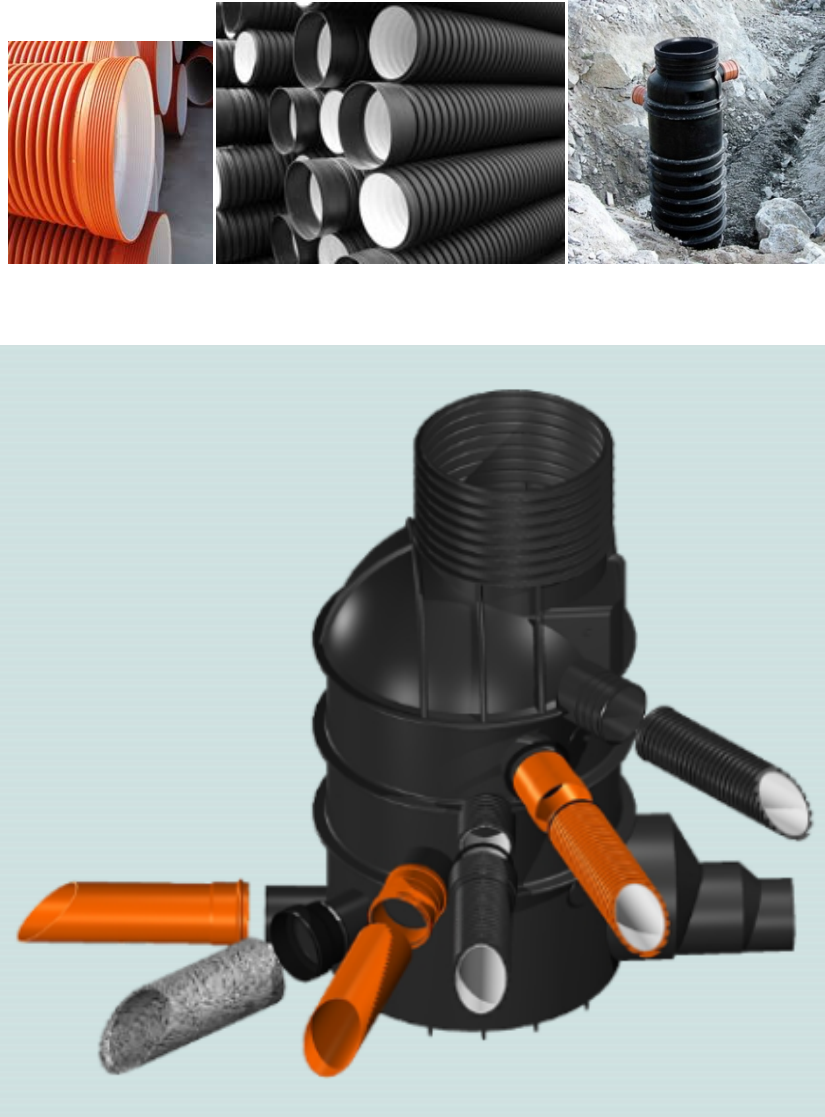


Fig.2.41. Canalizaciones y pozo de registro de materiales poliméricos para redes de saneamiento

La unión de los elementos puede efectuarse mediante los siguientes sistemas:

- junta elástica estanca en las uniones de tipo enchufe campana
- mortero

Los diámetros utilizados en PVC, sancionados por los cálculos, son \varnothing 500, \varnothing 400, \varnothing 315 y \varnothing 250 mm, en función de los volúmenes a transportar y de la pendiente hidráulica de los colectores.

Las acometidas de parcelas se suelen proyectar con tubería \varnothing 315 PVC y las de sumideros con \varnothing 250 también de PVC.

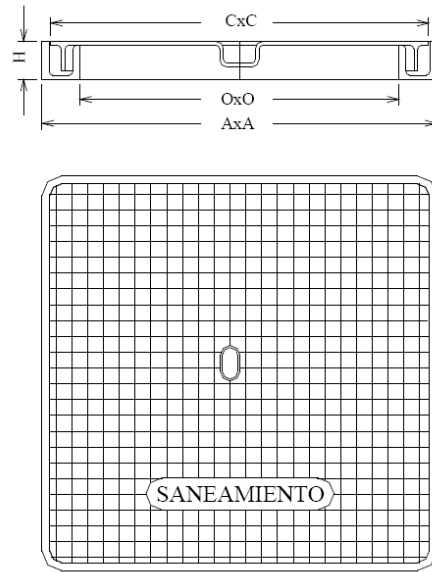


Fig.2.42. Tapa de fundición para arqueta de saneamiento.

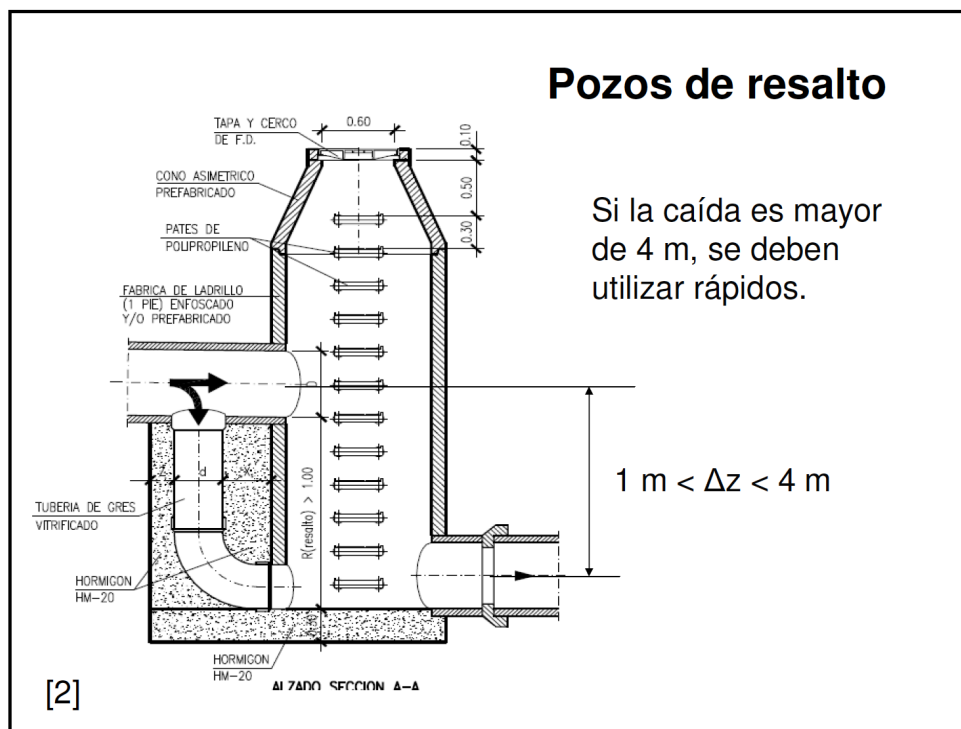


Fig.2.43. Plano de Barcelona. 1840.

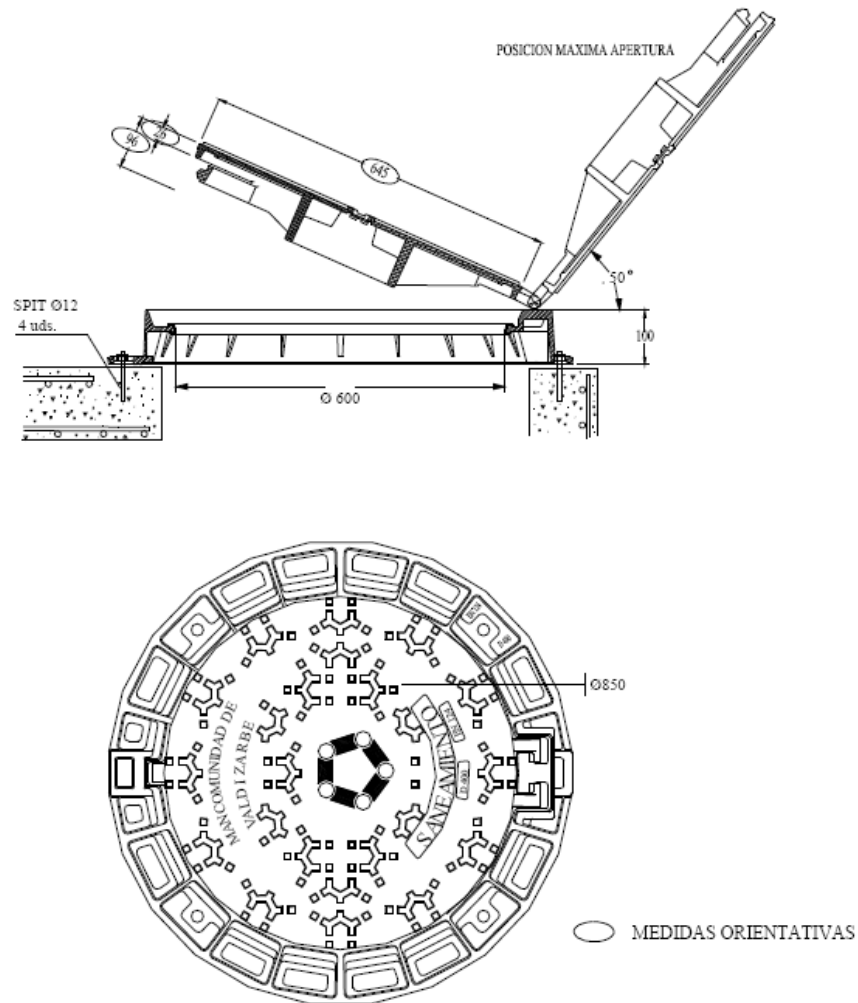


Fig.2.44. Tapa normalizada de pozo de saneamiento. Alzado y planta.

2.17. DISTRIBUCIÓN DE AGUA

Generalmente la red de distribución de agua se proyecta se configura en malla, aunque también puede ser una red ramificada, o mixta. Los diámetros de acometidas son de \varnothing 100 mm y de \varnothing 80 mm, según se precise, en general, en función de las condiciones del suministro.

Para servicios comunes, en zona pública, se disponen bocas de riego cada 60 m, próximas a los pozos de registro de cabecera de los colectores de pluviales y fecales, para facilitar su limpieza.

La red de acometida termina habitualmente en contadores de 40 mm. Las redes se resuelven con tuberías PEBD desde \varnothing 63 mm y hasta \varnothing 16 mm para las instalaciones de riego por goteo.

En relación a las acometidas de parcela, se dimensionan en relación a la protección de incendios, por ser la que da los mayores consumos.

Los materiales posibles son:

Material de tuberías	Campo de aplicación
Hormigón armado con camisa de chapa	1000-1200-1300-1400-1600-1800-2000-2200-2400-2600
Fundición dúctil	80-100-150-200-250-300-400-500-600-800-1000-1200
Acero	>200
Polietileno PE100	75-90-110-160-200
Polipropileno	25-32-40-50-63
Etileno-propileno	

Fig. 2.45. Materiales para tuberías de distribución de agua.

2.18. RED DE INCENDIOS

Como ya se ha indicado las acometidas, se dimensionan en relación a la protección de incendios, por ser la que da mayores consumos, con Ø 80mm, de fundición dúctil. Con el fin de poder configurar suministros que cumplan las especificaciones de la norma UNE 23500, para instalaciones sencillas, se deben garantizar las condiciones de suministro recogidas en la misma. Se debe configurar asimismo una red de hidrantes exteriores de superficie ubicados en las aceras.



Fig.2.46. Hidrante para enterrar. Boca siamesa y tapa de fundición

Material de tuberías red contra incendios
PE
PVC
Fundición dúctil
Acero
Fibrocemento

Fig.2.47. Hidrante para enterrar. Boca siamesa y tapa de fundición

2.19. RED DE SUMINISTRO DE GAS

En realidad, la instalación se concreta en una canalización general desde la que en el futuro saldrán las redes de reparto para las acometidas, ya que habitualmente, en entornos industriales no todos los usuarios requieren de este tipo de suministro energético. Esta canalización se suele diseñar de PEHD Ø 8”.

La red de suministro discurre por las aceras, quedando una banda al efecto disponible a 1,00 m al interior de los bordillos.

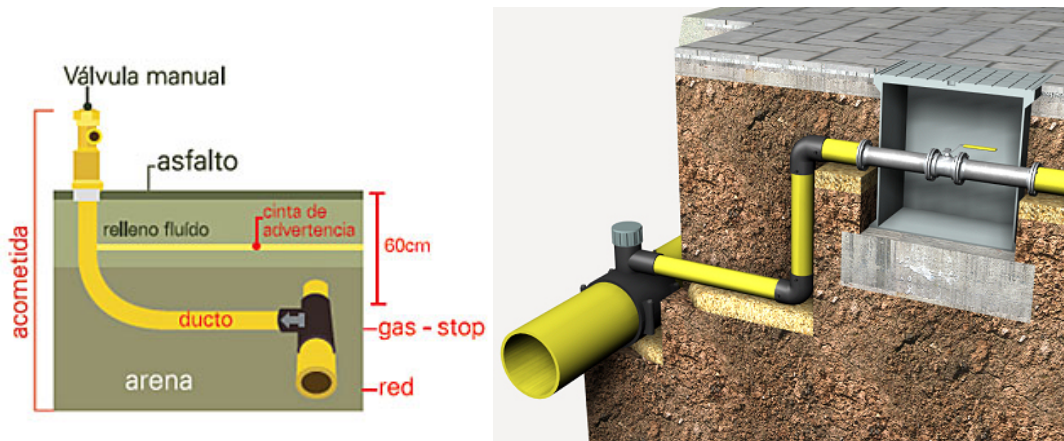


Fig..2.48. Sistema de instalación acometida de gas. Elementos.

Material de tuberías
PE SDR
Acero UNE 10208

Fig..2.49. Hidrante para enterrar. Boca siamesa y tapa de fundición

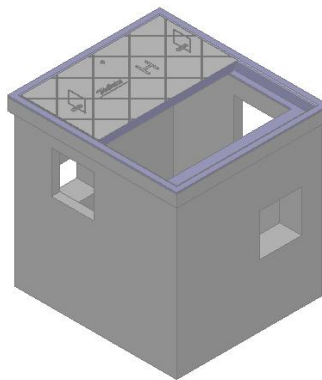
2.20. REDES DE TELECOMUNICACIONES

Las canalizaciones se sitúan en acera, de forma que las cámaras o arquetas de registro tengan siempre la boca de acceso en la acera.

La canalización telefónica está formada por conductos subterráneos que constarán de un número variable de tubos de PVC revestidos de hormigón en forma de prisma. Las cámaras registro y arquetas son los únicos puntos accesibles de la canalización. En ellas se realizan todas las operaciones necesarias para la explotación de los cables.



Fig.2.50. Infraestructuras para red de telecomunicación



*Fig.2.51. Arqueta tipo "H" prefabricada para red de telecomunicación.
Fuente: Telefónica*

Las cámaras de registro y arquetas, dependiendo de la naturaleza de la instalación pueden ser de diversos tipos. Se utilizan las siguientes arquetas: "D", "H" y "M", y cámaras de Registro tipo "GBR" y "GJR".

Tanto las cámaras como las arquetas se construyen de hormigón prefabricado.

Se disponen pedestales para armarios de distribución de acometidas y para armarios de interconexión.



Fig.2.52. Canalización prefabricada de hormigón. ADIF

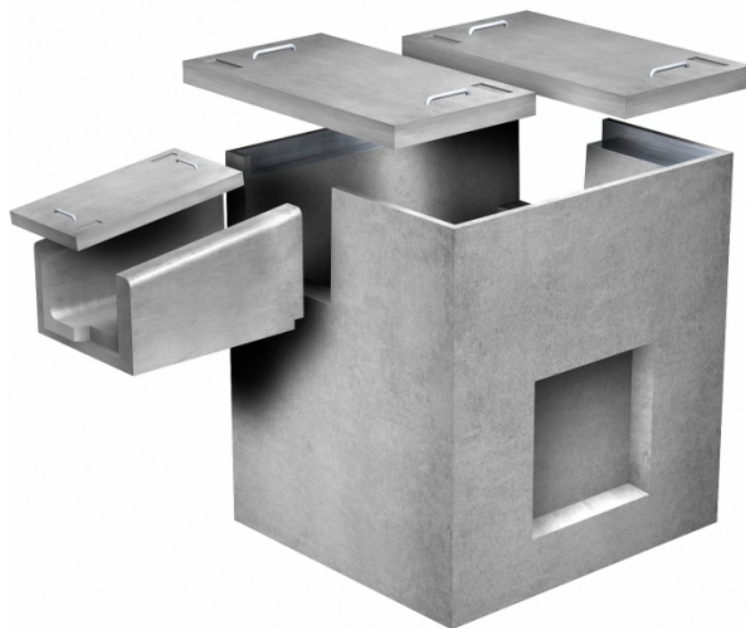


Fig. 2.53. arqueta prefabricada hormigón. ADIF

Material de canalizaciones y arquetas
Hormigón prefabricado
Zanja rellena áridos seleccionados
Prisma hormigonado tubo PE corrugado
Prisma hormigonado tubo PVC liso
Conductores
Cobre sólido-PE-PVC
Aluminio
Fibra óptica+PVC+Aramida
Coaxial cobre-polipropileno
Cobre estañado
Acero cobreado+poliéster aluminizado+PVC
Acero cobreado+poliéster aluminizado+PVC+malla alambre aluminio

Fig. 2.54. Material elementos infraestructuras telecomunicaciones

2.21. ENERGIA ELECTRICA

Distribución en Baja y Media Tensión

Zanjas y arquetas.

Las zanjas de distribución son entubadas y con arquetas de paso cada 60m. aprox. El conductor de MT se colocará en zanja común con el de BT, si bien para éste primero se utilizarán los tubos inferiores.

Estas zanjas contienen tubos de P.E.A.D., polietileno flexible de doble capa de 160 mm. De diámetro en dado de hormigón en masa HM-20.

De acuerdo con la compañía se han previsto los siguientes tubos de reserva: uno para las líneas de B.T., uno en aceras y terreno natural y 2 en cruce de calzadas para líneas de M.T.

Las arquetas son rectangulares de 100x100 cm., con tapa de entrada de 60x60 cm. La distribución en Baja Tensión se realiza a 400/230 V en base a líneas de sección constante y mediante conductores unipolares de aluminio tipo UNE RV0,6/1 KV. aislamiento en polietileno reticulado, cubierta externa de PVC. La sección de cada una de las líneas será constante en su recorrido, empleándose 150 mm². con neutro 95 mm² y 240 mm² con neutro de 150 mm².

La distribución en M.T. se realiza con conductores unipolares de Al de etileno-propileno UNE HEPRZ1 12/20 KV 1 de 240 mm² de sección.

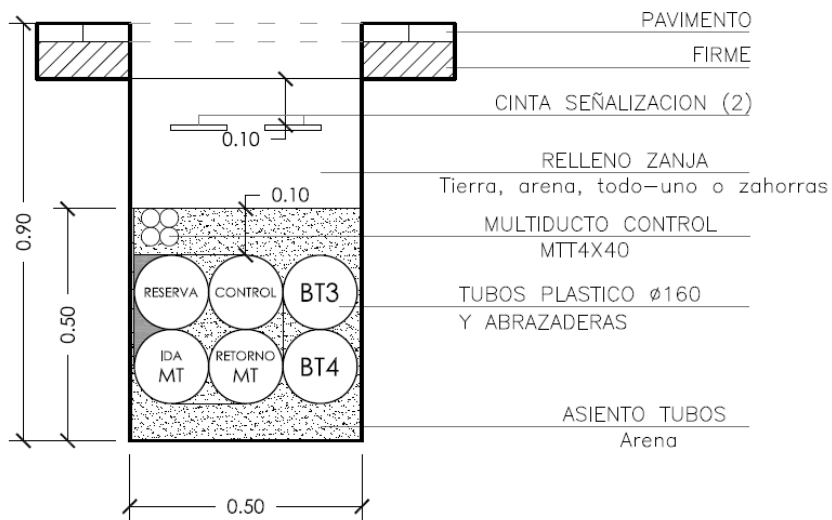


Fig.2.55. Conductor eléctrico apantallado alta tensión.

CANALIZACION ENTUBADA EN DOS PLANOS

ZANJA BAJO ACERA "TRAMO T2"

($\varnothing 160\text{mm}$ Cables hasta 240mm^2)



2.56. Sección constructiva instalación lineal Baja y Media tensión

Material de canalización
Tubo PVC
Tubo PE
Tubo acero
Relleno material árido seleccionado
Conductores
Cobre HDPE
Cobre esmaltado HDPE
Aluminio HDPE
Cobre LDPE
Cobre esmaltado LDPE
Aluminio LDPE+Plomo
Cobre LDPE+Plomo
Cobre esmaltado LDPE+plomo
Aluminio XLPE+HDPE
Cobre XLPE+HDPE
CobreXLPE+HDPE+Capa semiconductora

Fig. 2.57. Materiales líneas enterradas alta/media tensión. ADIF

Estaciones Transformadoras

Son prefabricadas de hormigón PFU-5 cuyas dimensiones son: 6,08x2,38x2,58 (largo x ancho x profundidad) con capacidad para albergar 2 transformadores de hasta 630 KVA y un prefabricado de hormigón PFU-3 cuyas dimensiones son: 3,28x2,38x2,58 (largo x ancho x profundidad) con capacidad para albergar un transformador hasta 630 KVA.



Fig.2.58. Envoltorio centro de transformación prefabricada hormigón.

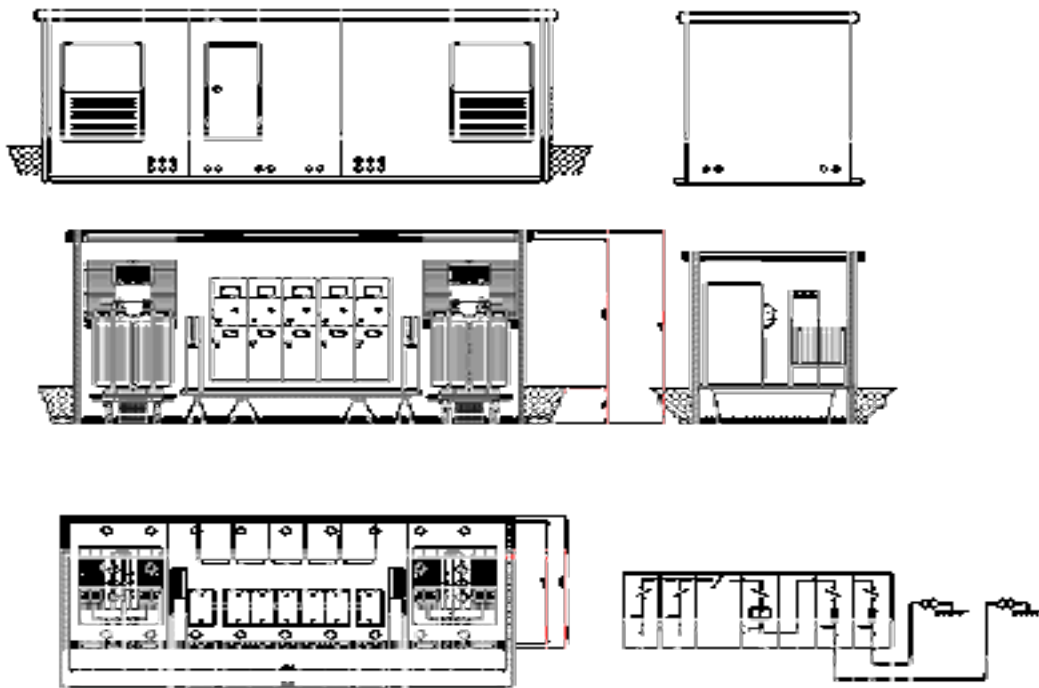


Fig.2.59. Planos estructura y contenido centro de transformación MT/BT.

Centros de maniobra

Son prefabricados de hormigón de estructura monobloque PF-15, cuyas dimensiones son: 1,36 x 1,215 x 1,50 (largo x ancho x profundidad) con parte enterrada de 0,55 m, con capacidad para albergar tres cabinas modulares, con puerta de dos hojas de apertura desde la vía pública, en las parcelas que por superficie, el suministro les corresponda en M.T.

2.22. ALUMBRADO PÚBLICO

Debido a la estructura transversal de los viarios (aparcamientos a ambos lados de la calzada), así como por la distribución de las manzanas en parcelas pequeñas con poca longitud de fachada, se usan báculos de 12 metros con brazos de 2 metros.

- Efectuar la instalación de ahorro energético mediante estabilizadores reductores de tensión en cabecera.
- Colocar una luminaria de primera marca y de alto nivel de calidad. Lo que nos lleva a diseños actuales todos ellos en la misma línea.

Se realiza la iluminación de las siguientes zonas:



Fig.2.60. Sistemas de alumbrado exterior LED y con fuente de captación fotovoltaica



Fig.2.61. Cimentación prefabricada y arqueta prefabricada para alumbrado exterior. Punto de luz.



Fig.2.62. Báculo de farola en madera.

Descripción de los materiales de Alumbrado Público utilizados

a) Lámparas

Se adopta la lámpara de vapor de sodio alta presión de 250 W para las secciones tipo estudiadas en viales, de 100 W en zonas ajardinadas y de 150 W en plaza.

b) Luminarias

Se adopta como idónea la luminaria con equipo incorporado, cerrada. Fabricada en aluminio prensado y de estética actual.

c) Báculos

Debido a las condiciones geométricas de las zonas a iluminar, con aparcamientos a ambos lados de la calzada, se ha elegido como soporte para las luminarias báculos de 12 m de altura con altura para las luminarias hasta la calzada de 11 m cuyas características vienen reseñadas en el Pliego de Condiciones Técnicas.

En consecuencia, se ha optado por un sistema sencillo, económico y totalmente fiable, que permite que las instalaciones de alumbrado con lámparas de descarga, puedan funcionar en dos o más niveles de iluminación prefijados, sistema que hemos adoptado, como solución idónea para nuestro Proyecto. Se instala en cabecera y en cada centro de mando un sistema electrónico centralizado de reducción de nivel.

Material de soporte
Fibra de vidrio+poliéster
Acero galvanizado
Acero
Fundición
Hormigón
Fibra de carbono
Madera
Aluminio
Material de luminaria
PVC
ALUMINIO
PP
Tipo de grupo de alumbrado
VSAP
VSBP
Halogenuros metálicos
VMCC
LED

Fig.2.63. Materiales de los elementos del sistema de alumbrado exterior.

2.23. JARDINERÍA, RIEGO Y MOBILIARIO URBANO

Materiales y mobiliario empleados

Con carácter general se han empleado los siguientes acabados:

-Adoquín de color en aceras, caminos y espacios del parque.

-Pavimento de adoquín envejecido en las zonas interiores de la cuadrícula de la plaza y en los caminos interiores del boulevard central. Las bandas longitudinales y el frente al espacio dotacional de la plaza se terminarán con losa prefabricada de hormigón combinada con los adoquines.

-Los remates con los parterres donde se ubica el arbolado se conforman con bordillo de jardín a excepción de los parterres de la plaza en los que se plantea una pieza de remate combinada con el adoquín envejecido.

-En la banda de parque lineal más alejada del núcleo de Arrabal se combinan los caminos de adoquín con otros en todo-uno, dado que su uso, mucho menor, y su carácter más visual no requieren de una pavimentación dura.



2.64. Fuente: Paquete de divulgación del Plan para mejorar las calles de San Francisco. Better Streets, 2008. Departamento de planificación de San Francisco CA

Jardinería

Se proyectarán plantaciones de árboles, arbustos y reptantes, que se adapten bien a la climatología extrema de la zona y a las características del terreno. A la vez, que tengan un escaso mantenimiento y un riego simplificado.

Especies arbóreas para entornos urbanos
Acer campestre
Tilia cordata
Sorbus latifolia
Ulmus columella
Betula utilis
Fagus sylvatica
Fraxinus americana

*Fig.2.65. Especies arbóreas indicadas para espacios urbanos.
Green Leaf España*

Red de riego

Las áreas industriales suelen equiparse muy escasamente con masas vegetales y consecuentemente con sencillas o nulas instalaciones de riego. Cuando se implementan especies vegetales, se suele recurrir a especies autóctonas de bajas exigencias hídricas por su adaptación al medio donde se implantan. No obstante, si se proyecta dotación de sistemas de riego, este suele diseñarse automático con programadores y con bocas de riego.

Los sistemas se suelen zonificar, constituyendo un sistema sencillo, por tanto de fácil mantenimiento y bajo coste. Suele estar formado por tuberías de PE de distintos diámetros, de 32 a 75 mm, PN 6 At. Tuberías de gotero integrado Ø 17 mm, y con gotero intercalado para arbolado y aspersores tipo aéreo con turbina para zonas con especies tapizantes o cespitosas. El sistema se completa con armarios, electroválvulas con sus arquetas y sistema de cableado.



Fig.2.66. Jardinera configurada con encintado de piezas de bordillo. Riego por goteo.

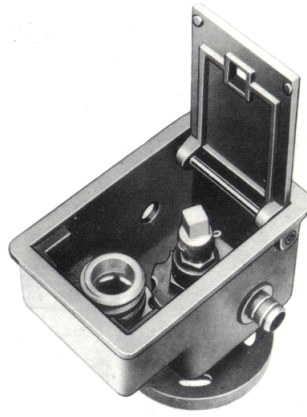


Fig.2.67. Toma de acoplamiento rápido para riego y baldeo.

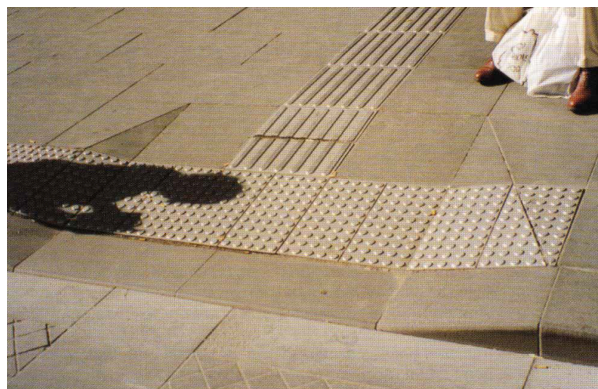
2.24. ACERAS

Las aceras constituyen el itinerario peatonal facilitando el recorrido de los usuarios y siendo un espacio exclusivo para el tránsito seguro de peatones, el cual permite acceder a la edificación y a los diferentes espacios públicos. Puede estar constituido por diferentes elementos combinados, zonas compatibles con elementos para personas con movilidad reducida, espacios adaptados para tránsito seguro de invidentes, etc.

Habitualmente está rematada (encintada) por una alineación de piezas que se denominan bordillo, el cual puede estar complementado (habitualmente) por una faja de adoquines, losetas u otro material en forma de canaleta que se coloca habitualmente junto al encintado de las aceras para conducir el agua de lluvia y que se denomina rigola.

En las aceras suelen intercalarse elementos para integración de elementos de jardinería, por medio de los denominados alcorques, configurados por piezas de bordillo.

En una acera suelen integrarse bandas señalizadoras, constituidas por piezas de pavimento o continuos que definen una textura y/o color diferente al resto del itinerario, cuya función es avisar, orientar y dirigir a las personas con problemas de orientación o visión.



*Fig.2.68. Acera con banda señalizadora.
Manual de vados y pasos peatonales. Fund. ONCE*



Fig.2.69. Acera de taco de piedra natural

Material de tránsito
Baldosa hormigón
Adoquín natural
Adoquín hormigón
Hormigón en masa con mallazo
Hormigón fibroreforzado
Baldosa de piedra natural caliza
Aglomerado asfáltico
Aglomerado asfáltico reciclado
Baldosa de piedra natural granito
Bordillo
Hormigón prefabricado
Piedra natural
Fundición
Rigola
Hormigón prefabricado
Hormigón in situ
Piedra natural
Fundición

Fig.2.70. Materiales configuración aceras

2.25. BANDAS APARCAMIENTO

Tradicionalmente, la dotación de plazas de aparcamiento en una determinada área se ha concebido como la suma de las necesarias para conceder una buena accesibilidad a las distintas actividades y edificios que la componen, por lo que se calculan de acuerdo a la media de propiedad y uso de automóviles de residente, empleados o visitantes.

Sin embargo, su incidencia en la utilización del vehículo privado como medio de transporte en el entorno urbano y el aumento de la congestión en el centro y accesos a una gran ciudad, recomiendan considerar cuidadosamente la dotación de ciertos tipos de aparcamiento. Sobre todo, las plazas de aparcamiento ligadas al empleo, ya que sus usuarios componen el tráfico de las horas y períodos punta, es decir, las horas de mayor congestión circulatoria.

Se recomiendan las siguientes dimensiones mínimas para plazas de aparcamiento de turismos en zonas urbanas, medidas entre ejes de marcas perimetrales delimitadoras de las plazas:

Dimensiones mínimas recomendables para las plazas de aparcamiento		
Tipo de vehículo	Longitud (m)	Anchura (m)
Vehículos de dos ruedas	2,50	1,50
Automóvil pequeño	4,00	2,25
Automóvil medio	4,50	2,25
Automóvil grande	5,00	2,40
Automóvil para discapacitados	5,00	3,60
Vehículos industriales ligeros	5,70	2,50
Vehículos industriales pesados	9,00	3,00

Fig.2.71. Dimensiones mínimas recomendadas para plazas de aparcamiento

Fuente: Instrucción Vía Pública del Ayuntamiento de Madrid.

Asimismo, se reservarán al menos el 2% de las plazas para vehículos de discapacitados y, como mínimo una, a partir de 25 plazas. Dichas plazas se situarán en los lugares más próximos a los accesos y al nivel de la calle y se asegurará la inexistencia de barreras arquitectónicas en el trayecto de las plazas a la calle.

Las plazas de aparcamiento para automóviles, situadas en la vía pública, se diseñarán en principio para automóviles medios, manteniendo las mismas reservas para discapacitados establecidas con carácter general en el párrafo anterior.

De acuerdo con la disposición de los vehículos en relación al vial de acceso, se distinguen bandas de aparcamiento en línea, batería o ángulo.



Fig.2.72. Banda de aparcamiento construida con adoquín drenante

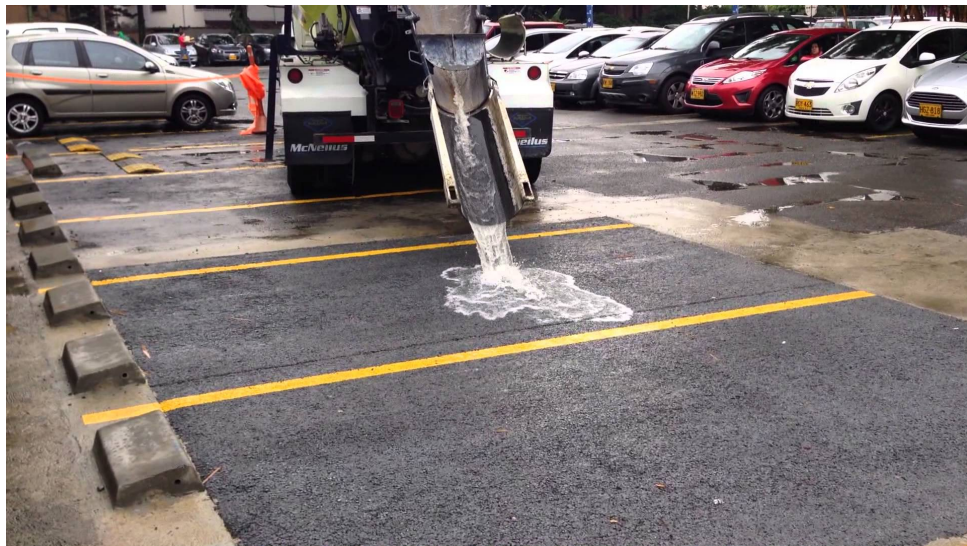


Fig.2.73. Banda de aparcamiento construida con hormigón drenante

Material de banda de aparcamiento
Hormigón en masa
Hormigón drenante
Celosía hormigón
Aglomerado asfáltico
Aglomerado asfáltico reciclado
Adoquín prefabricado
Adoquín de piedra natural

Fig.2.74. Materiales habituales bandas de aparcamiento



Fig.2.75. Elementos de aparcamiento para bicicletas

2.26. FIRMES Y PAVIMENTOS

Las carreteras han sido durante décadas el principal medio de desplazamiento de personas y la vía principal para tránsito y distribución de mercancías. Haciendo un poco de historia sobre los orígenes de los firmes asfálticos, mayoritariamente utilizados en la urbanización de espacios, el empleo del alquitrán para pavimentación de carreteras se remonta al año 1830 cuando fue empleado en algunos riegos superficiales, sin embargo los primeros aglomerados in situ no llegaron hasta 1850 en algunas carreteras y vías urbanas del Reino Unido. En torno a 1870 se empezaron a realizar en EEUU mezclas fabricadas a partir de rocas y asfaltos naturales. En esos años, como consecuencia del desarrollo de la industria del petróleo se comenzaron a emplear betunes de destilación para fabricación de mezclas.

Los firmes de hormigón también han sido y son extensamente utilizados, con excelente comportamiento mecánico, resistencia y medioambiental, tal como indica IECA en su guía técnica, Firmes de Hormigón en Carreteras. Actualmente su empleo mayoritario se concentra en firmes de aeropuertos, puertos y entornos rurales, siendo todavía discreto su uso en carreteras.

La técnica de los pavimentos de hormigón en carreteras dispone de una amplia variedad de soluciones constructivas en función de los condicionantes de cada obra. Estos son, básicamente, el tráfico, el tipo de explanada y, en menor medida, el clima. Emplean recursos naturales locales prácticamente inagotables (no consumen derivados del petróleo). Las ventajas medioambientales que se le atribuyen son:

- El consumo de áridos de calidad es menor que el de otras alternativas
- Permiten el empleo de áridos reciclados (RCDs), procedentes de pavimentos existentes y son reciclables en su totalidad al final de su vida útil, posibilitando el ahorro de áridos naturales
- Son muy duraderos, por lo que se evita el consumo de nuevos recursos y se

reducen las emisiones de CO₂ debidas a las operaciones de mantenimiento o refuerzo

- Pueden capturar CO₂ , lo que contribuye a mejorar el balance de emisiones a lo largo de su vida útil
- Requieren menor iluminación dada su claridad, con la consiguiente disminución del consumo energético
- Reducen el efecto invernadero y contribuyen al enfriamiento global, al disminuir la cantidad de radiación solar absorbida por la superficie de la Tierra
- No emiten lixiviados ni volátiles
- Es una técnica especialmente adaptada al empleo de cementos con alto contenido de adiciones. Ello se traduce en una disminución de las emisiones durante su fabricación, al reducir la cantidad de clínker empleado e incorporar subproductos industriales como escorias o cenizas volantes, lo que favorece el cumplimiento del protocolo de Kioto y de los compromisos de desarrollo sostenible.

Las características iniciales de toda carretera se van degradando con el transcurso del tiempo. Son diversos factores los que inciden y determinan este proceso de deterioro. Por una parte, están los factores relacionados directamente con las características del propio firme como pueden ser los espesores, los materiales utilizados en su fabricación y el proceso de ejecución, que podríamos considerar como los factores pasivos del proceso, y por otra parte tenemos los factores activos, verdaderos causantes del deterioro, que son el tráfico y los factores ambientales.

Los factores activos de deterioro son dos variables complejas y difíciles de definir que dependen de un conjunto diverso de elementos, así pues, el tráfico está unido al número de ejes, a la carga por eje, a la velocidad de circulación de los vehículos, a la regularidad superficial del firme, etc.

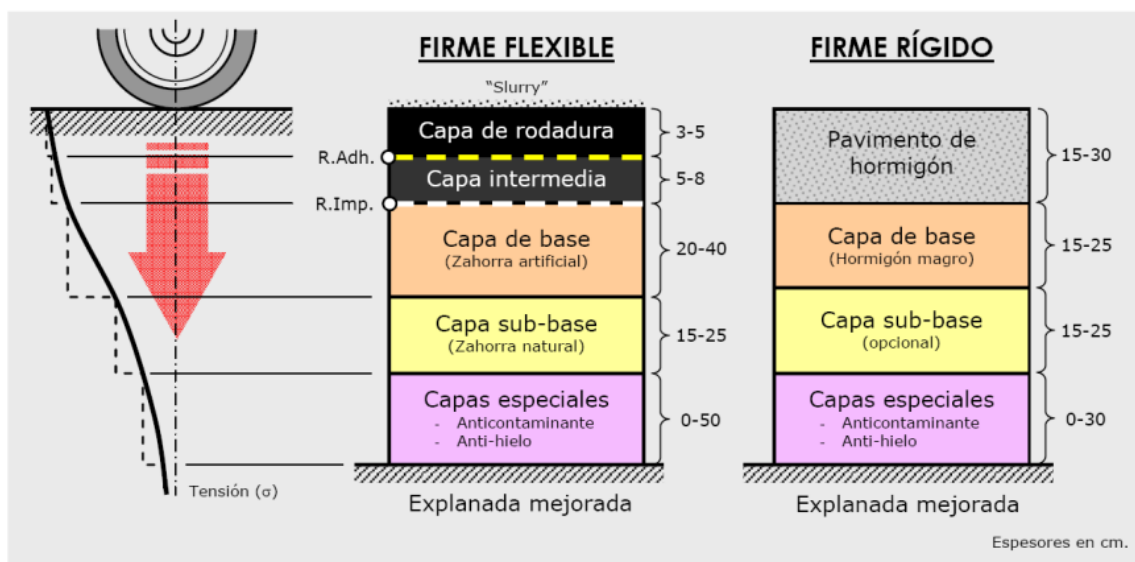


Fig.2.76. Estructura de un firme flexible y de un firme rígido

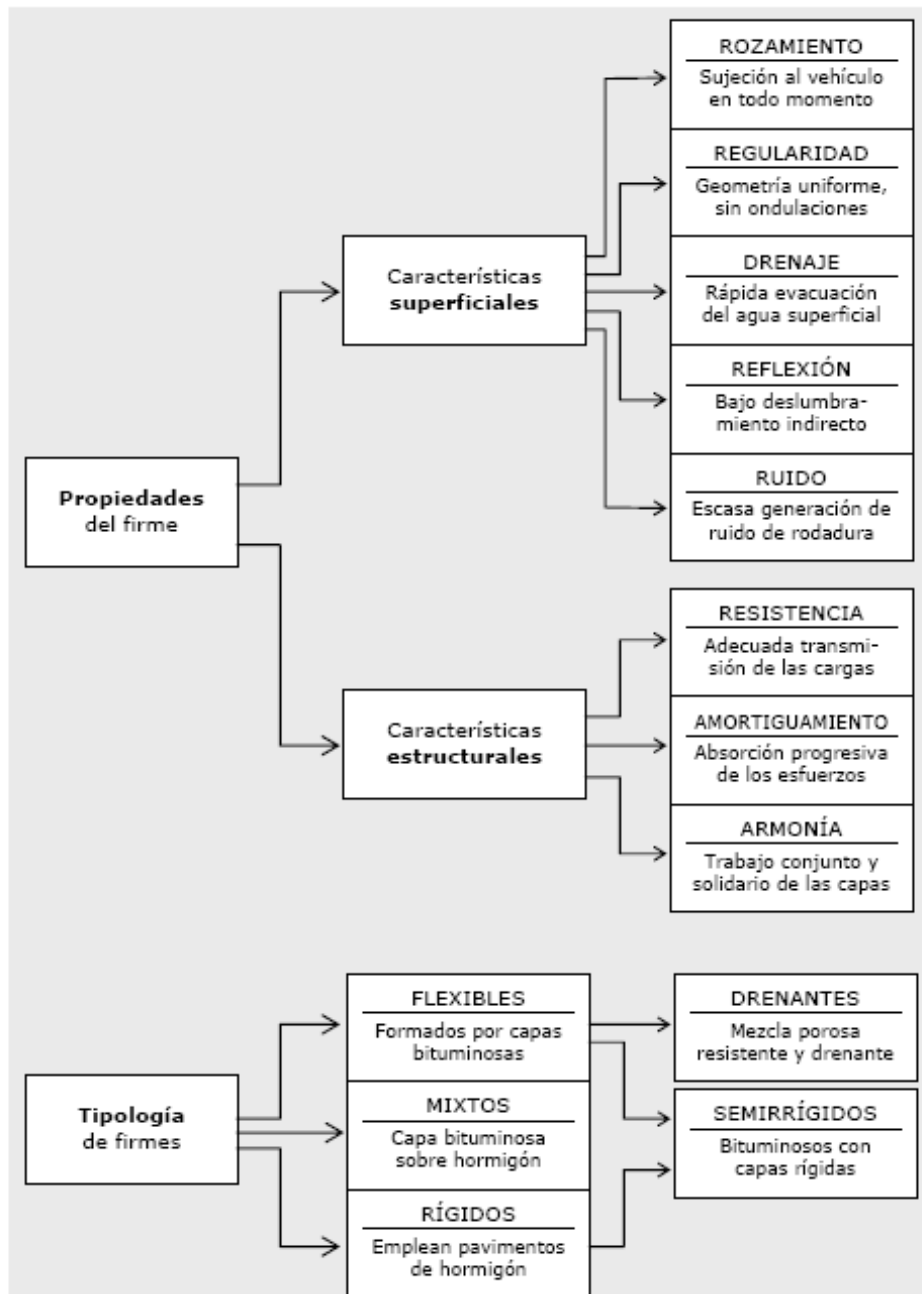


Fig.2.77. Propiedades y tipología de firmes

Los ejes actúan sobre el pavimento transmitiendo una sollicitación horizontal y otra vertical, lo cual se traduce en el tiempo en un deterioro del firme que se manifiesta principalmente en los siguientes tipos de fallo:

- fisuración por fatiga
- desprendimiento de gravillas o pulimento de áridos
- deformaciones permanentes
- hundimiento de gravillas
- baches y peladuras

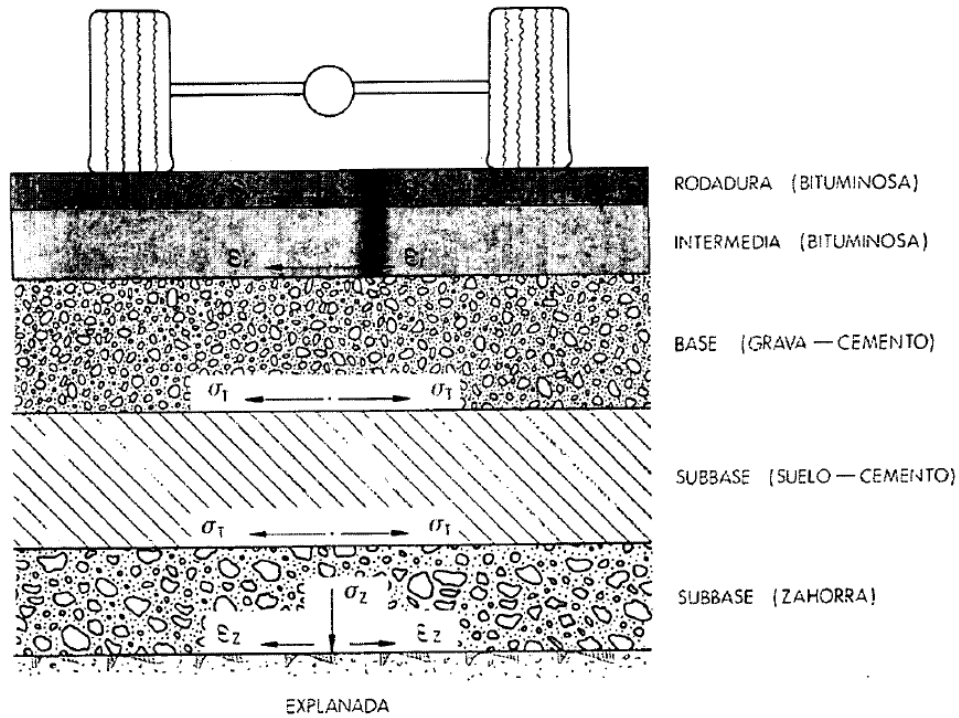


Fig.2.78. Acciones transmitidas por el tráfico a la estructura de un firme

SÍMBOLO	DEFINICIÓN DEL MATERIAL	ARTÍCULO DEL PG-3	PRESCRIPCIONES COMPLEMENTARIAS
IN	Suelo inadecuado o Marginal	330	- Su empleo sólo será posible si se estabiliza con cal o con cemento para conseguir S-EST1 o S-EST2.
0	Suelo tolerable	330	- CBR ≥ 3 (*). - Contenido en materia orgánica $< 1\%$. - Contenido en sulfatos solubles (SO_3) $< 1\%$. - Hinchamiento libre $< 1\%$.
1	Suelo adecuado	330	- CBR ≥ 5 (*) (**).
2	Suelo seleccionado	330	- CBR ≥ 10 (*) (**).
3	Suelo seleccionado	330	- CBR ≥ 20 (*)
S-EST1 S-EST2 S-EST3	Suelo estabilizado <i>in situ</i> con cemento o con cal	512	- Espesor mínimo: 25 cm. - Espesor máximo: 30 cm.

(*) El CBR se determinará de acuerdo con las condiciones especificadas de puesta en obra, y su valor se empleará exclusivamente para la aceptación o rechazo de los materiales utilizables en las diferentes capas, de acuerdo con la figura 1.

(**) En la capa superior de las empleadas para la formación de la explanada, el suelo adecuado definido como tipo 1 deberá tener, en las condiciones de puesta en obra, un CBR ≥ 6 y el suelo seleccionado definido como tipo 2 un CBR ≥ 12 . Asimismo, se exigirán esos valores mínimos de CBR cuando, respectivamente, se forme una explanada de categoría E1 sobre suelos tipo 1, o una explanada de categoría E2 sobre suelos tipo 2.

Fig. 2.79. Materiales para la formación de explanadas.
Norma 6.1. Secciones de firme. Orden FOM 3460/2003

CATEGORÍA	IMDP
T0	IMDP > 2000
T1	2000 > IMDP ≥ 800
T2	800 > IMDP ≥ 200
T3	200 > IMDP ≥ 50
T4	IMDP < 50

Figura.2.80. Categorías de tráfico pesado

SUELO	CARACTERÍSTICAS	SUCS
SELECCIONADO	- Tamaño máximo del árido TMA < 8 cm. - Contenido en finos menor del 25% (0.080 UNE) - Límite líquido LL < 30 - Índice de plasticidad IP < 10 - CBR > 10, sin presentar hinchamiento - Exentos de materia orgánica	GW GP
		GM GC
ADECUADO	- Tamaño máximo del árido TMA < 10 cm. - Contenido en finos menor del 35% (0.080 UNE) - Límite líquido LL < 40 - Densidad máxima Proctor Normal > 1,750 g/cm ³ - CBR > 5, con un hinchamiento < 2% - Contenido de materia orgánica < 1%	SW SP
		SM SC
TOLERABLE	- Contenido en piedras de tamaño superior a 15 cm. inferior al 25% - Límite líquido LL < 40, o bien simultáneamente: <ul style="list-style-type: none"> ▪ LL < 65 ▪ IP > 0.6·LL - 9 - Densidad máxima Proctor Normal > 1,450 g/cm ³ - Índice CBR > 3 - Contenido de materia orgánica < 2%	ML CL OL
		MH CH OH Pt
INADECUADO	No cumplen las condiciones mínimas exigidas para los suelos tolerables.	

Figura.2.81. Clasificación española de suelos (PG-3)

		TIPOS DE SUELOS DE LA EXPLANADA (DESMONTES) O DE LA OBRA DE TIERRA SUBYACENTE (TERRAPLENES, PEDRAPLENES O RELLENOS TODO-UNO)				
		SUELOS INADECUADOS Y MARGINALES (IN)	SUELOS TOLERABLES (0)	SUELOS ADECUADOS (1)	SUELOS SELECCIONADOS (2) y (3)	ROCA (R)
CATEGORÍA DE EXPLANADA	E1 $E_{1/2} \geq 60\text{MPa}$					
	E2 $E_{1/2} \geq 120\text{MPa}$					
	E3 $E_{1/2} \geq 300\text{MPa}$					

IN	Suelo inadecuado o marginal (Art. 330 del PG-3)	0	Suelo tolerable (Art. 330 del PG-3)	1	Suelo adecuado (Art. 330 del PG-3)	2	Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)	3	Suelo seleccionado (Art. 330 del PG-3)
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	S-EST 2	Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	S-EST 3	Suelo estabilizado in situ (Art. 512 del PG-3)	HM-20	Hormigón (Art. 610 del PG-3)		

	tipo de material
	espesor
	mínimo en cm
	suelo de explanación o de la obra de tierra subyacente

Figura.2.82. Tipos de explanada admisibles

SÍMBOLO	DEFINICIÓN	ARTÍCULO PG-4	PRESCRIPCIONES
0	Suelo tolerable	330 Terraplenes	
1	Suelo adecuado	330 Terraplenes	
2	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	
3	Suelo seleccionado	330 Terraplenes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CBR > 20
T	Material de la zona de transición en pedraplenes	331 Pedraplenes	
S-EST 1	Suelo estabilizado in situ con cal o cemento	510 Suelos estabilizados "in situ" con cal 511 Suelos estabilizados "in situ" con cemento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CBR de la mezcla a los 7 días > 5 ▪ Cemento o cal \geq 2%
S-EST 2	Suelo adecuado estabilizado in situ con cal o cemento	330 Terraplenes 510 Suelos estabilizados "in situ" con cal 511 Suelos estabilizados "in situ" con cemento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CBR de la mezcla a los 7 días > 10 ▪ Cemento o cal \geq 3%
S-EST 3	Suelo adecuado estabilizado in situ con cemento	330 Terraplenes 511 Suelos estabilizados "in situ" con cemento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistencia a compresión simple a los 7 días \geq 1.5 MPa

Figura. 2.83. Materiales utilizables en explanadas.
Fuente: Instrucción de Carreteras (6.1 y 6.2-IC)

SÍMBOLO	Características generales		
GW GP GM GC	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
			Pobremente graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
SW SP SM SC	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias (Finos<5%)	Bien graduadas
			Pobremente graduadas
		Con finos (Finos>12%)	Componente limoso
			Componente arcilloso
ML MH	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
CL CH	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
OL OH	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	TURBA	Suelos altamente orgánicos	

2.84. Tipología de suelos (Simbología SUCS)

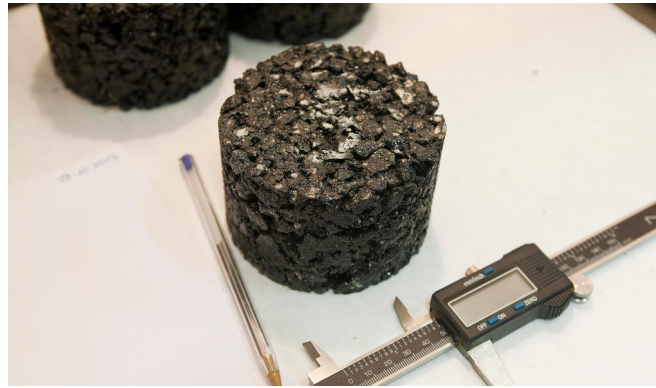


Fig.2.85. Aglomerado asfáltico a partir de neumático NFU reciclado

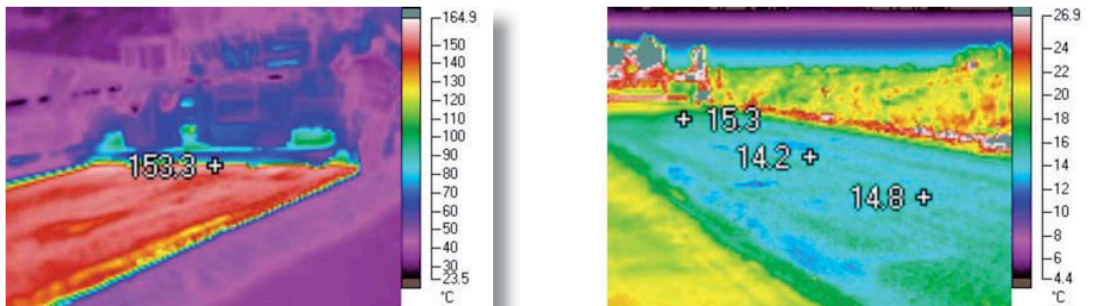


Fig.2.86. Temperaturas de puesta en obra de un pavimento asfáltico (izquierda) y uno de hormigón (derecha)

Fuente: IECA, Manual técnico Firmes de Hormigón en Carreteras

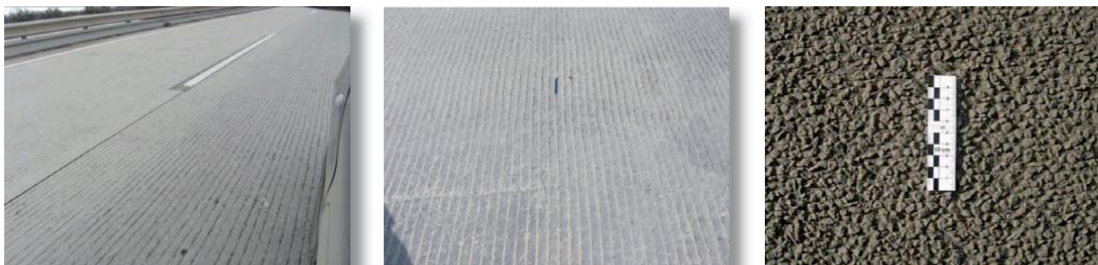


Fig.2.87. Texturas superficiales firmes de hormigón. Estriado longitudinal, estriado horizontal y árido visto.

Fuente: IECA, Manual técnico Firmes de Hormigón en Carreteras

	Tipo de mezcla
Fracciones de árido empleadas	Mástico Mortero Macadam Hormigón
Temperatura de puesta en obra	En frío En caliente
% de huecos en mezcla	Cerradas ($h < 6$) Semicerradas ($6 < h < 12$) Abiertas ($h > 12$) Porosas ($h > 20$)
Tamaño del árido	Gruesas ($t \text{ máx} > 8 \text{ mm}$) Finas ($t \text{ máx} < 8 \text{ mm}$)
Estructura del árido	Con esqueleto mineral Sin esqueleto mineral
Granulometría	Continuas Discontinuas

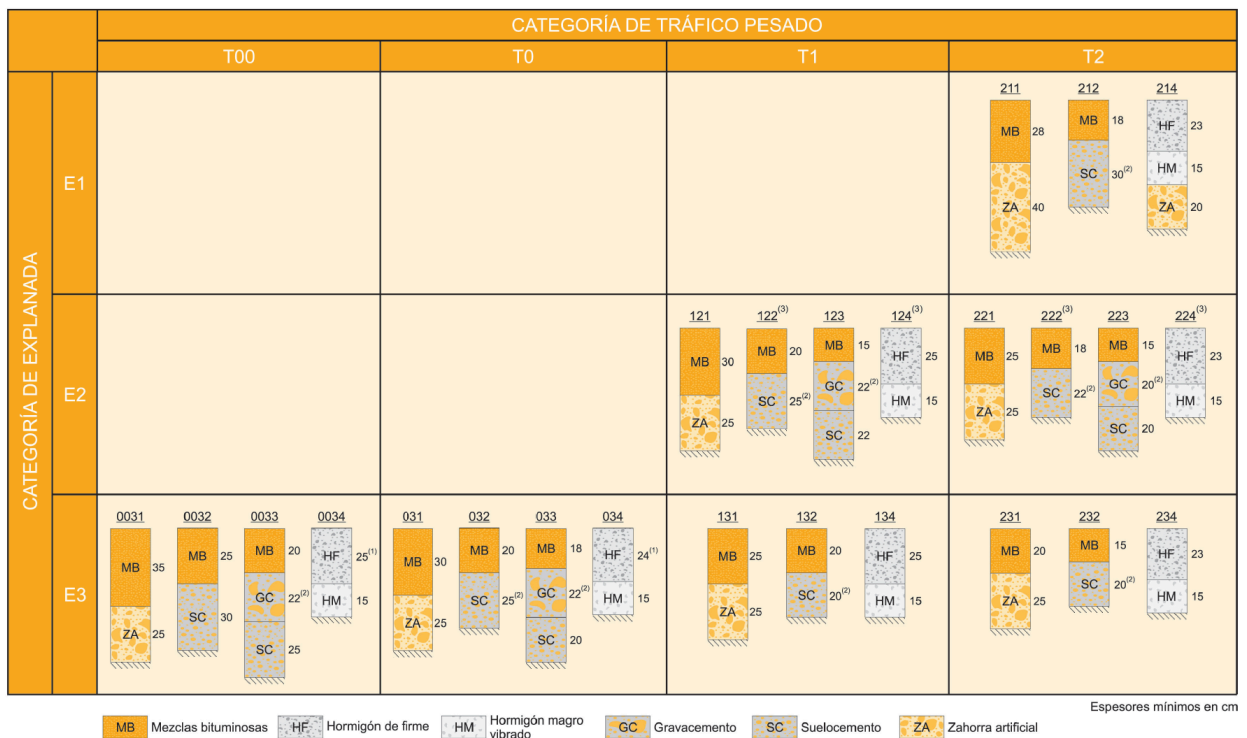
Fig.2.88. Clasificación de mezclas bituminosas (Kraemer et al. 1999)

Ligante o conglomerante	Emulsión Bituminosa			Cemento
	I	II	III	
Clase				IV
Dosificación	4-7%	3-5%	2-4%	3-6%
Firme que se recicla	Pavimento bituminoso (< 5 cm) + base granular	Pavimento bituminoso (< 10 cm) + base tratada o no	Mezclas bituminosas	Firmes degradados
Espesor reciclado	8-15	8-15	5-15	20-35
Objetivos	Estabilización y regularización del firme		Regeneración del ligante	Formación <i>in situ</i> de una base tratada

Fig 2.89. Clasificación de los reciclados in situ en frío (Kraemer et al. 1999)

CLAVE	DEFINICIÓN	PG-4
R	Mezcla bituminosa D ó S (Capa de rodadura)	542
RD	Mezcla bituminosa P ó PA (Capa de rodadura)	542
RA	Mezcla bituminosa A ó AF (Capa de rodadura)	542
I	Mezcla bituminosa D, S ó G (Capa intermedia)	542
BB	Mezcla bituminosa S, G ó A (Capa base)	542
ZN	Zahorra natural	500
ZA	Zahorra artificial	501
ZAD	Zahorra artificial drenante	501
SC	Suelocemento	259
GC	Gravacemento	268
HM	Hormigón magro	517
HC	Hormigón comprimido o compactado	516
HV	Hormigón vibrado en masa	463
HVA	Hormigón vibrado armado continuo	463
TS	Tratamiento superficial (riegos con gravilla)	532
-	Tratamiento superficial (lechada bituminosa)	540
-	Riegos de imprimación, adherencia y curado	530 ó 532

Fig 2.90. Denominación simbólica de materiales. Fuente: Instrucción de Carreteras



(1) Para las categorías de tráfico pesado T00 y T0 se emplearán únicamente pavimentos continuos de hormigón armado con los espesores indicados.
 (2) Capas tratadas con cemento que deberán prefisurarse con espaciados de 3 a 4 m, de acuerdo con el artículo 513 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales (PG-3).
 (3) Para poder proyectar esta solución será preceptivo que la capa superior de la explanada E2 esté estabilizada con cemento.

Fig2.91. Catálogo de secciones de firme para las categorías de tráfico pesado T00 a T2, en función de la categoría de la explanada. Fuente: Instrucción de Carreteras-IC-6.1

Material de la explanada	Material de base	Firme
Tolerable (0)	MBC-D	MBC-D
Adecuado (1)	MBC-S	MBC-S
Seleccionado 2 (2)	MBC-G	MBC-G
Seleccionado 3 (3)	MACADAM	MBDC-M
Estabilizado 1 (S-EST1)		MBDC-F
Estabilizado 2 (S-EST2)		MBA-F
Estabilizado 3 (S-EST3)		MB-AM
Hormigón en masa (HM20)		HORMIGON
		GRAVACEMENTO
		GRAVAEMULSION
		GRAVAESCORIA
		ZAHORRA ARTIFICIAL
		MACADAM
		MB DRENANTE (PA)

Fig 2.92. Materiales para la formación de un firme

2.27. SEÑALIZACIÓN VERTICAL Y HORIZONTAL

Las marcas viales (marcas sobre el pavimento) tienen por objeto regular la circulación y advertir o guiar a los usuarios de la vía, y pueden emplearse solas o con otros medios de señalización, a fin de reforzar o precisar sus indicaciones.

Tienen alguna de las funciones siguientes:

- Delimitar carriles de circulación
- Separar sentidos de circulación
- Reforzar o precisar las indicaciones de otras señales
- Repetir o recordar una señal vertical
- Advertir, guiar y orientar a los conductores y demás usuarios de la vía, dándoles información e indicaciones útiles
- Delimitar las zonas excluidas al tráfico, las reservadas a la circulación de determinados vehículos o a estacionamiento
- Permitir un mejor aprovechamiento de la calzada disponible y favorecer en los conductores la disciplina de carril
- Mejorar la seguridad, fluidez, comodidad y eficacia de la circulación

La señalización horizontal está compuesta, fundamentalmente, por las marcas viales. Éstas son unas marcas que se pintan directamente sobre la calzada, y su finalidad es la de advertir y guiar a los usuarios, así como regular el tráfico. La Norma 8.2-IC de la Legislación Española define lo siguiente:

“Las marcas viales son líneas o figuras, aplicadas sobre el pavimento, que tienen como objetivo satisfacer una o varias de las siguientes funciones:

- Delimitar carriles de circulación
- Separar sentidos de circulación
- Indicar los bordes de la calzada
- Delimitar las zonas donde esté prohibida la circulación regular de vehículos
- Establecer reglas de circulación, especialmente la prohibición de adelantamiento, la parada y el estacionamiento
- Completar o ayudar a la comprensión del significado de señales verticales o semáforos
- Repetir o recordar una señal vertical
- Establecer los movimientos permitidos
- Anunciar, guiar y orientar a los usuarios.”

Debido a su ubicación y sus características, las marcas viales son de vital importancia con condiciones meteorológicas adversas y de reducida visibilidad, por lo que su correcto mantenimiento y ejecución resultan cruciales para mantener la seguridad vial en dichas situaciones (por ejemplo, con niebla densa, el conductor puede tener fuera de su campo visual una señal vertical y, sin embargo, puede leerla si se ha pintado sobre la calzada, además de que las marcas longitudinales le ayudan a guiarse y mantenerse sobre la vía).

En España, la Instrucción 8.2-IC establece los siguientes colores para las marcas viales:

- Blanco. En general, las marcas viales serán de color blanco, que estará conforme a la referencia B-118 de la norma UNE 48 103.
- Amarillo. Serán de color amarillo las marcas viales, continuas o discontinuas, que estén colocadas junto a un bordillo o de la zona peatonal para indicar prohibición o restricción de la parada o el estacionamiento. También lo serán aquellas en zigzag que se empleen para indicar zonas con estacionamiento prohibidos y que estén destinadas a algún uso especial.
- Azul. Las marcas azules se utilizarán para delimitar zonas de estacionamiento de duración limitada, en las que el conductor debe indicar claramente y de forma visible la hora del comienzo del mismo.

En algunas ciudades, también existen marcas de otros colores, como el verde.

Reflectancia

Las marcas de color blanco serán, en general, reflectantes, con la salvedad de aquellas situadas en zonas urbanas o en vías suficientemente iluminadas. Las amarillas o azules, en general, no lo serán.

La reflectancia de la pintura se consigue mediante la incorporación a la pintura de unas microesferas de vidrio, o, en ocasiones, con un tratamiento de su superficie.

Grupos

A efectos de esta norma, las marcas se clasifican dentro de alguno de los siguientes siete grupos:

- 1. Longitudinales discontinuas:** El significado de una marca longitudinal discontinua es el de que ningún conductor debe circular con su vehículo o animal por encima de ella, salvo cuando sea necesario y la seguridad de la circulación lo permita, en calzadas con carriles estrechos (menos de 3m de anchura). También se emplean para la separación de carriles normales, la separación de carriles reversibles, la separación de carriles de entrada o salida y otros usos.
- 2. Longitudinal continua:** Una marca longitudinal continua significa que ningún conductor, con su vehículo o animal, debe atravesarla o circular a la izquierda de la misma, cuando ésta separe los sentidos de circulación.

Dos marcas continuas, situadas una junto a la otra, tienen exactamente el mismo significado.

Se excluyen de este significado las líneas continuas de borde de calzada. Las marcas longitudinales continuas deberán ser de, como mínimo, 20m, y su uso y longitud deberán estar restringidos lo máximo posible a fin de favorecer la flexibilidad de la circulación y conservar el valor prohibitivo de la misma. Por tanto, deberá considerarse su reducción y eliminación adoptando ciertas medidas.”

Sus usos más significativos son: en líneas de separación de los sentidos para prohibir el adelantamiento y para la delimitación de borde de calzada.

- 3. “Marcas longitudinales continuas adosadas a discontinuas:** La finalidad de una línea de esta clase es la de permitir el adelantamiento en un sentido mientras se prohíbe en el otro, en el caso de calzadas de dos o tres carriles con doble sentido de circulación o para limitar la maniobra de cambio de carril a aquél más próximo a la línea discontinua, en el caso de que la calzada sea de un único sentido.
- 4. Marcas transversales:** Existen tanto discontinuas como continuas. Una marca transversal continua significa que ningún conductor de vehículo o animal debe franquearla sin haber cumplido anteriormente con la obligación impuesta por:
 - Una señal de detención obligatoria.
 - Una marca vial de “stop”.
 - Una señal de prohibición de paso sin detenerse.
 - Un paso para peatones, ya sea indicado por la marca vial M-4.3 o por una señal vertical.

- Una señal de paso a nivel.
- Un semáforo.
- Una señal de detención efectuada por un agente de la circulación.

La línea de detención, que fija la línea que ningún vehículo debe rebasar según los casos anteriores, debe estar situada en un lugar desde el cual el conductor tenga la suficiente visibilidad (incluidos los peatones) y, además, debe ser lo suficientemente larga como para que abarque todos aquellos carriles afectados por la prohibición.

5. **Flechas:** Las flechas tienen diferente significado según su ubicación y el tipo de calzada en el que estén. Existen flechas de dirección y selección de los carriles, de salida, de fin de carril y de retorno.
6. **Inscripciones:** Las inscripciones sobre el pavimento tienen como finalidad proporcionar al conductor una información complementaria, recordando la obligación de cumplir con una señal vertical o imponiendo una prescripción por sí misma.

La disposición y el tamaño de las letras variará en función de la velocidad máxima VM de la carretera, y estarán siempre alargadas longitudinalmente para que, desde el punto de vista del conductor, parezcan proporcionadas. Entre ellas, se pueden encontrar: las de carril o zona reservada, las de dirección y las señales horizontales.

7. **Otras marcas:** Existe otro tipo de marcas que no entran en ninguna de las categorías anteriores y que, por sí solas, tienen cada una un significado diferente. Dentro de esta categoría entran marcas como los cebreados, líneas de estacionamiento, etc

En función del tipo de vía sobre la cual estén pintadas, estas marcas viales tendrán un tamaño que variará según la Velocidad específica, la Velocidad máxima o la señalización fija, y no cambiarán de tamaño en tramos que, pese a tener una velocidad diferente a la del resto de la vía, sean de una longitud muy corta.



Figura. 2.93. Señalización horizontal

Señalización vertical
Acero
Fundición
Acero galvanizado
Aluminio
PE
Madera
Fibra de vidrio
Fibra de carbono
Señalización horizontal
Pintura epoxi con microesferas
Pintura fotoluminiscente
Pintura acrílica
Pintura alcídica
Pintura al agua

Figura. 2.94. Materiales empleados en señalización vertical y horizontal

CAPÍTULO 3

OPTIMIZACIÓN Y ALGORITMOS GENÉTICOS



3 | OPTIMIZACIÓN ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1. Definiciones básicas

De forma genérica, puede definirse la optimización como aquella ciencia encargada de determinar las mejores soluciones a problemas matemáticos que a menudo modelan una realidad física. Bajo esta definición tan simple se presenta todo un mundo de métodos y algoritmos diferentes que resultarían del todo imposibles de tratar de forma correcta.

Los problemas de optimización no sólo están presentes en ingenierías de cualquier tipo. Forman parte de casi todas las ramas de la ciencia haciendo posible la resolución de una variedad infinita de problemas distintos y de cuyas características depende la elección de uno u otro método de optimización. Para poder comprender un poco mejor el amplio abanico de posibles soluciones que se nos ofrecen es necesario comenzar con una serie de definiciones básicas extraídas del trabajo de Thomas Weise, *Global optimization algorithms – theory and application*.

- **Solución candidata:** Consiste en todas y cada una de las soluciones posibles al problema. En el caso de estar trabajado en un problema de optimización con restricciones veremos que no todas las soluciones posibles son aceptables. Esto implica que previamente se ha modelado dicho problema de manera que se pueda trabajar como una función matemática, cosa que resulta muy complicada en algunos casos. De hecho, en muchas ocasiones el problema a optimizar no tiene una representación matemática directa, sino que se trabaja con algún tipo de función de coste o incluso con simulaciones de los resultados.

- **Espacio del problema:** Se define el *espacio del problema* X como la unión de todas las soluciones candidatas al problema que queremos optimizar.

- **Espacio de soluciones:** El *espacio de soluciones* S está definido como el conjunto de todas las soluciones aceptables al problema.

- **Espacio de búsqueda:** El *espacio de búsqueda* G se define como el conjunto de todos los elementos que pueden ser operados por los métodos de optimización. Esta diferenciación cobra especial sentido en los *algoritmos genéticos* y en la mayoría de los algoritmos heurísticos puesto que, como se verá más adelante, no trabajan con soluciones directamente, sino con individuos codificados que representan las posibles soluciones.

- **Vecindad:** La vecindad se define como un entorno acotado del espacio de búsqueda alrededor del punto que se está evaluando donde todos los puntos son *adyacentes*.

- **Adyacentes:** Se dice que dos puntos p y p' , pertenecientes a un espacio de búsqueda de una función, son adyacentes si se puede saltar de uno a otro con una única operación de búsqueda.

- **Operación de búsqueda:** Cualquiera de las operaciones de las que se sirva el algoritmo de optimización para llevar a cabo su cometido que es, cómo no, encontrar el valor óptimo (ya sea local o global).

- **Máximo local:** Se define el *máximo local* $x' \in X$ de una función $f: X \rightarrow R$ es un elemento tal que, $f(x') \geq f(x)$ para cualquier otro elemento x que pertenezca al vecindario. O dicho de otra forma, se puede definir un intervalo ε tal que para todo elemento $x \in X$ se cumpla lo siguiente (**ec.3.1**).

$$\forall x' \exists \varepsilon > 0: f(x') \geq f(x) \forall x \in X, |x - x'| < \varepsilon \quad (\text{ec.3.1.})$$

- **Máximo global:** Se define el *máximo global* $x' \in X$ de una función $f: X \rightarrow R$ como aquel elemento que para cualquier $x \in X$ se cumple que $f(x') \geq f(x)$.

- **Mínimo local:** Se define que el *mínimo local* $x' \in X$ de una función $f: X \rightarrow R$ es un elemento tal que, $f(x') \leq f(x)$ para cualquier otro elemento x que pertenezca al vecindario. O, dicho de otra forma, se puede definir un intervalo ε tal que para todo elemento $x \in X$ se cumpla lo siguiente (**ec.3.2**).

$$\forall x' \exists \varepsilon > 0: f(x') \leq f(x) \forall x \in X, |x - x'| < \varepsilon \quad (\text{ec.3.2.})$$

- **Mínimo global:** Se define el *mínimo global* $x' \in X$ de una función $f: X \rightarrow R$ como aquel elemento que para cualquier $x \in X$ se cumple que $f(x') \leq f(x)$.

- **Óptimo local:** Se define el *óptimo local* $x^* \in X$ de una función $f: X \rightarrow R$ como aquel elemento que es máximo o mínimo local de la función.

- **Óptimo global:** Se define el *óptimo global* $x^* \in X$ de una función $f: X \rightarrow R$ como aquel elemento que es máximo o mínimo global de la función.

- **Óptimo de Pareto:** Este término aparece cuando nos enfrentamos a problemas de optimización de más de una variable y con restricciones.

En estos casos no todas las soluciones son viables. Y más aún, los *óptimos de Pareto* hacen referencia a soluciones en las que no se puede mejorar más los valores de una variable, sin empeorar alguna de las otras condiciones.

Es decir que más que alcanzar una solución única, lo que conseguimos es definir una frontera de soluciones equilibradas (*frente de Pareto*) (**Fig.3.1**) donde no es posible encontrar una solución que mejore en ningún sentido sin empeorar en otro.

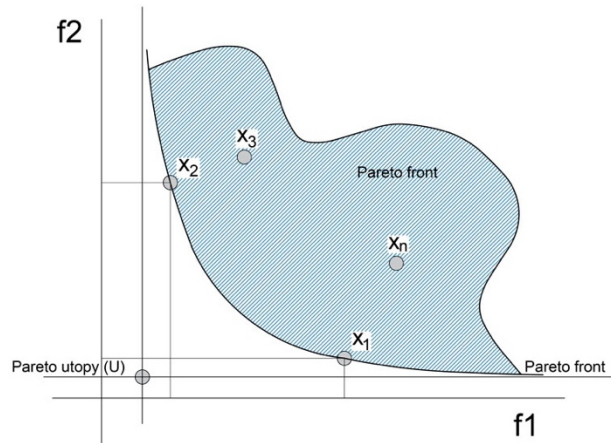


Figura. 3.1. Frente de Pareto de una función con dos variables. Elaboración propia.

Una vez definidos todos estos conceptos, en la figura siguiente (**Fig. 3.2**) podemos ver un ejemplo de lo que sería un fragmento de una función cualquiera. En esta figura podemos ver múltiples *máximos* y *mínimos locales*. Y marcados en rojo podemos observar lo que serían los valores *máximos* y *mínimos globales*. Dado que no se trata del dominio completo de la función, sino de un fragmento acotado, es interesante remarcar como el *mínimo global* coincide con el límite del dominio de la función.

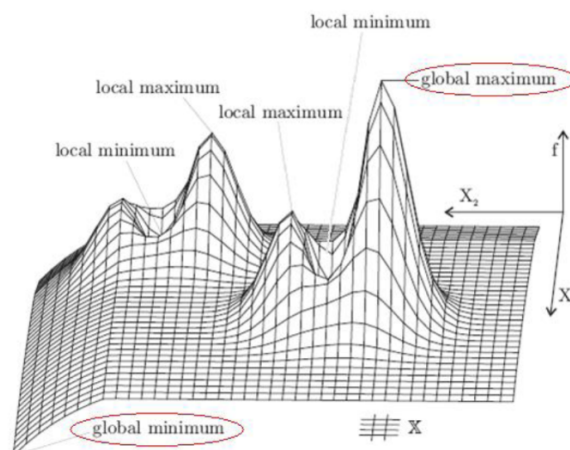


Figura. 3.2. Fragmento de una función con múltiples máximos y mínimos. Elaboración Propia.

En lo que a clasificación se refiere, la gran variedad de métodos de optimización existentes da lugar a multitud de esquemas diferentes según si se

clasifican en función del sistema que utilizan, el tipo de espacio de búsqueda sobre el que trabajan, etc.

A continuación, podemos ver un intento incompleto de clasificación (**Tabla.3.1**) de los métodos de optimización más representativos en función del sistema de búsqueda que utilizan.

MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN				
Métodos tradicionales		Heurísticos modernos		
Búsqueda local	Construcción de soluciones	Deterministas	Probabilísticos	
<i>Steepest descent</i>	Branch and Bound	Tabú Search	Una solución	Basados en población
<i>Steepest ascent</i>				
<i>Newton</i>	Divide and conquer		<i>Random search/Random walk</i> <i>Stochastic hill-climbing</i> <i>Simulated annealing</i>	Evolutionary algorithms: Genetic algorithms Evolutionary programming Evolution strategies Genetic programming Particle swarm optimization Ant colony optimization Memetic algorithms Cultural algorithms
<i>Quasi Newton:</i>				
<i>Davidon-Fletcher-Powell</i>				
<i>Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno</i>				
<i>Gradiente conjugado:</i>				
<i>Fletcher-Reeves</i>				
<i>Polak-Ribiere</i>				
<i>Simplex-Nelder and Mead</i>				

Tabla 3.1. Clasificación métodos de optimización. Elaboración Propia.

3.2. Métodos tradicionales

Siguiendo el esquema de la **Tabla 3.1**, dentro de los métodos tradicionales encontraríamos una primera subdivisión en función de si se trata de algoritmos de optimización local o global.

Por un lado, los **algoritmos de búsqueda local** son métodos basados principalmente en la búsqueda de valores extremos de la función, y que se sirven básicamente de la utilización de ecuaciones diferenciales y gradientes para la resolución de problemas. El más destacado es el método **Newton**, (también conocido como método de **Newton-Raphson**) que es un método iterativo numérico simple, que se utiliza para encontrar las raíces o ceros de las funciones basándose en el uso de ecuaciones diferenciales.

En esta primera clasificación también podríamos destacar el algoritmo **Simplex**, utilizado en la optimización de problemas de programación lineal. Este método, perteneciente a los algoritmos de búsqueda directa, define el espacio de búsqueda como los vértices de una figura geométrica de N-dimensiones. En cada iteración el algoritmo evalúa la función en los N vértices y desplaza el espacio de búsqueda hacia el punto óptimo.

El otro gran grupo dentro de los algoritmos clásicos lo formarían los **algoritmos llamados constructivos**, más orientados hacia la **optimización global**. Éstos se caracterizan por descomponer el problema inicial en subespacios de búsqueda que se van examinando de forma aislada para finalmente obtener como solución el valor más óptimo de los encontrados. Quizás el ejemplo más claro de estos algoritmos sea **Divide and Conquer** (Divide y vencerás), basado en la resolución recursiva de un problema dividiéndolo en dos o más subproblemas de igual tipo o similar.

Otro ejemplo de este tipo de métodos sería el llamado **Branch and Bound**. Este algoritmo de búsqueda general inicia el proceso considerando el espacio completo del problema original, dando lugar a lo que se denomina como *problema raíz*. A continuación, se le aplican los procedimientos de búsqueda del límite inferior y límite superior entre los que se encuentran las soluciones locales al problema.

En caso de coincidir, el proceso termina puesto que se ha alcanzado la solución óptima. De no ser así se divide el espacio de búsqueda en dos, de forma que obtenemos dos subproblemas hijos del nodo raíz. Así sucesivamente se va generando un árbol de subproblemas. Es importante tener en cuenta que el hecho de encontrar una solución óptima a alguno de estos subproblemas, no garantiza que se trate de la solución óptima para el problema raíz. El proceso continúa hasta que todos los subproblemas se hayan resuelto o se hayan "*podado*" (descartado) por ofrecer unos límites que se alejan de las soluciones óptimas obtenidas en otras partes del árbol de sub-problemas. Al final del proceso, lo que obtenemos es una solución que puede ser la óptima del problema raíz, o al menos un umbral entre la mejor solución y los límites de los nodos no resueltos.

3.3. Métodos Modernos

Siguiendo con la clasificación encontraríamos otro gran grupo de métodos de optimización más modernos, comúnmente llamados **métodos heurísticos**. Estos algoritmos se pueden aplicar a funciones *simples* donde se podrían utilizar los

métodos clásicos antes descritos, pero donde realmente demuestran su utilidad es en funciones con un espacio de soluciones demasiado grande o con muchas dimensiones. En estos casos no resulta eficiente recorrer todas las posibles soluciones en busca de la óptima. Es necesario utilizar técnicas más *creativas* que, a partir de unas pequeñas muestras y de la evolución de las mismas, puedan *decidir* en qué regiones es más probable encontrar la solución al problema.

Dentro de este grupo podríamos hacer una primera gran distinción a partir del patrón de conducta utilizado. Así pues, se generarían dos grandes grupos: por un lado los **métodos deterministas** en los que el espacio de búsqueda se explora siguiendo un patrón concreto, y de los que la búsqueda **Tabú** sería un claro ejemplo. Este método parte de un punto del espacio de búsqueda y analiza las soluciones vecinas en busca de la óptima, almacenando todas ellas en un registro de soluciones. A partir de los resultados, el patrón de conducta es siempre el mismo, y consiste en desplazarse siempre hacia la solución óptima, sin aceptar una solución de peor categoría excepto para evitar volver a espacios de búsqueda que ya se hayan explorado. Este método permite escapar de soluciones locales, así como definir una nueva posible clasificación de los algoritmos de optimización en función de si trabajan con memoria (como en este caso, en el que todas las soluciones obtenidas se almacenan en un registro) o si no lo hacen, de manera que corren el riesgo de explorar una y otra vez el mismo espacio de búsqueda, y recaer una y otra vez en las mismas soluciones.

A parte de los algoritmos deterministas, el otro gran grupo en el que se dividen los sistemas de búsqueda heurísticos son los **métodos estocásticos** que, en contra de los deterministas, intentan aportar un mayor grado de aleatoriedad a la búsqueda, de manera que esta se aproxime más a un sistema de búsqueda probabilístico que no a uno de búsqueda secuencial. Este último grupo es el que más auge ha tenido en las últimas décadas gracias sobre todo a la aparición de procesadores cada vez más potentes que permiten realizar cálculos complejos con un coste de tiempo cada vez más pequeño. Dentro de esta categoría se produce una nueva diferenciación en función de si el algoritmo inicia la búsqueda a partir de un único punto de partida, o si por el contrario se dedica a observar una población de posibles soluciones.

El **Stochastic Hill-climbing** es el algoritmo de búsqueda más utilizado dentro de los métodos que utilizan un único punto de partida. Se divide en tres pasos: primero empieza en un estado generado al azar. El siguiente paso es desplazarse repetidas veces hacia el vecino que ofrezca un valor mejor. Una vez alcanzado un mínimo local el proceso se reinicia desde una nueva posición generada de forma aleatoria. Para evitar quedar atrapado en los valores locales se define un parámetro denominado *Max_Flips* que limita el número de desplazamientos que pueden realizarse entre cada reinicio. El proceso se repite tantas veces como sea necesario hasta conseguir una solución.

Otro método característico dentro de este tipo de algoritmos sería el **Simulated Annealing** que es un método consistente en imitar el proceso de cristalización de los sólidos. En la realidad, este sistema consiste en calentar un material y luego enfriarlo (como por ejemplo hierro o cristal) normalmente para endurecerlo y hacer que el material sea menos frágil. *Simulated Annealing* intenta imitar este proceso para tratar de obtener una solución óptima al problema. La técnica consiste en imaginar la función matemática como si se tratase de una representación de la energía cinética de las partículas que la componen. Así pues, si calentamos suficientemente el sólido la posición de sus moléculas (o sea nuestra solución) podrá superar las barreras de potencial y saltar a un nuevo estado (es decir superar un mínimo local y desplazarse a una nueva zona del espacio de búsqueda). Basándose en esto, la técnica prueba variaciones al azar de la solución actual. La probabilidad de aceptar una solución peor como nueva solución disminuye con el tiempo (enfriamiento). Cuanto más lentamente se produzca el enfriamiento, más probable será que el algoritmo encuentre una solución óptima o casi óptima.

Por otro lado, dentro de los **algoritmos basados en poblaciones de soluciones** encontramos una gran variedad de métodos divididos en dos grupos: los que trabajan con memoria y los que no. En el lado de los que *trabajan sin memoria* encontramos los **Evolutionary Algorithms**, que son métodos que intentan imitar el proceso de selección natural de la población. En este grupo es donde se encontrarían definidos los **Algoritmos Genéticos** (que serán tratados en profundidad en los capítulos siguientes y que constituyen la base de esta tesis). A grandes rasgos, estos métodos parten de una población de soluciones y las hacen *evolucionar* a base de combinarlas entre sí. Así mismo añaden aleatoriedad al sistema mediante un proceso de *mutación*. Pero su sistema de selección se basa meramente en el *elitismo* y sin ningún tipo de memoria, de forma que prevalecen las soluciones óptimas frente a las otras que son desechadas.

Por otro lado, dentro de los *algoritmos con memoria*, encontramos métodos como el **Particle Swarm Optimization** (enjambre de partículas) o el **Ant Colony Optimization** (colonia de hormigas) que consisten en poblaciones de individuos (en este caso soluciones) organizados, que tienen en cuenta los logros obtenidos por sus predecesores y que se organizan para cooperar entre sí. Por ejemplo, en el caso del de la *Colonia de hormigas* que define un paradigma que intenta imitar el comportamiento de las hormigas cuando están buscando un camino en la colonia que les lleve a una fuente de comida. A medida que las hormigas se van desplazando hacia posiciones óptimas van marcando el camino mediante feromonas. Esta información sirve de guía para las siguientes hormigas que identificarán las zonas óptimas ya que serán las que más cantidad de feromonas tendrán, mientras que las secciones menos fructíferas apenas ofrecerán rastros. Así pues, imitando este sistema natural, obtendremos un método distribuido en el que un conjunto de agentes individuales cooperan para llevar a cabo un objetivo común: encontrar una solución óptima.

Dentro de este grupo también se encuentran métodos similares como los **Cultural Algorithms**, que intentan imitar la evolución cultural. De manera que las sucesivas generaciones de individuos se enriquecen con el conocimiento del espacio de búsqueda que se obtiene durante el proceso de exploración. Esta información se transmite de generación en generación para así encontrar al final la solución óptima. Así como los **Memetic Algorithms**, que combinan técnicas de los *Evolutionary Algorithms* y *Conjugate Gradients*. Es decir, de la búsqueda de poblaciones y la mejora local, y por ello también son considerados como algoritmos genéticos híbridos.

Queda patente pues la gran variedad de métodos de optimización existentes. En definitiva, el tipo de algoritmo utilizado depende en gran medida del tipo de espacio de búsqueda con el que nos enfrentamos ya que métodos existentes hay muchos y cada uno goza de ciertas virtudes y padece ciertas debilidades.

3.4. Computación evolutiva

Retomando el hilo de la clasificación utilizada nos encontramos con un grupo de algoritmos de optimización global, estocásticos y basados en población denominados **Algoritmos Evolutivos**.

Estos métodos de optimización obtienen su nombre de grupo de su rasgo en común que consiste en intentar imitar los procesos naturales de evolución genética planteados por Darwin. Haciendo referencia a lo dicho por M. Gestal podríamos explicar la existencia de esta rama como la respuesta a una pregunta muy simple: “*Si algo funciona bien, ¿por qué no imitarlo?*”.

Durante millones de años las diferentes especies han estado evolucionando y compitiendo entre sí para tratar de convertirse en individuos cada vez más óptimos y mejor adaptados. Partiendo de esa base, lo que pretenden los Algoritmos Evolutivos es arrancar desde una población de potenciales soluciones a un problema y mediante sucesivos cruces, mutaciones y procesos de selección de los individuos óptimos, converger hacia lo que sería el óptimo global del problema inicial (**Fig. 3.3**).

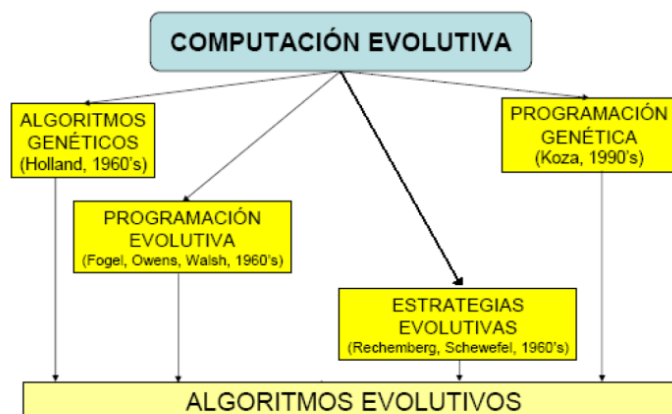


Figura. 3.3. Clasificación de los Algoritmos Evolutivos

A grandes rasgos, las diferencias internas dentro del grupo de los Algoritmos Evolutivos hacen referencia al tipo de individuos con los que trabajan o a la forma en la que se rigen para hacer evolucionar a sus poblaciones. Dejando a un lado los algoritmos genéticos, puesto que son el tema central del capítulo, nos quedan tres grandes grupos a definir.

3.4.1. Programación Evolutiva

La **Programación Evolutiva** surgió de las manos de David Fogel en la década de los sesenta en E.E.U.U. como alternativa a la creación de redes neuronales y a la programación heurística. Ambos métodos se centran en emular a los humanos como los organismos más inteligentes y avanzados creados por la evolución. Fogel pretendía utilizar la evolución simulada como proceso de aprendizaje destinado a generar inteligencia artificial.

Durante estos años se ha aplicado al aprendizaje de los autómatas de estados finitos y, más recientemente, a la optimización numérica. Este método se caracteriza por tener un gran marco de trabajo. Admite cualquier tipo de representación o mutación, aunque a grandes rasgos utiliza vectores de números reales y la perturbación gaussiana como tipo de mutación. Selecciona a los padres de manera determinística y a sus supervivientes de forma probabilística. De esta técnica cabe destacar que no admite la recombinación y que posee una gran auto-adaptación de la mutación a los parámetros estándar. Es un híbrido de los métodos que veremos a continuación, es decir, muchas de sus características serán comunes a los otros métodos.

3.4.2. Estrategias Evolutivas

Las **Estrategias Evolutivas** fueron introducidas por Rechenberg en la Alemania de los años sesenta y setenta. Comparten con la Programación Evolutiva el tipo de representación codificada con números reales, la mutación gaussiana y la fácil auto-adaptación. Y se diferencian de ella por su rapidez, así como porque admiten recombinación discreta o intermedia. También difieren en el modo uniforme y aleatorio de seleccionar a los padres, y por los métodos de selección de supervivientes.

Estos métodos imitan la evolución biológica, más concretamente el proceso de selección natural y el principio de "supervivencia del más fuerte". Son métodos que priorizan la selección y la mutación de las soluciones como sistema para hacer evolucionar a la población, dejando en segundo plano los métodos de cruce. Su aplicación más notoria es la optimización numérica.

3.5. Programación Genética

La **Programación Genética** apareció por primera vez de la mano de Koza a principios de los noventa. Es un método relativamente nuevo que se inspira en la evolución biológica para encontrar programas destinados a realizar una tarea concreta (resolver un problema). Es un método automatizado que recibe la información de un nivel superior que le indica que hay un problema y automáticamente crea un programa para solucionar dicho problema. Tradicionalmente se ha aplicado a tareas de aprendizaje de autómatas tales como predecir o clasificar.

La programación genética igual que los algoritmos genéticos se caracteriza por seleccionar a los padres mediante *fitness*, así como porque en la selección de supervivientes se produce una sustitución generacional. Compite con las redes neuronales y sus derivados y necesita poblaciones enormes (miles de individuos) para llevarse a cabo. Se representa mediante estructuras en forma de árboles, y el proceso de recombinación se produce mediante el intercambio de subárboles. Por otro lado, la mutación, que es posible pero no necesaria, se realiza mediante cambios aleatorios en los árboles.

3.6. Algoritmos Genéticos

Los **Algoritmos Genéticos** (AG's de ahora en adelante) son métodos adaptativos que pueden utilizarse para resolver problemas reales de búsqueda y de optimización basándose en imitar los procesos genéticos de los organismos vivos.

Los principios básicos de los AG's se atribuyen a Holland en 1975. En gran parte, su auge y proliferación en los últimos tiempos se debe a su carácter robusto, que les permite abordar con éxito gran variedad de problemas de áreas muy diferentes, incluyendo aquellos en los que otros métodos encuentran dificultades. Además de esto, los AG's ofrecen otras características interesantes como el hecho de que, aunque no se pueda garantizar que el AG encuentre la solución óptima al problema, existe la certeza empírica de que ofrecerá una solución de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo. Es cierto que no son la respuesta perfecta para abordar todos los problemas. Existen situaciones que cuentan con métodos concretos más rápidos y efectivos que los AG's.

Aun así, otra de las ventajas que ofrecen los AG's es que permiten mejorar estas técnicas específicas hibridándolas con la metodología de los AG's.

Así pues, los AG's se basan en imitar el proceso genético de los seres vivos como se ha dicho anteriormente. Parten de una población inicial de individuos generados al azar de forma que cada uno de ellos representa una posible solución al problema dado. A cada uno de estos individuos se les debe asignar un valor que represente su grado de adaptación, o dicho de otra forma, cómo de buena es esa solución para el problema.

Así pues, del mismo modo que en la naturaleza los individuos mejor dotados (es decir, los que ofrezcan las mejores soluciones) serán los que más probabilidades tendrán de ser seleccionados para reproducirse.

Mientras que los individuos peor adaptados (los que ofrezcan peores soluciones) tendrán más difícil el propagar su material genético a las nuevas generaciones. Sucesivamente cada nueva generación contará con una mayor proporción de buenas características de forma que, si el AG ha sido diseñado correctamente, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

3.6.1. Algoritmo Genético Simple o Canónico

Bajo la explicación tan simple antes expuesta subyace un proceso probabilístico que puede llegar a ser muy complejo. El primer paso para poder explicar con más detalle la sistemática que utilizan los AG's es plantear la versión más sencilla posible de éstos denominada **Algoritmo Genético Canónico**. A continuación en la **figura 3.4** podemos ver el pseudocódigo de lo que sería el Algoritmo Genético Simple o Canónico.

```

BEGIN /*Algoritmo genético Simple*/
    Generar una población inicial
    Computar la función de evaluación de cada individuo
WHILE NOT Terminado DO
    BEGIN /*Producir nueva generación*/
        FOR Tamaño población/2 DO
            BEGIN /*Ciclo reproductivo*/
                Seleccionar dos individuos de la anterior generación,
                para el cruce (probabilidad de seleccionar proporcional a la función de
                evaluación del individuo).
                Cruzar con cierta probabilidad los dos individuos
                obteniendo dos descendientes.
                Mutar los dos descendientes con cierta probabilidad
                Computar la función de evaluación de los dos
                descendientes mutados
                Insertar los dos descendientes mutados en la nueva
                generación
            END
        IF la población ha convergido THEN
            Terminado:= TRUE
    END
END

```

Figura. 3.4. Algoritmo Genético expresado de forma abstracta como un conjunto de métodos

Al observar la **figura 3.4** comprobamos que representa claramente el proceso descrito con anterioridad. Partimos de una *población inicial* de individuos a los que se

les asigna un valor mediante una *función de adaptación (función de fitness)* que representa cómo de buena es la solución que proponen.

El cuerpo del algoritmo es un bucle que realiza las mismas tareas en tanto que no se cumpla la condición de convergencia previamente impuesta: en primer lugar selecciona los individuos progenitores (*función de selección*).

Seguidamente se procede a cruzar estos individuos de forma que intercambien parte de sus *genes (función de cruce)* para obtener la nueva generación de descendientes.

A continuación, introduce un determinado grado de mutación sobre estos nuevos individuos (*función de mutación*) y finalmente inserta y reajusta el tamaño o número de individuos que conforman la población para que esta no crezca de forma desmesurada (*función de inserción*).

Este proceso se repetirá en tanto que no se cumpla la *condición de parada* impuesta previamente.

De nuevo esta es una explicación muy simple del funcionamiento de los AG's, pero que nos permite expresarlos como un conjunto de procesos más o menos sencillos (**Fig.3.5**).

```

BEGIN (
    Población inicial
    Función de adaptación
DO (
    Función de selección
    Función de cruce
    Función de mutación
    Función de adaptación
    Función de inserción
    ) WHILE (Condición de parada == False);
END ;

```

Figura 3.5. Algoritmo Genético expresado de forma abstracta como un conjunto de métodos

Para no tener que remitir constantemente al lector a los anexos y poder continuar con los objetivos propuestos daremos unas breves pinceladas sobre los aspectos más importantes y característicos de los AG's. Con esto será suficiente para poder proseguir con el hilo conductor de la tesis y poder comprender las pruebas y resultados del siguiente capítulo (Capítulo 4 Implementación y pruebas básicas). Aun así, quedarán referenciados los capítulos del Anexo donde se amplía la información

que se está tratando por si el lector quiere conocer más en profundidad alguno de estos aspectos.

3.6.2. Población inicial

En primer lugar, deberíamos plantearnos la codificación a utilizar. Como se ha dicho anteriormente, cada individuo representa una posible solución, pero no es la solución misma. Cada individuo estará definido como un cromosoma compuesto por uno o varios genes que representan las diferentes variables que componen el problema. Así pues, cada individuo estaría representado no por el valor de la solución que aporta, sino por el valor que han de adoptar cada una de las variables y que dan como resultado una solución al problema.

Partiendo de esta base, uno de los primeros problemas que se nos plantea es cómo codificar dichos genes o variables. Realmente cualquier codificación puede ser válida: caracteres, números reales, binario, etc. La codificación binaria es una de las más utilizadas porque ofrece una gran flexibilidad a la hora de codificar y trabajar con múltiples variables, aunque también tiene aspectos negativos como el hecho de que una simple mutación en un único bit puede dar lugar a un individuo totalmente diferente. Esto en sí mismo no es un efecto definitivamente negativo (puesto que añade diversidad y permite explorar mejor el espacio de búsqueda) pero puede alejarte radicalmente de la zona correcta de búsqueda de forma inesperada.

Una vez decidida la codificación más adecuada (y la longitud de la misma, en el caso de tratarse de codificación en binario), la siguiente pregunta que surge es cuántos individuos deben formar esta población inicial. Algunos autores (De Jong) se decantan por un número prudente como $n=50$ para codificaciones reales. Otros estudios sugieren que si la población está codificada en binario con longitud L sería aconsejable utilizar entre L y $2L$ individuos. Por último, solo queda decidir cómo se escogen estos individuos primigenios: la opción más común suele ser hacerlo al azar mediante una distribución uniforme.

Partiendo del esquema del algoritmo canónico y una vez decidida la codificación más adecuada, el primer paso a realizar es la generación de la población inicial. Este proceso sencillo a simple vista, tiene toda una serie de implicaciones importantes a tener en cuenta.

El primer problema que se ha de plantear a la hora de generar la población inicial es el tamaño de la misma. Parece evidente que una población demasiado pequeña no podrá ser capaz de cubrir de forma correcta el espacio de búsqueda. Por otro lado, una población demasiado grande aumentaría el coste computacional del AG haciéndolo poco competitivo frente a otros métodos de optimización.

Por último, una vez decidido el alfabeto, la codificación de los genes y el tamaño de la población inicial sólo cabe preguntarse el método correcto para escoger esos primeros elementos. Generalmente se escogen de forma aleatoria con probabilidad uniforme, aunque también sería posible escogerlos como el resultado de alguna técnica previa de optimización local. En el caso de escoger individuos de forma no aleatoria se comprueba que el AG converge de forma más rápida. Pero en ocasiones esta *convergencia prematura* no es beneficiosa porque se realiza sobre óptimos locales.

3.6.3. Codificación

En primer lugar, y quizás uno de los factores más determinantes a la hora de que el AG funcione correctamente, está en determinar la codificación más adecuada.

Como ya se ha dicho con anterioridad los individuos que componen la población de un AG son representaciones de soluciones posibles al problema, pero, en general, no son los valores de dichas soluciones. La explicación más sencilla a esto es que raramente se trate de un problema de optimización con una única variable o restricción. Los AG's son aplicables tanto en problemas con una única restricción como con múltiples restricciones en cuyo caso muchas de las soluciones generadas serán posibles, y quizás serían soluciones óptimas para algunas de las variables, pero no serán válidas porque violarán algunas de las restricciones.

Representar esto mediante un único valor sería del todo imposible ya que provocaría que se perdiera gran cantidad de información. De manera que en general, cada uno de los individuos estará definido por un conjunto de valores representativos de cada una de las restricciones o variables del problema a los que denominaremos genes. Así pues, a imagen y semejanza de los seres vivos, cada uno de los individuos estará compuesto por un conjunto de genes que darán lugar a los cromosomas que definirán las características del individuo.

Durante los primeros años de vida de los AG's, el alfabeto escogido para representar estos genes era el binario ya que se adapta muy bien al tipo de operaciones que se han de realizar dentro de los AG's. A pesar de esto, en ocasiones provoca problemas (sobre todo a la hora de introducir las mutaciones, ya que una pequeña variación de un solo bit provoca una gran variación del individuo en sí). Esto puede desplazarte muchísimo del espacio de búsqueda de forma que pasas de acercarte a una solución óptima a estar explorando una sección totalmente nueva.

En sí mismo este efecto no tiene por qué ser siempre malo ya que puede ayudar a escapar de óptimos locales, pero es algo que debe darse en contadas

ocasiones. Para evitar, en la medida de lo posible, estos efectos se suele utilizar el código Gray para representar los genes en binario.

Esta codificación tiene la particularidad de que su distancia de *Hamming* entre dos números consecutivos es 1, o dicho de otra forma: que para pasar de la secuencia de bits que representan un valor dado, a la que representa el valor siguiente sólo es necesario modificar un bit.

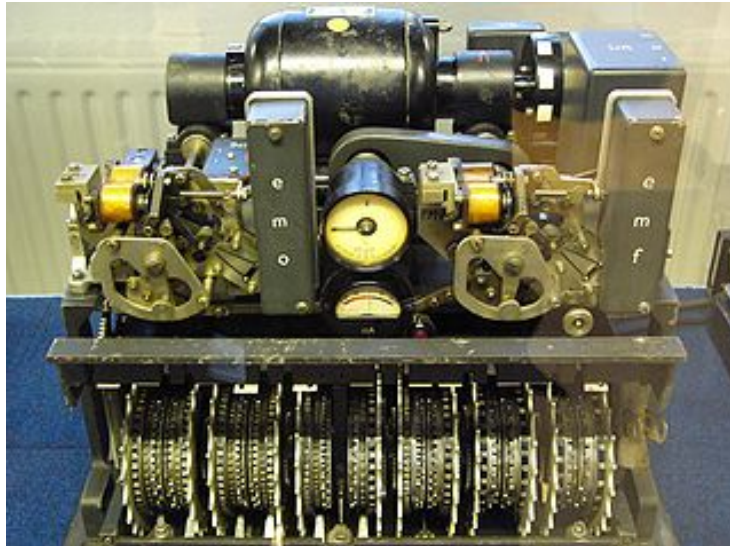


Figura 3.6. Criptógrafo. Máquina alemana de cifrado Lorenz utilizada en la 2ª guerra mundial

Decimal	Gray	Binario
0	000	000
1	001	001
2	011	010
3	010	011
4	110	100
5	111	101
6	101	110
7	100	111

Tabla 3.2. Representación decimal, binaria y en codificación Gray de los 8 primeros números naturales

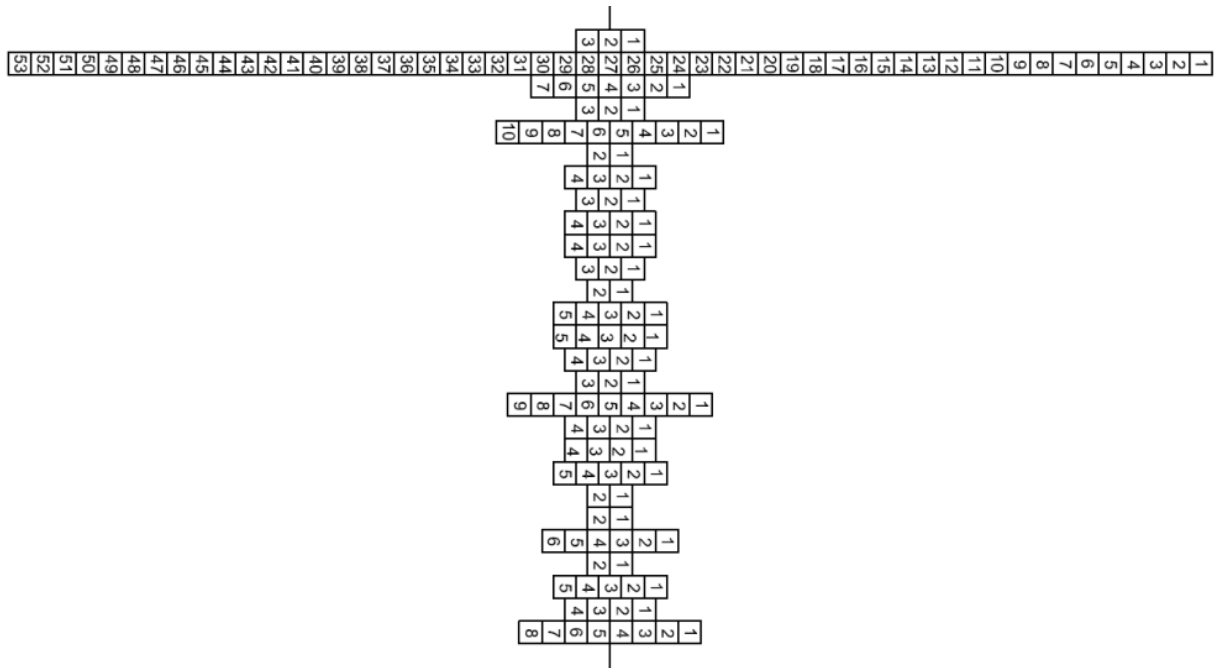


Figura 3.7. Rueda de Jefferson para la generación de soluciones de elementos de una sección viaria.

Elaboración propia

ELEMENTO (Gen)	POSICION N	ALELOS POSIBLES	CODIGO	NÚMERO DECIMAL
Arbolado	1	8	AR	1..8
Mobiliario Urbano	2	4	MU	9..12
Canalización telecomunicación	3	5	CT	13..17
Conductores telecomunicación	4	2	KT	18..19
Agua potable	5	6	AP	20..25
Cimentación báculo alumbrado	6	2	ZB	26..27
Conductor media tensión	7	2	CM	28..29
Conductor baja tensión	8	5	CB	30..34
Canalización baja tensión	9	4	KB	35..38

Canalización media tensión	10	4	KM	39..42
Luminarias (Lámparas)	11	9	LA	43..51
Luminarias (Proyector)	12	3	PA	52..54
Báculos (columnas farolas)	13	4	BA	55..58
Pozos de registro	14	5	PR	59..63
Red horizontal saneamiento	15	5	RS	64..68
Tapas pozos registro	16	2	TS	69..70
Imbornales	17	3	IM	71..73
Bordillos	18	4	BR	74..77
Rigolas	19	4	RG	78..81
Señalización horizontal	20	3	SH	82..84
Señalización vertical	21	4	SV	85..88
Soporte Vertical señal	22	2	PV	89..90
Pavimento aceras	23	10	PZ	91..100
Infraestructura de gas	24	3	IG	101..103
Banda de aparcamiento	25	7	PK	104..110
Firme (combinación PG3)	26	51	FR	111..161
Capa de rodadura	27	3	CR	162..164

Tabla 3.3. Individuos integrantes en la sección viaria y variabilidad de los mismos

A parte de esto, también es posible representar los genes mediante números enteros, reales (*real-encoded*), cadenas de letras o cualquier otro tipo de estructura. De esta forma, la longitud l de las cadenas que conforman los cromosomas de un individuo dependerá del alfabeto escogido y del número de genes que lo componen.

Es importante destacar que el número de genes puede ser fijo o variable; es decir, puede tratarse de un problema en el que el número de variables a tener en cuenta no cambia. O por el contrario, puede tratarse de un problema en el que el sistema va *aprendiendo* por sí mismo de manera similar a lo que ocurre con las redes neuronales, en cuyo caso el número de estados del sistema va variando.

No. 4356 April 25, 1953 NATURE 737

equipment, and to Dr. G. E. R. Deacon and the captain and officers of R.R.S. *Discovery II* for their part in making the observations.

¹ Young, F. B., Gerrard, H., and Jevons, W., *Phil. Mag.*, 40, 149 (1920).

² Longuet-Higgins, M. S., *Mon. Not. Roy. Astr. Soc., Geophys. Supp.*, 5, 285 (1949).

³ Von Arx, W. S., *Woods Hole Papers in Phys. Oceanog. Meteor.*, 11 (3) (1950).

⁴ Ekman, V. W., *Arkiv. Mat. Astron. Fysik. (Stockholm)*, 2 (11) (1905).

MOLECULAR STRUCTURE OF NUCLEIC ACIDS

A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid

WE wish to suggest a structure for the salt of deoxyribose nucleic acid (D.N.A.). This structure has novel features which are of considerable biological interest.

A structure for nucleic acid has already been proposed by Pauling and Corey¹. They kindly made their manuscript available to us in advance of publication. Their model consists of three intertwined chains, with the phosphates near the fibre axis, and the bases on the outside. In our opinion, this structure is unsatisfactory for two reasons: (1) We believe that the material which gives the X-ray diagrams is the salt, not the free acid. Without the acidic hydrogen atoms it is not clear what forces would hold the structure together, especially as the negatively charged phosphates near the axis will repel each other. (2) Some of the van der Waals distances appear to be too small.

Another three-chain structure has also been suggested by Fraser (in the press). In his model the phosphates are on the outside and the bases on the inside, linked together by hydrogen bonds. This structure as described is rather ill-defined, and for this reason we shall not comment on it.

We wish to put forward a radically different structure for the salt of deoxyribose nucleic acid. This structure has two helical chains each coiled round the same axis (see diagram). We have made the usual chemical assumptions, namely, that each chain consists of phosphate diester groups joining β -D-deoxy-ribofuranose residues with 3',5' linkages. The two chains (but not their bases) are related by a dyad perpendicular to the fibre axis. Both chains follow right-handed helices, but owing to the dyad the sequences of the atoms in the two chains run in opposite directions. Each chain loosely resembles Furberg's² model No. 1; that is, the bases are on the inside of the helix and the phosphates on the outside. The configuration of the sugar and the atoms near it is close to Furberg's 'standard configuration', the sugar being roughly perpendicular to the attached base. There

is a residue on each chain every 3.4 Å. in the z-direction. We have assumed an angle of 36° between adjacent residues in the same chain, so that the structure repeats after 10 residues on each chain, that is, after 34 Å. The distance of a phosphorus atom from the fibre axis is 10 Å. As the phosphates are on the outside, cations have easy access to them.

The structure is an open one, and its water content is rather high. At lower water contents we would expect the bases to tilt so that the structure could become more compact.

The novel feature of the structure is the manner in which the two chains are held together by the purine and pyrimidine bases. The planes of the bases are perpendicular to the fibre axis. They are joined together in pairs, a single base from one chain being hydrogen-bonded to a single base from the other chain, so that the two lie side by side with identical z-coordinates. One of the pair must be a purine and the other a pyrimidine for bonding to occur. The hydrogen bonds are made as follows: purine position 1 to pyrimidine position 1; purine position 6 to pyrimidine position 6.

If it is assumed that the bases only occur in the structure in the most plausible tautomeric forms (that is, with the keto rather than the enol configurations) it is found that only specific pairs of bases can bond together. These pairs are: adenine (purine) with thymine (pyrimidine), and guanine (purine) with cytosine (pyrimidine).

In other words, if an adenine forms one member of a pair, on either chain, then on these assumptions the other member must be thymine; similarly for guanine and cytosine. The sequence of bases on a single chain does not appear to be restricted in any way. However, if only specific pairs of bases can be formed, it follows that if the sequence of bases on one chain is given, then the sequence on the other chain is automatically determined.

It has been found experimentally^{3,4} that the ratio of the amounts of adenine to thymine, and the ratio of guanine to cytosine, are always very close to unity for deoxyribose nucleic acid.


It is probably impossible to build this structure with a ribose sugar in place of the deoxyribose, as the extra oxygen atom would make too close a van der Waals contact.

The previously published X-ray data^{4,5} on deoxyribose nucleic acid are insufficient for a rigorous test of our structure. So far as we can tell, it is roughly compatible with the experimental data, but it must be regarded as unproved until it has been checked against more exact results. Some of these are given in the following communications. We were not aware of the details of the results presented there when we devised our structure, which rests mainly though not entirely on published experimental data and stereochemical arguments.

It has not escaped our notice that the specific pairing we have postulated immediately suggests a possible copying mechanism for the genetic material.

Full details of the structure, including the conditions assumed in building it, together with a set of co-ordinates for the atoms, will be published elsewhere.

We are much indebted to Dr. Jerry Donohue for constant advice and criticism, especially on interatomic distances. We have also been stimulated by a knowledge of the general nature of the unpublished experimental results and ideas of Dr. M. H. F. Wilkins, Dr. R. E. Franklin and their co-workers at



This figure is purely diagrammatic. The two ribbons symbolise the two phosphate-sugar chains, and the horizontal rods the pairs of bases holding the chains together. The vertical line marks the fibre axis.

Figura 3.8. Estructura ADN. Revista Nature, 25 abril 1953. Nº4356. Pág.737

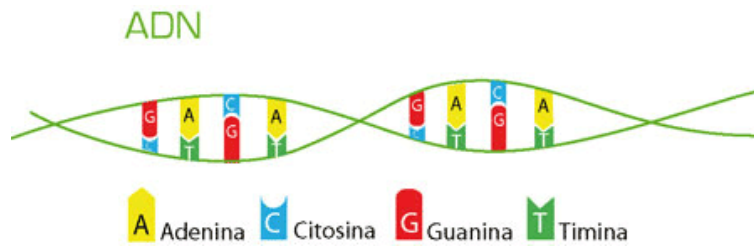


Fig. 3.9. Glosario de términos codificación molécula ADN. Instituto Nacional de medicina genómica. Secretaría de Salud. México

A modo de resumen y al mismo tiempo para definir más claramente algunos conceptos importantes utilizaremos un ejemplo simple de optimización. Supongamos que queremos optimizar el coste de fabricar un envase en función de la cantidad de aluminio que se necesita para construirlo. Así pues, los genes de estos individuos serán dos: la altura del envase y el diámetro del mismo. Los cromosomas de estos individuos estarían formados por estos genes codificados en binario (**Fig.3.10**).

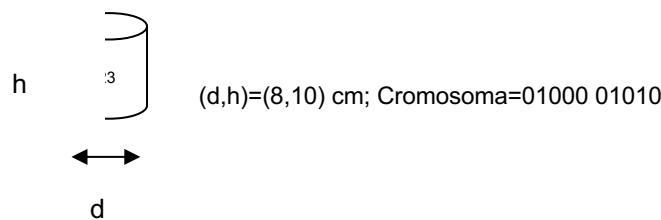


Figura. 3.10. Individuo: bote de aluminio

A la posición concreta de cada gen dentro del cromosoma se le llama *locus* y a su valor concreto se le denomina *alelo*. El conjunto de estos dos cromosomas sería que denominaríamos *genotipo*, a partir de los cuales se podría calcular fácilmente el coste de construir el envase ya que mediante sus genes (altura y diámetro) se puede determinar sin problemas la superficie del mismo. Este coste del envase sería lo que denominaríamos *fenotipo*, y vendría a ser una representación “real” de la combinación de genes que describen al individuo (**Fig.3.11**).

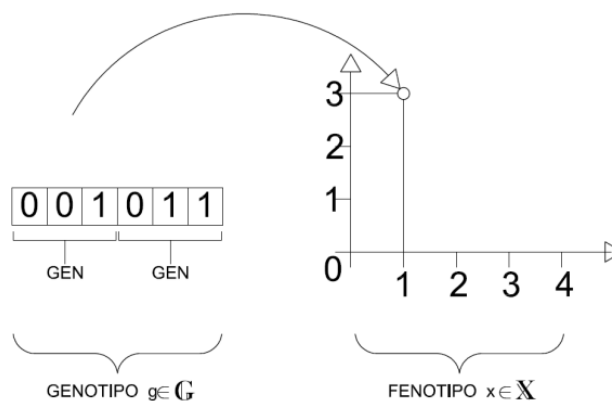


Fig. 3.11. Ejemplo de la relación directa entre genotipo y fenotipo

Durante el proceso propio del AG veremos cómo la población evoluciona y van apareciendo todo tipo de individuos diferentes como se observa en la figura de abajo (**Fig.3.12**) hasta que, si el AG se ha planteado correctamente, se alcance el valor óptimo deseado.

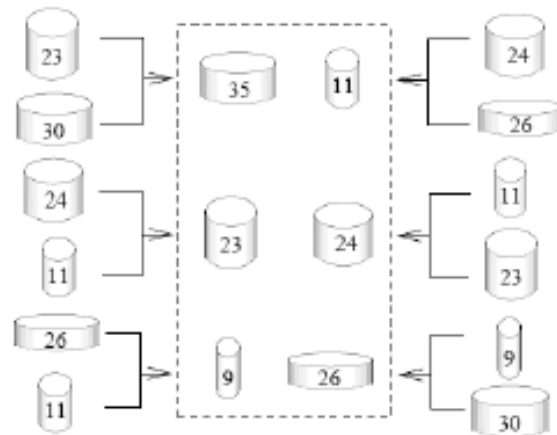


Fig. 3.12. Ejemplo de los diferentes individuos que podrían aparecer

3.6.4. Función de Adaptación o *Fitness*

En la naturaleza, los individuos más adaptados son los que tienen más oportunidades de reproducirse y de que su material genético se propague de generación en generación. Los AG's intentan imitar este proceso y es la función de Adaptación o *Fitness* la encargada de evaluar cómo de "buenos" son los individuos.

Existen multitud de formas de evaluar a los individuos de una población: desde las más simples como la de asignar un valor real que defina cómo de bueno es el individuo comparado con el mejor encontrado hasta la fecha (*Fitness Puro*), hasta normalizar el valor entre 0 y 1 en función de los valores obtenidos por todos y cada uno de los individuos (*Fitness Normalizado*). Además de tener en cuenta posibles penalizaciones puesto que no todos los individuos pueden ser soluciones viables. Pueden incumplir alguna de las restricciones propias del problema y no por ello han de ser descartados sin más (aunque sería una opción posible). Pueden ser conservados aplicándoles algún tipo de hándicap que los penalice frente a los otros individuos viables, pero que los permita evolucionar para facilitar la exploración de los límites del problema.

La función de adaptación o *fitness function* es la encargada de valorar a los individuos que forman la población e indicarnos cómo de buena es la solución que nos ofrecen. Así nosotros podemos escoger a los más aptos para que se reproduzcan y den lugar a las siguientes generaciones. Mientras tanto, los individuos menos

adaptados encontrarán mayores dificultades para que su material genético se propague en las sucesivas generaciones hasta que al final acaben desapareciendo.

No es necesario recalcar la importancia que tiene esta función de *fitness*. Es junto con la codificación escogida los dos factores más decisivos para que un AG funcione correctamente. Lo ideal sería definir funciones de *fitness* que reflejen el valor del individuo de una marea “real” y que verifiquen que para dos individuos que estén próximos en el espacio de búsqueda, el valor de la función de adaptación de éstos esté próximo entre sí también.

Basándonos en lo descrito por Koza, J. R. se pueden definir cuatro tipos de valores de adaptación o *fitness*:

Fitness puro [$r(i,t)$]

Consiste en asignar un valor real que refleje cómo de bueno es el individuo. Esto se consigue comparando el valor que ofrece el individuo con el deseado donde, el valor deseado, es el mejor obtenido hasta la fecha. Así pues, en problemas de maximización el individuo mejor adaptado será el que ofrezca los valores más altos. Mientras tanto, en problemas de minimización, el mejor adaptado ofrecerá los valores más bajos.

Fitness estandarizado [$s(i,t)$]

Parte de la base del *fitness puro* pero añade ciertas variaciones para que, tanto en problemas de maximización como de minimización, el individuo mejor adaptado sea el que ofrezca un valor más próximo a cero. Para esto modifica el *fitness puro* mediante la ecuación siguiente (**ec.3.3**)

$$S(i,t) = \begin{cases} r(i,t) & \text{minimización} \\ r_{\max} - r(i,t) & \text{maximización} \end{cases} \quad (\text{ec. 3.3.})$$

En el caso de problemas de minimización utilizaremos el valor del *fitness puro*. Para problemas de maximización utilizaremos el valor del *fitness puro* restado de una cota máxima r_{\max} que estará representada por el mejor valor obtenido hasta la fecha. Así, en cualquiera de los dos casos, el individuo mejor adaptado será el que ofrezca valores más próximos a cero.

Fitness ajustado [$a(i,t)$]

De nuevo se trata de una mejora del modelo anterior. Mediante la ecuación siguiente (**ec.3.4**) se consigue que los valores obtenidos a partir del *fitness estandarizado* tomen valores entre 0 y uno.

$$a(i,t) = \frac{1}{1 + s(i,t)} \quad (\text{ec. 3.4.})$$

En este caso, el mejor grado de adaptación se conseguirá con valores próximos a 1.

Fitness normalizado [$n(i,t)$]

En los tipos de *fitness* antes presentados sólo se tenía en cuenta el valor de adaptación del individuo en cuestión. Al igual que el *fitness estandarizado*, el *fitness normalizado* utiliza un rango de valores entre 0 y 1, pero en este caso lo hace en relación al resto de las soluciones que ofrece la población (**ec.3.5**)

$$n(i, t) = \frac{a(i,t)}{\sum_{k=1}^N a(k,t)} \quad (\text{ec. 3.5.})$$

De esta forma, un valor de *fitness* próximo a 1 no sólo indica que se trata de una buena solución. Además, indica que es mucho mejor que las otras soluciones ofrecidas por los demás individuos.

Ni que decir tiene que, en la mayoría de los problemas, donde existen multitud de restricciones, definir cómo de bueno es un individuo no resulta tarea fácil. Para empezar una gran parte de los puntos del espacio de búsqueda hacen referencia a posibles soluciones que violan alguno de estos criterios y por tanto no son válidas. En estos casos existen diferentes opciones para tratar de obtener individuos válidos y poder continuar con el proceso.

- Una primera opción que podríamos definir como más *absolutista*, consistiría en asignarles un valor de función de adaptación igual a cero.
- Otra opción sería ignorar que se trata de individuos no válidos y continuar con el proceso de cruce y mutación hasta obtener algún individuo válido.
- Otra posibilidad sería la de penalizar a los individuos que violen alguna de las restricciones con algún factor que estaría definido en función del número de restricciones violadas o al coste de reconstruir dicho individuo de manera que no viole ninguna restricción.
- Por último, en caso de que la función de adaptación sea muy compleja, se podría optar por una *evaluación aproximada* de dicha función. Es decir, se trataría de definir n funciones aproximadas de la función objetivo original, siempre y cuando la evaluación de una función aproximada (más simple que la función original) resulte como mínimo n veces más rápida y por tanto resulte rentable computacionalmente hablando.

Así mismo existen otros problemas intrínsecos de los AG's y que se pueden solventar en parte mediante la redefinición de la función de *fitness*. Es el caso de los problemas derivados de la velocidad de convergencia. Generalmente suele denominarse *convergencia prematura* y surge generalmente porque existen lo que podríamos definir como *súper individuos* (óptimos locales muy superiores al resto de sus valores vecinos), es decir, individuos cuya adaptación al medio es muy superior al resto y que acaban dominando la población puesto que siempre son escogidos para los procesos de cruce.

En el caso de la convergencia prematura se pueden reducir los valores de aptitud que se otorgan a un individuo cuando en la población se observen ciertas cantidades de individuos parecidos (*sharing*). En estos casos la solución no radica únicamente en modificar la función de adaptación. Es interesante también replantearse utilizar un método de selección que no sea meramente elitista como por ejemplo la *selección por ruleta* o algún otro de los que veremos a continuación.

3.6.5. Función de Selección

Como se puede imaginar por su nombre, la función de selección es la encargada de elegir a los individuos que harán de progenitores para la nueva generación. Como en el caso anterior existen diferentes formas de tomar esta decisión.

La más evidente sería la de escoger a los individuos más adaptados pero esto degeneraría en problemas de *diversidad genética*, donde rápidamente aparecerían *súper individuos* que provocarían uno de los grandes problemas que presentan los algoritmos genéticos: *la convergencia prematura*. Estos tres términos son básicos y aparecerán en multitud de ocasiones de ahora en adelante, así que es necesario hacer un alto en el camino y ofrecer una pequeña definición:

- **Diversidad genética:** es quizás el más intuitivo de los tres términos. Hace referencia a la distribución de las soluciones en el espacio de búsqueda. Uno de los problemas que presentan los AG's es el de cómo mantener una diversidad genética aceptable evitando que las soluciones se agolpen alrededor de óptimos locales impidiendo que se explore todo el espacio de búsqueda.

- **Súper individuos:** son óptimos locales. En esencia son buenas soluciones al problema (en ocasiones las mejores soluciones) pero que, si no se tratan correctamente, "absorben" a la población hacia ellos de forma que el resto del espacio de búsqueda queda sin explorar.

- **Convergencia prematura:** se produce cuando los súper individuos colapsan la población; es decir, los súper individuos (como mejores soluciones que son) se eligen una y otra vez como progenitores de forma que asfixian a los individuos menos dotados haciéndolos desaparecer. Al final el resultado es una población formada en su

mayoría por individuos muy “similares” al súper individuo y por tanto muy próximos a él. De esta forma el AG no tiene ninguna posibilidad de explorar nuevos territorios de manera que la población *converge* hacia el *súper individuo* (óptimo local).

Como se ha comentado antes, una solución tan trivial como escoger siempre al mejor no es efectiva a largo plazo, pues reduce la diversidad genética dejando al AG a merced de la suerte. Existen otros métodos más complejos que intentan hacer esta selección de un modo más “distribuido”, dando siempre prioridad a los mejores individuos, pero dejando cierto margen para los menos adaptados. De entre estos diferentes métodos los más utilizados son la *selección por ruleta* y la *selección por torneo*.

- **Selección por ruleta:** consiste en asignar a cada individuo una probabilidad de ser elegido. Esta probabilidad estará basada en el valor de su función de adaptación y vendrá normalizada (entre 0 y 1) por la suma de la función de *fitness* de todos los individuos (**ec.3.6**). Así pues, con este método todos los individuos pueden ser seleccionados, aunque claro está, los mejores individuos tendrán mayores posibilidades.

$$P(x) = \frac{\text{Adaptación}(x)}{\sum_{j=1}^N \text{Adaptación}(x_j)} \tag{ec.3.6.}$$

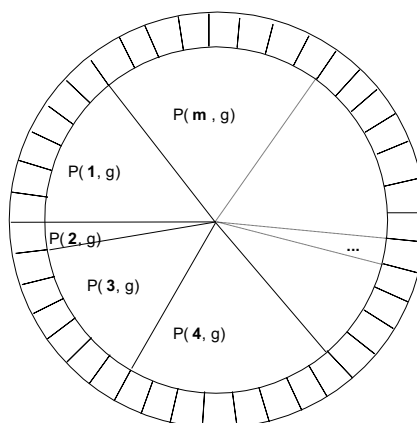
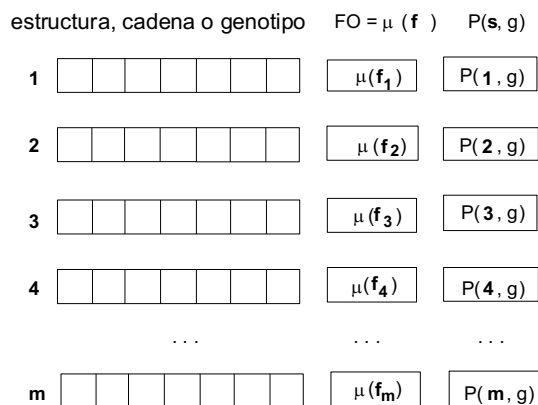


Figura. 3.13 Algoritmo Genético expresado de forma abstracta como un conjunto de métodos

- **Selección por torneo:** es un método considerablemente más simple. Consiste en escoger n individuos al azar y hacerlos competir entre sí. La manera de escoger al vencedor puede ser muy simple (escogiendo al que tenga un mejor valor de *fitness*) o más aleatoria (asignando una probabilidad de selección a cada individuo en función de su valor de *fitness* y dejando que sea el azar quien decida. Evidentemente la probabilidad de ser elegido será mayor cuanto mejor sea el individuo, pero aun así todos tendrían posibilidades de ser vencedores).

Queda patente pues que la lucha por mantener la diversidad genética y evitar resultados no deseados comienza con la elección de una correcta función de selección, pero además existen otras técnicas dedicadas específicamente a ello. En concreto se trata de las técnicas de *Sharing*.

- **Técnicas de Sharing:** simplificándolo mucho, estas técnicas intentan evitar que los individuos más dotados se reproduzcan sin control (haciendo desaparecer a los menos favorecidos) a base de imponer ciertas penalizaciones.

Existen diferentes formas de aplicar esta penalización, pero todas parten de un nexo común: la definición de un *nicho* o distancia entre soluciones. A los individuos que estén dentro de un mismo nicho se les penaliza con respecto a los de otros nichos en función de su densidad poblacional. Es decir, un individuo de un nicho muy poblado sufrirá una penalización en su *fitness* al competir contra otro individuo de un nicho más “desértico”.

Esto es así puesto que esa elevada densidad poblacional es debida a la existencia de un óptimo local, es decir, que ese nicho está superpoblado de individuos muy dotados contra los que poco podrán hacer los individuos residuales de otras zonas del espacio de búsqueda. De esta forma, aplicando las técnicas de *Sharing* se consigue una mayor diversidad genética.

La función de selección será la encargada de elegir a los individuos que serán utilizados para la reproducción y cuáles no. En principio la idea más intuitiva sería elegir siempre a los más aptos (es decir, a los que ofrezcan unos valores de función de adaptación más altos) de entre todos los de la población. Pero eso provocaría que en pocas generaciones la población se volviera homogénea; es decir, que en pocas generaciones los genes de los individuos más aptos acabarían predominando en casi todos los individuos.

Así pues, no se debe eliminar del todo la posibilidad de que los individuos menos aptos puedan reproducirse puesto que esto reduciría la diversidad de la población lo que se traduciría en espacios de búsqueda sin explorar. La opción más común es escoger previamente a los individuos participantes en el cruce mediante algún método de los que veremos a continuación y después, de entre los individuos menos aptos, realizar una selección aleatoria de algunos progenitores más.

A continuación, podemos encontrar un listado de los métodos más comunes mediante los que un AG puede escoger a los progenitores de su siguiente generación. Algunos de estos métodos son excluyentes entre sí, pero en general los AG's no utilizan un solo método sino combinaciones de varios a la vez.

Selección puramente elitista

En este caso la idea es muy simple, se trata de evaluar a los individuos y escoger como progenitores a los más aptos, es decir, los que ofrezcan unos valores más altos. Es una idea muy simple e intuitivamente parece la más correcta, pero como hemos visto antes genera problemas de convergencia debido a una reducción rápida de la diversidad de la población.

Selección por ruleta

La *selección por ruleta* o *método Montecarlo* o *muestreo universal estocástico* es quizás el método más utilizado junto con la *selección por torneo* que veremos más adelante. Su funcionamiento es simple: consiste en simular una ruleta donde cada individuo x tiene asignado una sección de tamaño $P(x)$ que representa la probabilidad que tiene ese elemento de ser escogido. Esta $P(x)$ se calcula en función de su nivel de adaptación; es decir, del valor que nos devuelve la función de *fitness*, y que se normaliza entre 0 y 1 mediante la expresión 3.7.

$$P(x) = \frac{\text{Adaptación}(x)}{\sum_{j=1}^N \text{Adaptación}(x_j)} \quad (\text{ec. 3.7.})$$

Una vez construida la ruleta (**Fig.3.14**) se trata de obtener una serie de valores entre cero y uno que nos indicarán los elementos seleccionados como progenitores de la nueva generación. La posición inicial para la primera elección es el cero, pero las siguientes posiciones se obtienen a partir de sumar la posición actual con el valor aleatorio obtenido en el módulo 1. De esta forma se intenta evitar que se escoja dos veces seguidas al mismo individuo en la medida de lo posible.

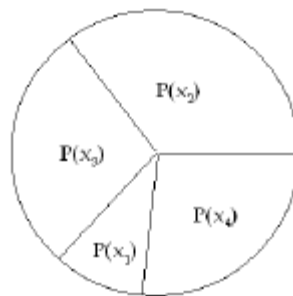


Fig. 3.14. Ruleta con las probabilidades de los cuatro elementos que componen la población

Así pues, este método sigue una pauta elitista en tanto que, cuanto mejor adaptado esté un individuo, mayor será la sección de ruleta que se le asignara, y por tanto mayor probabilidad de ser escogido. Aun así no es un método puramente elitista. Ningún individuo tiene una probabilidad cero de ser escogido, de forma que la diversidad de la población está garantizada y depende únicamente del azar. No es un método perfecto, puesto que se pueden escoger sólo los individuos de peor calidad. Además de que su complejidad computacional crece a medida que aumenta la población de manera que el AG puede acabar volviéndose ineficiente.

Selección por rango

Este método mejora la efectividad contra los problemas de *convergencia prematura* con respecto al método anterior. En este caso, la probabilidad de elegir a un individuo no se asigna en base a la función de *fitness*, sino al rango que ocupa el valor de dicha función. Como se explica en el primer paso para utilizar este método de selección consiste en ordenar de menor a mayor los individuos que componen la población. Evidentemente, dicha ordenación se realiza a partir de la del valor de la función de *fitness*.

Así pues, el individuo menos adaptado tendría asignado rango 1 mientras que el más adaptado de los n individuos tendría asignado rango n . A partir de esto, la probabilidad de que un individuo i de la generación t , sea escogido como padre ($P_{i,t}$) se calcula mediante la expresión siguiente **(ec.3.8)**.

$$P_{i,t} = \frac{\text{rango}(f_{fitness}(i,t))}{n(n+1)/2} \quad (\text{ec.3.8.})$$

Donde la suma de los rangos $n(n+1)/2$ se comporta como una constante de normalización que, como podemos ver en la **figura 3.15**, da como resultado una distribución mucho más uniforme de las probabilidades de selección en comparación con el método anterior y con otros diferentes.

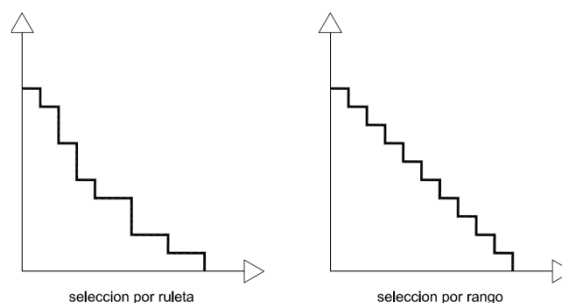


Fig. 3.15. Representación de la distribución de probabilidad que ofrece la selección por ruleta (izquierda) y la selección por rango (derecha)

Aquí todos los individuos tienen las mismas probabilidades de ser elegidos lo que hace realmente complicado que un individuo colapse la población de forma rápida y permite una mayor efectividad del AG. En contrapartida, el AG sufre una ralentización en su proceso de cálculo.

Selección por torneo

La idea de este método es bastante simple: se trata de escoger al azar un número determinado de individuos (en general 2) y hacerlos competir entre sí para decidir cuál es el que se convertirá en uno de los progenitores de la nueva generación. En este punto el camino se bifurca.

Por un lado, existe una versión más determinista en cuyo caso el individuo seleccionado es el que posea un nivel de adaptación mayor. Es decir, el que ofrezca unos valores más altos de la función de adaptación.

Opuestamente, existe una versión más estocástica donde la elección del progenitor se realiza al azar eligiendo un número entre 0 y 1. En el caso de que el valor sea más alto que un cierto umbral k definido previamente, el progenitor será el individuo con mejor adaptación. En caso contrario el progenitor será el menos adaptado, diversificando así mucho mejor los valores de la población.

En todos los casos lo más destacable de este método es su sencillez que se traduce en coste computacional muy bajo. Y el hecho de que permite suavizar los efectos propios de la presión selectiva, ya sea mediante la utilización de un criterio más bien estocástico, o de un método más determinista. En ambos casos, tomando pocos individuos para realizar el torneo, se aumentan las opciones globales de los individuos menos adaptados, mientras que en torneos con muchos participantes sus opciones son más reducidas.

Selección del valor esperado

Otra posible solución a los problemas derivados de súper individuos es la que ofrece el método de *selección del valor esperado*. Este sistema asigna un contador a cada individuo cuyo valor inicial es directamente proporcional a su función de *fitness* e inversamente proporcional a la media de dicha función en el instante en que aparece dicho individuo (**ec.3.9**).

$$Contador = \frac{f_{fitness}(x)}{f_{fitness}} \quad (ec.3.9)$$

Este contador decrecerá en un valor comprendido entre 0,5 y 1 cada vez que el individuo sea seleccionado para ser progenitor. De esta forma el número de veces que un mismo individuo puede ser seleccionado está limitado y será descartado cuando el contador pase a ser negativo.

Como hemos podido comprobar existen muchos y muy variados métodos de selección. En esta lista no están ni mucho menos todos, pero sí los más comunes o significativos. Además del hecho de que estos u otros métodos pueden utilizarse combinados para mejorar su efectividad siempre y cuando eso no suponga un coste computacional demasiado elevado.

La elección de uno u otro método de selección definirán la estrategia de búsqueda del AG: Utilizando métodos más elitistas la búsqueda se centrará en los entornos próximos a las mejores soluciones. Utilizando métodos donde la presión de la selección sea menor se está dejando abiertas las puertas a la exploración de zonas desconocidas que pueden reportar mejores soluciones o simplemente tiempo de cálculo perdido.

3.6.6. Función de cruce

Es, junto con la función de mutación, la encargada de hacer evolucionar a la población de soluciones. Al igual que en el mundo real, una vez elegidos a los progenitores llega el momento de la reproducción que puede darse de dos formas diferentes: sexual o asexualmente.

Por un lado, el método asexual (que traducido al mundo de los AG's significa que los descendientes son exactamente iguales a los padres) es una idea que por sí sola no es nada recomendable (no aporta diversidad alguna a la población más allá de las posibles mutaciones que puedan surgir después) aunque combinada con la reproducción sexual puede resultar interesante.

Por otra parte, el método sexual, consistente en combinar de alguna forma el material genético de ambos progenitores para dar lugar a nuevos individuos, (soluciones en este caso) diferentes a sus padres, pero con ciertas similitudes. De este modo la población evoluciona en todas direcciones, de manera que se obtienen tanto individuos más dotados como de peor calidad. Una vez más, existen multitud de formas de llevar a cabo este proceso.

Destacaremos una, la *función de cruce en un punto*, (**Fig. 3.16**) que además de ser la más simple y de las más utilizadas, sienta las bases para multitud de variantes. La idea en la que se sustenta es muy simple: se escoge un punto al azar del cromosoma, dando lugar a dos secciones, que seguidamente se intercambian entre los progenitores.

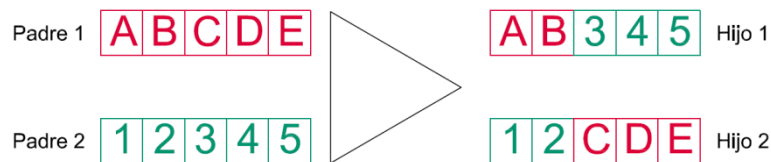


Fig. 3.16. Operador de cruzamiento basado en un punto

Una vez seleccionados los individuos que harán las funciones de padres llega el momento de la reproducción. A imagen y semejanza de lo que ocurre en los seres vivos la reproducción de los individuos de una población puede darse de un modo *sexual* o *asexual*.

En el modo *sexual* se produce un intercambio de material genético entre los progenitores y es precisamente la *función de cruce* la encargada de realizar dicha tarea. A diferencia del anterior, en el modo *asexual*, los hijos son meras copias de los padres de forma que no hay evolución más allá de lo puedan provocar las mutaciones inesperadas. El proceso a seguir para conseguir la nueva generación de individuos es flexible y se puede realizar de diferentes maneras.

Por lo general la reproducción *asexual* no es un método recomendable por sí mismo. Aun así, tampoco ha de ser descartada de forma tajante. Se puede considerar la posibilidad de permitir un pequeño margen de individuos reproducidos de manera *asexual* y cuyas únicas diferencias con sus padres sean las provocadas por la *función de mutación*.

La reproducción *sexual*, de la que se encarga la *función de cruce*, es la base del funcionamiento de los AG's. Mediante los diferentes métodos que veremos a continuación la población se diversifica y evoluciona en todas direcciones de manera que obtendremos tanto individuos mejor dotados como menos adaptados que sus progenitores. Esto se traduce en una nueva lista de posibles soluciones y de nuevos vectores de búsqueda que tanto pueden llevar al éxito como al fracaso, así que es importante tener claro que la función de cruce sólo hace evolucionar a la población sin tener en cuenta si esto nos acerca o nos aleja de la solución deseada.

Operador de cruce basado en un punto (SPX)

El operador de cruce basado en un punto o SPX (*Single Point Crossover*) es quizás el proceso más simple y el más utilizado en los AG's. Como puede verse en la **figura 3.17**, una vez escogidos los padres se elige al azar un punto y se divide el cromosoma en dos secciones. A continuación, se intercambian las secciones entre uno y otro progenitor dando lugar a los descendientes.

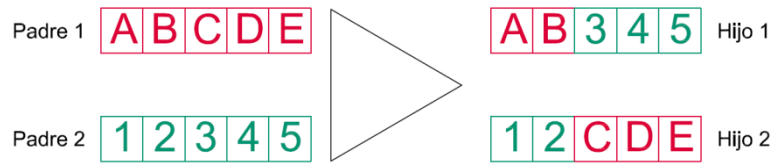


Fig. 3.17. Ejemplo del funcionamiento del operador de cruce en un punto

Operador de cruce basado en n puntos

Partiendo del operador anterior era cuestión de tiempo que los investigadores se aventuraran a probar de dividir el cromosoma en n secciones para intentar que el intercambio fuera más profundo. Las conclusiones obtenidas por De Jong son que aumentar el número de puntos de corte a más de dos no beneficia al AG.

El problema principal de utilizar más de dos puntos de corte consiste en que al generar multitud de pequeños segmentos, resulta mucho más fácil perder las buenas características de los progenitores, a favor de una evolución mucho más caótica que, como aspecto positivo, permite una exploración más a fondo del espacio de búsqueda.

El *operador de cruce basado en dos puntos* o DPX (Double Point Crossover) tendría un funcionamiento muy similar al SPX. De hecho, son dos casos particulares de la misma idea. En el caso del DPX (**Fig.3.18**) se definirán al azar dos puntos de corte dentro del cromosoma. La sección comprendida entre ambos puntos de corte será la que se intercambiarán los progenitores.

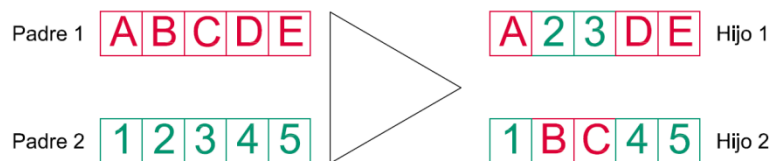


Fig. 3.18. Ejemplo del funcionamiento del operador de cruce en dos puntos

Operador de cruce uniforme (UPX)

El *operador de cruce uniforme* o UPX (*Uniform Point Crossover*) utiliza un sistema diferente a los anteriormente explicados. La idea, presentada por primera vez en 1992 por Gilbert Syswerda, consiste en definir de forma aleatoria una máscara, de tipo binario con ceros y unos, que nos indique de qué progenitor debemos tomar el elemento del cromosoma que ocupa dicha posición.

Así pues, para una posición determinada, si en la máscara hay un uno, el bit (o el elemento del alfabeto utilizado) que debemos tomar procederá del primer progenitor. En caso de que encontremos un cero, el bit (o el elemento del alfabeto utilizado) procederá del segundo progenitor. En la **figura 3.19** podemos ver un ejemplo muy claro de su funcionamiento.

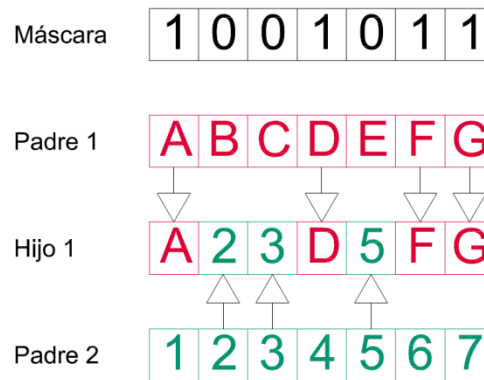


Fig. 3.19. Funcionamiento del operador de cruce uniforme

Como podemos ver en la figura superior, obtener el cromosoma del primer hijo es una cuestión muy sencilla y ara conseguir el segundo descendiente basta con intercambiar los padres o invertir la máscara de cruce. Queda por tratar el tema de cómo obtener de forma aleatoria los valores de la máscara de cruce: en este caso la máscara de cruce estaría compuesta por una muestra aleatoria extraída de una distribución de Bernouilli de parámetro $\frac{1}{2}$

Operador de cruce basado en la función de *fitness*

El *operador de cruce basado en la función de adaptación* sería un caso particular del *operador de cruce uniforme* (UPX) donde se tendría en cuenta el valor de la función de *fitness* para generar la máscara de cruce. El funcionamiento es exactamente el mismo en cuanto a la generación de los descendientes. La diferencia radica en que la máscara se generara a partir de una distribución de Bernouilli de parámetro p que se obtiene a partir de la expresión siguiente **(ec.3.10)**.

$$p = \frac{f_{fitness}(i, t)}{f_{fitness}(i, t) + f_{fitness}(j, t)} \tag{ec.3.10}$$

Donde $fitness(i,t)$ y $fitness(j,t)$ serían los valores de la función de *fitness* de los individuos i y j respectivamente en la generación t . De esta forma los genes de los individuos mejor dotados tienen mayores posibilidades de propagarse a las futuras generaciones, y aun así, ningún gen tiene probabilidad cero, de manera que la diversidad de la población se mantiene.

Operador de cruce inspirado en el *Simulated Annealing*

En este caso el operador de cruce no recurre a puntos de corte ni a máscaras como en casos anteriores. Se trata cada posición del cromosoma por separado y se define una probabilidad de que dicho elemento provenga de uno u otro progenitor siguiendo una analogía del proceso utilizado en el endurecimiento de los metales. Se define un umbral de energía θ_c y una temperatura T que irá descendiendo con el paso del tiempo mediante un proceso de enfriamiento.

Una vez hecho esto el funcionamiento es simple: se define una probabilidad p (ec.3.11)

(ec.3.11.)

$$P = e^{-(\theta_c/T)}$$

Este parámetro P será la probabilidad de que el padre del que proviene el elemento $i+1$ del cromosoma sea el opuesto al progenitor del elemento i . Cuando la temperatura T es alta el sistema se comporta como el *operador de cruce uniforme* de manera que la diversidad en la población es elevada. Por el contrario, al enfriarse, los descendientes resultantes acabarán siendo muy parecidos a alguno de sus padres.

Operador de cruce baricéntrico

Hasta ahora, los operadores vistos estaban más indicados para problemas discretos. El *operador de cruce baricéntrico* a diferencia de los anteriores es más eficaz en problemas continuos. El funcionamiento es sencillo: una vez seleccionados los individuos progenitores sus genes se combinan linealmente mediante la expresión siguiente (ec.3.12).

(ec.3.12)

$$\begin{cases} C_1(i) = \alpha P_1(i) + (1-\alpha)P_2(i) \\ C_1(i) = (1-\alpha)P_1(i) + \alpha P_2(i) \end{cases}$$

Donde el *coeficiente de ponderación* α nos permite tener cierto control sobre el resultado del cruce adoptando valores que van desde -0,5 hasta 1.5. De esta forma podemos favorecer que los genes de los descendientes estén más próximos a uno u otro progenitor en función del valor de *fitness* de sus padres, de la diversidad poblacional, del grado de saturación del sistema, etc. En la figura siguiente (**Fig.3.20**) podemos ver a grandes rasgos los efectos del *coeficiente de ponderación* sobre los descendientes.

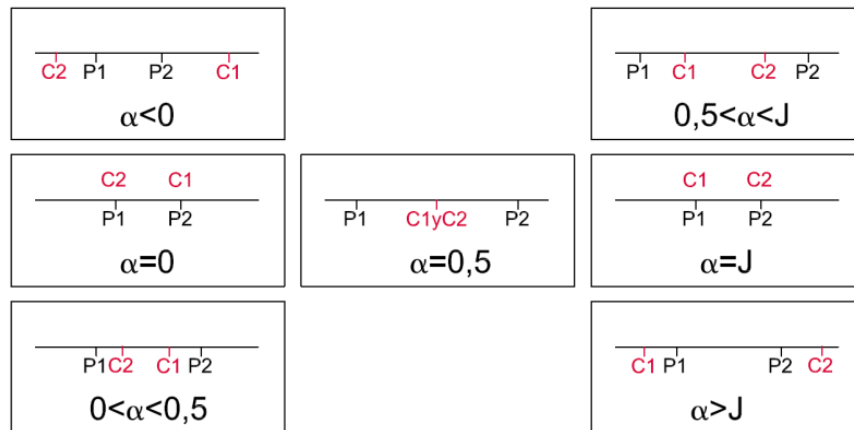


Fig. 3.20. Efectos del coeficiente α en el operador de cruce baricéntrico

Como podemos ver, en función del valor de α escogido los descendientes se parecerán más a uno u otro progenitor según nos interese en cada momento o incluso serán copias exactas de sus padres como ocurre para $\alpha = 0$ y $\alpha = 1$. De esta forma el cruce baricéntrico se revela como un método muy flexible para controlar problemas de diversidad poblacional.

Como ha podido comprobarse, el sistema para realizar los cruces de los individuos es flexible y permite multitud de opciones. En este apartado se han visto representados sólo algunos de los métodos más genéricos. Además, cada tipo de problema puede dar lugar a métodos específicos para realizar el proceso de cruce siempre basándose en unos principios muy concretos: por un lado, mantener la diversidad de la población, en la medida de lo posible, para explorar la mayor cantidad del espacio de búsqueda. Y por otro preservar los valores “buenos” que van apareciendo en la población y que son el camino a seguir para alcanzar las soluciones óptimas.

3.6.7. Función de mutación

La misión de la función de mutación es complementar a la de cruce insertando cambios inesperados en los individuos. La idea es que la función de cruce recorra el espacio de búsqueda en todas direcciones y que la de mutación permita la aparición de individuos diferentes garantizando que ninguna zona del espacio búsqueda tenga

una probabilidad cero de ser explorada. Para ello se define como una cierta probabilidad de que un gen, o parte del mismo, pueda ser mutado.

El caso más simple de mutación sería el de cambiar un bit del cromosoma del estado 0 al 1 o viceversa, pero como de costumbre existen multitud de métodos diferentes: por ejemplo, existe una variante llamada *permutación* que consiste en elegir al azar dos elementos de un mismo cromosoma e intercambiar sus posiciones.

A parte de la elección del método, el problema principal radica en seleccionar un valor apropiado para esta probabilidad. Un valor demasiado alto haría crecer enormemente la diversidad genética (lo que significaría que el espacio de búsqueda sería explorado a fondo). Pero convertiría la optimización en una mera búsqueda aleatoria dificultando la convergencia final del problema. Por el contrario, un valor demasiado bajo reduciría la diversidad dejando al AG a merced del primer óptimo local en el que cayera.

Así pues, no existe un valor correcto, sino más bien un compromiso entre ambos factores. Lo único que parece estar claro es que se recomienda un valor muy pequeño: por ejemplo De Jong sugiere que la probabilidad de mutación sea la inversa de la longitud del cromosoma.

La función de mutación es otro de los pilares básicos del funcionamiento de los AG's. Una vez más, la intención es imitar lo que ocurre en el mundo real. Se trata de insertar una ínfima posibilidad (menos del 1%) de que un gen (o un elemento del alfabeto del cromosoma) varíe de forma inesperada. De esta forma imitamos esos "errores" que se producen al copiar el material genético en el proceso reproductivo y que, aunque insignificantes a primera vista, tienen unas consecuencias impredecibles. No en vano estas mutaciones nos han permitido pasar de organismos unicelulares a lo que somos actualmente.

En los AG's ocurre lo mismo. Existen diferentes formas de realizar esta mutación: desde la más simple donde cada gen o cada elemento del cromosoma muta de forma independiente, hasta soluciones más complejas donde la estructura del problema y la relación entre los genes juegan un papel importante.

Si bien es cierto que es la función de cruce la que recorre el espacio de búsqueda, la función de mutación garantiza que ningún punto del espacio tenga una probabilidad cero de ser explorado. Un factor que va ganando importancia a medida que la población va convergiendo.

Más aun, investigadores como Schaffer sugieren que los efectos de la mutación son incluso superiores a los del cruce. Para ello simulan dos procesos evolutivos sobre una misma población. En un primer caso mediante un proceso de selección y cruce únicamente. En el otro caso mediante un proceso de selección y mutación.

Más allá de todo esto, el problema principal de la función de mutación es el de encontrar su valor adecuado. Un valor demasiado bajo provocaría una reducción de la

diversidad de la población pudiendo producirse una convergencia prematura sobre algún óptimo local. Un valor demasiado alto añadiría demasiada diversidad a la población. Esto repercutiría positivamente en cuanto a la cantidad de espacio de búsqueda explorado, pero dificultaría la convergencia del AG.

Estudios teóricos publicados por De Jong en sugieren que se utilice una probabilidad de mutación inversa a la longitud del cromosoma. Por otro lado, otros investigadores como Schaffer en sugieren empíricamente que el valor óptimo de la probabilidad de mutación P_m se debe calcular mediante la expresión siguiente (ec.3.13).

$$P = \frac{1}{n^{0,9318-l/0,5435}} \quad (\text{ec.3.13})$$

Donde n es el número de individuos que tiene la población y l la longitud de sus cromosomas. Por último, otros investigadores sugieren que no se utilice un parámetro fijo para P_m , sino que esta disminuya conforme aumenta el número de iteraciones ya que es en esos momentos donde su efecto resulta más crítico.

Existe también una variante de esta mutación denominada *permutación* que consiste en variar la posición de los genes dentro de un mismo cromosoma (Fig.3.21). Este método sólo es aplicable para problemas de optimización donde lo que se busca es una secuencia de elementos.

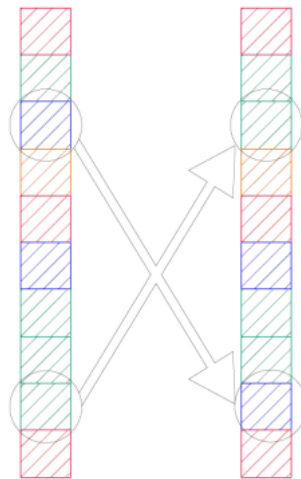


Figura. 3.21. Permutación de genes dentro de un cromosoma

3.6.8. Función de inserción

En lo que se refiere a la función de inserción, su labor consiste en adecuar el tamaño de la población después de cada nueva generación. Esto es debido a que en un principio el AG se define con una población n , pero después de las funciones de selección y cruce a la población n se le han de sumar los m descendientes. Existen implementaciones en las que el tamaño de la población adopta un valor variable, pero lo normal es que sea de tamaño fijo y que tenga que ser “recortado” siguiendo algún criterio.

El criterio más sencillo sería el de no conservar individuos entre generaciones (*Reducción simple*). El polo opuesto sería utilizar un criterio más elitista de manera que se seleccionen los n individuos mejores y se descarten el resto. Esto aumentaría la velocidad de convergencia a costa de reducir la diversidad con el consiguiente riesgo que eso comporta.

Un camino intermedio parece la solución más completa, aunque como de costumbre cada método tiene aspectos positivos y negativos que se han de sopesar antes de decidirse por cualquiera de ellos.

Una vez generados y evaluados los nuevos individuos, es decir, después de seleccionar a los progenitores, cruzarlos, aplicarles la función de mutación y evaluarlos mediante la función de *fitness*, nos encontramos con un nuevo problema: la población ha crecido por encima del máximo permitido. Sobran un determinado número de individuos dando lugar a un nuevo parámetro del AG llamado *tasa de reemplazamiento generacional* (tgr), que representa el porcentaje de hijos generados con respecto al tamaño de la población. Llega pues, el momento de “recortar” la población. La idea original de los primeros AG's era realizar este reemplazamiento de uno en uno ($tgr = n-1$). Actualmente se suele realizar en bloque ($tgr = 1$).

Esto no tiene por qué ser necesariamente así y se debe a que estamos trabajando con una única población de tamaño fijo. Más adelante veremos otras implementaciones donde el tamaño de la población puede ser variable o incluso cada nueva generación puede explorarse de forma independiente como si de otra población se tratase.

En el caso genérico, el resultado del cruce y la mutación es una población demasiado grande. En este momento está formada por los individuos de la anterior generación más los nuevos hijos. Es necesario insertar estos nuevos individuos y para ello es imprescindible eliminar algunos otros mediante algún tipo de criterio.

Una posibilidad sería utilizar una *reducción simple* consistente en no conservar individuos entre generaciones. Así pues, los descendientes generados sustituyen a sus progenitores convirtiéndose en la nueva generación. Otra posibilidad sería utilizar un *criterio de reducción elitista*, donde se escogen los n individuos más adaptados para que formen la nueva población descartando al resto. Otra opción sería tomar un camino intermedio, es decir, si el tamaño de la población es n , tomar los m individuos más adaptados (donde m es siempre menor que n) de entre los descendientes y

progenitores. Y posteriormente tomar los $(n-m)$ que faltan de entre los individuos que no fueron seleccionados para la reproducción.

Otros AG's como por ejemplo el *Algoritmo Genético Modificado* o MODGA proponen un reemplazamiento generacional basado en la elección de m_1 individuos para hacer de progenitores, y m_2 individuos destinados a morir. El resto de los individuos de la población, es decir $(n - (m_1 + m_2))$, son considerados como neutros y pasan directamente a la nueva generación. En este MODGA el criterio para elegir a estos individuos se basa en la función de *fitness*. De esta manera los individuos mejor adaptados tienen mayor posibilidad de ser escogidos para formar parte de los progenitores, y los individuos menos dotados, tienen mayor probabilidad de ser escogidos para morir.

De nuevo existen multitud de implementaciones diferentes, cada una con aspectos positivos y negativos. En unos casos la utilización de criterios elitistas aumenta la velocidad de convergencia reduciendo la diversidad. El AG parece más eficiente, pero puede quedar atrapado más fácilmente en óptimos locales. La otra cara de la moneda serían los criterios más probabilísticos que mejoraran la exploración del espacio de búsqueda a costa de un tiempo de convergencia mayor. Una vez más se trata de encontrar un equilibrio adecuado que dependerá en gran medida del tipo de problema que estemos tratando.

3.6.9. Criterio de parada

En pocas palabras, el criterio de parada consistiría en un baremo para decidir cuando el AG ha alcanzado la solución óptima y podemos dar por finalizada la búsqueda. El método más sencillo sería definir un número máximo de generaciones. No es la solución perfecta puesto que en ocasiones la solución óptima aparece antes y el resto del tiempo hasta que se detiene el AG se convierte en ciclos de proceso innecesario. O todo lo contrario, de manera que el AG no dispone de ciclos suficientes y finaliza antes de alcanzar su objetivo.

Otro método consiste en tener en cuenta la convergencia genética de la población y definir un criterio de parada basado en su saturación genética. Según De Jong se dice que un gen ha convergido cuando el 95% de la población comparte el mismo valor para dicho gen. De esta forma se podría establecer un criterio de parada tal, que se pueda concluir la labor del AG cuando un número determinado de genes del cromosoma hayan convergido.

Igualmente, el método anterior tampoco es un método recomendable al cien por cien. Hay que recordar que al AG sigue un método pseudoaleatorio de forma que en ocasiones la convergencia genética puede necesitar demasiadas generaciones. Quizás la solución más adecuada sería combinar ambos métodos.

La idea en la que se basan los AG's consiste en iterar los procesos anteriormente descritos sobre una población de individuos hasta que finalmente

converjan en la solución óptima al problema. Así pues, el *criterio de parada* debería hacer referencia a la convergencia de la población.

Este término (convergencia poblacional) debería hacer referencia a una pérdida de diversidad en la población. Por definición un gen se dice que ha convergido cuando el 95% de la población comparte el mismo valor para dicho gen. De esta forma el *criterio de parada* puede establecerse de manera que el proceso termine cuando todos los genes, o al menos un alto porcentaje de los mismos, hayan convergido.

Otra forma de evaluar esta misma condición es a partir del valor medio de la función de *fitness*. Partiendo de esta idea, se podría establecer un valor límite a partir del cual la solución es suficientemente buena como para ser aceptada, pero esto implicaría un conocimiento de los valores máximos que se pueden alcanzar en el problema (cosa que no siempre tendremos).

Ahora bien, esta no debería ser la única variable a tener en cuenta. Si bien es cierto que la función principal del AG es alcanzar esta convergencia, puesto que eso significa que se ha alcanzado alguna solución óptima. El tiempo necesario para conseguirlo es igualmente importante. Los AG's han de ser competitivos. No se puede esperar indefinidamente a que los cruces y mutaciones nos lleven a la solución global. Lo más sencillo sería combinar el criterio de convergencia con un número máximo de iteraciones de forma que se limite el tiempo de proceso del AG.

3.7. Computación evolutiva. MOGA

Desde un punto de vista general las técnicas de Computación Evolutiva, como los Algoritmos Genéticos o la Programación Genética, pueden considerarse como un conjunto de técnicas computacionales más ligadas en sus conceptos a los procesos biológicos que a las técnicas computacionales tradicionales.

Una vez introducidos los términos y conceptos básicos y asimiladas las analogías entre el mundo biológico y el mundo computacional, se alcanza a ver el gran potencial que ofrecen estas técnicas.

La Programación Evolutiva surge principalmente a raíz del trabajo "Artificial Intelligence Through Simulated Evolution" de Fogel, Owens y Walsh, publicado en 1966 (Fogel, Ewens & Walsh, 1966). En este caso los individuos, conocidos aquí como organismos, son máquinas de estado finito. Los organismos que mejor resuelven alguna de las funciones objetivo obtienen la oportunidad de reproducirse. Antes de producirse los cruces para generar la descendencia se realiza una mutación sobre los padres.

La Programación Genética surge como una evolución de los algoritmos genéticos tradicionales, manteniendo el mismo principio de selección natural. Lo que ahora se pretende es resolver los problemas mediante la inducción de programas y algoritmos que los resuelvan. Es en esta posibilidad donde reside toda la potencialidad

de la Programación Genética, puesto que permite desarrollar de forma automatizada programas, entendiéndose éstos de una forma amplia, es decir, como algoritmos en los que, a partir de una serie de entradas, se genera una serie de salidas. De esta manera, por ejemplo, una ecuación matemática podría ser inducida mediante el uso de Programación Genética.

La base biológica de la Programación Genética es exactamente la misma que la de los Algoritmos Genéticos. Por esta razón, el funcionamiento es similar. La diferencia entre una técnica y otra consiste en la forma de codificación de problemas, lo que permite su utilización en una serie de entornos donde anteriormente los Algoritmos Genéticos no podían ser aplicados.

El primer GA multi-objetivo, llamado vector evaluado GA (o VEGA), fue propuesto por Schaffer [5].

Posteriormente, se desarrollaron varios algoritmos evolutivos multiobjetivos que incluyen:

- Algoritmo Genético Multiobjetivo (MOGA)
- Algoritmo Genético de Pareto Niched (NPGA)
- Algoritmo Genético Basado en Peso (WBGA)
- Algoritmo Genético Ponderado Aleatorio (RWGA)
- Algoritmo Genético de Clasificación No Dominante (NSGA)
- Algoritmo Evolutivo de Pareto de Fuerza (SPEA)
- SPEA mejorado (SPEA2)
- Estrategia de Evolución de Pareto-Archivado (PAES)
- Algoritmo de selección basado en la envolvente de Pareto (PESA)
- Selección basada en la región en Optimización multiobjetivo evolutiva (PESA-II)
- Algoritmo genético de ordenación rápida no diferenciada (NSGA-II)
- Algoritmo evolutivo multiobjetivo (MEA)
- Micro-GA
- Rank-Density Based Genetic Algorithm (RDGA)
- Dynamic Multi-Object Evolutionary Algorithm (DMOEA)
- Algoritmo genético multiobjetivo de ordenación rápida no diferenciada que utiliza una tasa fija para el operador mutación (NSGA-III)

Hay que tener en cuenta que aunque hay muchas variaciones de GA multiobjetivo en la literatura, estos GA citados son algoritmos bien conocidos y creíbles que se han utilizado en muchas aplicaciones y sus actuaciones se probaron en varios estudios comparativos.

Por su parte, los Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (MOEAs) combinan técnicas de computación evolutiva con la teoría de optimización multiobjetivo, y por lo tanto brindan la posibilidad de realizar búsquedas en espacios ilimitados y complejos.

Igualmente, permiten mantener toda una población de soluciones óptimas, por lo que se han planteado como una buena herramienta algorítmica para resolver diversos problemas de optimización de objetivos múltiples.

Algunos de los algoritmos evolutivos más conocidos son NSGA, SPEA, NSGA-II, SPEA-II y PAES-II, entre otros.

Un problema de optimización multiobjetivo (MOP) es aquel que incluye un conjunto de n variables de decisión, un conjunto de k funciones objetivo, y un conjunto de m restricciones de desigualdad y p restricciones de igualdad, en donde las funciones objetivo y las restricciones son funciones de las n variables de decisión.

Existen diferentes técnicas para resolver los problemas multiobjetivo.

NSGA fue propuesto por Deb, Agrawal, Pratap y Meyarivan en el 2000, con el fin de incorporar elitismo y reducir la complejidad del procedimiento de ordenamiento rápido por no dominancia de su antecesor. Realiza una clasificación de la población por frentes. Los individuos que pertenecen al primer frente son los no dominados; los que pertenecen al segundo frente son los no dominados en ausencia de los del frente anterior, y así sucesivamente. A cada individuo se le asigna un rango equivalente a su nivel de no dominancia.

Los mejores individuos son aquellos que tienen rangos menores. También incorpora el cálculo de una distancia de crowding, como el operador utilizado para mantener la diversidad de la población, con el fin de evitar el uso del σ_{share} en la compartición de aptitud (fitness sharing) de su antecesor. La selección es realizada mediante torneo binario, utilizando como criterio de comparación el operador \in fn . Según este criterio, el torneo lo gana el individuo con menor rango. Si el rango es el mismo, el torneo lo gana aquel individuo que tenga menor distancia crowding.

SPEA-II. Desarrollado por Zitzler, Laumanns y Thiele en el 2000 con el fin de superar debilidades detectadas en el esquema de asignación de adaptación del SPEA. En este algoritmo, la función de asignación de aptitud se mejora teniendo en cuenta para cada individuo el número de individuos a los que domina y el número de individuos por los que es dominado.

Este esquema también añade una estimación de densidad poblacional. El tamaño $-NE_{max}$ de la población externa PE (utilizada para elitismo) es fijo, a diferencia del SPEA, en el cual el tamaño de PE es variable pero acotado. PE está conformada sólo por individuos no dominados siempre y cuando el número de éstos sea mayor o igual que NE_{max} . En el caso en que el número de individuos no dominados sea menor que NE_{max} se incluyen individuos dominados dentro de PE hasta que el tamaño de PE sea igual a NE_{max} .

La técnica de agrupamiento (clustering), encargada de mantener la diversidad de la población en SPEA, es sustituida por un método de truncamiento, el cual evita eliminar las soluciones extremas del conjunto de soluciones no dominadas. La

selección se realiza mediante torneo binario, tomando como criterio de comparación el fitness de cada uno de los individuos. SPEA-II asume minimización de fitness, por lo tanto gana el torneo aquel individuo que tenga un menor valor de fitness.

3.7.1. Modelos evolutivos que generan poblaciones de soluciones no dominadas

La primera generación de algoritmos evolutivos multiobjetivo basados en soluciones no dominadas, cuenta con los siguientes métodos:

-VEGA

-MOGA: Multiobjetivo optimización GA. A cada individuo de la población se le asignará un rango de acuerdo al cual será ordenado para la selección.

Una vez calculado el rango de los individuos de la población se siguen los siguientes pasos:

1. La población se ordena de menor a mayor, de acuerdo al rango que se le ha asignado a cada individuo.
 2. Se asigna el valor de adaptación para cada individuo por interpolación desde el mejor (rango 1) hasta el peor.
 3. Se promedia la adaptación de los individuos con el mismo rango, para que tengan el mismo valor de adaptación.
- (Fonseca y Fleming, 1993)

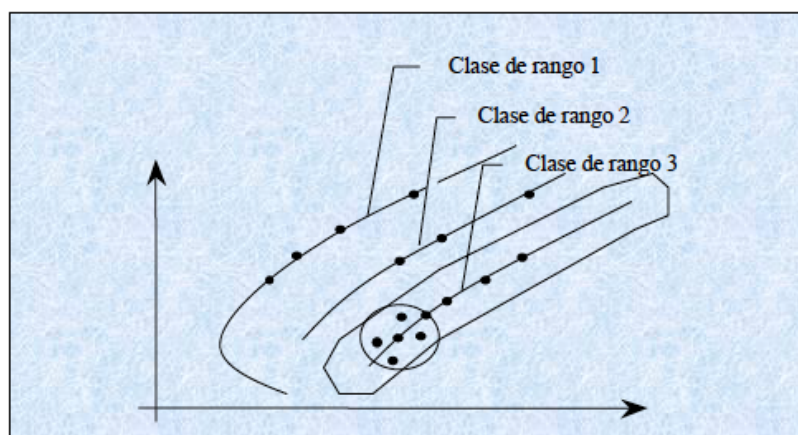


Fig.3.23. Asignación de rangos en MOGA

-NPGA: Niche Pareto GA

Este algoritmo se basa en la combinación de la selección de torneo y el concepto de Pareto Dominancia.

Dados dos individuos que compiten, se selecciona un subconjunto aleatorio de la población de tamaño t_{dom} .

Si un individuo es dominado por cualquier miembro del conjunto y el otro no, entonces este último se considera el ganador del torneo. Si ambos individuos son dominados, el resultado del torneo se decide por el método de proporción. El individuo con menos cromosomas en su nicho es el seleccionado.

La técnica de sharing se aplica a nivel de objetivos. (Horn y Nafpliotis, 1993)

-NSGA: Non-dominated sorting GA

Este algoritmo se basa en:

Una ordenación de la población según el criterio de no- dominancia (distinto de MOGA), mediante fronteras de no-dominancia.

El uso de una técnica de proporción de nichos (sharing) aplicada sobre los valores de las variables de decisión de cada individuo. (método de proporción continua y selección por torneo en implementaciones recientes).

El algoritmo actúa extrayendo frentes de individuos progresivamente, a los que se asigna un valor de adaptación menor que el del frente anterior.

1. En el primer frente se toman los individuos no dominados, a los que se asigna un valor hipotético alto como valor de adaptación.
2. Estos individuos se penalizan según un criterio de proporción en el fenotipo (sharing en las variables) con $\alpha=2$.
3. Los individuos anteriores son ignorados temporalmente para procesar el resto de la población de igual forma, identificando el segundo conjunto de individuos no dominados (entre los dominados).

A este segundo conjunto de individuos se le asigna un valor hipotético más pequeño que el mínimo valor alcanzado por el conjunto anterior tras la aplicación del método de proporción.

4. El proceso continúa hasta que toda la población se clasifica en frentes. (Srinivas y Deb, 1995). La segunda generación de algoritmos viene caracterizada por la incorporación del elitism en la búsqueda evolutiva multiobjetivo. Recientemente se ha diseñado un nuevo modelo evolutivo que usa una población externa, donde se almacenan soluciones no-dominadas encontradas a lo largo de la búsqueda. Esto permite al algoritmo cubrir de un modo más adecuado el Frente del Pareto.

Este conjunto de soluciones no dominadas se suele llamar "conjunto elite", P_e , con tamaño N_e . Los métodos en este conjunto son:

- **SPEA**, modelo evolutivo elitista que genera poblaciones de soluciones no dominadas, Strength Pareto Evolutionary Algorithms (Zitzler, Thiele 1998) Este algoritmo introduce el concepto de CONJUNTO ELITISTA EXTERNO DE SOLUCIONES NO DOMINADAS, actualmente muy importante en el desarrollo de AGs Multiobjetivo. Utiliza técnicas de clustering para reducir el número de soluciones no dominadas almacenadas para no destruir las características de equilibrio de la frontera (clustering sobre el fitness). Todas las soluciones externas participan en la selección. El algoritmo de clustering se puede utilizar en el espacio de decisiones (cromosoma) o en el espacio de objetivos (los autores de SPEA sugieren este último).

- Ratio entre poblaciones 1:4 (ejemplo: $|P_e| = 20$, $|P| = 80$)

- SPEA presenta una desventaja frente a otros AGs-MO en términos de eficiencia por el tiempo necesario para la aplicación del algoritmo de clustering en el conjunto elite.

- La diferencia básica entre los distintos algoritmos multiobjetivo (MOGA, NSGA, SPEA, ...) es la modificación en la asignación de fitness, más el elitismo.

Experimentos de comparación entre NSGA y SPEA dan mejores resultados para SPEA.

- Los resultados de NSGA+Elitismo son similares a SPEA.

- **SPEA2**. Una versión revisada de SPEA (llamada SPEA2) fue propuesta por E. Zitzler y sus colegas en 2001. SPEA2 tiene 3 diferencias fundamentales con respecto al SPEA original:

1. Incorpora una estrategia de grano fino para asignar aptitud, la cual toma en cuenta la cantidad de individuos que cada solución domina y la cantidad de individuos que la dominan.

2. Incorpora una técnica de estimación de densidad de vecinos que guía la búsqueda de manera más eficiente.

3. Tiene un esquema de truncamiento de archivo que garantiza la preservación de soluciones de frontera.

- **NSGA-II**: Elitismo dentro de la Población es considerado el Mejor Modelo. Fue propuesto por *Deb, Pratap, y otros en 2000*. Es una versión mejorada del NSGA que utiliza un operador de *crowding* que no requiere parámetros en vez de usar nichos. NSGA II utiliza un esquema de selección más en el cual la población de padres se compara con la población de hijos. NSGA-II además de contar con el uso de elitismo es mucho más eficiente (computacionalmente)

que NSGA y es un algoritmo altamente competitivo en convergencia al Pareto. En cada generación, se crea un conjunto mediante la unión de la actual población y la creada mediante selección, cruce y mutación

- De este conjunto se extraen los diferentes frentes (agrupados según el número de soluciones que los dominan). El frente F1 coincide con el actual frente Pareto
- La nueva población se crea incluyendo los frentes (de mejor a peor) hasta alcanzar el tamaño máximo. Si es necesario, el último frente se trunca atendiendo al orden basado en el *crowding* (medida de concentración)

La medida de *crowding* se utiliza para seleccionar las soluciones más dispersas entre los individuos del último frente utilizado en la nueva población (F3 en este ejemplo)

- Cuanto mayor sea la distancia de *crowding* de una solución al resto de su frente mejor, ya que hay menos concentración en esa zona

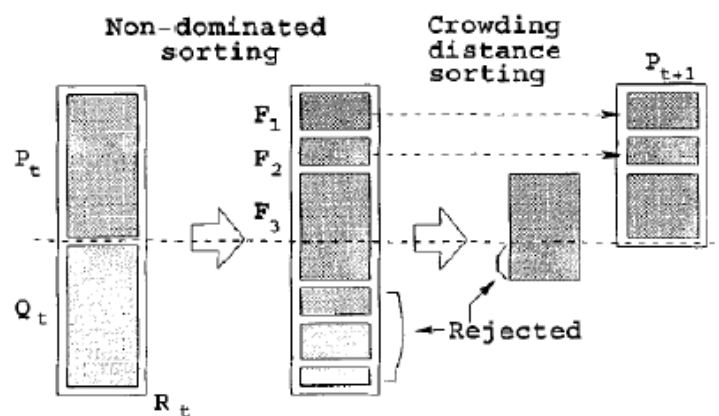


Fig. 3.24. Fases del algoritmo NSGA

- MOEA / D.

Es un algoritmo evolutivo multiobjetivo para problemas sin restricciones basado en la descomposición.

Los MOEA se han convertido en una de las áreas de investigación más activas en el ámbito de la Computación Evolutiva.

Su aplicabilidad en los problemas multiobjetivos es clara e inmediata, y se ha convertido en una herramienta muy importante para abordar dichos problemas. MOEAs (incorporación de preferencias, funciones dinámicas, espacios con restricciones, escalabilidad en cuanto al número de objetivos, trade-off eficiencia-eficacia en problemas complejos, paralelismo, ...), como de la aplicación.

La lista de las soluciones para el MOEA (de las aproximaciones del Pareto) es un problema complejo

Table 1
A list of well-known multi-objective GA

Algorithm	Fitness assignment	Diversity mechanism	Elitism	External population	Advantages	Disadvantages
VEGA [5]	Each subpopulation is evaluated with respect to a different objective	No	No	No	First MOGA Straightforward implementation	Tend converge to the extreme of each objective
MOGA [6]	Pareto ranking	Fitness sharing by niching	No	No	Simple extension of single objective GA	Usually slow convergence Problems related to niche size parameter
WBGA [8]	Weighted average of normalized objectives	Niching Predefined weights	No	No	Simple extension of single objective GA	Difficulties in nonconvex objective function space
NPGA [7]	No fitness assignment, tournament selection	Niche count as tie-breaker in tournament selection	No	No	Very simple selection process with tournament selection	Problems related to niche size parameter Extra parameter for tournament selection
RWGA [9]	Weighted average of normalized objectives	Randomly assigned weights	Yes	Yes	Efficient and easy implement	Difficulties in nonconvex objective function space
PESA [14]	No fitness assignment	Cell-based density	Pure elitist	Yes	Easy to implement Computationally efficient	Performance depends on cell sizes Prior information needed about objective space
PAES [29]	Pareto dominance is used to replace a parent if offspring dominates	Cell-based density as tie breaker between offspring and parent	Yes	Yes	Random mutation hill-climbing strategy Easy to implement Computationally efficient	Not a population based approach Performance depends on cell sizes
NSGA [10]	Ranking based on non-domination sorting	Fitness sharing by niching	No	No	Fast convergence	Problems related to niche size parameter
NSGA-II [30]	Ranking based on non-domination sorting	Crowding distance	Yes	No	Single parameter (N) Well tested Efficient	Crowding distance works in objective space only
SPEA [11]	Raking based on the external archive of non-dominated solutions	Clustering to truncate external population	Yes	Yes	Well tested No parameter for clustering	Complex clustering algorithm
SPEA-2 [12]	Strength of dominators	Density based on the k -th nearest neighbor	Yes	Yes	Improved SPEA Make sure extreme points are preserved	Computationally expensive fitness and density calculation
RDGA [19]	The problem reduced to bi-objective problem with solution rank and density as objectives	Forbidden region cell-based density	Yes	Yes	Dynamic cell update Robust with respect to the number of objectives	More difficult to implement than others
DMOEA [20]	Cell-based ranking	Adaptive cell-based density	Yes (implicitly)	No	Includes efficient techniques to update cell densities Adaptive approaches to set GA parameters	More difficult to implement than others

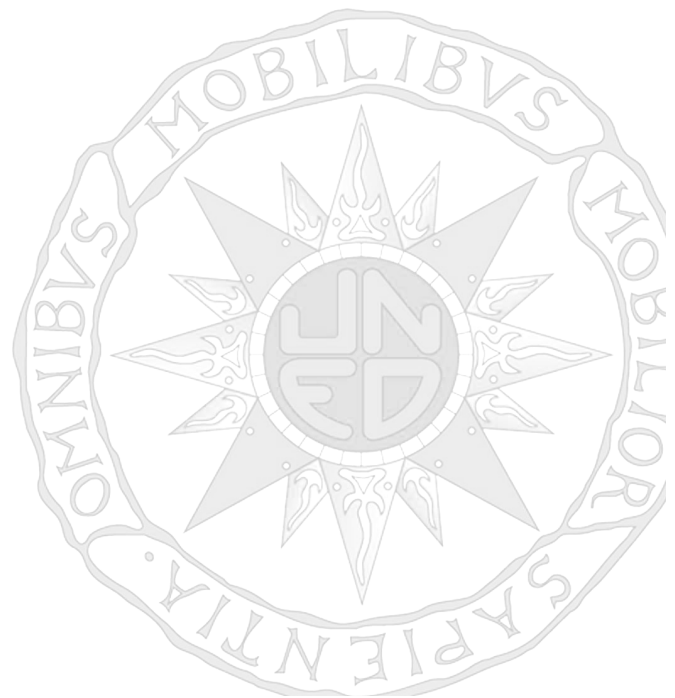
Fig. 3.25. Clasificación de los Algoritmos Genéticos

Sin embargo, los algoritmos evolucionarios no son la única técnica que se emplea para resolver problemas de optimización multiobjetivo.

En los últimos años, varios algoritmos metaheurísticos han sido desarrollados para resolver problemas de este tipo, tales como Optimización por Colonia de Hormigas (MOACO), Artificial Inmune System, Particle Swarm OPTimization (MOPSO),...

CAPÍTULO 4

IMPLEMENTACIÓN METODOLÓGICA Y PRUEBAS BÁSICAS



4 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PRUEBAS BÁSICAS

4.1. Implementación de un Algoritmo Genético

Una vez concluida la exposición teórica sobre los objetivos y técnicas utilizadas en los procesos de optimización (Capítulo 3), así como las bases en las que se sustentan los algoritmos genéticos, llega el momento de aplicar todo lo expuesto hasta ahora.

Se va a utilizar una de las múltiples implementaciones libres disponibles dedicando los esfuerzos a corroborar la teoría anteriormente expuesta.

En cuanto a la implementación escogida, se recurrirá a uno de los grandes nombres en el campo de la investigación sobre los algoritmos genéticos: el Dr. Kalyanmoy Deb, director del *Kanpur Genetic Algorithms Laboratory* y editor adjunto del *Evolutionary Computation Journal* del MIT entre otros. De las múltiples implementaciones disponibles en la página oficial de sus laboratorios (*Kanpur Genetic Algorithms Laboratory*), se ha seleccionado una de las más simples puesto que implementa a la perfección los aspectos básicos que debe tener un AG y, gracias a su relativa simplicidad, permite interactuar con el código, modificándolo y ampliándolo, de manera que se puedan poner a prueba todos los parámetros principales utilizados en la optimización mediante AG's.

El algoritmo NSGA-II, es un algoritmo Elitista no dominado del tipo MOEA basado en clasificación de individuos de una población obtenidos a partir de una población inicial de padres de los que se obtiene la descendencia. A partir de ahí se van recombinando generaciones, incluyendo incluso factores de mutación, cruzamiento y selección, para llegar a obtener poblaciones descendientes, las cuales se ordenan de forma no dominada en diferentes frentes de Pareto. Aunque esto puede parecer requerir un mayor esfuerzo, se justifica por el hecho de permitir una verificación global de la dominancia entre la población de padres y de los descendientes.

Una vez el proceso de ordenación no dominado ha finalizado, la nueva población es generada a partir de las configuraciones de frentes no dominados. Esta nueva población empieza a ser construida con el mejor frente no dominado, continúa con las soluciones del segundo frente, tercero y así sucesivamente. Cuando se está considerando el último frente, las soluciones que hacen parte de éste pueden exceder las restantes por acomodar en la población descendiente.

NSGA-II, en su traducción del inglés es Algoritmo Genético de Clasificación no Dominado-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), cuenta con las siguientes ventajas:

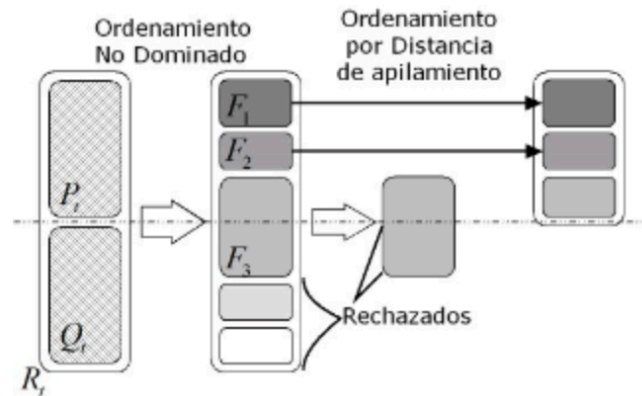


Figura 4.1. Diagrama esquemático del mecanismo de generación de individuos del NSGA-II

Además, se presenta un operador de selección que crea un grupo de apareamiento combinando las poblaciones de padres y descendientes y seleccionando las mejores soluciones de N (con respecto a la condición física y la propagación).

Los resultados de la simulación en problemas complejos de prueba, muestran que NSGA-II puede, para la mayoría de los problemas, encontrar una mejor distribución de soluciones y una mejor convergencia cerca del verdadero frente de Pareto óptimo en comparación con la estrategia de evolución archivada de Pareto y la fuerza evolutiva de Pareto algoritmo: otros dos MOEA elitistas que prestan especial atención a la creación de un frente diverso de Pareto-óptimo.

Además, se modifica la definición de dominancia para resolver problemas limitados de objetivos múltiples de manera eficiente. Los resultados de simulación del NSGA-II restringido en una serie de problemas de prueba, incluido un problema no lineal de cinco objetivos y siete restricciones, se comparan con otro optimizador de objetivos múltiples restringido, y se observa un rendimiento mucho mejor del NSGA-II.

Los detalles sobre el funcionamiento del código se encuentran en el anexo A para que sean consultados si el lector lo desea. No obstante, a continuación, se repasarán los aspectos más importantes de la implementación elegida antes de someterla a los tests del apartado siguiente.

En esencia el AG implementado se ajusta al modelo del *Algoritmo Genético Simple o Canónico* (ver Anexo A). Permite utilizar tanto variables codificadas en forma binaria como real y se sirve de un parámetro llamado *RIGID* para permitir, o no, que se generen soluciones que estén fuera del espacio de búsqueda. Así mismo y para complementar esta última parte, además de que a cada individuo se le asocia un valor de *fitness* mediante la función objetivo, también se le puede asociar una penalización.

En lo que a funcionamiento se refiere, utiliza una función aleatoria para generar los individuos de la población inicial a partir una “*semilla*” (número real) introducida por teclado al inicio. El método elegido para escoger a los progenitores es el *Torneo* entre dos individuos elegidos al azar.

Como función de cruce, utiliza el método *Single Point Crossover* (Cruce en un punto) y se sirve de una probabilidad de cruce P_{xover} para decidir qué individuos se reproducirán sexualmente y cuáles lo harán de forma asexual. Para las mutaciones utiliza, en el caso binario, una probabilidad de mutación para decidir bit a bit si éste debe mutar o no, y para los números reales, un sistema de *mutación polinómica*.

El método de inserción por su parte es el *Simplex*, donde la nueva generación sustituye por completo a la anterior.

Por último, el criterio de parada utilizado consiste en definir un número máximo de generaciones a realizar. Además de esto, implementa técnicas de *Sharing* opcionales que en caso de utilización permiten definir el tamaño del nicho mediante el parámetro σ_{share} .

Como se puede apreciar, es un algoritmo bastante simple, pero que implementa a la perfección los aspectos básicos para entender el funcionamiento de estas técnicas.

En el próximo apartado, se intentará corroborar la teoría antes expuesta mediante unos sencillos test que pondrán a prueba los parámetros más interesantes del AG: el tamaño óptimo de la población, el número de generaciones, la probabilidad de cruce, la probabilidad de mutación, la efectividad de las técnicas de *Sharing* y el tamaño óptimo del nicho. Y para esto hemos elegido cinco funciones, muy simples todas ellas, pero que permitirán observar el funcionamiento del AG en diferentes escenarios.

4.2. Funciones seleccionadas

Para poder poner a prueba los diferentes parámetros del AG es necesario definir algunos escenarios de búsqueda. En este caso no se trata de funciones excesivamente complicadas, más bien lo contrario.

Se trata de un conjunto de cinco funciones simples, con valores óptimos conocidos de forma que se puedan evaluar fácilmente los resultados. A continuación, podemos ver las ecuaciones a las que responden estas funciones (**ec.4.1**), (**ec.4.2**), (**ec.4.3**), (**ec.4.4**) y (**ec.4.5**), así como su representación gráfica (**Fig.4.1**).

$$\text{Función A: } y = \frac{x^2}{25} - 10,12345678901234 \quad \forall x \in [-50,50] \quad (\text{ec. 4.1})$$

$$\text{Función B: } y = \cos x^2 \cos^2 x \quad \forall x \in [-5,5] \quad (\text{ec. 4.2})$$

$$\text{Función C: } z = (\cos x \times \cos y) \times (x + y) \quad \forall x \in [-5,5] \quad (\text{ec. 4.3})$$

$$\text{Función D: } y = x \sin x \quad \forall x \in [0,100] \quad (\text{ec. 4.4})$$

$$\text{Función E: } y = \begin{cases} \cos 200x & \text{si } x > \frac{-\pi}{400} \\ \cos 200x \times 20 & \text{si } x \in \left[\frac{-\pi}{400}, \frac{\pi}{400} \right] \\ \cos 200x & \text{si } x < \frac{\pi}{400} \end{cases} \quad (\text{ec. 4.5})$$

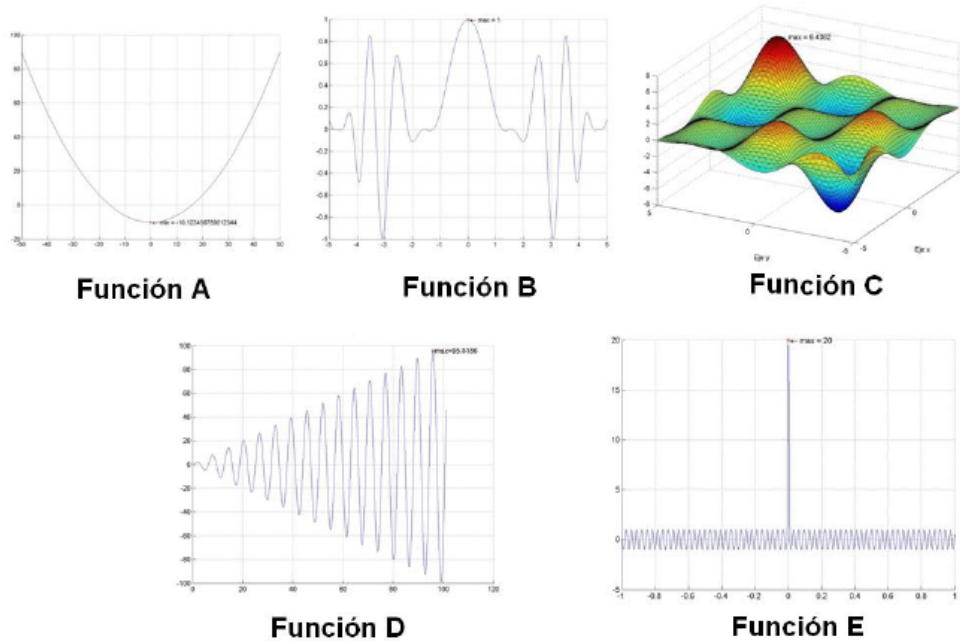


Figura 4.2. Representación gráfica de las funciones A, B, C, D, E

Los motivos e intenciones que nos llevaron a escoger estas funciones no son imprescindibles para comprender los resultados.

Baste decir que las **funciones A, B y C** serán las utilizadas para las consideraciones previas y los tests de número de generaciones, población, probabilidad de cruce y mutación.

Por otro lado, la función D ha sido escogida específicamente para ser utilizada en el test de *Sharing* y por último la función E se ha diseñado específicamente para comprobar la efectividad del AG en uno de sus escenarios más desfavorables .

4.3. Test y resultados

4.3.1. Consideraciones previas

Antes de comenzar con los tests propiamente dichos y con la intención de poder evaluar los resultados de la forma más eficiente posible hay que tener en cuenta un par de consideraciones.

Por un lado, es necesario implementar un método para evaluar el tiempo de proceso que ocupa el AG. Este método consistirá en un sencillo contador que se iniciara al comienzo de la evolución del AG (una vez que ya se hayan introducido todos los parámetros por teclado) y que se detendrá al final, evitando los procesos que no sea propiamente de la evolución (impresión de ficheros de salida, etc.) de manera que se evalúe exclusivamente el tiempo de proceso evolutivo.

Por otro lado, y en referencia también al tiempo de proceso, se ha comentado que el AG puede trabajar con variables reales o binarias.

En concreto las variables reales utilizan *double's* para guardar los resultados.

Esto traducido en bits significaría que utilizan un espacio de 64 bits por variable. Para ser justos, y sobre todo para poder comparar correctamente los datos deberemos escoger una codificación binaria de similar magnitud.

La idea más simple sería codificar cada variable binaria con 64 bits dejándola en igualdad de condiciones, pero como veremos más adelante, eso puede no resultar lo más eficaz.

En primer lugar, es evidente que la precisión de los resultados aumentará conforme aumente el número de bits (el número podrá tener más decimales). Pero debido a la implementación y al hecho de que el lenguaje escogido (en este caso c) presenta mejores tiempos de proceso trabajando con variables reales que con tiras de bits, veremos que los tiempos de proceso de variables en binario son muy superiores a los de variables reales (del orden de 3 a 10 veces dependiendo del número de bits usados).

Así pues, se trataría de encontrar un punto intermedio entre precisión y tiempo de proceso para el AG codificado en binario.

En los gráficos siguientes (**Fig.4.3** y **Fig.4.4**) encontraremos mediciones sobre los tiempos de proceso y precisiones obtenidas para las funciones A, B y C en función de la longitud del cromosoma.

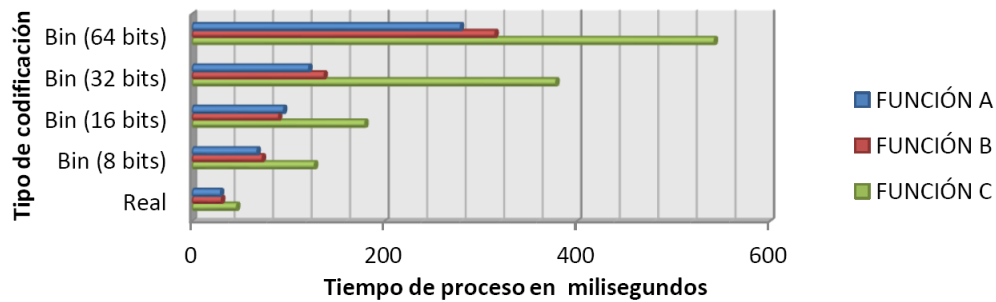


Figura 4.3. Tiempo de proceso para diferentes longitudes de cromosomas binarios

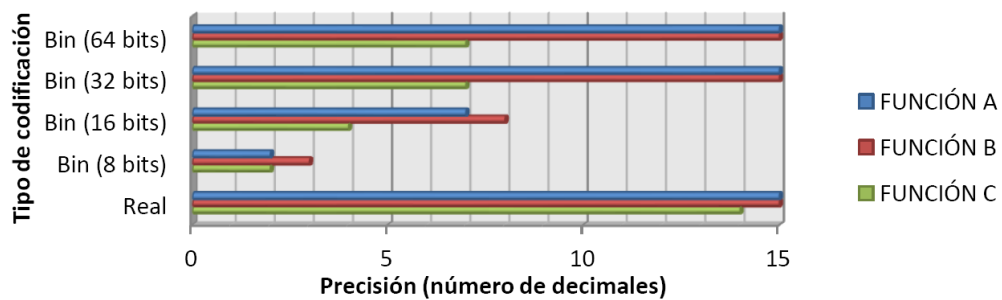


Figura 4.4. Precisión en los resultados para diferentes longitudes de cromosoma

Como se puede observar, los tiempos de proceso aumentan de manera notable al aumentar el número de bits.

En cambio, la precisión de los resultados parece estancarse entre los 32 y los 64 bits. Así pues, a igualdad de resultados y para perjudicar lo mínimo posible a la codificación binaria (en lo que a tiempos se refiere), de ahora en adelante se utilizarán 32 bits en lugar de 64 para las variables binarias.

Por último, la idea básica de estos tests es la de corroborar la teoría expuesta sobre los diferentes parámetros que definen un AG evaluándolos uno a uno. Ahora bien, en cada caso el valor que utilizaremos para el resto de los parámetros será el teóricamente correcto.

Así pues, se definirán los parámetros “teóricamente correctos” como siguen:

- población = 50 individuos,
- 32 bits por variable binaria,
- probabilidad de cruce alta (0,9) y
- probabilidad de mutación muy baja, de 0,05 (cercana a la inversa de la longitud del cromosoma).

4.3.2. Test de población

Este test, pretende observar los diferentes resultados que se obtienen sobre una misma función haciendo variar el tamaño de la población entre 4 y 100 individuos. El proceso se repite 30 veces para cada tamaño de la población y para cada una de las tres funciones A, B y C para conseguir un valor medio.

El objetivo es contrastar de forma práctica lo expuesto en la teoría y al mismo tiempo encontrar un valor óptimo para el parámetro de la población. Para cada población se evalúa el número de generaciones máximo, mínimo y medio en el que se alcanza la solución, así como el tiempo de proceso requerido. Seguidamente veremos un conjunto de gráficas en las que aparecen reflejados todos estos parámetros (Fig.4.5, Fig. 4.6, Fig. 4.7, Fig. 4.8, Fig. 4.9 y Fig. 4.10).

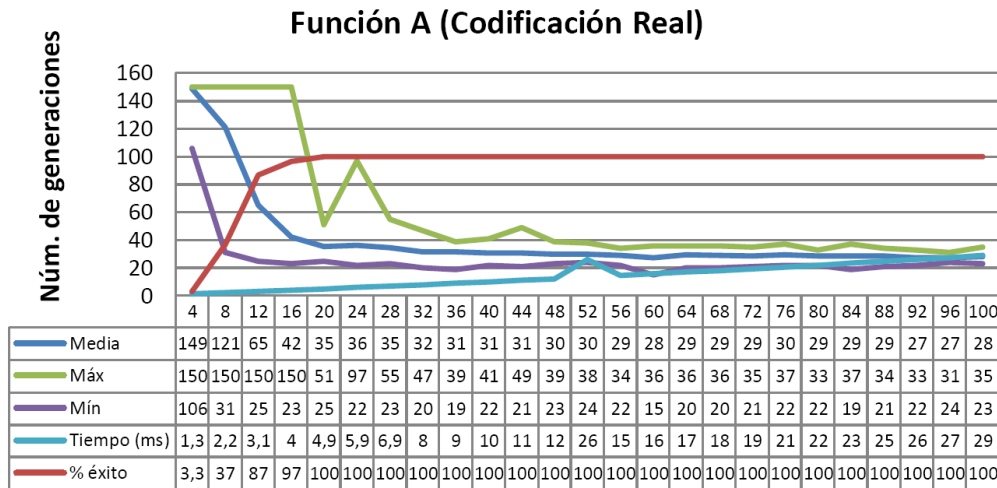


Figura 4.5. Resultados del test de población en la función A (codificación real)

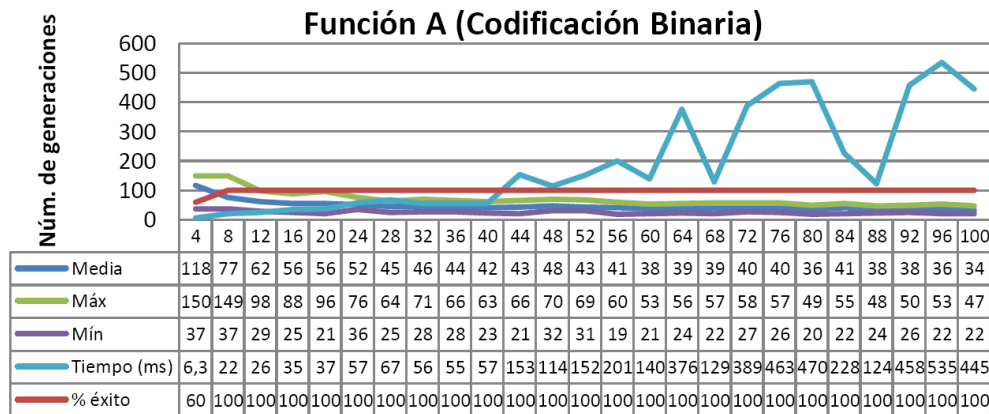


Figura 4.6. Resultados del test de población en la función A (codificación binaria)

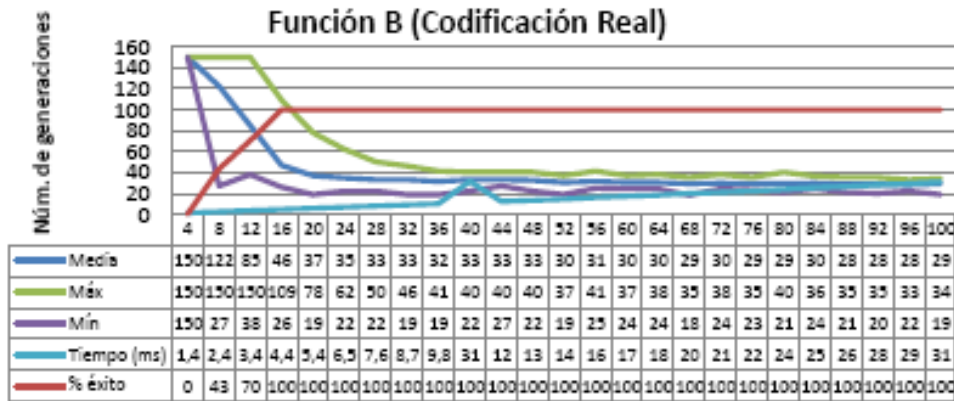


Fig. 4.7. Resultados del test de población en la función B (codificación real)

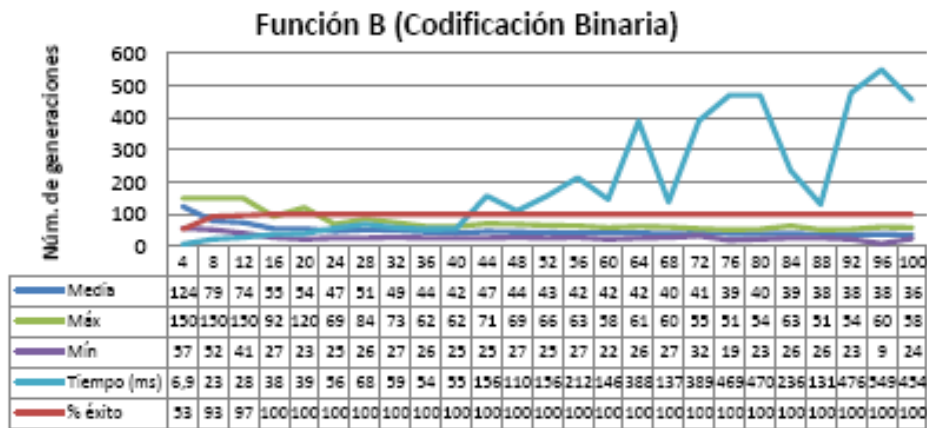


Fig. 4.8. Resultados del test de población en la función B (codificación binaria)

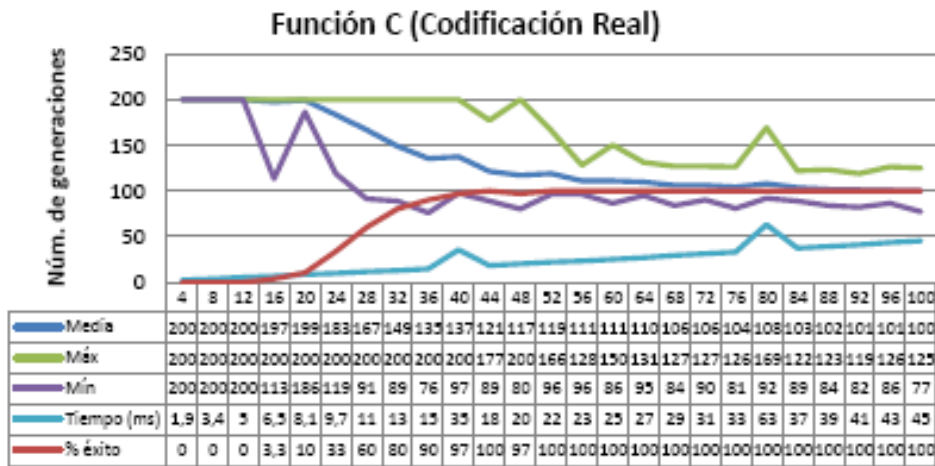


Fig. 4.9. Resultados del test de población en la función C (codificación real)

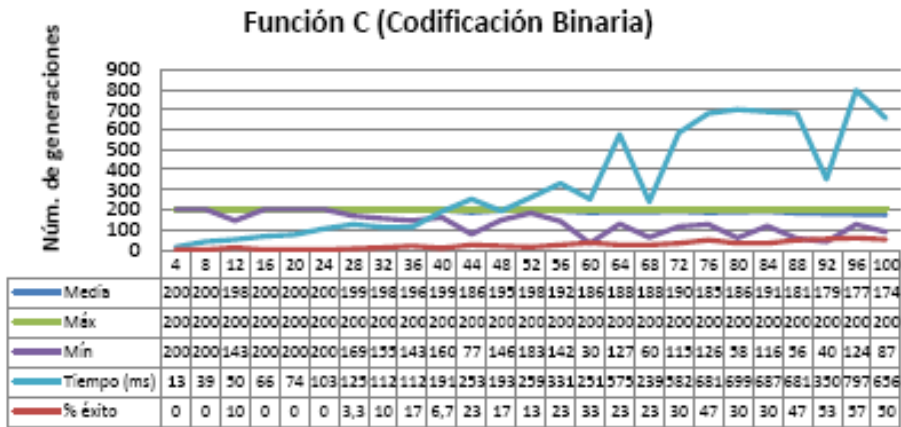


Fig. 4.10. Resultados del test de población en la función C (codificación binaria)

Observando las gráficas se puede llegar a la conclusión de que el intervalo de valores óptimos para estos casos particulares se encuentra entre los 40 y 48 individuos. Más allá de estos valores los tiempos de proceso suben demasiado sin aportar grandes mejoras.

Por el contrario, por debajo de estos valores los tiempos de proceso no son sustancialmente mejores como para compensar la falta de acierto que sufre el AG en algunos casos.

Así pues, por división simple concluiremos que el valor óptimo debe ser de 44 individuos, que comparándolo con los 50 que recomendaba la teoría ofrece un resultado más que aceptable.

4.3.3. Test de número de generaciones

En principio, este AG utiliza un criterio de parada basado únicamente en el número de generaciones máximas definidas por el usuario. Así pues, el interés de este test se centra en encontrar un número óptimo de iteraciones de forma que no se desperdicie tiempo de proceso en generaciones innecesarias, ni tampoco se finalice precozmente el AG sin darle tiempo a alcanzar la solución óptima. Si bien es cierto que ningún número garantiza el 100% de efectividad siempre, mediante estas pruebas encontraremos un valor aceptable que garantice el éxito en la mayor parte de los casos.

Para esto el test, evaluará una población de tamaño definido (el valor óptimo antes encontrado), haciendo variar el número de generaciones desde 10 hasta 150 en 100 ocasiones para cada una de las tres funciones (una vez codificadas en binario y otra vez en real).

A continuación, se puede ver un gráfico (Fig. 4.11) donde se ve representado el número medio de generaciones necesarias para que el AG alcance el objetivo para cada función y codificación.

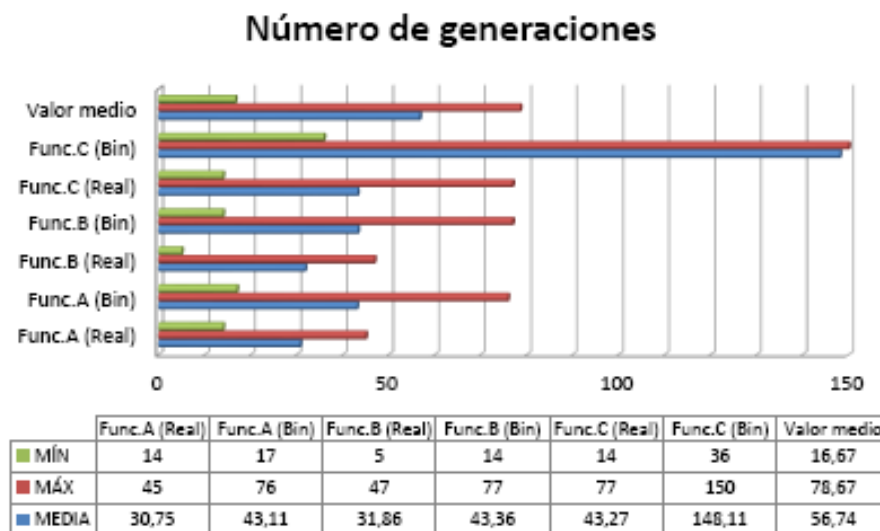


Fig. 4.11. Resultados del test de generaciones en las funciones A, B y C

Analicemos ahora los resultados obtenidos. La información que aporta el valor mínimo es prácticamente anecdótica (puesto que es puro azar que el óptimo se revele tan pronto) así que es mejor ignorarla.

Observando los valores medios, vemos que se mantienen constantes alrededor de las 40 generaciones, salvo para el caso de codificación binaria con múltiples variables (función C). Este dato junto con el obtenido en las consideraciones previas

sobre el tiempo de proceso, empieza a señalar que la codificación binaria no es muy recomendable para problemas de varias variables.

Dejando eso a un lado de momento, si tomamos los resultados reales y binarios por separado observamos que para problemas de una sola variable (funciones A y B) mantiene unas cifras más o menos constantes. Teniendo en cuenta el bajo tiempo de proceso que tiene el AG codificado en real podemos definir el valor óptimo de ambos como el más alto de las dos, es decir unas 80 generaciones.

Si tomamos ahora los datos obtenidos para el problema de dos variables (función C) observamos que las 80 generaciones se quedan cortas. Los valores prácticamente se han duplicado tanto para la codificación real como para la binaria. Siguiendo la misma lógica aplicada en el caso anterior, el valor óptimo en este caso sería de 150 generaciones.

Parece pues existir una relación directa entre el número de variables y el factor que multiplica al número de generaciones. A partir de todo esto, podemos concluir que el número de generaciones óptimas (que será utilizado como criterio de parada) para funciones de una o dos variables, parece responder a la ecuación 4.6.

$$\text{Criterio de parada} = (\text{Núm. Variables} \times 80)[\text{Generaciones}] \text{ Ec. 4.6.}$$

Para dar por válida esta hipótesis a nivel general sería necesario hacer pruebas con funciones de 3 o más variables, pero esto queda fuera de los propósitos de esta tesis.

La función de este test, era determinar cuál era el valor óptimo de generaciones necesarias para definir correctamente un criterio de parada, y en vista de que la teoría solo nos habla de escoger el valor más adecuado, podemos concluir que por el momento el valor que hemos elegido es tan válido como cualquier otro. Veremos después en futuras pruebas si hemos hecho la elección correcta o no.

4.3.4. Test de probabilidad de cruce

Una vez elegidos a los progenitores, es la probabilidad de cruce la que decidirá si estos intercambiarán su material genético, permitiéndoles evolucionar, o si se limitarán a pasar a la nueva generación sin sufrir ningún cambio. Teóricamente ambos casos son necesarios, eso sí, en su justa medida.

Partiendo de esta base el test siguiente intentará reflejar cómo afecta la probabilidad de cruce al desarrollo del AG. Para esto, haremos variar dicha

probabilidad entre 0.0 y 1.0 a intervalos de 0.05 (repitiendo este proceso 30 veces cada vez para obtener una media estadística).

Teniendo en cuenta que las funciones que hemos elegido tienen valores óptimos de sobra conocidos, la forma de evaluar el éxito o fracaso del AG consistirá en normalizar el resultado obtenido entre 0 y 1 a partir del valor óptimo conocido. Así, cuanto más próximo a 1 sea el resultado, mejor comportamiento habrá tenido y de esta forma podremos definir cuál es el valor óptimo de la probabilidad de cruce.

A este respecto, la teoría augura que el resultado debería ser un valor alto. Un valor bajo representaría que la población apenas evoluciona y que no avanza de manera útil.

Como en casos anteriores, el resto de los parámetros los fijaremos a los valores teóricamente correctos.

En la **figura 4.12** y la **tabla 4.1** siguientes podemos ver los resultados obtenidos.

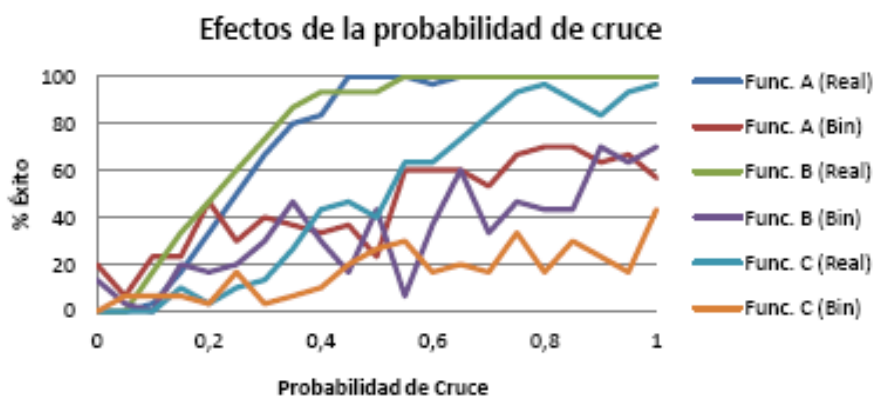


Fig. 4.12. Efectividad del Algoritmo Genético en función de la probabilidad de cruce utilizada

Como podemos ver en el gráfico (**Fig. 4.12**) el porcentaje de éxito aumenta cuanto mayor es la probabilidad de cruce (aunque curiosamente los valores más efectivos no corresponden a una probabilidad de cruce igual a 1).

	A (Real)	A (Bin)	B (Real)	B (Bin)	C (Real)	C (Bin)	Media
P. Cruce	0,825	0,825	0,775	0,95	0,9	1	0,88

Tabla 4.1. Valores óptimos de la probabilidad de cruce

Analizando ahora la **tabla 4.1** podemos observar los que serían los valores de la probabilidad de cruce que ofrecerían un porcentaje de éxito más alto.

A partir de ellos y con una simple operación alcanzamos el valor que buscábamos: en concreto la probabilidad de cruce óptima debería ser de 0.88, 0.9 para redondear. Es un valor alto como indicaba la teoría. Pero además de esto, este test ha puesto de nuevo de manifiesto la diferencia de resultados que hay entre la codificación real y la binaria, siempre quedando por detrás esta última.

4.3.5. Test de probabilidad de mutación

Este test guarda muchas similitudes con el anterior tanto en objetivos como en metodología. De hecho, es prácticamente el mismo, con la salvedad de que en este caso lo que se busca es el valor óptimo de la probabilidad de mutación.

Como se puede ver en el gráfico inferior (**Fig. 4.13**) el porcentaje de éxito mayor se da cuando la probabilidad de mutación adopta valores bajos. Como en el caso anterior, si analizamos los datos numéricos de la tabla inferior (**Tabla 4.2**) podremos calcular el valor óptimo de la probabilidad de mutación.

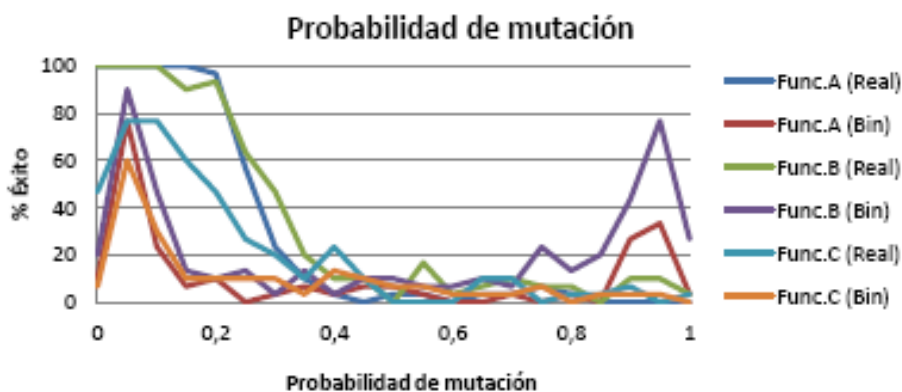


Fig. 4.13. Efectividad del Algoritmo Genético en función de la probabilidad de mutación utilizada

	A (Real)	A (Bin)	B (Real)	B (Bin)	C (Real)	C (Bin)	Media
P. Mutación	0,075	0,05	0,05	0,05	0,075	0,05	0,06

Tabla 4.2. Valores óptimos de la probabilidad de mutación

En este caso el valor obtenido estaría en torno a los 0.06 (un valor muy bajo como indicaba la teoría). Además este test, confirma la importancia de incluir

inesperadas mutaciones en algunos individuos, aunque esto no debe restarle protagonismo a la función de cruce que es, al fin y al cabo, la que lleva el peso de la evolución.

4.3.6. Test de mutación y cruce simultáneamente

En los apartados anteriores hemos verificado la probabilidad de mutación y la de cruce dejando fijo en cada caso uno de los dos parámetros. Es decir, para calcular la probabilidad de mutación fijábamos el valor de la probabilidad de cruce al valor óptimo teórico y viceversa. De esta forma hemos podido comprobar que los datos teóricos se cumplen y hemos encontrado una combinación de probabilidades que resulta efectiva.

La idea de este test, es demostrar que, aunque el AG verifica los parámetros óptimos teóricos, no deja de ser un sistema libre donde existen otras combinaciones que también resultan efectivas. Para esto haremos variar la probabilidad de cruce y la de mutación simultáneamente en intervalos de 0,05 en 50 ocasiones cada vez para determinar el valor medio.

Como podemos ver en el gráfico (**Fig.4.14**) existen múltiples zonas donde el AG alcanza el óptimo global en todas las ocasiones. Por ejemplo, un valor muy alto de mutación convertiría el Algoritmo Genético en una simple búsqueda aleatoria que con una mínima ayuda de la probabilidad de cruce podría terminar alcanzando el objetivo buscado.

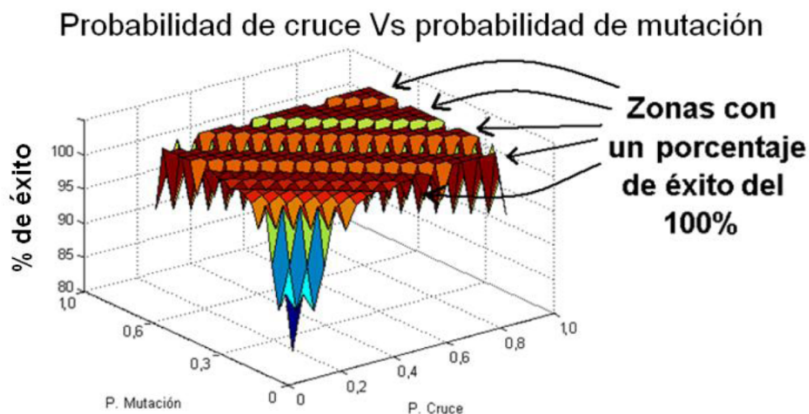


Fig. 4.14. Efectividad del Algoritmo Genético con diferentes combinaciones de probabilidad de cruce y probabilidad de mutación

La finalidad de esta prueba no es determinar las combinaciones de parámetros que son efectivas. Más bien es mostrar al lector que se trata de un sistema abierto y flexible que permite probar y probar moldeándolo a nuestra elección.

4.3.7. Test de *Sharing*

Llegados a este punto tenemos un AG con todos sus parámetros principales optimizados:

- Población de 44 individuos
- Criterio de parada fijado en 80 generaciones por variable
- Probabilidad de cruce de 0.9
- Probabilidad de mutación optimizada con valor de 0.06

Da la impresión de que habiendo obtenido estos datos ningún problema pueda resistirse, pero la verdad es que no es así. No hay que olvidar que los algoritmos genéticos padecen de problemas intrínsecos (Anexo A, apartado A.3) que requieren de técnicas específicas para intentar superarlos. Un ejemplo claro de estos problemas es el de quedar atrapado en máximos/mínimos locales sin posibilidad de alcanzar otras soluciones mejores.

Las técnicas de *Sharing* (Anexo A, apartado A.3.1) entre otras, intentan paliar estas debilidades, ayudando a mantener una mejor diversidad genética. Partiendo de esta base, y de la premisa de estar utilizando valores adecuados para otros parámetros importantes, intentaremos corroborar los efectos beneficiosos de utilizar estas técnicas.

El funcionamiento de este test, es muy similar al de los casos anteriores: la idea es evaluar la función D (especialmente escogida para este fin por su topografía) sin utilizar las técnicas de *Sharing*.

Después se evalúa la misma función aplicando dichas técnicas y haciendo variar el tamaño del nicho: en este caso comenzaremos con un tamaño de 1/10 del espacio búsqueda e iremos dividiéndolo por la mitad hasta que alcance los 1/5120 del espacio de búsqueda.

Cada proceso se repetirá 100 ocasiones y como en el caso anterior (al ser el óptimo un valor conocido) se medirá el éxito del AG normalizando el resultado entre 0 y 1 con el valor esperado. A continuación, podemos ver un gráfico (**Fig.4.15**) con los resultados obtenidos.

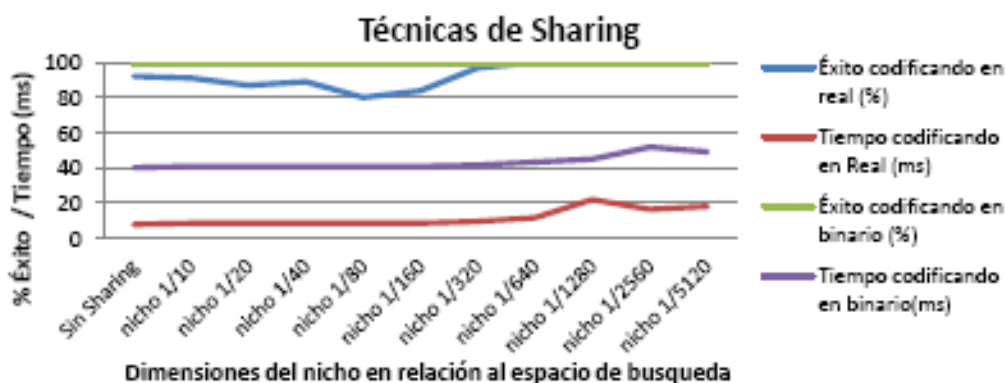


Fig. 4.15. Efectividad y tiempo de proceso del AG en el test de Sharing

Viendo los resultados observamos un par de cosas destacables: por un lado, el sorprendente éxito que presenta la codificación en binario y que, aparentemente, hace innecesario utilizar técnicas extras.

Este efecto es producto de la propia codificación binaria en la que un cambio de un solo bit da lugar a un individuo radicalmente distinto, y por otro lado a que la función de mutación evalúa el cromosoma bit a bit, acentuando todavía más este efecto. Esto, como podemos ver, tiene aspectos positivos en cuanto a diversidad de soluciones y a la profundidad con la que se explora el espacio de búsqueda. Pero como veremos más adelante, hace del todo inútil utilizar criterios de parada basados en la diversidad genética.

Para luchar contra estos efectos se pueden utilizar codificaciones binarias del tipo *Código Grey* (donde cada individuo se separa de su vecino por un cambio en un único bit [Anexo A, apartado A.1.1]), aunque también sería necesario retocar la función de mutación de manera que sólo permitiera un cambio en un único bit por cromosoma (con la función actual podrían mutar todos los genes de un mismo cromosoma). Por otro lado, observando los resultados para la codificación real, vemos que en este caso las técnicas de *Sharing* sí que ofrecen una cierta mejoría en los resultados. Así pues, centrándonos en la evolución de los parámetros reales podemos concluir que las técnicas de *Sharing* son efectivas y que un valor óptimo para el tamaño del nicho (en relación al tiempo de proceso) sería de 1/640 del espacio de búsqueda aproximadamente en este problema concreto.

4.4. Mejoras

Más allá de implementar diferentes métodos de selección o de cruce (que tal vez mejorarían los resultados, pero que son más bien específicos de cada tipo de problema), optaremos por implementar un par de soluciones básicas y efectivas, en principio, para todo tipo de escenarios.

Por un lado, implementaremos un criterio de convergencia basado tanto en el valor óptimo de generaciones obtenido en el test anterior como en la convergencia genética de la población. Definiremos un criterio tal, que se considerará que el AG habrá convergido (y por tanto daremos por finalizado el proceso), cuando más del 85% de su población se encuentre dentro de un cierto intervalo del espacio de búsqueda, definiendo este intervalo como una millonésima parte del espacio de búsqueda total. Además de esto, y teniendo presente el factor aleatorio propio de los AG's, esta convergencia deberá producirse en tres ocasiones consecutivas y sobre el mismo valor. De esta manera evitamos que una agrupación puntual y prematura de la población nos confunda y finalice el proceso.

Por otro lado, implementaremos algunos cambios en la función de inserción para solucionar una particularidad que esta presenta: actualmente, el proceso de inserción consiste básicamente en no conservar ningún individuo de la generación anterior (método *Simplex*).

Esto conlleva que a veces los mejores individuos se degraden por cruces desafortunados o mutaciones imprevistas perdiendo la posibilidad de explorar esa prometedora zona del espacio de búsqueda.

El cambio que se propone es el de asegurar que los mejores individuos pasen a la siguiente generación independientemente de que se hayan reproducido previamente.

Una vez implementados estos cambios, probaremos su efectividad con las tres funciones utilizadas anteriormente (A, B y C) y las evaluaremos con y sin las mejoras en cuanto a precisión y tiempo de proceso se refiere (**Fig.4.16** y **Fig.4.17**).

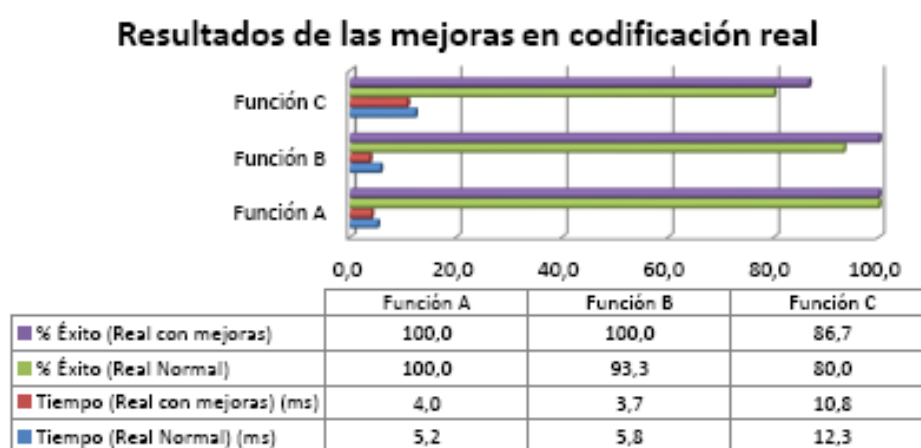


Fig. 4.16. Resultados para las funciones A, B y C con y sin mejoras (real)

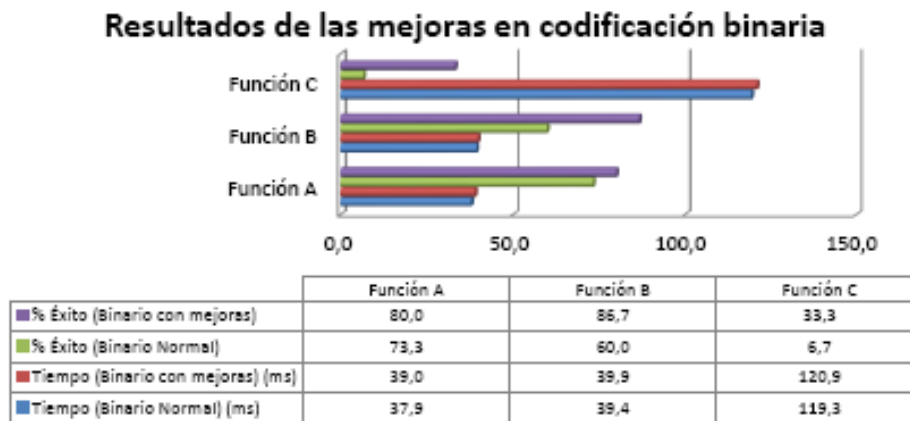


Fig. 4.17. Resultados para las funciones A, B y C con y sin mejoras (binario)

En ambos casos puede verse una mejoría en los resultados obtenidos consiguiendo que éstos se acerquen cada vez más a los valores de los óptimos conocidos.

En lo que a tiempos se refiere, el resultado varía en función del tipo de codificación. Para el caso de la codificación real se observa una considerable reducción en los tiempos de proceso debido a que el criterio de convergencia da por finalizado el proceso de búsqueda antes de concluir las 80 generaciones.

En el caso de la codificación binaria el efecto es el contrario. El tiempo de proceso aumenta ligeramente debido a los cálculos necesarios para evaluar la diversidad genética de la población. Y en cambio el AG se ve obligado siempre a agotar los 80 ciclos impuestos por el criterio de parada debido a que la población binaria no acaba de converger hacia ningún valor concreto.

Este efecto como explicamos en el apartado anterior, es provocado en parte porque la función de mutación se aplica a todos los bits por separado sin importar si otros han mutado ya o no. Pero sobre todo por la codificación binaria en sí misma puesto que un cambio de un bit puede dar lugar a un individuo radicalmente alejado de su antecesor.

Aun así podemos ver como los resultados mejoran tanto en una codificación como en otra, pero en el caso de la codificación binaria el criterio de parada basado en la diversidad debería ser suprimido puesto que solo aumenta el tiempo de proceso.

A lo largo de este capítulo hemos ido viendo como la selección apropiada de los parámetros determina en gran medida la efectividad del AG. Hemos optimizando todas estas características y hemos puesto en práctica algunos de los métodos específicos (*Sharing*) para mejorar su productividad en determinados escenarios. Incluso hemos implementado algunos métodos que mejoran su efectividad y, en ocasiones, reducen su tiempo de proceso. Aun así, existen multitud de escenarios en

los que estos métodos no son recomendables y su rendimiento es bastante deficiente (Anexo A, apartado A.3.2).

De las funciones definidas en el capítulo 3.2 hemos estudiado en profundidad las cuatro primeras, y hemos dejado la última para el final puesto que se trata de uno de los múltiples casos en los que los AG's no son los métodos más indicados para resolver el problema.

Así pues, utilizaremos la función E para realizar el análisis final del AG. Analizaremos primero la función de forma simple (es decir sin ningún tipo de técnica o mejora). Seguidamente repetiremos el análisis utilizando las técnicas de *Sharing*, después con las mejoras implementadas anteriormente y, finalmente, con todo a la vez.

En cada escenario repetiremos las pruebas en 50 ocasiones y normalizaremos los resultados a 1 (entendiendo como 1 la solución perfecta) para determinar finalmente los resultados medios que pueden verse en la **figura 4.18**.



Fig. 4.18. Resultados medios normalizados para la función E

Como podemos ver, al trabajar con problemas similares al de la función E ni la optimización de parámetros ni las mejoras incluidas consiguen que su rendimiento sea aceptable.

De las 50 veces respectivamente que se repitió el proceso en el caso simple o con *Sharing*, ni una sola vez fue encontrada la zona del valor óptimo.

Al aplicar la nueva función de inserción se consigue una leve mejoría (la zona es encontrada entre 7 y 10 veces dependiendo de la codificación). Pero ni siquiera aplicando las mejoras junto con las técnicas de *Sharing* (especialmente indicadas para diversificar la población ayudando a encontrar zonas de interés para explorar) se consigue alcanzar el 50% de efectividad.

Como podemos ver los algoritmos genéticos son métodos muy potentes, pero no son la solución a todos los problemas.

En este caso, como en muchos otros, su comportamiento hace que dependan enteramente de un golpe de suerte que los lleve a la zona adecuada y así su sistema evolutivo pueda llevarles a mejorar la solución hasta el valor óptimo.

4.5. Evaluación de los Algoritmos Genéticos

Una pregunta importante que nos puede asaltar es: ¿está funcionando bien nuestro AG? La respuesta más simple sería esperar a ver los resultados finales y comprobar si los valores son aceptables. Introducidos por De Jong, los métodos que se exponen a continuación permiten evaluar la progresión que está siguiendo el AG, de manera que se pueda valorar si está funcionando correctamente.

4.5.1. Evaluación On-Line

Utilizando el método *On-Line* a lo largo de las diferentes generaciones, podemos observar la evolución media de todos los individuos hasta la generación actual T (**ec.4.7**).

$$E_{On-Line}(T) = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_{fitness}(i, t)}{NT} \quad (ec. 4.7)$$

Donde $f_{fitness}(i,t)$ es el valor de la función de *fitness* para un determinado individuo de la generación t , y N es el número total de individuos que componen la población

4.5.2. Evaluación Off-Line:

Sirviéndonos del método *off-line* (**ec.4.8**), observaremos cómo va evolucionando el valor óptimo alcanzado en cada generación a lo largo de T generaciones.

$$E_{off-Line}(T) = \frac{\sum_{t=1}^T f_{\max fitness}(t)}{T} \quad (ec. 4.8)$$

Donde $f_{\max fitness}(t)$ representa el valor más alto de *fitness* alcanzado por un individuo dentro de la generación t .

4.5.3. Problemas específicos

Como hemos explicado hasta ahora los AG's son métodos de optimización muy potentes, pero no están exentos de problemas.

En primer lugar, hay que tener muy claro que no son la mejor solución para todos los problemas. Hay entornos en los que los AG's no trabajan demasiado bien (**Fig.4.19**). No hay que olvidar que son algoritmos *ciegos* que se guían únicamente por las tendencias evolutivas (gradientes) y por el azar.

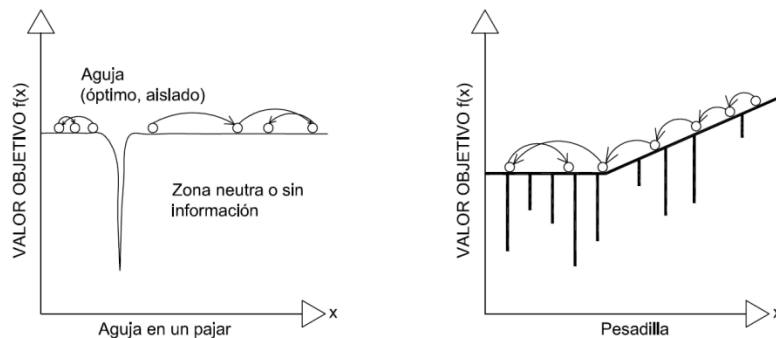


Fig. 4.19 Ejemplo de espacios de búsqueda particulares donde los AG's no funcionan correctamente.

Como podemos ver en la **figura 4.19** hay entornos en los que resulta francamente difícil encontrar una progresión lógica que nos lleve hasta donde queremos ir. Dependemos básicamente de un golpe de suerte que nos sitúe en el punto correcto.

En otras ocasiones la orografía del espacio de búsqueda hace que los gradientes de búsqueda cambien continuamente (*ruggedness*, **Fig.4.20**). En estos casos la evolución que siguen los individuos es del todo inesperada. Tan pronto una pequeña variación en sus genes puede provocar grandes cambios en su fenotipo (*Strong Causality*) como todo lo contrario, y grandes cambios en sus cromosomas dejar a los individuos prácticamente igual (*Weak Causality*).

En estos casos no hay soluciones buenas por las que optar. Utilizar poblaciones grandes y mantener una diversidad alta es prácticamente la única posibilidad [2], pero el resto depende de dónde el azar nos quiera llevar.

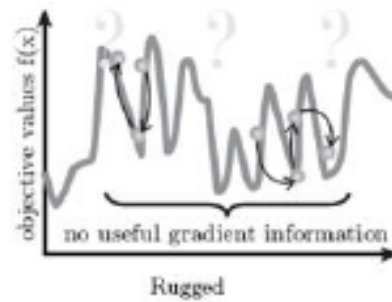


Fig. 4.20. Función demasiado irregular (*Ruggedness*)

En otras ocasiones el espacio de búsqueda no resulta tan “inhóspito”, pero eso no significa que no pueda dar problemas. Por ejemplo, en la figura siguiente (**Fig.4.21**) la mayor parte del espacio de búsqueda no sugiere ninguna ruta a seguir.

El número de generaciones máximas podría agotarse sin que se hubiera alcanzado ninguna zona de interés. En estos casos la utilidad de los AG's queda en entredicho y resulta más efectivo utilizar métodos de búsqueda más exhaustivos.

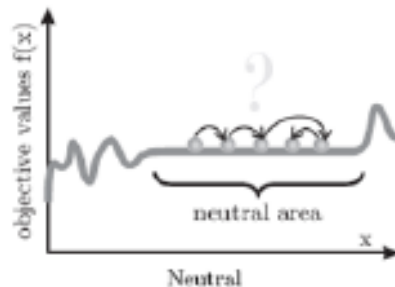


Fig. 4.21. Espacio de búsqueda con una gran sección neutral

Más allá de todo esto, el problema por excelencia de los AG's es la pérdida de diversidad. Está presente en casi todos los contratiempos que se nos presentan al utilizar estos métodos.

A veces se presenta como mera repercusión de otro problema más importante y en ocasiones es provocada por la implementación del propio AG. Sea como fuere, sus efectos suelen ser demoledores: reducción del espacio de búsqueda explorado, aparición de súper individuos que colapsan la población, imposibilidad de escapar de óptimos locales y finalmente *convergencia prematura* del algoritmo de búsqueda.

Para luchar contra este enemigo no es suficiente con una única estrategia. A lo largo de este capítulo hemos visto como la implementación de las funciones básicas

del AG favorece en mayor o menor medida que se mantenga esta diversidad (métodos de *selección por torneo* (apartado A.1.4.4), *fitness normalizado* (apartado A.1.3.4), *función de cruce inspirada en el simulated annealing* (apartado A.1.5.5), etc.). Además de todas estas pequeñas contribuciones existen métodos creados específicamente para reducir los efectos de la pérdida de diversidad en la población. A continuación, veremos algunos de los más importantes como son las *técnicas de nicho*, *sharing*, *scaling*, etc.

4.5.4. Sharing

La técnica de *sharing* o *fitness sharing* es una de las más conocidas y utilizadas para intentar mantener la diversidad de la población. Introducida por Goldberg [25], la función de *sharing* penaliza a los individuos en función de la densidad poblacional de la zona.

Es decir, que cuanto más concentrados estén los individuos en una zona o *nicho*, mayor será la penalización que sufrirán.

De esta forma, individuos situados en zonas poco pobladas (que con los métodos tradicionales estarían condenados a desaparecer) no desaparecen completamente y los individuos de zonas superpobladas, no siguen reproduciéndose indiscriminadamente [26].

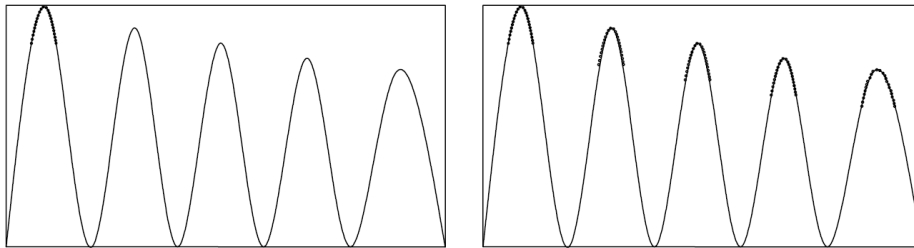


Fig. 4.22 Efectos de utilizar *sharing*: a la izquierda distribución de la población en una función normal, a la derecha distribución de la población utilizando técnicas de *sharing*

Como podemos ver en la **figura 4.22**, la función de *sharing* permite una mejor exploración del espacio de búsqueda. Al evitar las concentraciones de población en zonas concretas. Existen múltiples variantes de la función de *sharing* [2] aunque todas se basan en los mismos principios básicos:

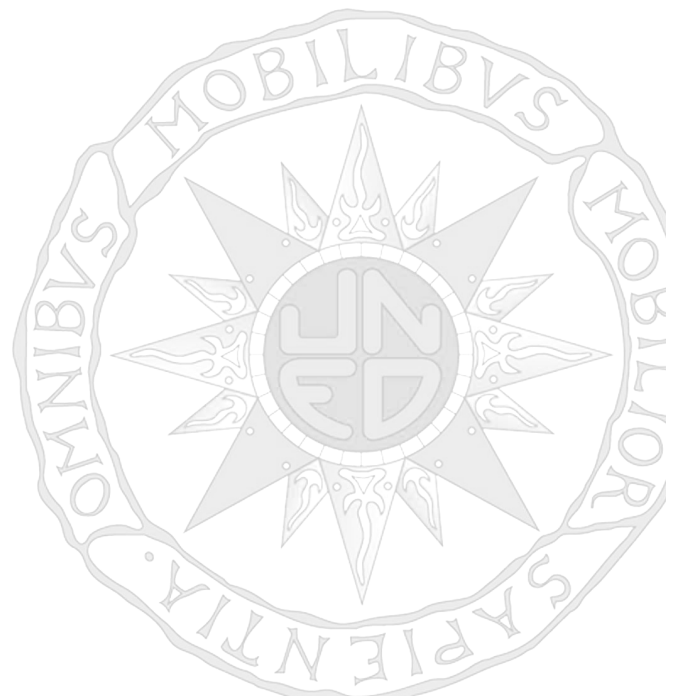
- En primer lugar hemos de definir *radio de nicho* σ .
- Tomamos dos individuos s_1 y s_2 pertenecientes al mismo *nicho* y calculamos la distancia d que los separa.

La forma de calcular la distancia entre los individuos depende de la codificación utilizada. En el caso de estar trabajando con un alfabeto binario la distancia se medirá en términos de *distancia de Hamming*.

En el caso de tratarse de vectores codificados con números reales la distancia será la distancia Euclídea [2]. Dicha distancia no sólo puede calcularse en base al espacio de búsqueda, también puede ser medida en el *espacio de soluciones*. Sea como fuere, una vez definida la distancia d se aplica la función de *sharing* elegida.

CAPÍTULO 5

ESTADO DEL CONOCIMIENTO



5 | ESTADO DEL CONOCIMIENTO

5.1. Introducción

El concepto de sostenibilidad aplicado a los entornos urbanos se puede definir como la capacidad del área urbana y su región para continuar operando a los niveles de calidad de vida deseados por la comunidad sin restringir las opciones disponibles para las generaciones presentes y futuras y sin causar impactos adversos dentro y fuera del límite urbano. Debemos ver la "Conferencia sobre ciudades urbanas sostenibles", celebrada en Río de Janeiro en 2000, para establecer la relación entre el desarrollo sostenible y la planificación urbana.

5.2. Estado del conocimiento en planificación urbana industrial

En otras palabras, la asunción de los principios de sostenibilidad en el campo de la planificación urbana y espacial significa la adopción de modelos de desarrollo urbano, conscientes del consumo de recursos y la necesidad de reducir los impactos ambientales [1].

En los países industrializados y principalmente en Europa, estas nuevas "tendencias" han dado lugar a la regeneración urbana, políticas de alta densificación urbana y el desarrollo de procesos que hacen referencia al modelo denominado de "ciudad compacta" [2].

Hoy en día, una ciudad compacta se considera una opción interesante para reducir la expansión urbana incontrolada que ha caracterizado el desarrollo urbano en el último siglo y que ahora se ha demostrado que ya no es sostenible. El alto consumo de tierra, la congestión urbana, el aumento en los costos de infraestructura y el empeoramiento de la salud de las personas son solo algunos de los efectos debidos a la expansión urbana [3].

Muchos planificadores consideran la construcción de áreas verdes insostenible, particularmente cuando la regeneración o reutilización de tierras abandonadas o tierras grises es posible porque contribuye a la explotación de un recurso no renovable como la tierra, en contra del principio de sostenibilidad urbana, planificación. Como algunos autores han enfatizado, el consumo de suelo reduce la capacidad de la naturaleza para satisfacer los requerimientos humanos y, por lo tanto, afecta los servicios ecosistémicos de varias maneras [4].

De hecho, a diferencia de los distritos industriales tradicionales, surgen los parques ecoindustriales (Eco Industrial Parks, EIP en inglés) que basan su modelo de agregación principalmente en oportunidades económicas o simplemente deciden ubicarse en áreas de gran accesibilidad, cerca de las principales infraestructuras de transporte.

Los parques ecoindustriales llaman a la forma común de producción en cuestión, prestando especial atención a la gestión de cuestiones ambientales y de recursos, incluida la energía, el agua y los materiales, para lograr la mayor reducción en el consumo de recursos naturales y no renovables, emisiones y desechos [5].

En realidad, si analizamos la teorización e implementación de EIP, observamos que la referencia a los principios sostenibles se ha centrado exclusivamente, además de los criterios para la ubicación y el uso de los recursos del suelo, principalmente en los procesos industriales, es decir, los intercambios de energía y masa.

Con el fin de tener una organización más efectiva de intercambios de masa y energía entre empresas y fuertes reducciones de impacto en las áreas circundantes, en lugar de aceptar intercambios de energía y masa de menor rendimiento a favor de la renovación y remediación de áreas industriales existentes, un objetivo más profundo y objetivo, se propone un análisis que consiste en la búsqueda de las mejores soluciones constructivas, basadas en el análisis de la implementación de las infraestructuras que conformarán el EIP y que garantizan criterios de sostenibilidad desde su origen.

Este es un nuevo enfoque que contribuirá, junto con los modelos de planificación urbana, el diseño del edificio y las interrelaciones y la gestión EIP, a la optimización ambiental de la misma.

Volviendo a los antecedentes, hasta la fecha, los modelos de planificación y asentamiento, que afectaron el desarrollo de las áreas industriales durante los últimos siglos, siempre han tenido en cuenta la necesidad de proporcionar la ubicación correcta para los sitios industriales, combinando las necesidades de producción con entornos espaciales óptimos y luego con las necesidades de protección ambiental [6].

Específicamente, la planificación urbana se desarrolló durante el siglo XIX, principalmente después del fenómeno de la industrialización, que ha producido cambios y transformaciones extensas de marcos urbanos y espaciales y ha determinado fuertes criticidades en términos de habitabilidad urbana, debido a procesos de polarización relevantes para la población en áreas urbanas [7].

Principalmente con el objetivo de mejorar la calidad de la vida urbana, muchos planificadores, ingenieros y arquitectos pensaron en nuevos modelos de ciudades donde podría resolverse el conflicto entre el desarrollo industrial y la vida urbana. Howard, Tony Garnier y Le Corbusier son solo algunos de los planificadores más famosos que propusieron nuevos modelos de ciudades, donde el patrón urbano se organiza sobre la base de una separación más o menos amplia entre funciones residenciales e industriales.

En particular, en 1928, Le Corbusier postuló el paradigma de la separación de las diferentes funciones urbanas, que se convirtió en un modelo importante para planificar y desarrollar la mayoría de las ciudades europeas. Como enfatizaron Lambert y Boons [8], esta idea ha sido ampliamente aceptada desde entonces, y dio como resultado los precursores de los parques industriales tradicionales.

Las primeras industrias que se establecieron en estas áreas industriales fueron las que no eran compatibles con las áreas residenciales. Las industrias un poco más grandes aprovecharon las instalaciones de transporte, como las conexiones ferroviarias o los canales de navegación interior.

Poco a poco, en los países industrializados, una parte cada vez mayor de las actividades económicas se desplazó del área residencial a los parques industriales; las áreas agrícolas, que a menudo tienen altos valores culturales e históricos y naturales y que deberían actuar como zona de amortiguación entre las áreas urbanizadas, se transformaron en áreas industriales a un ritmo elevado [9].

Este desarrollo fue acelerado por las políticas municipales que apuntan a desarrollar muchas áreas industriales a través del modelo de planificación de zonificación, para enriquecer su territorio y economía local y también gracias a la mejora del transporte mediante vehículos livianos para empleados y clientes y el transporte de mercancías en vehículos pesados.

Hasta los años setenta, el desarrollo industrial había seguido el modelo clásico, donde los problemas económicos vinculados a las ganancias y el desarrollo continuo de nuevas tecnologías se consideraban los únicos propósitos.

Además, como ya se señaló, el modelo de localizador relacionado se vio afectado principalmente por el acceso a las principales infraestructuras de transporte y centros estratégicos y tendió a reubicar asentamientos industriales lejos de las áreas urbanas.

Más tarde, ante las previsiones de un próximo agotamiento de los recursos naturales necesarios para continuar fomentando el desarrollo económico y proporcionando bienestar a la población mundial, la necesidad de desarrollar nuevos modelos de asentamiento de parques industriales, que puedan conducir al desarrollo sostenible, se convirtió en esencial.

Los EIP nacieron para responder a estas prioridades urgentes, gracias a su naturaleza innovadora, capaces de combinar objetivos ambientales, como la reducción profunda de emisiones y el consumo de recursos y energía, con objetivos económicos.

Una de las primeras y más famosas definiciones de un parque ecoindustrial fue formulada por Lowe, Moran y Holmes [11] como "una comunidad de empresas manufactureras y de servicios que buscan un mejor desempeño ambiental y económico mediante la colaboración en la gestión de cuestiones y recursos ambientales", incluida la energía, el agua y los materiales.

Côte et al. [12] dio una definición más estructurada de un parque ecoindustrial como "un sistema industrial que conserva los recursos naturales y económicos, reduce

los costos y las responsabilidades de producción, energía material, seguro y tratamiento, mejora la eficiencia operativa, la calidad, la salud de el trabajador y la imagen pública, y brinda oportunidades para la generación de ingresos por el uso y venta de materiales desperdiciados ".

De nuevo, Roberts [13] dijo que los parques ecoindustriales son de mayor interés, ya que los gobiernos, las empresas y la sociedad buscan soluciones para el uso y el reciclaje de desechos y emisiones, y Lowe [14] agrega que "los componentes

Este enfoque incluye el verde diseño de infraestructura e instalaciones del parque (nuevas o modernizadas), producción más limpia, prevención de la contaminación, eficiencia energética y asociación entre empresas. Un EIP también busca beneficios para las comunidades vecinas para asegurar que el impacto neto de su desarrollo sea positivo ".

En definitiva, los EIP han gozado de amplia atención desde sus primeras teorizaciones, y hoy en día, los planificadores industriales de todo el mundo los observan con gran interés, ya que se consideran una alternativa real a los parques industriales tradicionales en los que vale la pena invertir. De hecho, desde principios de los años noventa, cuando se acuñó el término "parque industrial ecológico" [15], se han llevado a cabo muchos experimentos, primero en los Estados Unidos y Canadá y, posteriormente, en Europa, Asia y el Sur. África, también lo que lleva a varias prácticas interesantes [16].

Los parques ecoindustriales se basan en ciencias profundamente vinculadas a la sostenibilidad: la disciplina que principalmente apoyó la implementación del concepto EIP fue la ecología industrial, basada en principios como la eficiencia energética (que debe considerarse como el uso eficiente de los recursos naturales para satisfacer a los humanos necesidades), circuitos cerrados de materiales (en términos de equilibrar entrada y salida minimizando, a través de la reutilización, la cantidad total de material industrial que se deposita o pierde en procesos intermedios) y, sobre todo, la simbiosis industrial (se ven procesos e industrias)) como sistemas que interactúan en lugar de componentes aislados en un sistema de flujos de materiales, energía e información) [17].

Estos enfoques, basados principalmente en intercambios de empresa a empresa, describen solo algunas de las muchas características posibles de un EIP. Si consideramos, por ejemplo, la China Circular Economy (CE), que se introdujo en 1998 como una nueva estrategia para el desarrollo sostenible, que integra la producción más limpia y la ecología industrial en un sistema más amplio que engloba las empresas industriales, pudieron identificar muchas más estrategias. Implementaciones de EIP, como desarrollo de sitios preservando características naturales locales, contratando empresas comprometidas con la eficiencia de recursos y baja contaminación, logrando apoyar el éxito financiero, ambiental y social de las compañías de EIP y un fuerte vínculo con las comunidades circundantes desarrollo económico, programas sociales y ambientales [18].

En este marco, un tipo de enfoque de planificación ecológica comienza a romperse [19] hacia la planificación de áreas industriales, que va más allá de la idea

tradicional de "acabar con el gasoducto" de control de la contaminación y trata de fomentar el "pensamiento como un ecosistema". [20]

Más recientemente, se ha propuesto un enfoque de planificación ecológica adicional para implementar EIP, integrado principalmente en una dimensión espacial. La nueva perspectiva, que proporciona la ecología del paisaje [21].

Con la introducción de la ecología industrial en 1989 [22], el desarrollo industrial se colocó en una nueva perspectiva. Esta nueva perspectiva establece que los complejos industriales deben diseñarse para parecerse al ecosistema natural lo más cerca posible.

El desarrollo industrial debe parecerse al ecosistema natural porque en ese sistema, la energía y los recursos se usan de manera óptima y no hay desechos.

En los últimos años, la atención de los proyectos de desarrollo de parques ecoindustriales (EIP) ha crecido enormemente entre los gobiernos y las industrias nacionales y regionales en muchos países.

Se cree que un EIP bien planificado y en funcionamiento tiene el potencial de beneficiar a la economía y aliviar sustancialmente la presión ambiental en y cerca de la ubicación de su desarrollo [23].

Este beneficio mutuo para la economía y el medioambiente mencionado anteriormente, está claramente establecido en la definición de EIP utilizada por la EPA de EE. UU. [24]: "EIP es una comunidad de empresas manufactureras y de servicios que buscan un mejor desempeño ambiental y económico colaborando en la gestión y reutilización ambiental cuestiones".

El desarrollo de EIP se basa principalmente en el concepto de ecología industrial. Frosch y Gallopoulos discutieron el concepto de ecología industrial por primera vez. En su artículo "Estrategias para la fabricación " [25], definieron un ecosistema industrial como un sistema en el que: " se optimiza el consumo de energía y materiales, se minimiza la generación de desechos y los efluentes de un proceso.

Aunque todavía está en su infancia como un campo de estudio, la ecología industrial está surgiendo como un enfoque apasionante para la aplicación del desarrollo económico ambientalmente sostenible. La discusión desde el lanzamiento de la Estrategia Mundial de Conservación en 1980, "Nuestro futuro común" [26], el informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1987 [27] y la "Agenda 21" en 1992 [28] resultó en la aceptación gradual de que la sostenibilidad debe integrar la integridad ecológica, la eficiencia económica y la equidad social.

Gran parte del esfuerzo del gobierno y la industria desde 1987 ha enfatizado el vínculo entre la economía y el medio ambiente con mucha menos atención a la dimensión social o comunitaria de la sostenibilidad.

En este sentido, podemos discutir si los ecosistemas industriales son simplemente analogías de los ecosistemas naturales e investigados con esto en mente o si el metabolismo de la producción industrial y los sistemas de consumo están

firmemente integrados en la biosfera y los ecosistemas industriales son simplemente otra forma de ecosistema con los humanos como el espacio dominante. Los parques o granjas industriales, de los cuales hay varios tipos, se han sugerido como una agrupación de ecosistemas, en esencia, un ecotipo.

En los estudios de BH Roberts [29] sobre EIP de Australia, que se encuentran entre los mayores productores de desechos en el mundo, hasta hace poco, ha sido que los desechos tienen poco uso y, por lo tanto, valor.

Para muchas empresas, el desperdicio es simplemente un subproducto que representa un costo de producción. En este caso, los parques ecoindustriales son una forma de demostrar la aplicación de la ecología industrial y son de gran interés ya que los gobiernos, las empresas y la sociedad buscan soluciones para el uso y el reciclaje de residuos y emisiones.

Australia está haciendo progresos para tratar de resolver sus problemas de desechos. A principios de 1997, el Instituto Australiano de Investigación de Vivienda y Planificación Urbana (AHURI) inició un proyecto de investigación en el sudeste de Queensland para investigar el concepto de ecología industrial y su aplicación para lograr formas más sostenibles de desarrollo de la propiedad industrial.

Peuportier [30] lleva a cabo una amplia exposición de indicadores ambientales dentro del entorno urbano y propone eco-técnicas para una construcción eficiente teniendo en cuenta la optimización energética y el uso de energías renovables.

Otros autores como Jullien, A. [31], analizan ecodiseño para infraestructuras, utilizando herramientas de análisis del ciclo de vida (ACV), calculando el impacto ambiental de las soluciones mediante el uso de herramientas (ECORCE) y ecoindicadores que permiten obtener el impacto relacionado con el consumo de energía, efecto sobre el calentamiento global, acidificación potencial del medio ambiente, alteración de los niveles de ozono, eutrofización y toxicidad humana potencial.

Todo esto analizando los diferentes sistemas de transporte (ferrocarril, transporte por carretera, ...) desde el análisis de la implementación de las infraestructuras.

La determinación de la magnitud de los impactos ambientales, causados por la implementación de proyectos de ingeniería y actividades productivas a lo largo de su ciclo de vida, se ha determinado a partir de diferentes herramientas de diferentes indicadores. Actualmente existen metodologías satisfactorias a nivel internacional, como BREEAM [32], CASBEE [33], LEED [34], y a nivel nacional, como SPRILUR [35], GUÍA DE CERTIFICACIÓN DE PLANIFICACIÓN URBANA ECOLÓGICA [36]. Estos sistemas permiten la evaluación de las diferentes actividades de planificación urbana, otorgando distinciones o valores en escalas de cumplimiento que consideran diferentes atributos como el paisaje, el uso de la tierra, el ecosistema, el riesgo, el ciclo de vida, etc.

Existen otras herramientas para evaluar el ciclo de vida de los productos industriales que podrían adaptarse para el estudio de los impactos ambientales durante el ciclo de vida de los diferentes productos y materiales que participan en los procesos de construcción, como SIMAPRO [37].

Hasta ahora, el estudio de los impactos causados por la implementación de áreas urbanas, así como de los espacios urbanos específicos destinados a áreas de producción industrial, con particularidades en términos de composición arquitectónica, provisión de infraestructuras y suministros, flujos de circulación y materia, fuente de efluentes de efectos significativos sobre el medio ambiente y sumidero de grandes cantidades de energía.

La industria requiere y consume cantidades considerables de energía y materiales para la transformación de materias primas en productos finales. Representa una gran parte del consumo de energía (200 cuatrillones de unidades térmicas británicas (Btu) o alrededor del 38% del consumo total de energía en 2010 (EIA, 2013)) [38].

Debido al aumento de la capacidad de producción en las plantas existentes y la instalación de nuevas unidades industriales, este consumo de energía continúa aumentando junto con las emisiones industriales.

Estos últimos suelen cuantificarse en términos de emisiones de GEI, y se ha observado un aumento del 30% entre 2000 y 2010 (IPCC, 2014) [39]. El uso de recursos naturales, como el agua, también es importante en el sector industrial, y se estima que el consumo mundial aumentará en un 22% para 2025 (ONU, 2003) [40].

Las relaciones simbióticas en el EIP brindan la oportunidad de obtener beneficios colectivos de EIP significativamente mayores que la suma de los beneficios individuales de cada una de las empresas industriales (Chertow, 2004) [41].

Sin embargo, los sistemas industriales que se interconectan en un EIP conducen a sistemas de ingeniería más complejos, cuyo diseño y operación requieren metodologías apropiadas capaces de ir más allá de la integración clásica de procesos de energía / materiales, para capturar, abordar y resolver los diferentes desafíos estructurales y de comportamiento que surgen.

Por analogía con el concepto de Smart Grids (SG) para la transmisión y distribución de energía eléctrica, que están destinadas a operar fuentes de generación distribuida y conectarlas de manera inteligente a consumidores de electricidad, este documento propone un marco de modelado y optimización para el diseño y operación requerido metodologías apropiadas capaces de ir más allá de la integración clásica de procesos energéticos / materiales, para capturar, abordar y resolver los diferentes desafíos estructurales y de comportamiento que surgen.

5.3. Diseño de espacios industriales

Las áreas industriales están configuradas por la trama de la carretera y la infraestructura asociada. Los elementos de carreteras e infraestructura utilizaron materiales, maquinaria e impactos ambientales responsables de soluciones constructivas a lo largo de su ciclo de vida.

Las diferentes soluciones constructivas, que consisten en sus elementos, están causando impactos ambientales que pueden medirse por indicadores relacionados con la sostenibilidad.

Un tramo de carretera constructivo puede considerarse el generador del desarrollo de la infraestructura que causa las carreteras longitudinales, integradas por elementos de construcción, instalaciones e infraestructura, que al mismo tiempo integran y configuran cualquier tejido urbano.

Este elemento, como solución de diseño en ingeniería civil para algunas necesidades funcionales específicas, conlleva algunos impactos específicos en el medio ambiente que pueden evaluarse y minimizarse, especialmente en la fase de elección de materiales y sistemas de construcción.

Hoy en día, estos son elementos comunes de las secciones transversales de la carretera que definen las parcelas urbanas en áreas residenciales y áreas industriales o comerciales, de la siguiente manera:

- Viales de circulación
- Aceras peatonales
- Medianas
- Bermas
- Zonas de aparcamiento en cordón o batería
- Viales o carriles especiales (carril bici, etc.)

Las Instalaciones longitudinales de cada uno de los servicios de infraestructura que normalmente se ejecutan a través del subsuelo y que se representan como los llamados prismas de servicio, bulbos de instalaciones, galerías de instalaciones registrables o, alternativamente, galerías de servicios visitables.

Una sección de un vial se puede representar esquemáticamente como se muestra en la Fig. 1. Aquí se ilustra la sección transversal de un vial industrial y muestra claramente los elementos de infraestructura y servicios urbanos que se encuentran dentro de ella (en su sección).

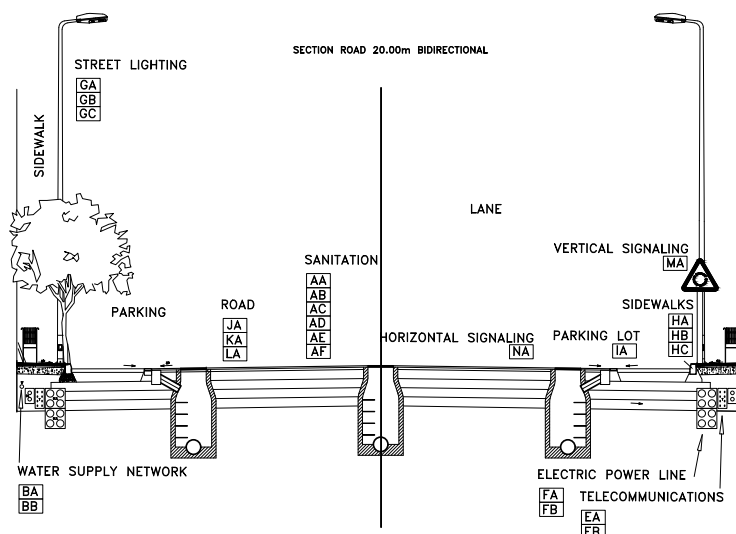


Fig. 1. Sección viaria generadora de un vial urbano longitudinal

El documento propone una metodología de optimización para apoyar al prescriptor o al servicio público o privado que debe adoptar decisiones al respecto de proyectos, es decir, la autoridad local, el operador de un parque industrial o un grupo de inversión privado, durante el proceso de implementación de un área industrial en aspectos relacionados con la sostenibilidad de dicho proyecto.

Infraestructuras, como saneamiento, con redes únicas o separadas, para la eliminación de aguas residuales y / o pluviales, suministro de agua, distribución de la distribución de energía, en media o baja tensión, distribución de gas, red de telecomunicaciones, la carretera con la configuración estructural definida en diferentes especificaciones de cálculo y diseño, con la explanada, la base, la subbase y la superficie de rodadura, las aceras para el tráfico peatonal y las bandas o áreas de estacionamiento, equipos, ..., todos y cada uno de los elementos pueden elegirse entre una amplia gama de posibilidades comerciales, materiales más o menos clásicos o nuevos, y con sus propias características que los diferencian entre otros en cuanto a su desempeño ambiental.

5.4. Técnicas de optimización

En esta Tesis, se han elegido diferentes parámetros para cada solución, vinculándolos a tres criterios utilizados para justificar las soluciones de las herramientas de optimización empleadas, que se basarán en el empleo de técnicas heurísticas como los Algoritmos Genéticos. Estos parámetros son, el costo económico (€/m), la cantidad de energía incorporada (KJ/m) y la cantidad de CO₂ emitido por m de solución propuesta.

La últimas contribuciones y desarrollos de las técnicas de optimización heurística están vinculados a los procedimientos de inteligencia artificial. Para

problemas multiobjetivo, los objetivos implícitos a los problemas de ingeniería civil, son generalmente conflictivos.

Nuestro verdadero problema de ingeniería tiene tres objetivos para minimizar, es decir, el costo económico ($\text{€} / \text{m}$), la cantidad de CO_2 generado (kgCO_2 / m) y la energía integrada en la solución (MJ / m). Estos son problemas complejos pero reales.

Los algoritmos genéticos (GA) son una metaheurística popular especialmente adecuada para esta clase de problemas, aunque hasta la fecha no han sido muy explotados.

Los GA tradicionales están personalizados para adaptarse a problemas de objetivos múltiples mediante el uso de funciones de ejercicio especializadas y la introducción de métodos para promover la diversidad de soluciones. La optimización multiobjetivo en la que se apoya esta Tesis se basa en la utilización del algoritmo NSGA-II [42]. Se ha demostrado que el algoritmo NSGA-II se adecúa mejor que otros en el proceso de optimización basado en Fronteras de Pareto para este tipo de problemas .

El objetivo del algoritmo NSGA es mejorar el ajuste adaptativo de una población de soluciones candidatas a un frente de Pareto limitado por un conjunto de funciones objetivas. El algoritmo utiliza un proceso evolutivo con sustitutos para operadores evolutivos que incluyen selección, cruce genético y mutación genética. La población se clasifica en una jerarquía de subpoblaciones basadas en el ordenamiento del dominio de Pareto. La similitud entre los miembros de cada subgrupo se evalúa en el frente de Pareto, y los grupos resultantes y las medidas de similitud se utilizan para promover un frente diverso de soluciones no dominadas.

El algoritmo, que se incluye en los anejos a la presente Tesis, proporciona un listado de pseudocódigo del algoritmo genético de clasificación no dominado II (NSGA-II) para minimizar una función objetivo determinada.

La función objetivo ordena a la población generada a partir de unos progenitores, en una jerarquía de frentes de Pareto no dominados. Ciertos operadores incluidos en el pseudocódigo, calculan la distancia promedio entre los miembros de cada frente en el frente mismo. Esta metodología fue creada por Deb en 2002. Existen otros operadores implementados como las relativas al cruzamiento, mutación, selección por rango, distancia al óptimo,.. todas ellas típicas en el procedimiento de optimización por algoritmos genéticos.

NSGA se diseñó y se adaptó inicialmente a casos de problemas de optimización de objetivos múltiples de función continua. Se puede usar una representación binaria junto con operadores genéticos clásicos, como el cruce de un punto y la mutación puntual. Se recomienda una representación de valor real para los problemas de optimización de la función continua, que a su vez requieren operadores genéticos específicos de representación, como el cruce binario simulado (SBX) y la mutación polinomial. Recientemente, Deb y Jan han concebido la tercera versión del algoritmo genético NSGA-III, como un nuevo algoritmo genético de clasificación no dominado para Optimización Multiobjetivo. Con él amplían el conocido NSGA-II para

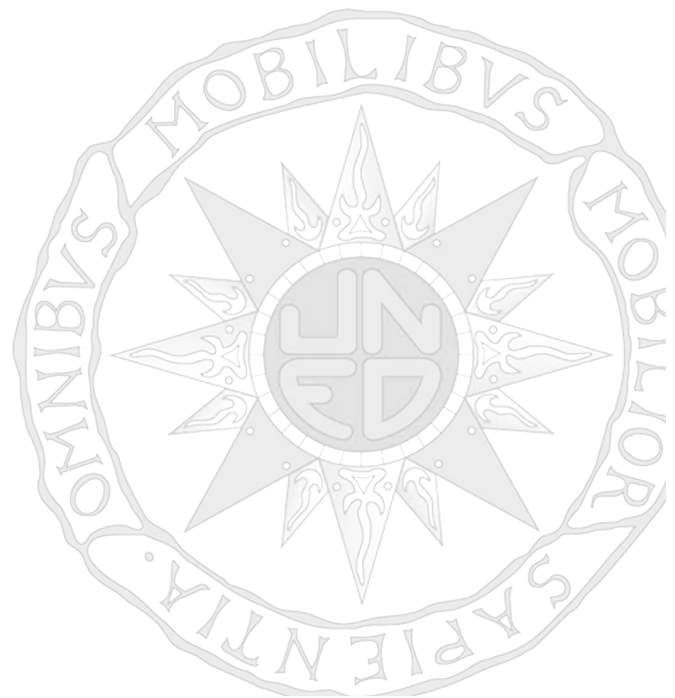
tratar el problema de optimización con mayor cantidad de objetivos, utilizando un enfoque de punto de referencia, con un mecanismo de clasificación no dominado.

Un tramo de vial urbano (sección viaria) puede considerarse el generador del desarrollo de la infraestructura que causa los viales longitudinales, integradas por elementos de construcción, instalaciones e infraestructura, que al mismo tiempo integran y configuran cualquier tejido urbano.

El objetivo final del documento es proponer un marco metodológico para complementar el modelado y la optimización de EIP, teniendo en cuenta las especificidades de EIP en términos de características de complejidad y el concepto de Simbiosis Industrial (SI). El marco metodológico se basa en el modelado abstracto y el procedimiento de optimización del algoritmo genético.

CAPÍTULO 6

APLICACIÓN PRÁCTICA



6 | APLICACIÓN PRÁCTICA

6.1. Definición del problema

En los capítulos anteriores se han visto las bases en las que se fundamentan los algoritmos genéticos, así como un conjunto de pruebas simples que intentaban corroborar de forma práctica lo descrito en la teoría.

Se ha visto que los algoritmos genéticos son métodos efectivos en lo que a funciones continuas se refiere. Sería pues momento de ponerlos a prueba con otro tipo de problema y ver además si resultan unos métodos tan potentes como se les presupone en la teoría.

En este caso el problema en cuestión sería el de obtener la sección constructiva óptima en relación a la sección viaria a implantar para definir la urbanización de un vial de un polígono industrial.

Un problema que puede parecer simple pero que como veremos más adelante tiene implicaciones importantes por ser *optimizable* desde el punto de vista de la sostenibilidad (emisiones de CO₂, energía embebida y coste económico).

6.1.1. Efectos negativos de un mal diseño y concepción de la sección viaria urbana

Independientemente del modelo o tipología de la sección viaria elegida, la forma de configurar los elementos constructivos y las infraestructuras de instalaciones (bulbos o prismas de instalaciones) se realiza de la misma forma.

Puede existir variabilidad en cuanto a materiales y alternativas o soluciones distintas para una misma finalidad. Es decir que las soluciones constructivas habituales pueden resultar no ser las óptimas desde los criterios de sostenibilidad perseguidos.

Quizás, alguna combinación no considerada hasta el momento resulte ser la óptima desde los criterios estudiados, todo ello generando las distintas posibilidades de variación de las diferentes soluciones constructivas, basadas en exploración de posibilidades sobre materiales, configuraciones y tecnologías, para configurar una sección viaria como generadora de la urbanización.

6.1.2. Espacio de búsqueda del problema

Como se ha comentado al inicio de este capítulo, el objetivo es utilizar los algoritmos genéticos para generar combinaciones de alelos (elementos de infraestructuras y materiales), y con ello una serie de individuos (población) que pueda ser explorada para elegir el individuo óptimo como solución de una sección viaria

cualquiera, como generadora de un espacio urbano, desde el punto de vista de sus emisiones de CO₂ a la atmósfera, la energía embebida de la solución y su coste económico.

La manera de hacer Esto sería informatizar los datos de los parámetros estudiados para cada partida de obra que constituye la solución constructiva de la infraestructura, a partir de hojas tabuladas en las que se incluyen las emisiones de CO₂, la energía embebida y el coste económico.

Una vez informatizadas estas hojas podremos determinar, a partir de los diferentes parámetros introducidos, la solución óptima y viable.

Con todos estos datos ya podemos hacernos una idea clara de cuál es el objetivo que buscamos, y por tanto del espacio de búsqueda en el que nos moveremos.

En la figura siguiente (**Fig.6.1**) podemos ver un ejemplo de esta codificación para un sistema de 26 elementos de la descomposición ($C = 26$) y con valores para cada elemento de entre 2 y 14 posibilidades ($B = 2..14$).

11	6	7	7	2	6	6	6	5	2	4	7	4	11	8	3	5	9	3	4	7	8	4	14	8	5
AA	AB	AC	AD	AE	AF	BA	BB	CA	DA	EA	EB	FA	FB	GA	GB	GC	HA	HB	HC	IA	JA	KA	LA	MA	NA

Fig. 6.1. Rango de valores de cada alelo

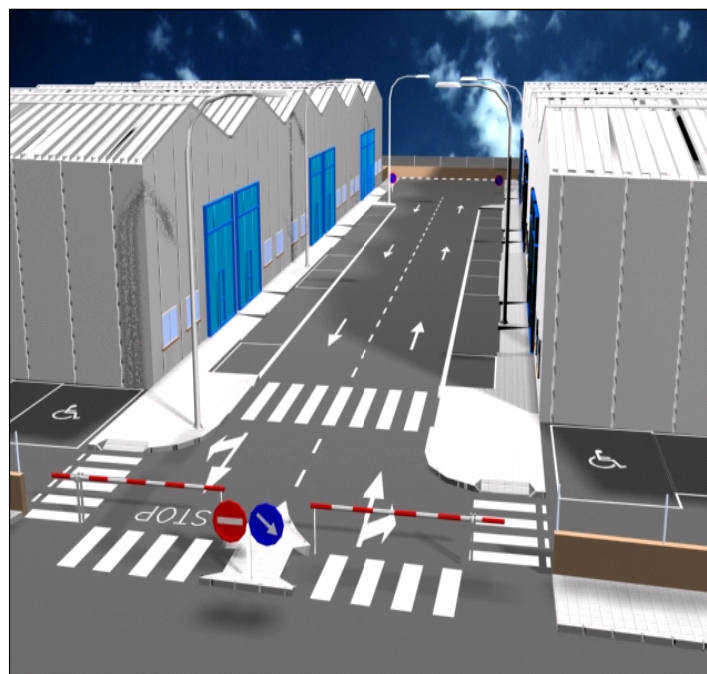


Fig. 6.2. Vial industrial.

A partir de esto, obtendremos que nuestro espacio de búsqueda se compone por todas las posibles combinaciones de estos C_j elementos de la sección viaria a lo largo de las B_k posibilidades de valor de cada elemento (**ec.6.1**).

$$\varphi = \prod_{j=1}^{26} rango B_{jk}$$

Tabla 1. Variables del problema

<i>Identificación</i>	<i>Variables</i>	<i>Grupo</i>	<i>Descripción</i>
AA	11	Saneamiento	Canalización
AB	6		Arquetas
AC	7		Pozo de registro
AD	7		Imbornal
AE	2		Trapa registrable
AF	6		Relleno
BA	6	Suministro de agua	Material tubería
BB	6		Relleno
CA	5	Protección incendios	Material tubería
DA	2	Suministro de gas	Material tubería
EA	4	Telecomunicaciones	Prisma canalización
EB	7		Cableado
FA	4	Energía eléctrica	Canalización
FB	11		Cableado
GA	8		Báculo
GB	3	Alumbrado público	Luminaria
GC	5		Grupo alumbrado
HA	9		Superficie peatonal
HB	3	Aceras	Bordillo
HC	4		Rigola
IA	7	Aparcamiento	Material
JA	8		Explanada
KA	4	Calzada	Base
LA	14		Firme
MA	8	Señalización	Señalización vertical
NA	5		Pintura horizontal

6.2. Justificación uso Algoritmos Genéticos

A la vista de lo propuesto sería natural preguntarse si los algoritmos genéticos son la opción más adecuada. Por un lado, la mayor parte de los métodos de optimización *tradicionales* no son viables puesto que este sistema no sigue ninguna ecuación (o como mínimo sería muy difícil de modelar) que pueda maximizarse o minimizarse. Otra posibilidad sería probar todas las posibles combinaciones valiéndonos de la potencia de los procesadores actuales.

Así pues, en este caso simple tendremos 26 elementos variables, con un máximo de 14 posibilidades de variación, y cada una de ellas con unos valores de nivel de CO₂ generado, energía embebida y coste económico, nos da el siguiente resultado (**ec.6.2**).

$$\varphi = 11 \times 6 \times 7 \times 7 \times 2 \times 6 \times 6 \times \dots \times 14 \times 8 \times 5 \approx 2,79818 \times 10^{19} \text{ soluciones posibles}$$

Evidentemente el resultado es un número enorme. Como también es evidente que dentro de esas $2,79818 \times 10^{19}$ soluciones existen multitud de combinaciones que pese a no ser iguales, representarán la misma solución a efectos prácticos e incluso soluciones imposibles, bien porque constructivamente no sean factibles o bien porque reglamentaria o legalmente no sean posibles.

Dejando a un lado la complejidad a nivel de programación que implicaría el probar sólo las soluciones “no repetidas” o las posibles por exigencias legales o reglamentarias, sería interesante comprobar en qué dimensiones deja esto a nuestro espacio de búsqueda y eso cambia en algo nuestra decisión.

Teniendo en cuenta que el cálculo de una sola solución y su correspondiente solución referida a los tres indicadores de sostenibilidad elegidos, tarda aproximadamente 35 nanosegundos nos indica que serían necesarios nada menos que $1,92 \times 10^{63}$ segundos para evaluar todas las posibilidades.

Intentar pasar esta cifra a horas, días, meses o años es absurdo. Además de tener en cuenta que esta cifra crece exponencialmente con el número de alternativas constructivas. Podemos concluir que es un tiempo demasiado elevado para este cálculo, aunque se puede indicar que equivaldría a 20×10^6 siglos.

Por el contrario, los métodos *heurísticos* y en concreto los algoritmos genéticos sólo necesitarían unos cuantos millones de cálculos incluyendo todo el proceso, además de garantizar que encontrarán, sino la solución óptima global, una buena solución en un tiempo competitivo.

Bien es cierto que estos métodos tienen ciertas dificultades en algunos tipos de problemas. Pero también es cierto que han tenido grandes éxitos en campos a priori poco prometedores por su carácter aleatorio y poco predecible: por ejemplo la inteligencia artificial en juegos de damas, o incluso el diseño de antenas de radio donde cuentan con la primera patente no humana registrada.

6.3. Especificaciones del código

Una vez conocidos los problemas podemos pasar al problema propiamente dicho. La idea, ya comentada con anterioridad, es utilizar los AG's para obtener una sección viaria óptima desde los cuatro indicadores de sostenibilidad definidos (y elegidos) por el autor.

6.3.1. Codificación utilizada y métodos de selección, cruce y mutación

En lo que se refiere a la **codificación** utilizada se implementará un sistema representado por un vector asociado a cada solución, consistente en un vector de enteros donde cada posición representará el número de sección viaria integrada por la suma de cada solución del total de elementos que la compone, al que será asignado (Fig.4.6 - Izquierda); las coordenadas del vector serán los tres valores correspondientes a la emisión total de CO₂, la cantidad de energía embebida en la solución y el coste económico que representa la misma, coordenadas o valores que podrán representarse sobre unos ejes coordenados y que podrán someterse a

optimización para minimizar su magnitud y con ello su impacto potencial sobre el medio ambiente.

11	6	7	7	2	6	6	6	5	2	4	7	4	11	8	3	5	9	3	4	7	8	4	14	8	5
7	3	2	5	1	5	3	4	5	2	3	6	3	9	7	1	5	6	2	2	2	6	3	10	7	2
RED DE SANEAMIENTO					AGUA		PCI	GAS	TELECOM	ELECTRIC.		ALUMBRADO			ACERAS		PARK	CALZADA		SEÑALIZAC.					
MATERIAL TUBERÍA: HORMIGÓN EN MASA	POZOS REGISTRO: FABRICA BLOQUE HORMIGÓN	AQUETAS: FABR. LADRILLO	SUMIDERO S: POLIETILENO	TAPA ARQUETAS: HORMIGÓN	RELLENO: ARIDO RECICLADO	TUBERÍA: ACERO	RELLENO: HORMIGÓN RECICLADO	TUBERÍA: FIBROCEMENTO	TUBERÍAS: POLIETILENO	CANALIZ. TELECO: PRISMA HORMIGÓN	CABLEADO: ACERO COBREADO	CANALIZ.: TUBO ACERO	CONDUCTOR: ALUMINIO XLPE+HDPE	BACULO: MADERA	LUMINARIA: PVC	GRUPO: LED	MAT. TRÁNSITO: BALDOSA PIEDRA NATURAL CALIZA	BORRILLO: PIEDRA NATURAL	RIGOLÁ: HORMIGÓN IN SITU	APARCAMIENTO: HORMIGÓN DRENANTE	EXPLANADA: SUELO ESTABILIZADO-2	MATERIAL BASE: MBC-G	FIRME: GRAVAEMULSIÓN	SEÑALIZ.: VERTICAL: FIBRA VIDRIO	SEÑALIZ. HORIZONTAL: PINTURA FOTOLUMINISCENTE
AA	AB	AC	AD	AE	AF	BA	BB	CA	DA	EA	EB	FA	FB	GA	GB	GC	HA	HB	HC	IA	JA	KA	LA	MA	NA

Fig. 6.3. Ejemplo de codificación con posible solución

Dicha codificación se realizará sólo con números reales en base a la posición asociada de la opción de entre las posibles para cada elemento de la solución constructiva.

Referente a los **métodos de selección** utilizados, se implementarán los dos más típicos expuestos en el apartado 2.2.5. (*Selección por ruleta* y la *selección por torneo*) y se observarán los resultados que cada uno ofrece.

Como **métodos de cruce** se utilizará el *cruce en un punto* (apartado 2.2.6) con algunas variaciones. En primer lugar, el sistema de codificación implementará la opción de cruce en uno o dos puntos de manera que se podrá ver cuál de ellos ofrece mejores resultados.

Por último, en cuanto al **método de mutación** utilizaremos la variante conocida como *permutación* que consiste en intercambiar de posición dos elementos del mismo individuo.

6.3.2. Sistema de *Fitness* y penalización

En lo que se refiere a la manera de evaluar cómo de buenas son las soluciones es necesario escoger entre dos posibilidades. Dando un vistazo a los métodos de cruce que se van a implementar es fácil observar un problema latente. Es muy posible, por no decir seguro, que aparecerán soluciones que violarán las condiciones del problema, tales como exigencias reglamentarias o normativas o simplemente combinaciones imposibles o absurdas.

Estas soluciones posibles, aunque inaceptables, requieren un tratamiento especial. Una posibilidad sería “repararlas” para que cumplan con las limitaciones impuestas. Por otro lado, se podría pensar que estos individuos, aunque inviables, puedan ser los precursores de las soluciones óptimas que buscamos. En este caso quizás sería más efectivo conservar estas soluciones y dejarlas evolucionar para explorar todas las posibilidades.

En nuestro caso optaremos por esta última opción: estableceremos un sistema doble de *fitness* y penalización. De esta forma las soluciones inviables podrán seguir existiendo penalizándolas en función de cuánto incumplan las limitaciones **(ec.4.5)** y **(ec.4.6)**. Dicha penalización quedará definida en función del ángulo de TRIM (en valor absoluto). Para ser justos en nuestra evaluación, existirán dos ecuaciones similares para medir esta penalización dependiendo del escenario en el que nos encontremos, y una vez elegida será utilizada la misma para todos los individuos del problema.

En lo referente a la función de *fitness* evaluaremos todas las **soluciones válidas** en función del valor absoluto del ángulo de TRIM conseguido, así como de la cantidad total de CO₂, energía y coste económico, mediante la **ecuación 4.7**. Este valor, normalizado entre 0 y 1, será mejor cuanto más próximo a cero sea el ángulo de TRIM.

$$Fitness = \frac{\left(1 - \frac{\left(\frac{Volumen\ en\ tierra}{Volumen\ total} + \frac{Peso\ en\ tierra}{Peso\ total}\right)}{2}\right) * (2,5 - |TRIM|)}{2,5} \quad (ec.4.7)$$

Por el contrario, para los individuos que incumplan alguno de los parámetros del problema se utilizará también la misma fórmula **(ec.4.7)**, pero el ángulo de TRIM adoptará por defecto el valor máximo posible (2,5).

A partir de este sistema doble definido a imagen y semejanza del que se utilizaba en la implementación del capítulo 3, escogeremos a los individuos en función de su penalización en primer lugar (entendiéndose como mejor a los individuos que tengan una penalización más próxima a cero). Y sólo en caso de igualdad de penalización, la elección se hará en función de su valor de *fitness* (entendiéndose como mejor aquel individuo que ofrezca un valor de *fitness* más próximo a uno).

6.4. Algoritmo NSGAI

El Algoritmo Genético de Clasificación no dominado II (NSGA-II) es un algoritmo genético multiobjetivo, propuesto por Deb et al., En 2002. Es una extensión y mejora de NSGA, que Srinivas y Deb preconizaron anteriormente en 1995.

En la estructura de NSGA-II, además de los operadores genéticos, el cruce y la mutación, se definen y utilizan dos operadores y mecanismos multi-objetivo especializados:

- **Clasificación no dominada:** la población se clasifica y se divide en frentes (F1, F2, etc.), donde F1 (primer frente) indica el frente de Pareto aproximado.
- **Crowding Distance:** es un mecanismo de clasificación entre los miembros de un frente, que dominan o dominan entre sí.

Estos mecanismos de clasificación se usan con los operadores de selección genética (por lo general, Operador de selección de torneo) para crear la población de la próxima generación.

La implementación de MATLAB de NSGA-II, se realiza mediante el siguiente código abierto. El algoritmo se implementa de forma estructurada:

```

% Project Title: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II)
function pop=CalcCrowdingDistance(pop,F)
nF=numel(F);
for k=1:nF
Costs=[pop(F{k}).Cost];
nObj=size(Costs,1);
n=numel(F{k});
d=zeros(n,nObj);
for j=1:nObj
[cj, so]=sort(Costs(j,:));
d(so(1),j)=inf;
for i=2:n-1
d(so(i),j)=abs(cj(i+1)-cj(i-1))/abs(cj(1)-cj(end));
end
d(so(end),j)=inf;
end
for i=1:n
pop(F{k}(i)).CrowdingDistance=sum(d(i,:));
end
end
end

```

6.5. Aplicación práctica

En este problema, como se describió anteriormente, debido a la explosión combinatoria, el análisis de todo el espacio de la solución es una tarea imposible, incluso con la gran capacidad computacional disponible hoy en día. Sin embargo, los algoritmos de aproximación (por ejemplo, algoritmos heurísticos) están disponibles para explorar las áreas de solución espacial más prometedoras y pueden alcanzar una solución óptima aproximada en un tiempo aceptable. Una de las técnicas más útiles y conocidas incluidas en el grupo heurístico es el Algoritmo Genético (GA).

Un GA es un enfoque de optimización global robusto que opera según los principios de la evolución, como la herencia, la selección, el cruce y la mutación.

En una GA, los cromosomas se utilizan como una analogía para codificar una solución candidata, y las funciones de objetivo o de aptitud funcionan como indicadores que representan la calidad de los individuos.

Mientras que la población evoluciona su estado físico medio gradualmente, los aumentos se basan en el principio de la "supervivencia del más apto". Los genes de mayor calidad se seleccionan más habitualmente de forma estocástica.

Los individuos seleccionados son operados a través del proceso del operador genético, como la selección, el cruce y la mutación, hasta que el algoritmo llega al final. Una AG general introduce métodos para promover la calidad y la diversidad en la solución.

Como se ha venido explicando, la optimización multiobjetivo requiere del análisis de una o varias funciones objetivo a minimizar. En este caso, se han definido tres objetivos, que son:

- Coste económico
 - Eco-precio de CO₂
 - Energía consumida en la fabricación de los materiales utilizados.
- Así pues, la función objetivo será:

$$F(x) = \begin{cases} F_1(x) = E(x) = \sum_{i=1}^n E(x_i) \\ F_2(x) = CO_2(x) = \sum_{i=1}^n CO_2(x_i) \\ F_3(x) = MJ(x) = \sum_{i=1}^n MJ(x_i), \end{cases}$$

6.5.1. Paseo aleatorio (random walk)

Para problemas de optimización multiobjetivo, las funciones objetivo generalmente están en conflicto.

Como primer paso en los algoritmos heurísticos, se ha llevado a cabo un Paseo Aleatorio (Random Walk). Un RW consiste en una generación de solución aleatoria, repetitiva. En este proceso, se evalúan la construcción de la solución y la función objetivo, y se pueden encontrar algunas correlaciones entre las funciones objetivo.

Las Fig. 6.4, 6.5. y 6.6. muestran los resultados de una iteración de 500,000 Random Walk.

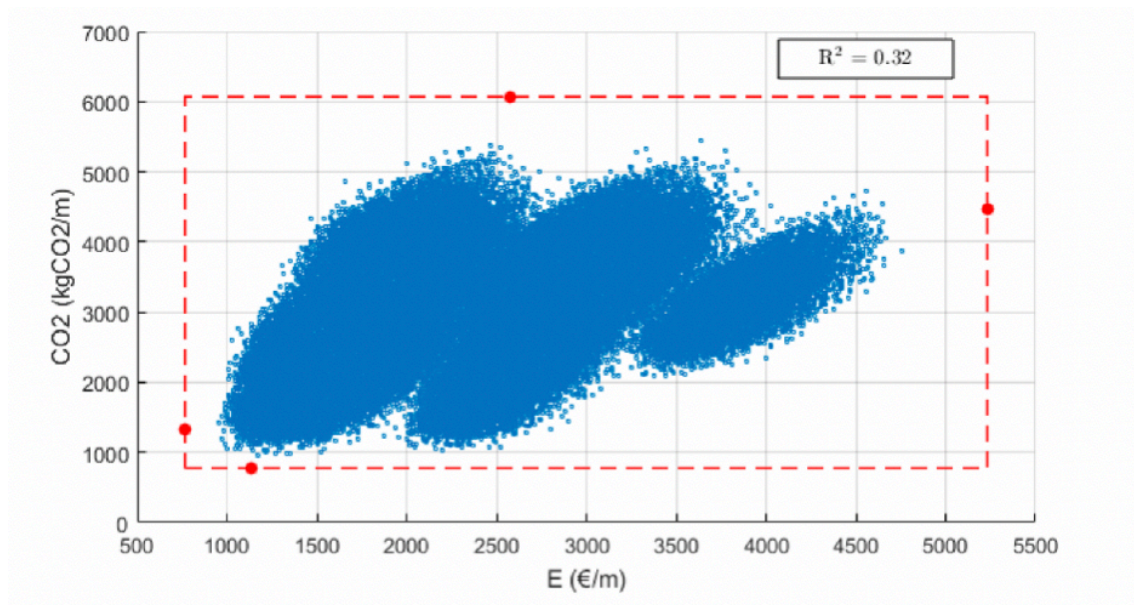


Fig. 6.4. Random Walk Coste económico vs. Emisiones CO₂, para 500x10³ iteraciones

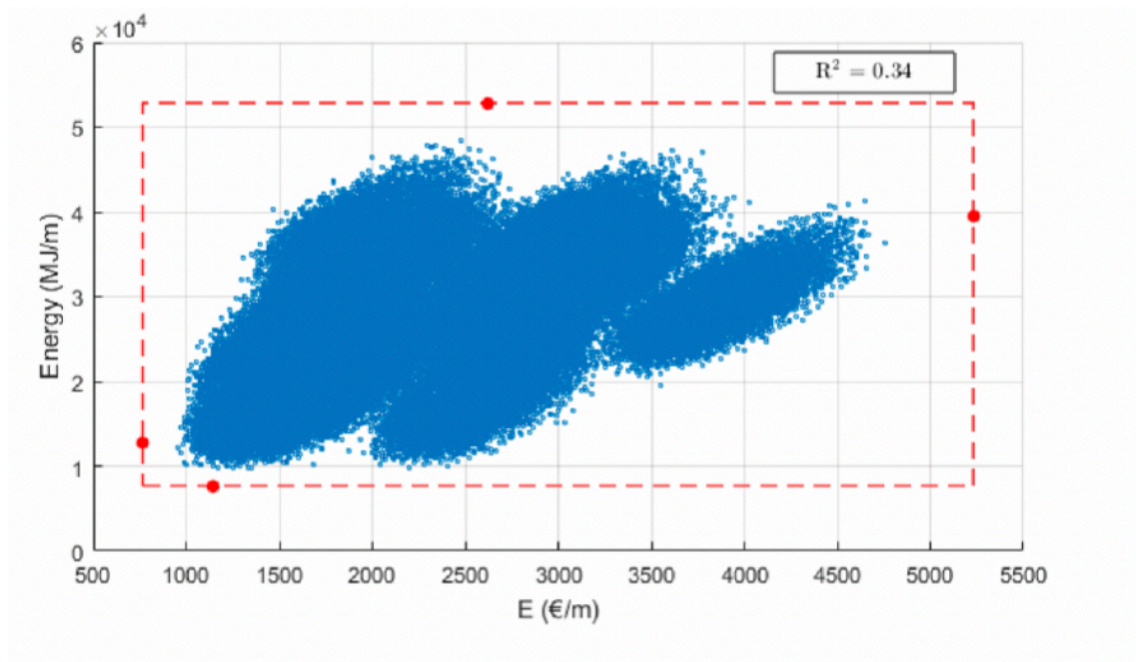


Fig. 6.5. Random Walk Coste económico vs. Energía embebida , para 500×10^3 iteraciones

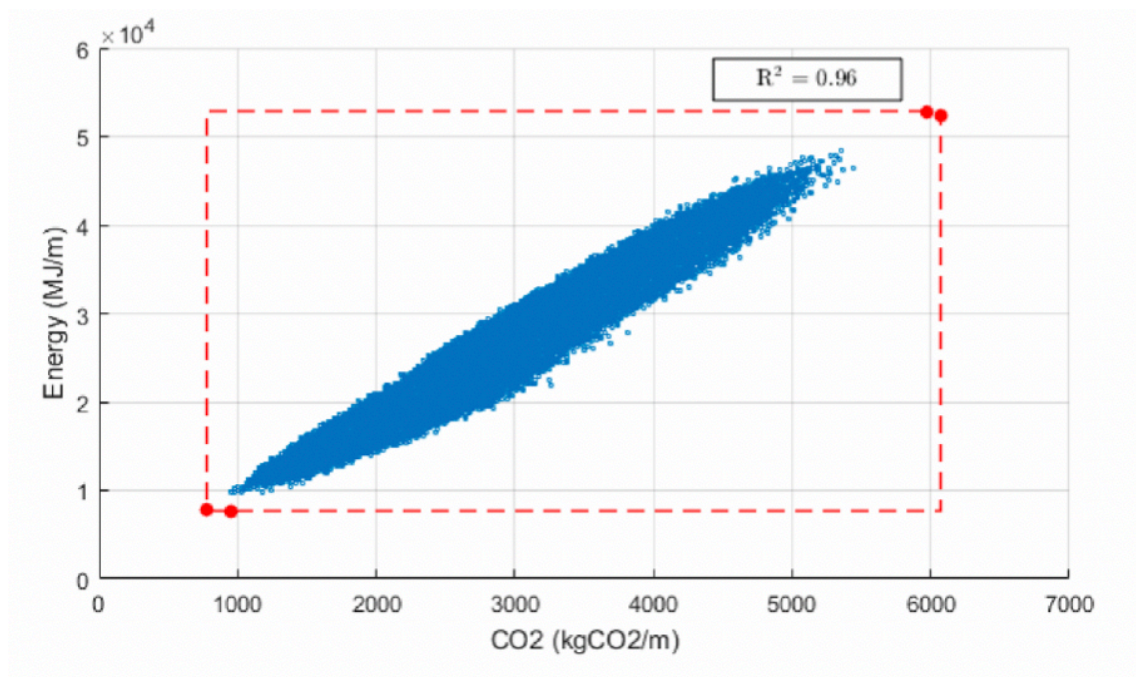


Fig. 6.6. Random Walk Emisiones CO₂ vs. Energía embebida, para 500×10^3 iteraciones

Se puede observar en las figuras 6.4., 6.5., y 6.6., que la función de objetivo de costo E (€/m) es independientemente contra CO₂ y Energía, porque no se observa ninguna correlación a través del RW. Sin embargo, las funciones objetivo de sostenibilidad (CO₂ y Energía) muestran una fuerte correlación entre ellas (R=0,96).

Significa que las tres funciones objetivo definidas están en conflicto por parejas (E (€ / m) vs. CO₂ y E (€ / m) vs. Energía).

Además, RW permite mostrar los límites de espacio de la solución; ver la Tabla II. Además, en la Fig. 6.4., 6.5., 6.6., ello permite trazar una caja de contorno roja, que representa las soluciones límite para cada función objetivo.

Las soluciones mínimas para cada objetivo se pueden obtener seleccionando la mejor opción para cada variable.

Estas soluciones se trazan como puntos rojos en la Fig. 6.4, 6.5., 6.6. Sin embargo, se muestra que, por ejemplo, la solución mínima en términos de costo económico (€ / m) no es la misma que la mínima para las emisiones de CO₂. Por lo tanto, el objetivo del proceso de optimización heurística será obtener una solución óptima que minimice simultáneamente todas las funciones objetivas.

Tabla 2. Límites espacio objetivo

<i>Identificación</i>	<i>mín</i>	<i>máx</i>
Objetivo coste	766,1 €/m	5.231,3 €/m
CO ₂	776,7 KgCO ₂ /m	6.072,2 KgCO ₂ /m
Energía	7.700,2 MJ/m	52.856,0 MJ/m

La optimización multiobjetivo es un campo de investigación importante, debido a que la mayoría de los problemas reales tienen más de un objetivo a tener en cuenta. Las técnicas desarrolladas para resolver este tipo de problemas se denominan técnicas de optimización combinatoria multiobjetivo.

La idea más básica para tratar varios objetivos sería combinarlos en uno solo, utilizando cualquier operador aritmético. Este enfoque puede ser simple, pero podría presentar desventajas importantes: un objetivo, por ejemplo, puede dominar a los demás. Para evitar este problema, otra técnica, llamada solución óptima de Pareto, se puede usar para problemas de optimización multiobjetivo.

Usando el concepto de dominancia de Pareto, una solución de problema () domina a otra () en un problema de minimización de múltiples objetivos cuando:

$$x_1 < x_2 \text{ if } \forall i \in \{1, \dots, m\} f_i(x_1) \leq f_i(x_2) \quad (3)$$

El conjunto de soluciones que no está dominado por ninguna otra solución en el espacio de soluciones (S) se denomina conjunto óptimo de Pareto (P):

$$P = \{x \in S | \nexists x' \in S: x' < x\} \quad (4)$$

Una representación gráfica del conjunto óptimo de Pareto para un problema con dos objetivos a minimizar se muestra en la siguiente gráfica:

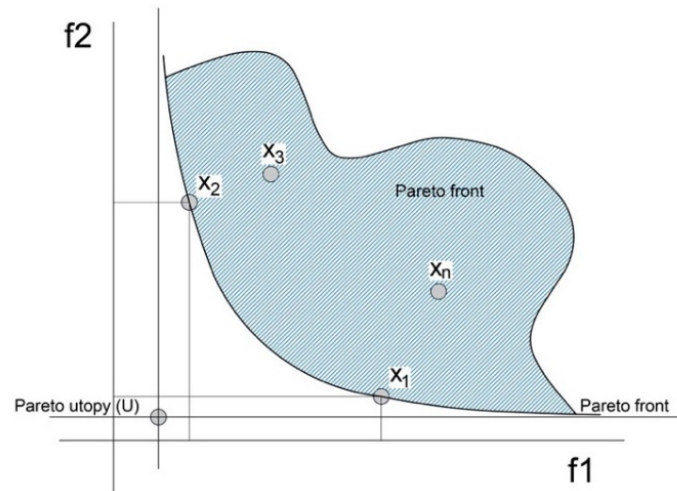


Figura 6.7. Representación del óptimo de Pareto (Utopía de Pareto)

El conjunto óptimo de Pareto se presenta aquí como la solución de problema de optimización multiobjetivo. Por lo tanto, no se obtiene una solución única. Posteriormente, se deben aplicar otras técnicas de decisión multicriterio para elegir cualquier solución particular a la frontera de Pareto.

6.5.2. NSGA-II para la optimización multiobjetivo

Se elige un algoritmo genético de ordenación no dominado rápido (NSGA-II) para tratar esta solución de problema como un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA).

Los algoritmos MOGA funcionan en una población mediante el uso de un conjunto de operadores. Una población es un conjunto de soluciones en el espacio de solución.

La población inicial se genera al azar y la generación siguiente, desarrollada a través de operadores genéticos como cruce y mutación, se calcula utilizando el rango no dominado y una distancia de ocupación.

Un rango no dominado se asigna a cada individuo, usando la aptitud relativa. Toda la población se clasifica en frentes consecutivos no dominados siguiendo el enfoque óptimo de Pareto. En cada frente de Pareto, las soluciones se clasifican utilizando una distancia de concentración que mide la proximidad entre dos miembros de la misma frontera.

Los individuos con la mayor distancia de concentración se ordenan antes, para preservar la diversidad durante el rendimiento del algoritmo. Si bien el rango no dominado mantiene el elitismo, la distancia de concentración ayuda a preservar la diversidad de la solución. Esto es muy importante para alcanzar una buena convergencia a fin de aproximar a los miembros de la solución óptima global.

En primer lugar, se crea una población primaria aleatoria de tamaño N (P_0). Esta población se ordena siguiendo la asignación de rango y la distancia de ocupación, como se explicó anteriormente.

Luego, usando esta lista ordenada, la selección del torneo, el cruce y la mutación se usan para crear una población de crías (Q0). Esta población descendiente se agrega a la anterior matriz (P0 + Q0) para preservar los miembros de élite. Ambas poblaciones juntas se ordenan de nuevo, basadas en la no dominación, y un subconjunto de tamaño N se convierte en la nueva población principal (P1).

Este procedimiento se aplica repetitivamente, obteniendo poblaciones parentales consecutivas (Pk), hasta que se estabiliza y el algoritmo se detiene.

Los resultados de optimización obtenidos a través del algoritmo NSGA-II se muestran en la Fig. 4. Se puede ver que el conjunto de Pareto obtenido (puntos rosados) está bien estructurado entre los valores mínimos de cada función objetivo (puntos rojos).

Además, el algoritmo de optimización ha mostrado un buen rendimiento de búsqueda, obteniendo puntos óptimos lejos de los resultados de la caminata aleatoria (puntos azules) y en la dirección de minimización correcta.

Además, debido a la fuerte correlación encontrada previamente entre las funciones objetivo de CO₂ y energía, se omite la frontera de Pareto entre ellas.

A partir de ahora, solo se tendrán en cuenta las funciones objetivas económicas (E) y de CO₂.

$$F'(x) = w_E \|E(x)\| + w_{CO_2} \|CO_2(x)\|$$

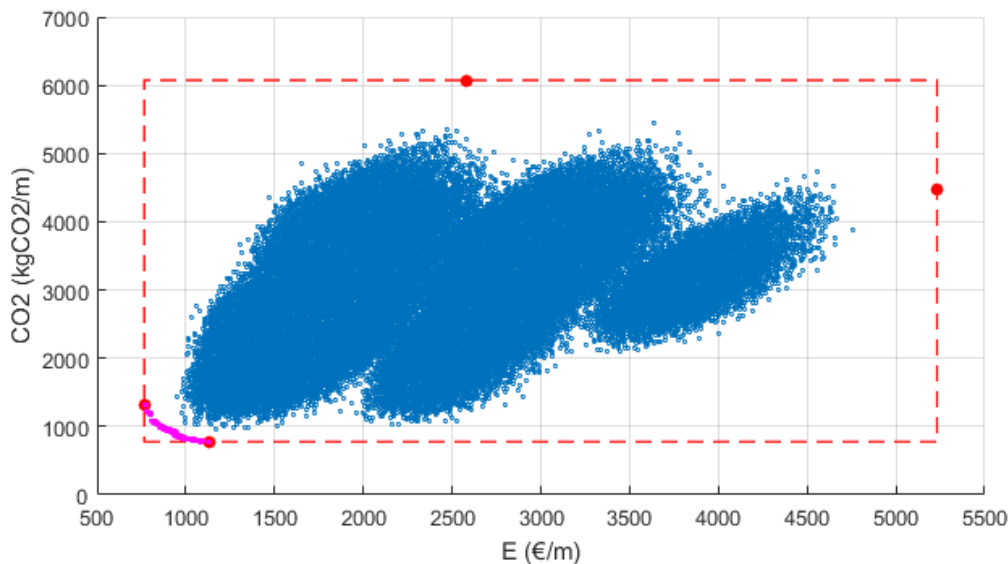


Figura 6.8. Resultados NSGA-II y óptimo de Pareto. Coste vs. CO₂

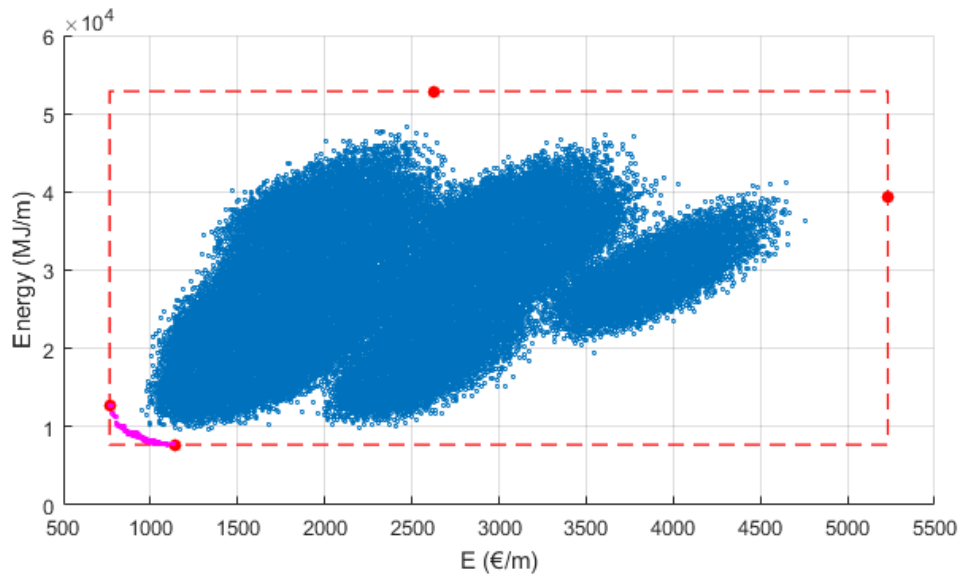


Figura 6.9. Resultados NSGA-II y óptimo de Pareto. Coste vs. Energía

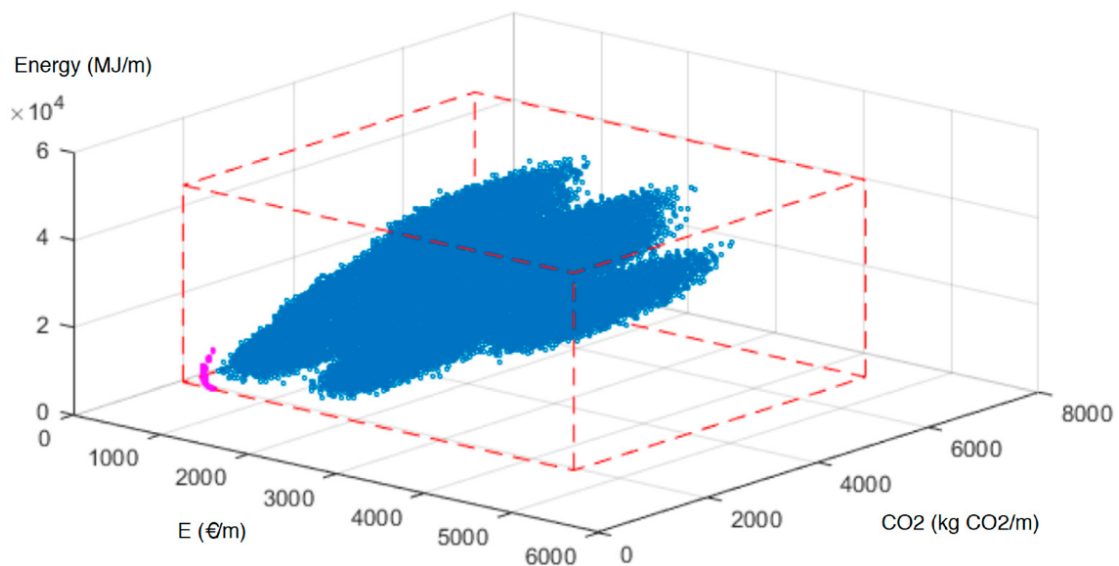


Figura 6.10. Resultados NSGA-II y óptimo de Pareto.

Una vez que se ha creado el conjunto de Pareto, hay disponibles varias soluciones óptimas del problema. Para seleccionar uno de ellos, todas las funciones objetivas deben combinarse, creando una función objetivo única. Será útil ordenar todas las soluciones óptimas para encontrar la mejor.

La combinación de funciones objetivo puede ser hacerlo definiendo pesos. En este caso, la decisión más común consiste en asignar pesos iguales a todas las funciones objetivas. Sin embargo, en este trabajo, se han definido pesos adicionales para comparar diferentes soluciones en el conjunto de Pareto. Específicamente, los pesos definidos se muestran en la Tabla III.

$$f = w_E \|E(x)\| + w_{CO_2} \|CO_2(x)\|$$

Tabla 3. Ponderación objetivos

<i>Identificación</i>	<i>w_e</i>	<i>w_{CO₂}</i>
OP-A	0,5	0,5
OP-B	0,33	0,66
OP-C	0,33	0,33

Previamente, para agregar todas las funciones objetivas, deben haberse normalizado para evitar cualquier dominación objetiva. La normalización de cada objetivo se basó en el rango objetivo de la Tabla II.

Finalmente, todas las soluciones de conjunto de Pareto se pueden proyectar según los pesos de función objetivo seleccionados; vea la Fig. 5. Por ejemplo, la proyección del conjunto de Pareto en la línea de bisectriz (puntos rojos) nos permite clasificar los puntos óptimos usando pesos iguales. Por lo tanto, se pueden obtener tres listas ordenadas a partir de los pesos definidos anteriormente, obteniendo la mejor solución para cada opción.

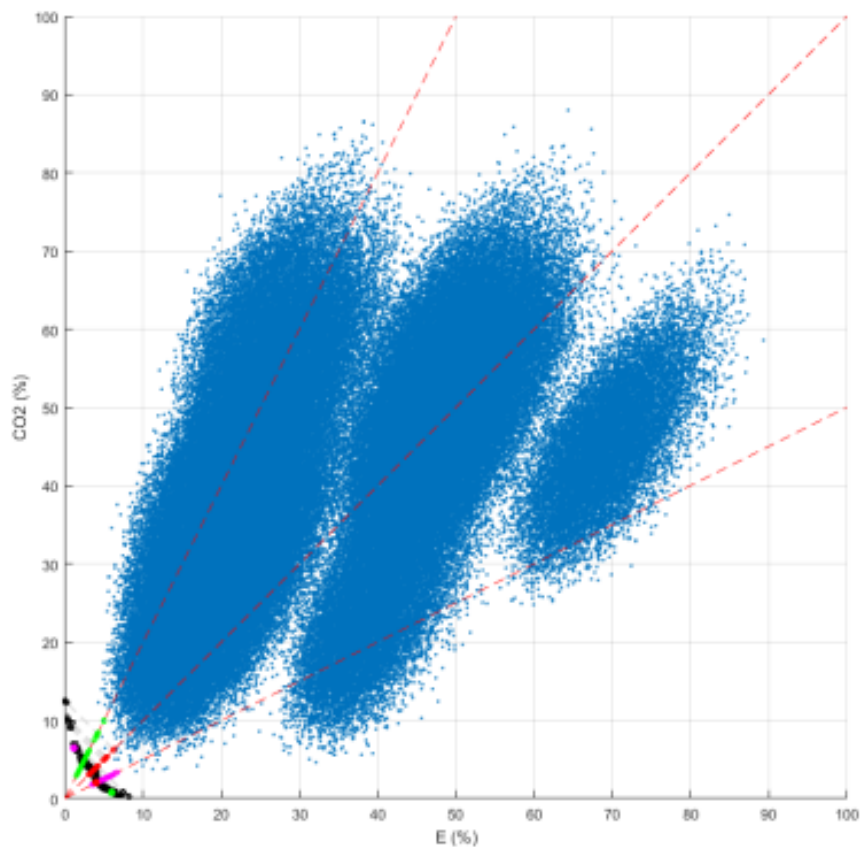


Fig.6.11. Resultados RW indicando frontera de Pareto

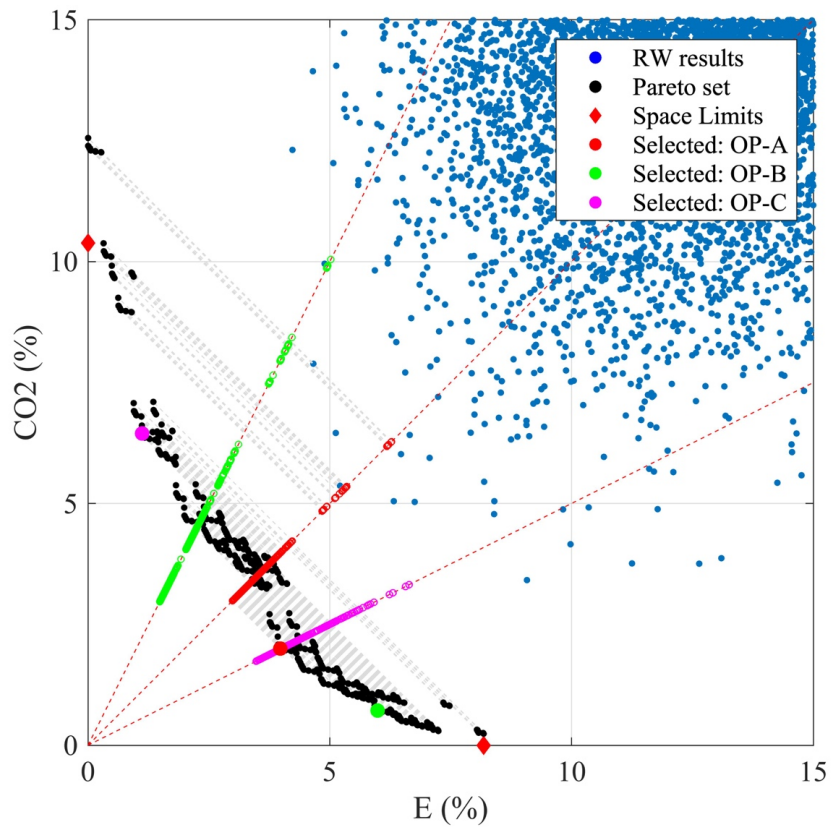


Fig. 6.12. Selección de resultados en la Frontera de Pareto

Utilizando la metodología de selección descrita anteriormente, finalmente se seleccionan tres soluciones diferentes de la frontera de Pareto

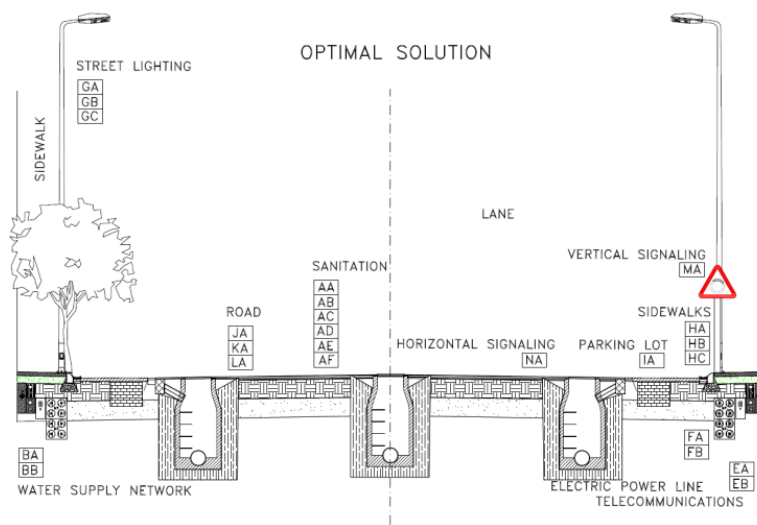


Fig. 6.13. Sección viaria óptima resultado

TABLA 4
SOLUCIÓN ÓPTIMA OP-A

GEN	ALELO	FENOTIPO	% €	% CO ₂	% E
AA	3	Tubería de polietileno	6,81	3,80	2,49
AB	6	Pozo registro polipropileno	4,35	9,39	8,28
AC	2	Arqueta registro ladrillo	5,72	5,88	5,95
AD	5	Imbornal polietileno	1,82	2,97	2,68
AE	1	Tapa hormigón armado	7,97	19,2	13,2
AF	6	Relleno tierras propias	1,82	4,12	4,36
BA	6	Tubería etileno-propileno	1,00	0,67	0,45
BB	6	Relleno tierras propias	1,82	4,12	4,36
CA	1	Tubería polietileno	0,57	0,36	0,23
DA	1	Tubería polietileno	0,35	0,19	0,13
EA	4	Tubería PVC	0,33	0,18	0,12
EB	1	Conductor de cobre	0,13	0,08	0,07
FA	1	Tubería OVC	0,33	0,18	0,12
FB	4	Copper conductor	0,09	0,16	0,11
GA	1	Báculo poliéster y fibra de vidrio	22,7	7,15	6,97
GB	2	Luminaria aluminio	15,0	6,04	4,07
GC	5	Lámpara LED	1,59	0,98	0,92
HA	5	Hormigón armado	1,89	5,76	5,65
HB	3	Elementos hormigón prefabricado	2,18	1,39	1,42
HC	1	Elementos hormigón prefabricado	0,80	1,89	1,94
IA	7	Bloques de granito nacional	5,98	2,90	2,75
JA	1	Suelo tolerable	1,23	3,21	3,12
KA	3	Macadam	5,97	7,03	11,4
LA	4	Mezcla bituminosa	6,63	9,87	16,8
MA	6	Poste de madera	1,85	1,94	1,89
NA	3	Pintura de poliuretano	1,06	0,57	0,53

$$E = 943.7 \text{ €/m}$$

$$\text{CO}_2 = 855.3 \text{ kgCO}_2/\text{m}$$

$$\text{Energía} = 8606.3 \text{ MJ/m}$$

La Tabla IV describe los resultados de la solución óptima OP-A (pesos iguales) para cada variable problemática, que se establecieron en la Tabla I.

Por lo tanto, la solución óptima estaba totalmente definida. El costo económico de esta solución es de 943,7 € / m, el indicador de CO₂ es de 855,3 kgCO₂ / m y el consumo de energía es de 8606,3 MJ / m.

Además, las configuraciones de peso OP-B y OP-C también se procesaron, obteniendo soluciones muy similares. De hecho, la Tabla V y la Tabla VI muestran solo la variación de estas soluciones óptimas en comparación con OP-A.

Todas las variables, que no están enumeradas en la Tabla V y la Tabla VI, adoptan el mismo valor que en la Tabla IV.

Se puede observar que solo cuatro variables cambian de OP-A a OP-B u OP-C. Esto muestra la solidez de la solución óptima obtenida.

TABLA 5
SOLUCIÓN ÓPTIMA OP-B (VARIACION DE A)

GEN	ALELO	FENOTIPO
AC	5	Arqueta de registro de polietileno
FB	9	Conductor de aluminio
HA	9	Adoquines
HC	3	Bloques de piedra

E = 1033.5 €/m
CO₂ = 798.2 kgCO₂/m
Energía = 8.005.8 MJ/m

TABLA 6
SOLUCIÓN ÓPTIMA OP-C (VARIACION DE A)

GENE	ALELO	FENOTIPO
EA	3	Tubería de polietileno corrugado
FA	2	Tubería de polietileno
GB	3	Luminaria de polipropileno
IA	6	Pavimento de hormigón

E = 816.2 €/m
CO₂ = 1.054.1 kgCO₂/m
Energía = 10.163.4 MJ/m

En la solución óptima OP-B, se estableció un peso mayor para el indicador de CO₂. Como consecuencia, esta solución muestra una mejora en los indicadores de sostenibilidad (798.2 kgCO₂ / m y 8.005.8 MJ / m), mientras que el costo económico aumenta lentamente. De lo contrario, OP-C ofrece una solución más económica, con un empeoramiento moderado del rendimiento de la sostenibilidad.

Estas variaciones se pueden alcanzar mediante pequeños cambios en solo cuatro variables de problema.

6.6. Conclusiones

Se ha propuesto un método novedoso para seleccionar soluciones sostenibles en el proceso de construcción de carreteras e infraestructuras, y se ha demostrado que proporciona un coste ambiental mínimo, basado en tres parámetros:

- emisiones de CO₂,
- energía embebida y
- coste económico.

El uso del algoritmo NSGA-II permite seleccionar individuos, representados por un espacio euclidiano plano que satisface los requisitos de posición utilizando una estrategia de conservación de élite, mecanismo adaptativo, algoritmo genético híbrido y diseños razonables de la función de aptitud, así como los operadores de selección, cruce y mutación.

Se han realizado y demostrado simulaciones completas para que el método de solución sostenible basado en NSGA-II pueda seleccionar efectivamente un subconjunto óptimo de los individuos disponibles.

Se han presentado los resultados del análisis de sostenibilidad para el estudio de caso en esta sección viaria industrial.

Primero, los efectos de los factores ambientales sobre el coste total de construcción del modelo se comparan con los resultados de los modelos de aquellos que incluyen consideraciones de sostenibilidad.

La gran cantidad de posibles soluciones para encontrar el resultado óptimo asociado con la solución de la sección de vial urbano industrial, utilizando un algoritmo computacional basado en Algoritmos Genéticos, con individuos definidos por huella de carbono, energía embebida y coste económico, se agregan al modelo para analizar el impacto del sistema en el medio ambiente.

Luego, el modelo se resuelve generando individuos, cruzándolos, realizando mutaciones y funciones, seleccionándolos mediante la recopilación de su idoneidad, cumplimiento legal y otras consideraciones.

Los individuos óptimos serán aquellos que se colocan en un plano tridimensional, Pareto, con la distancia más corta al origen de las coordenadas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

Y LINEAS DE DESARROLLO FUTURO



7 | CONCLUSIONES Y LINEAS DE DESARROLLO FUTURO

7.1. Introducción

El desarrollo de suelo natural para implantación de las actividades industriales implica la creación de espacios urbanos que, dotados de las infraestructuras necesarias, permitan el desarrollo de las actividades productivas y la relación entre actividades.

Sin entrar en los impactos ambientales que producen las actividades (industriales, terciarias, comerciales, ...) en los ámbitos donde se implanten, e incluso sin considerar los impactos ocasionados por la construcción de los edificios y los producidos durante su ciclo de vida útil (para lo cual ya existen herramientas de análisis), hay un escalón previo que se ha venido estudiando mediante las herramientas clásicas de evaluación de impacto ambiental de los proyectos de urbanización y de los proyectos de ingeniería civil en general, que merece de un análisis más pormenorizado y concreto para determinar de la manera más objetiva posible los impactos ocasionados, con el objetivo de poder comparar soluciones constructivas diferentes en cuanto a su comportamiento medioambiental intentando establecer un indicador de sostenibilidad que satisfaga dicho objetivo.

Las transformaciones que se han venido produciendo de forma paulatina en el sistema de urbanización, así como las diversas y novedosas tipologías de asentamiento que han ido apareciendo, configuran a partir de la década de los años ochenta, el nuevo “escenario” de los asentamientos urbanos dedicados a las áreas productivas: Polígonos industriales, parques industriales, parques eco-industriales (EIPs), polígonos de actividad, parques empresariales, sectores de actividades económicas, etc.

Los proyectos de urbanización de estas áreas productivas, como proyectos de obra civil que son, definen entre otros aspectos, las características técnicas de las infraestructuras a construir, partiendo del planeamiento redactado previamente – p.ej. planes parciales-, a fin de que el área productiva funcione de manera correcta y conexa con su entorno y sus infraestructuras cumplan con las exigencias que las actividades que en ellas se implanten requieran.

La investigación, de acuerdo a la metodología propuesta en el capítulo 3, ha permitido obtener conclusiones en cuanto a un novedoso método de evaluación ambiental de las soluciones planteadas. Dicha metodología, se basa en el empleo de los algoritmos genéticos, como técnica heurística para resolver un problema multicriterio en el que el amplio conjunto de soluciones factibles y posibles requerirían, para ser analizadas, magnitudes temporales que abarcarían siglos. A su vez, dicha metodología tiene en consideración posibles soluciones dentro de un conjunto discreto, no lineal y multicriterio, sin límites de variabilidad ni de consideración de criterios que, en nuestro caso, se pueden correlacionar con la sostenibilidad de la solución.

Como parámetros de sostenibilidad, no excluyentes, se han establecido en esta tesis los relativos a la producción de CO₂ de los diferentes productos y sistemas constructivos, la cantidad de energía embebida de los distintos productos, materiales y sistemas integrantes de las soluciones constructivas y el coste económico asociado a dichos productos, materiales y soluciones constructivas o partidas de obra integrantes de la sección viaria a implantar como generadora de un vial urbano dotado de todas las infraestructuras y características que le permitan ser utilizado en una trama urbana concreta, donde se acogerán los edificios que alberguen las distintas actividades económicas.

Podrían haberse considerado parámetros adicionales, que hubieran contribuido, sin duda, a perfilar un índice de sostenibilidad más completo, tales como el consumo de agua, la cantidad de residuos generados, la vida útil de la solución, su regenerabilidad, etc.

La referencia al estudio de diversas cuestiones como la modificación o implantación de nuevas infraestructuras en un área productiva, la constatación de su grado de ocupación actual, el grado de conservación y mantenimiento, la calidad medioambiental de ellas, y la comprobación del tipo de actividades que se están desarrollando, ha permitido comprobar el cumplimiento de los objetivos que en su momento decidieron llevar a cabo la planificación y consiguiente urbanización de cada área productiva, proceso en el cual, la administración pública tiene una intervención fundamental.

Los proyectos de urbanización de las áreas productivas, deben prever, de acuerdo a normativas promulgadas en el ámbito municipal o el entorno reglamentario de mayor ámbito, las infraestructuras de pavimentación, red de abastecimiento de agua, red de alcantarillado, y red de distribución de energía eléctrica y alumbrado público.

Tras los estudios previos realizados, se constata que las áreas productivas se han diseñado con la previsión de estas infraestructuras obligatorias, funcionando, al cabo de años de estar operativas, de la misma manera que se diseñaron inicialmente, no presentando ningún tipo de dinamismo, en cuanto a la modificación respecto a las construcciones iniciales, ya sea por nuevas necesidades o adaptación a cambios sociales o normativos.

El Código Técnico de la Edificación Español, también recoge la incorporación de sistemas de mejora energética de los edificios y las actividades productivas de nueva implantación en cuanto a la incorporación y contribución mínima de fuentes energía naturales (radiación solar) mediante sistemas de captación solar fotovoltaica para usos energéticos y térmica para sistemas de agua caliente sanitaria, pero que en nada afectan al proceso de urbanización tratado en esta tesis.

El desarrollo o adaptación de infraestructuras, que permita una mejora de la sostenibilidad de las áreas productivas, es inexistente. Las posibilidades que aportan, desde hace unos años, las energías renovables y las telecomunicaciones – orbótica, telecontrol, telectura, etc.-, no han sido incorporadas todavía de forma sistemática a la realidad.

El grado de ocupación de las áreas productivas es alto - entre el 70% y el 100% -, siempre que el área lleve operativa un tiempo superior a diez años.

En general, no se realiza una conservación de los elementos constructivos que con el paso de los años se van deteriorando, esto muestra que en las áreas más antiguas el grado de conservación sea medio, mientras que en las más recientes de construcción el grado de conservación se catalogue como alto, coincidiendo con la poca ocupación, y por consiguiente poco uso.

La calidad medioambiental, en cuanto a limpieza de calles, recogida de basuras y conservación de la jardinería y arbolado es en general alta, no detectándose variaciones al resultado, en función de la fecha de la construcción del área productiva.

Independientemente de los usos establecidos en los planes parciales de cada área productiva, se comprueba que las áreas con un marcado carácter industrial son prácticamente inexistentes, aunque en el planteamiento y diseño inicial estuviera prevista la implantación de este tipo de actividades. Incluso en algunos casos la existencia de actividades industriales se debe a implantaciones existentes en el territorio, antes de la creación del área productiva, que con el nuevo planeamiento quedaron incluidas.

7.2. Trabajo realizado

Durante el desarrollo de la tesis el trabajo principal realizado fue:

- Revisión bibliográfica de artículos de publicaciones científicas, libros, monografías, congresos y normativa específica de diseño de parques industriales, de sus infraestructuras asociadas y análisis de los impactos ambientales y de la sostenibilidad con respecto a su entorno de las soluciones tradicionales y de los esfuerzos actuales de mejora.
- Revisión bibliográfica de artículos de publicaciones científicas, libros, monografías y estado del arte de los métodos de optimización tradicionales y heurísticos, concretamente de los algoritmos genéticos, su implementación en Matlab y su calibración con ejemplos básicos, en casos continuos y discontinuos o discretos.
- -Publicación de artículos y participación en Congresos difundiendo los avances relativos a los trabajos relacionados en la presente Tesis Doctoral.

7.3. Concepción de las infraestructuras

De manera previa, es importante citar una serie de conclusiones obtenidas del estudio y análisis de la propia documentación técnica que se aporta en los proyectos de urbanización estudiados y analizados a los que se ha tenido acceso y que a su vez incidirán en conclusiones posteriores:

- Falta de concreción sobre las dotaciones de diseño para algunas de las infraestructuras, principalmente en las redes de suministro de energía eléctrica, telecomunicaciones y abastecimiento de gas, es decir, redes que son gestionadas posteriormente por las Compañías Suministradoras respectivas.
- Falta de estudio y análisis del impacto ambiental de las diversas alternativas o soluciones técnicas que se pueden aplicar en el diseño de cada elemento de la urbanización, especificando directamente la solución ingenieril adoptada.
- Falta de justificación de la solución final adoptada, desde un punto de vista técnico-económico. Principalmente esta falta se produce en las infraestructuras diseñadas por la respectivas Compañías Suministradoras que posteriormente explotaran las redes.
- En la redacción de los proyectos de urbanización no se han seguido las indicaciones de la norma UNE 157001, lo cual hubiera resuelto los aspectos citados anteriormente, haciendo más comprensible el trabajo de los proyectistas.
- Falta de fuentes de datos comparables sobre sostenibilidad de soluciones constructivas, materiales, etc.

Existen una serie de infraestructuras en las que su diseño técnico y económico, suele ser delegado a las Compañías Suministradoras, que posteriormente realizarán el suministro y el mantenimiento correspondiente de la red, destacando las redes de suministro de energía eléctrica, telecomunicaciones y abastecimiento de gas.

Por otra parte, la pavimentación de calles, la evacuación de aguas y el alumbrado público, son las infraestructuras que en los proyectos técnicos de urbanización quedan resueltos de manera más clara, aunque con pocas soluciones alternativas a las tradicionalmente adoptadas.

La aplicación del concepto de la gradualidad referida al modo de construcción progresiva de la urbanización de un área productiva, hasta alcanzar niveles de complejidad mayores, no se produce. Se observa un olvido de la forma acumulativa e interrelacionada de producirse la urbanización, llegando a entenderse como algo construido por trozos, desde unidades autónomamente concebidas respecto al resto del tejido urbano.

En la construcción de las áreas productivas se exige la resolución de la totalidad de sus servicios desde la propia escala del proyecto de un área y con la lógica que se contempla en los textos legales la producción del nuevo suelo urbano. Esta situación conlleva a una inversión inicial total, desaprovechada en algunos casos, durante muchos años y que además representa un coste de mantenimiento innecesario si se hubieran aplicado criterios de gradualidad.

El único concepto de gradualidad que se aplica es la ejecución territorial, el desarrollo de un proyecto completo, por sectores, subsectores o zonas, eso sí, con todas las redes de servicios y pavimentación completa.

La implantación de una nueva área productiva supone en muchas ocasiones la afectación de infraestructuras existentes, que condicionan su diseño. Aspectos como la afectación de caminos, cañadas, carreteras, rieras y barrancos, líneas eléctricas y de telecomunicaciones son infraestructuras que existen en el territorio, que inciden de manera mayoritaria en la ejecución de un nuevo proyecto, y que podrían aprovecharse de ellas para desarrollar este concepto de gradualidad.

Las redes no se diseñan con una visión sostenible integral y de complementariedad que permitan una mejor funcionalidad, un ahorro en la inversión de la ejecución, una minimización del impacto medioambiental ocasionado y/o un ahorro en el mantenimiento de ellas.

No hay ninguna implantación de modificaciones a las redes existentes, que mejoren el concepto de sostenibilidad de cada área productiva, aun a pesar de la facilidad que hay para algunas de ellas. Así la incorporación del autoconsumo con energías alternativas, eólica o solar, en las áreas productivas, que permiten el ahorro energético y la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, aprovechando los espacios públicos disponibles y el impacto económico que representa, contrasta con la inexistencia de ellas.

7.4. Evolución de las infraestructuras

En primer lugar, se comprueba que la distribución porcentual de superficies de un área productiva (vialidad, zonas verdes, equipamientos y servicios técnicos, y superficie neta privada destinada a la implantación de las actividades), presenta variaciones muy pequeñas entre diferentes áreas.

La pavimentación de viales no presenta ningún tipo de evolución en cuanto a materiales y maneras de resolver el tráfico rodado y peatonal. Las calzadas son acabadas con mezcla bituminosa y las aceras con aplacados rígidos u hormigón. En la elección de las soluciones no se tiene en cuenta, aspectos que permitan complementar a otras infraestructuras como:

- El drenaje de aguas hacia el subsuelo o la incorporación de zonas verdes en aceras que mantengan la humedad del suelo;
- La utilización de las calles como colectores;
- La elección de texturas y colores de pavimentos en beneficio de otras infraestructuras como el alumbrado público;
- O, una distribución de espacios y soportes multifuncionales más acorde con las necesidades actuales.

El coste de construcción de dicha infraestructura no ha sufrido una tendencia clara a la incorporación de criterios de sostenibilidad ni, en el plano económico, al abaratamiento o encarecimiento, variando en función del año y del proyecto.

En cuanto a las redes de distribución de agua, se diseñan con criterios de dotación no uniformes en cuanto a incorporación de criterios de sostenibilidad o incorporación de nuevos materiales o sistemas. Aplicable a las redes de PCI (hidrantes) y de distribución de riego para jardinería. Entre los materiales utilizados en las redes de abastecimiento de agua, predomina el polietileno (PE) en primer lugar seguido de la fundición (FD). Materiales como el PVC o el fibrocemento han quedado relegados. Los diámetros máximos utilizados en las canalizaciones corresponden a áreas de superficie grande, llegando a la cifra de 400 mm, aunque la franja más habitual es la que se encuentra entre 100 y 200 mm. Las secciones mínimas de las canalizaciones empleadas, la franja más utilizada de diámetros se encuentra entre 63 y 125 mm, no produciéndose variaciones significativas con el paso del tiempo.

No se destaca ninguna evolución técnica significativa, el telecontrol no se ha incorporado a esta red y tampoco los sistemas de telelectura que proporcionan mayor información sobre el consumo, mejor servicio a los clientes y contribuye a mejorar la eficiencia de este tipo de redes. Aunque estos aspectos entrarían dentro de cuestiones de funcionamiento, y no de diseño, dentro de los parques industriales y su sostenibilidad.

En las redes de evacuación de aguas, de manera mayoritaria se diseñan tipo separativas, con un criterio dotacional muy similar al utilizado para el abastecimiento de agua - 1'00 l/seg Ha. En cuanto a los materiales empleados para la construcción de las canalizaciones se encuentran el hormigón armado, polietileno, fundición y PVC. El hormigón armado principalmente en colectores de pluviales de gran diámetro, mientras que se produce un cambio del PVC a polietileno. En general, los diámetros mínimos utilizados tanto para redes de evacuación de aguas residuales como aguas pluviales son de 300 mm, por prescripción normativa, aunque en el caso de las redes pluviales se supera este en los últimos años, debido al incremento del valor del coeficiente de escorrentía que se aplica en el diseño de dichas redes. No se destaca ninguna evolución técnica significativa, a excepción de alguna mejora de materiales.

En el plano de funcionamiento de un parque industrial, la mejora de la sostenibilidad, mejorando el ciclo del agua, es inexistente. El uso de agua pluvial para riego de zonas verdes; instalación de separadores de hidrocarburos y grasas, antes del vertido de éstas aguas a rieras o espacios verdes; depuración localizada para aprovechamiento de las aguas resultantes; utilización de las redes pluviales como almacenamiento de aguas y disminuir la sollicitación sobre conductos; limpieza de redes de evacuación mediante la inyección de agua potable o de agua de lluvia, a través de cámaras de descarga; etc.

También es inexistente la incorporación de sistemas de telecontrol que permiten una mejor gestión del correspondiente ciclo del agua.

El coste de construcción de la red de saneamiento y los criterios de sostenibilidad asociados, varían mucho de una actuación a otra, aunque se produce una tendencia creciente en precio y en comportamiento sostenible en los últimos años.

El análisis de las redes de suministro de energía eléctrica se hace muy dificultoso. Muchos proyectos no disponen de la información necesaria, ya que el diseño de la red se delega a la Compañía Suministradora.

Los criterios de dotación eléctrica, a pesar de que el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión siempre ha establecido, desde 1973, y lo mismo desde 2002, una previsión de la potencia eléctrica de 125 W/m² de edificación, no es hasta los últimos años que realmente se está aplicando este criterio, habiéndose aplicado en muchos proyectos la consideración de 50 W/m² de parcela, que representaba generalmente una dotación menor. En cuanto a las estaciones transformadoras, se ha pasado de edificios construidos in situ ha edificios

prefabricados con transformadores de 1000 kVA.

Los costes de construcción de las redes de distribución de energía eléctrica se han incrementado de manera significativa en los últimos años, debido a las exigencias de las Compañías Suministradoras en cuanto a las características de los materiales a emplear. Su sostenibilidad, en cuanto a la etapa de implantación, no se ha considerado nunca.

No se destaca ninguna evolución técnica significativa, a excepción de alguna mejora de materiales, como pueden ser la introducción de materiales prefabricados en la construcción de las estaciones transformadoras o los nichos de protección de las cajas generales de protección (C.G.P). La incorporación de la autogeneración y la generación distribuida –Smart Grids-, la generación de energía eléctrica por fuentes renovables que permite un ahorro energético y reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera, son inexistentes a pesar de ser de fácil instalación.

En el plano de funcionamiento de las áreas industriales, los sistemas de telelectura aplicables en las redes de distribución de energía eléctrica, que proporcionan mayor información sobre el consumo, mejor servicio a los clientes y contribuye a mejorar la eficiencia de este tipo de redes, no se han implantado en los niveles deseables.

En las redes de alumbrado público, la potencia eléctrica instalada en función de la superficie de vialidad, presenta una tendencia a la reducción, no superando los 0'80 W/m², con una influencia importante según el tipo de lámpara utilizada. El tipo de lámpara más utilizado en las luminarias de las áreas productivas es lámpara de vapor de sodio (V.S.A.P.), no incorporándose, en niveles deseables, nuevos tipos de lámparas más eficientes como las de halogenuros metálicos o, sobre todo, LEDs.

El ahorro energético, y por tanto su mejora relacionada con la sostenibilidad, se obtiene solamente con la aplicación de unas soluciones clásicas, tales como apagado parcial (doble circuito), reactancia de doble nivel y, con equipos reductor–estabilizador.

La repercusión del coste económico y medioambiental, de la construcción de las redes de alumbrado público, en función de la superficie de vialidad varía de manera significativa, en función del número de cuadros eléctricos de distribución, modelo de luminaria, nivel de iluminación etc., pero se puede afirmar que en los últimos años del estudio se ha producido un crecimiento del coste.

En las redes de telecomunicaciones, todas las áreas productivas incorporan la red de telecomunicaciones, aunque en los proyectos de urbanización no se determinan las características técnicas de las mismas, valorándose solamente el coste de la obra civil. Por normativa y acuerdos con las compañías operadoras, posteriormente son estas las que implantan su instalación de cableados y demás equipos, haciéndose imposible, determinar en fase de proyecto cuales eran las especificaciones técnicas y dotaciones previstas.

No se han podido obtener conclusiones en cuanto al diseño de las redes de abastecimiento de gas, ya que, por una parte, son muy pocos los proyectos que incorporan esta infraestructura y por otra, la documentación técnica de los mismos está en poder de la Compañía que explota la red.

El conocer en el momento de urbanizar, la actividad de la empresa y sus necesidades de infraestructuras, permite desarrollar un espacio a su medida, ahorrando en acometidas de servicios, minimizando la infraestructura viaria, obteniendo unas parcelas de dimensiones y características adecuadas a su actividad, etc.

En definitiva, obteniendo un área o polígono adaptado a sus necesidades y a un coste económico y medioambiental más reducido.

El objetivo final de la investigación es hacer progresos en el estado de la técnica. En el caso de esta tesis es proporcionar nuevas herramientas para mejorar la realización de análisis medioambientales y sostenibles del entorno industrial, en la fase de su construcción.

Esta investigación está centrada en la definición de un método de evaluación (a priori) de soluciones constructivas de proyecto, para determinar su sostenibilidad, de forma que se puedan establecer umbrales de cumplimiento y de comparación entre diversas actuaciones. De esta manera se facilita por una parte la realización del estudio de proyectos y por otra una apertura a la posibilidad de difusión de los resultados que se traduce en una mejor comparación potencial con otros proyectos.

Las técnicas heurísticas disponibles en la actualidad, y concretamente para este caso de estudio, los algoritmos genéticos entre los que el NSGA-II ha demostrado adaptarse perfectamente a la resolución del problema con resultados rápidos en la obtención de soluciones óptimas dentro del problema multicriterio inicial.

En la literatura se encuentran metodologías basadas en el análisis de ciclo de vida (ACV) totalmente dispares, pero siempre relacionadas con la construcción de edificios o de productos industriales. Tanto en vida útil, unidad funcional, límites del sistema, categorías de impacto, métodos de evaluación de impacto, bases de datos y aplicaciones o herramientas.

Los resultados mostrados dependen de las características de los análisis y para poder compararlos es necesario disponer de un marco común. La etapa de diseño es clave, ya que las decisiones tomadas en esta etapa influyen en todo el ciclo de vida del entorno industrial referido a sus infraestructuras.

Los agentes de la edificación con más relación en la toma de decisiones son: el promotor, que decide aspectos básicos que tienen una gran influencia en la demanda energética; el proyectista, que concreta las decisiones planteadas por el promotor; el usuario, que tiene la capacidad de influir y decidir sobre el equipamiento; las instituciones financieras, que pueden financiar el proyecto según criterios medioambientales; y la administración, que limita y controla las actuaciones en el ámbito de la construcción.

En la fase de definición de la metodología, se definen todas las decisiones que se pueden dar en una evaluación de sostenibilidad de una obra de ingeniería civil. Al agrupar estas decisiones, muchas iteraciones que normalmente se dan en un ACV se reducen o se confinan funcionalmente. Procediendo de esta manera se puede ejecutar el resto de las fases de la metodología de forma mecánica.

En la fase de definición de la metodología, se recoge toda la información directa o indirecta disponible de la sección constructiva, como generadora de un entorno urbano industrial. Si en vez de un proyecto de detalle, sólo se dispone de un proyecto básico, debería ser suficiente para realizar un análisis de sostenibilidad con un grado de aproximación admisible.

En la construcción de un espacio urbano, dotado de elementos de obra civil e infraestructuras, no hay documentos para su rehabilitación, ya que tendría lugar en momento alejado en el futuro. Y por tanto, no se pueden predecir las técnicas ni la legislación para ese momento, tal como se puede hacer con el mantenimiento, o incluso, como se suele hacer con la etapa de fin de vida.

La fase de inventario de datos de la metodología sirve para asimilar los datos recolectados en la fase previa de documentación y organizar la información en un formato que sea directamente aplicable en la siguiente fase de cálculo y análisis.

La fase de cálculo y análisis de la metodología, al tener todos los datos necesarios dispuestos para su introducción en las herramientas de cálculo y de análisis, se puede ejecutar de una forma mecánica. En la fase de resultados de la metodología se muestran los resultados de una manera transparente e íntegra, y permite en gran medida trazar el origen de los datos.

Al exponer los datos relevantes y los resultados lo más desagregados posible ayuda a la comparación de los resultados con otros estudios.

La aplicación de la metodología a un caso práctico confirma que la metodología propuesta es apta para ser empleada y se obtienen los resultados esperados para la determinación de un índice comparable de sostenibilidad, referido a parámetros de control.

Las políticas actuales no tienen en cuenta la sostenibilidad en los proyectos de urbanización, si bien existen algunos intentos o aproximaciones relatados en la presente Tesis, ya que en la etapa de uso se buscan soluciones de eficiencia energética que además sean económicas, pero se utilizan otros criterios basados en cuestiones estadísticas comparativas de otras experiencias y casos existentes.

7.5. Estudio de la sostenibilidad en la etapa de implantación

En los estudios e intentos para conocer los impactos ambientales de una acción o proyecto, es necesario tener en cuenta las etapas de construcción y de fin de vida. Existen metodologías, como LEED y BREEAM, que tienen en cuenta no sólo los aspectos medioambientales, sino también aspectos económicos y sociales.

También tienen en cuenta algunos aspectos de la etapa de construcción y de la etapa de fin de vida. Estas metodologías tienen la ventaja que permiten la comparación de edificios entre sí de una manera muy fácil, pero no de actuaciones como la planteada en el problema en estudio, en la cual, los resultados obtenidos tras el análisis efectuado, basado en fuentes de datos que sí que han tenido en consideración aspectos relacionados con el ciclo de vida de los materiales utilizados, proporcionarán unos valores, plenamente comparables que faciliten la toma de decisión en cuanto a diseños o procedimientos constructivos.

Por contra, va a ser necesario contar con bases de datos de materiales cada vez más completas, donde se incluyan datos relacionados con el ciclo de vida de los mismos, desde su etapa de extracción, fabricación hasta el momento de su abandono, reciclaje o reutilización.

Las aplicaciones que gestionan obras y que operan con estado de mediciones, tienen una base de datos económica y suelen tener información muy básica sobre las emisiones de CO₂, agua, energía embebida, etc. Estas aplicaciones deberían tener una base de datos cada vez más completa con más impactos ambientales, de datos fiables y contrastados, tales como incidencia en la biodiversidad, carcinogénicos, etc. De manera que se pudieran obtener datos medioambientales de una manera rápida e integrada con el estado de mediciones.

No sería muy difícil incorporar en el estado de mediciones los resultados de los cálculos energéticos y de recursos, así como otras etapas o subetapas del ciclo de vida como el mantenimiento, rehabilitación y fin de vida.

7.6. Conclusiones personales

El paso del concepto de polígono industrial a parque empresarial u otros derivados – generalizando con el nombre de área productiva-, producido a mediados de los años 80, se produce como consecuencia del cambio de la actividad industrial existente hasta aquellos momentos, pasando a un incremento de las actividades de servicios y similares. Este hecho provoca la implantación de este nuevo concepto, tanto en las áreas de nueva construcción como en las existentes.

La incorporación de este concepto en la mayoría de casos, simplemente ha sido una “moda” o sentido comercial del desarrollador, ya que cuando se analiza con detalle las características tanto en la planificación como en las infraestructuras, se observa que no hay diferencia prácticamente respecto al concepto de polígono industrial que perduró hasta los años 80.

La normativa contenida en los planes parciales es la que define los usos posteriores del área productiva, y por tanto, marca el sentido económico que se pretende desarrollar. Por otra parte, también marca las directrices que deberá seguir el proyecto de urbanización (previsión de infraestructuras, características técnicas, etc.)

La urbanización de las áreas productivas ha comportado siempre, junto a la pavimentación de las calles, la implantación de las redes de servicios de distribución de agua potable, evacuación de aguas, suministro de energía eléctrica, alumbrado público y telecomunicaciones. En general no ha existido una legislación sectorial específica para el diseño de las áreas productivas, aplicándose los mismos criterios que para cualquier tipo de urbanización, y siempre a partir de manuales de diseño arquitectónico que nunca han considerado criterios de sostenibilidad implícitos a la obra urbanizadora, aunque ha habido esfuerzos dirigidos a minimizar otros impactos medioambientales tales como los visuales, los relacionados con la acústica, con la gestión de residuos, etc., más relacionados con las fase de funcionamiento del espacio generado que de su construcción o implantación.

Incluso en el ámbito del diseño sostenible de los espacios o áreas industriales, determinados parámetros de diseño han ido variando, incrementando las solicitudes, e incidiendo en las características técnicas de los materiales.

En cualquier caso, el diseño de las infraestructuras, con los años y con esta evolución conceptual que han sufrido las áreas productivas, no ha variado en ninguno de los planos, y con poca relevancia en su comportamiento sostenible. Se ha diseñado con los mismos criterios la red de abastecimiento de agua de un parque con previsión de actividades industriales, actividades logísticas o actividades de servicios, y de igual manera se puede hablar del resto de infraestructuras (red eléctrica, evacuación de aguas, etc.)

Las formas y criterios de proyectar las infraestructuras son las mismas que han perdurado en lo básico durante años, con la incorporación de algún nuevo material, pero no en cuanto a nuevos criterios de diseño, nuevas formas de proyectar, sin incorporar conceptos como la gradualidad de las infraestructuras ni obtener una eficiencia de las redes y en definitiva ser operativos a un menor coste de inversión y de mantenimiento posterior.

Nos encontramos con multitud de hectáreas de áreas o espacios productivos con un nivel de dotaciones igual o superior al estándar, sin actividades instaladas o que en el caso que están las necesidades de infraestructuras son muy inferiores a las previstas y construidas.

Por otra parte, las Compañías explotadoras de determinadas redes de servicios, principalmente electricidad, telecomunicaciones y gas, han ayudado a este fenómeno de dimensionar en sobre exceso. Teniendo en cuenta que dichas redes pasaran a su explotación, participan en la supervisión del proyecto y la ejecución de la obra, a tal nivel, que es frecuente que en la fase de redacción del proyecto de urbanización correspondiente, se delegue el diseño de alguna de estas infraestructuras a la propia compañía que realizará el suministro o explotación de la red.

Estas circunstancias han implicado un aumento en los costes de inversión y de mantenimiento, y de su incidencia o impacto medioambiental, demostrándose claramente insostenibles, principalmente en determinados elementos de la urbanización como son las redes de evacuación de aguas, la red de distribución de energía eléctrica y la red de alumbrado público, a pesar de la reducción que se produce en los costes industriales. También en los espacios de circulación viaria. En cuanto a los costes ambientales todavía en los proyectos de urbanización no se valora dicha problemática.

Estos costes de inversión pueden reducirse de manera importante, cuando en fase de planeamiento se conocen las actividades concretas que tienen prevista su instalación, una vez finalizado el proceso de ejecución de la urbanización. El diseño de un área o espacio productivo a unas necesidades concretas, permite ajustar el diseño viario, la distribución parcelaria, los criterios dotacionales, etc., a fin de minimizar el coste final de la urbanización.

El aumento de coste de la construcción de un área, repercute en el coste de venta final, pudiendo afectar en la decisión de implantarse de una empresa en este territorio - posible motivo de la deslocalización productiva- .

Conceptos que permiten una mejor sostenibilidad de las áreas productivas no se han aplicado en absoluto. La mejora del ciclo del agua, la generación de energía renovable en las propias áreas, la instalación de alumbrado público con menos consumo eléctrico, la urbótica, etc., son algunos de los aspectos que su implantación permitirían mejorar las áreas desde el punto de vista de su funcionamiento y de mejora de la sostenibilidad, adaptándose a las nuevas realidades sociales y económicas que las empresas demandan.

El planteamiento de la rehabilitación de las áreas productivas, en aquellos elementos que permitan mejorar la sostenibilidad de las mismas, y como parte de ella, la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera mediante la introducción de las energías renovables, es una propuesta que debería ser de implantación inmediata a fin de contribuir al cumplimiento de los objetivos del Plan Nacional de Asignación de derechos de emisiones de CO₂ de España.

Para las áreas productivas existentes, en general es necesario un proceso de puesta al día y mejora de las infraestructuras y condiciones medioambientales, con el apoyo de los Ayuntamientos y de las Empresas instaladoras y suministradoras. Son ellas, en definitiva, las que conocen los problemas del día a día y son ellas las primeras que deben ser conscientes de la importancia de tener un espacio moderno donde desarrollar la actividad económica que favorezca la aparición de economías externas.

La participación de los Ayuntamientos también es crucial, ya que la rehabilitación supone un largo y farragoso proceso urbanístico – administrativo que sólo puede desarrollarse con una participación activa de los mismos.

Para las áreas productivas nuevas, hay que replantearse profundamente los criterios de diseño y sus infraestructuras. Criterios dotacionales ajustados a la realidad de las empresas que se van a implantar, incorporación de los conceptos de sostenibilidad (hasta ahora un concepto inexistente), infraestructuras adaptadas a las necesidades actuales (incorporación de la automatización, vigilancia), y criterios de mantenimiento con unos niveles superiores, aplicando criterios de análisis coste-beneficio adecuados. No desarrollar proyectos que después no se puedan mantener adecuadamente.

Por último, cabe hacer una consideración sobre el concepto de espacio o área productiva actual, donde existen una serie de empresas que actúan de manera independiente, pagando unos gastos al ayuntamiento y a las empresas que explotan las redes. La transformación en un concepto de gestión global de necesidades que permita aprovecharse a todas las empresas instaladas a modo de pequeñas “Smart City”, generando y consumiendo la energía eléctrica y vendiendo o comprando la sobrante en microrredes, aprovechando el agua de lluvia, compartiendo servicios de vigilancia, y otros muchos servicios que se pueden hacer de manera mancomunada, permitiría mejorar rendimientos, reducir costes y convivir en un hábitat mucho más agradable.

7.7. Investigaciones futuras

Es muy probable que el presente trabajo haya dejado muchas cuestiones abiertas. Era previsible al intentar tratar un tema tan extenso, donde bajo el paraguas de la urbanización, se ha hablado de aspectos normativos, aspectos técnicos y de aspectos económicos.

Considero especialmente apropiado hablar de dos nuevas líneas de investigación que, como continuación de la temática tratada en este trabajo, pueden ser de extrema utilidad de cara al futuro en el desarrollo de nuevas áreas productivas o la rehabilitación de las mismas.

- Propuesta de las bases técnicas de un modelo de determinación de sostenibilidad de la urbanización de áreas productivas, residenciales urbanas o rurales, que aporten con su aplicación, una mejora de la sostenibilidad respecto a las implantaciones actuales.

- Propuesta de las bases técnicas para la rehabilitación de áreas urbanas que aporten una mejora de la sostenibilidad en su funcionamiento, con la incorporación de los nuevos materiales o soluciones constructivas e infraestructuras, de energías renovables y las telecomunicaciones como elementos de base.
- Propuesta de nuevas formas de planeamiento de las áreas urbanas y su urbanización posterior, que permitan desarrollar las áreas de manera gradual y en base a las necesidades concretas de las empresas que se instalan.

En la realización de esta tesis doctoral se han detectado diversas posibilidades de realizar líneas de investigación que continúen y profundicen la contribución al conocimiento:

- Las metodologías de evaluación medioambiental basadas en listas, como LEED y BREEAM, siguen un patrón muy diferente a las metodologías de ciclo de vida. Si bien la metodología general propuesta en esta tesis es capaz de utilizarlas, sería oportuno hacer una adaptación de la metodología y hacerla más simple para estos casos específicos. Sería necesario contar con fuentes solventes, acreditadas y completas de parámetros de sostenibilidad, salud ambiental, recursos e impactos asociados.
- Estudiar si se puede utilizar alguna otra técnica heurística (Colonias de hormigas, Lógica borrosa, Calentamiento simulado,..) a la metodología de optimización y determinación de soluciones constructivas de urbanización o de cualquier otro problema de ingeniería civil (proyectos de puentes, presas, etc.). Una vía de simplificación puede venir por la parametrización de las variables características del proyecto de ingeniería civil o industrial, haciendo que el análisis sea sencillo. Otra vía puede venir mediante la creación de un perfil estándar en la fase de definición, evitando así tomar la mayoría de decisiones y estableciendo un marco común que sería beneficioso para la comparación entre casos que utilicen la misma metodología. Una última vía sería forzar el uso de cálculos simplificados.
- Realizar un estudio comparativo de los resultados de casos existentes en la literatura con casos en los que se ha aplicado las metodologías adaptadas a alternativas, rehabilitación y parques industriales.
- Aplicar la metodología general para combinaciones de varios aspectos de la sostenibilidad: ACV, coste de ciclo de vida (CCV) y análisis de ciclo de vida social (ACV-S).

El análisis de las diferentes soluciones constructivas, a partir de la descomposición de la sección viaria generadora en sus distintos componentes, integrados a su vez por elementos y materiales con propiedades diferenciales entre ellos, puede ser ampliable a una mayor cantidad de atributos, tanto cuantificables como cualitativos.

En esta tesis se han considerado tres de los atributos posibles (coste económico, cantidad de CO₂ generada y energía embebida en la solución). Estos atributos han venido a definir las coordenadas de una gran cantidad de soluciones posibles cuya distancia euclídea al eje coordenado representado por el origen de puntos (0,0,0), constituye la búsqueda del óptimo de Pareto para este problema. Minimizando dicha distancia, obtendremos una de las posibles soluciones óptimas desde esta triple consideración relacionada con la sostenibilidad.

Para el inicio de otras líneas de investigación, se pueden considerar y añadir al problema nuevas variables, incorporando las mismas técnicas multicriterio o explorando nuevas dimensiones de búsqueda, incluyendo restricciones adicionales tales como requerimientos legales o de otro tipo.

7.8. Contribución al conocimiento

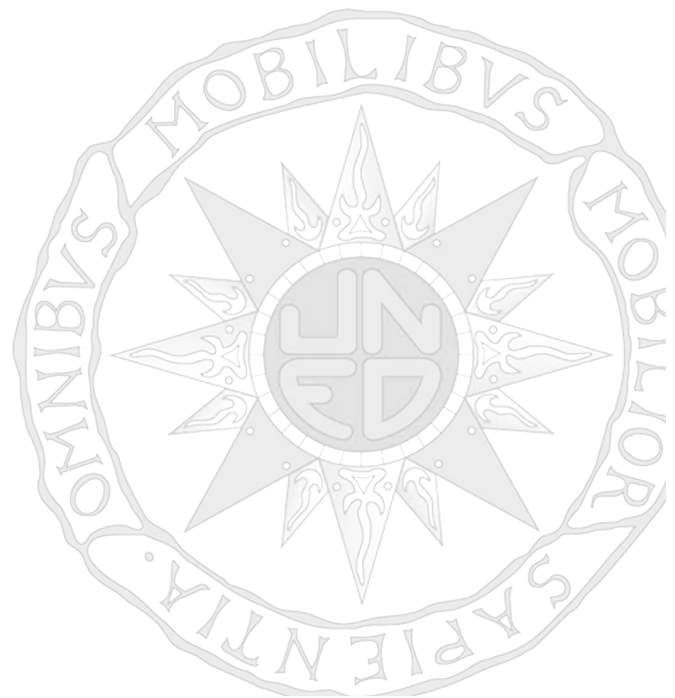
El trabajo realizado en esta tesis doctoral ha significado un avance en el conocimiento en los puntos siguientes:

- Estado de la técnica y análisis en el contexto de la sostenibilidad en obras de urbanización, específicamente sobre estos temas: sostenibilidad, cambio climático, urbanizaciones existentes (tipologías y estado del parque industrial), consumo y emisiones asociadas a la construcción, medidas de mejora de la eficiencia energética, análisis de ciclo de vida, agentes que participan en el ciclo de vida de un espacio urbano y energía operacional e incorporada.
- Se ha realizado una metodología que incluye aspectos medioambientales y económicos para evaluar los impactos de un entorno urbano en todo su ciclo de vida.
- Se han identificado las decisiones tomadas tanto en el proyecto como en la evaluación medioambiental y económica de la ejecución de un proyecto.
- Se han determinado los momentos críticos en la toma de decisiones y los actores que están involucrados en ellas.
- Se han determinado cuáles son los datos necesarios para realizar los cálculos y las evaluaciones y dónde se encuentran.

Esta tesis ha contribuido a mejorar la realización de análisis medioambientales, económicos y de sostenibilidad aplicados a un proyecto de implantación de un espacio urbano, analizando la sección viada industrial descriptiva de la obra civil e infraestructuras necesarias, como generadora de la trama urbana que alberga las actividades industriales, y especialmente, a una mejora de su posterior comparación con otros análisis. En general, se ha demostrado que la metodología propuesta es apropiada mediante la validación de esta para un caso de estudio.

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFIA



8 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**OPTIMIZACION DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS SOSTENIBLES
EN LA IMPLANTACION DE INFRAESTRUCTURAS DE
URBANIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS BASADAS EN ALGORITMOS
GENÉTICOS**

8

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

**OPTIMIZACION DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS SOSTENIBLES
EN LA IMPLANTACION DE INFRAESTRUCTURAS DE
URBANIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS BASADAS EN ALGORITMOS
GENÉTICOS**

a

AASHTO (1995). A policy on geometric design of highways and streets (1994). ISBN 978156051508.

A.A. HOPGOOD. (B - Book) Intelligent Systems for Engineers and Scientists, 2nd edition. CRC Press, 2nd edition, 2001. ISBN 0-8493-0456-3 (First edition published in 1993 as Knowledge-Based Systems for Engineers and Scientists, ISBN 0-8493-8616-0.).

ABDULLAH KONAK, DAVID, W. COIT, ALICE E. SMITH. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability Engineering & System Safety (2005). Elsevier.

AGNES, JULLIEN. 2013. Eco-design for infrastructures in all transport models. Hal archives-ouvertes.

ALABERN I VALENTÍ, Eduard; and GUILLEMANY CASADEMON, Carles. Implantació i coordinació dels serveis en l'execució de les obres d'urbanització: Fitxer d'informació i fitxer de formalització. 1989. ISBN 8440457324.

ALCANTARA, Vicent, PADILLA, Emilio y ROCA, Jordi (nov. de 2007). Actividad económica y emisiones de CO₂ derivadas del consumo de energía en Cataluña, 1990-2005. Análisis mediante el uso de los balances energéticos desde una perspectiva input-output .

ALEXANDER C., Notes on the Synthesis of Form. Cambridge, Harvard University Press: (1964).

ALLEN BARRY WILKINSON, Michael. Parallel programming. Prentice-Hall, (1999). ISBN 9780136717102

ALONSO TEIXIDOR, Luis Felipe. Las nuevas formas del espacio productivo y sus implicaciones urbanísticas. *Geometría: Revista semestral de arquitectura y urbanismo*, 1991, nº. 11. pp. 2-15. ISSN 0213-4780.

ALVARADO, CAROLINA, HERAZO, IVÁN, ET. AL. 2005. Aplicación del NSGA-II y SPEA-II para la optimización multiobjetivo de redes multicast.

ANASTASELOS, Dimitris, OXIZIDIS, Simos y PAPAPOULOS, Agis M. (feb. De 2011). "Energy, environmental and economic optimization of thermal insulation solutions by means of an integrated decision support system": *Energy and Buildings* 43.2-3, págs.686-694. ISSN 0378-7788.

ANDIMA e IDAE (abr. de 2008). Guía práctica de la energía para la rehabilitación de edificios. El aislamiento, la mejor solución. Madrid. APU (dic. de 2007).

ARAFAT DURRANI, Yaseer. Macromodelado del consumo de sistemas digitales basados en IPs descritos a nivel de transferencia de registros. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales., 2008. Número OCLC 778044455.

ARROYO, Elvira. Urbanismo Sostenible: Joaquim Nadal, Conseller de Política Territorial y Obras Públicas del Gobierno de la Generalitat de Catalunya. *Cauce 2000: Revista de la Ingeniería Civil*, 2004, nº. 121. pp. 16-23. ISSN 0212-761X.

ARROYO, JOSÉ; PUIG-PEY, Pedro (1992). Carreteras urbanas. Recomendaciones para su planeamiento y proyecto. Secretaria General Técnica, Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Madrid. ISBN 9788474338034.

ARIZMENDI BARNES, Luis J. Instalaciones urbanas: Infraestructura y planeamiento. Madrid: Bellisco,1995, 1990. ISBN 8485198468; 8485198530; 848519859X; 8485198670.

AYE, Lu, CRAWFORD, R.H. GAMMAMPILA, R y. MENDIS, P (2012). "Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules". En: *Energy and Buildings*. ISSN 0378-7788.

b

BABOULET, Olivier y MANFRED, Lenzen (ago. de 2010). “Evaluating the environmental performance of a university”. En: Journal of Cleaner Production. ISSN 0959-6526

BAGCHI,T Multiobjetive Scheduling by Genetic Algorithms, Kluwer Academic Publishers, London, (1999).

BALARAS, Constantinos, ATHINA, A, GAGLIA, G. GEORGOPOULOU, Elena, MIRASGEDIS, Sevastianos (mar. de 2007). “European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings”. En: Building and Environment. ISSN 0360-1323.

Banco de España (2010). Informe Anual 2009. ISBN 1579-8615.

BANDALA,M Algoritmo Genético Multiobjetivo para problemas de calendarización con transferencia cero (Flowshop). Tesis de Maestría, Benemerita Universidad Autonoma de Puebla, México, (2005).

BARAN,B. y HERMOSILLA,A., Comparación de un sistema de Colonia de hormigas y una estrategia evolutiva para el problema del ruteo de Vehículos con ventana de tiempo en un contexto Multiobjetivo, Centro Nacional de Computación, Universidad Nacional de Asunción; San Lorenzo, Paraguay. (1987).

BECATTINI, Giacomo. From industrial districts to local development: An itinerary of research. Northhampton, MA: Edward Elgar, 2003. ISBN 1843761599.

BIN, Guoshu y PARKER,Paul (2012). “Measuring buildings for sustainability:Comparing the initial and retrofit ecological footprint of a century home.The REEP House”. En: Applied Energy. ISSN 0306-2619.

BLENGINI, Gian Andrea (feb. de 2009). “Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy”. En: Building and Environment. ISSN 0360-1323.

BLENGINI, Gian Andrea y DI CARLO, Tiziana (jun. de 2010). "The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings". En: Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

BOIX DOMENECH, Rafael; TRULLÉN I THOMÀS, Joan; and Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona. La relevancia empírica de los distritos industriales marshallianos y los sistemas productivos locales manufactureros de gran empresa en España. Bellaterra: Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans de Barcelona, 2010.

BOSQUE MAUREL, Joaquín; and MÉNDEZ GUTIÉRREZ DEL VALLE, Ricardo. Cambio industrial y desarrollo regional en España. Barcelona: Oikos-Tau, 1995. ISBN 842810851X.

BRAGANÇA, Luis (2007). COST C16, Improving the Quality of Existing Urban Building envelopes Facades and Roofs . Research in Architectural Engineering. Series 5 . Amsterdam, Netherlands: IOS Press. iSBN : 978 - 1 -58603 -737 -6 .

BRUNET, M., P. D. Jones, J. Sigró, O. Saladié y col. (jun. de 2007). "Temporal and spatial temperature variability and change over Spain during.

BRUNKLAUS, Birgit, Catarina THORMARK y Henrikke BAUMANN (2010). "Illustrating limitations of energy studies of buildings with LCA - and actor analysis". En: Building Research & Information. ISSN 0961-3218.

BUCH I CLERMONT, Miquel, et al. Polígons Industrials i Sectors d'Activitat Econòmica. Barcelona: Generalitat de Catalunya, Departament de Política Territorial i Obres Públiques, 2007. ISBN 9788439375715.

BYRON S. Gottfried; WEISMAN, Joel. Introduction To Optimization Theory. Prentice-Hall, 1978. ISBN-0134914725.

C

CAMBIO 16. Ciudades Smart City: Tecnologías para la sostenibilidad al servicio de la calidad de vida. 2012, nº. 2108. pp. 30-33. ISSN 0211-285x.

CAMINOS, Horacio; and GOETHERT, Reinhard. Elementos de urbanización: Valoración de proyectos, análisis del emplazamiento. México D.F.: Gustavo Gili, 1984. ISBN 9686085939.

CAMPBELL, Tim. Beyond smart cities: How cities network, learn and innovate. Abingdon, Oxon; New York, NY: Earthscan, 2012. ISBN 9781849714266.

CANO, J.J., CANTÓ, J. (1997) "Clasificación y crítica de las galerías de servicios", XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, Sevilla.

CANO, J.J., CANTÓ, J. (1998) "La galería de servicio como elemento coordinador e integrador de las instalaciones urbanas", XIII Congreso Nacional de Ingeniería de Mecánica, Terrassa.

CANO, J.J., CANTÓ, J. (1999) "El desarrollo sostenible de las instalaciones urbanas", XV Congreso Nacional de Ingeniería de Proyectos, León.

CARMONA SÚAREZ, Enrique J. Algoritmos evolutivos para minería de datos. Apuntes de UNED.

CASTRO J., Creación de Portafolios de Inversión Utilizando Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México. (2005).

Centre For Design at RMIT University (ene. de 2001). Background Report LCA Tools, Data and Application in the Building and Construction Industry.

CERDÁ, I. (1867) "Teoría General de la Urbanización, y aplicación de sus principios y doctrinas a la Reforma y Ensanche de Barcelona", Ed. Imprenta Española, Madrid.

CETUR (1988). Voirie urbaine. Guide general de la voirie urbaine. Conception, aménagement, exploitation. CETUR. Bagneux, Francia. ISBN 9782110854780.

CETUR (1990). Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Voies Rapides Urbaines (ICTAVRU) CETUR, Bagneux, Francia. ISBN 9782110971647.

CHARLOT-VALDIEU, Catherine (abr. de 2010). "A tool and an approach for setting sustainable energy retrofitting strategies for territories (neighbourhood city) or building stocks".

CHAU,C.K.,W.K.Hui,W.Y.Ng y G. POWELL (abr. de 2012). "Assessment of CO2 emissions reduction in high-rise concrete office buildings using different material use options". En: Resources, Conservation and Recycling. ISSN 0921-3449

CHONG,Wai K. y Christopher HERMRECK (jul. de 2010). "Understanding transportation energy and technical metabolism of construction waste recycling". Resources, Conservation and Recycling. ISSN 0921-3449.

CITY OF LOUISVILLE. Industrial development design standars & guidelines. 2000.

CLARKE JONATHAN, The Rushenden Estate, Quenborough, Kent: An Early Bristish Industrial Estate. 2007. Industrial Archaeology Review XXIX.

CMD URS OETIKER. A320 Line Training Summary. Air Berlin, Revision 4.1

COATES P., Programming.Architecture, New York, Routledge. (2010). ISBN 9780203841488; 0203841484.

COELLO C., y TOSCANO G., A Micro Genetic Algorihm for Multiobjetive Optimizacion. First Internacional Conference on Evolutionary MultiCriterion Optimization. Springer Verlag. Lecture notes in Computer Science. (2001). ISBN 9781852337872.

COELLO C., VELDHUIZEN A. y LAMONT G., *Evolutionary Algorithms for Solving Multiobjective Problems*. Kluwer Academic Publishers, USA. (2002). ISBN 9780387332543.

COLE, Raymond J. (2011). "Transitioning from green to regenerative design". *Building Research & Information*. ISSN 0961-3218.

Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - The World Summit on Sustainable Development one year on: implementing our commitments . European Commission. (jun. de 2005).

Communication from the Commission - Energy efficiency: delivering the 20% target . European Commission.(abr. de 2009).

CONSEJO SUPERIOR DE LOS COLEGIOS DE ARQUITECTOS DE ESPAÑA. *Guía para la redacción de proyectos de urbanización*. Madrid: Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, 2007. ISBN 8493139491.

CONSEJO SUPERIOR DE LOS COLEGIOS DE ARQUITECTOS DE ESPAÑA. *Guía para la redacción de proyectos de urbanización*. Madrid: Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España, 1997. ISBN 8492194146; 8492194154.

CONVERY, Frank J.; and European Environment Agency. *Challenges for urban infrastructure in the European Union*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1998. ISBN 9282836738.

CORNE D., KNOWLES J. y OATES M., *The Pareto-Envelope based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization, Parallel Problem Solving from Nature-PPSN VI*, Springer Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, (2000).

CORNE D., JERRAM N., KNOWLES J. y OATES M., *PESA-11: Region-based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization*. Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO-2001), Morgan Kaufmann Publishers. (2001). ISSN 1556-603X.

CORREA FLÓREZ, C.A. 2008. *Algoritmo multiobjetivo aplicado al problema de la mochila*. Scientia et Technica. Vol. XIV. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia

CORTES, A. MANCILLA, L.E. An experimental Comparison of Multiobjective Algorithms: NSGA-II and OMOPSO.

CPM (2011). CPM LCA Database. Center for Environmental Assessment of Product and Material Systems.

CRANA (2006). Programa de Hogares Kioto . Centro de Recursos Ambientales de Navarra.

CUCHÍ, A., G. WADEL, F. LÓPEZ y A. SAGRERA (2007). Guía de la eficiencia energética para Administradores de Fincas. Fundación Gas Natural.

CUCHÍ, Albert, Gerardo WADEL y Paula Rivas HESSE (abr. de 2010). Cambio Global España 2020/50. Sector edificación. ISBN 9788461404575.

CUCHÍ, Albert, Daniel CASTELLÓ, Glòria DÍEZ y Albert SAGRERA (oct. de 2003).Paràmetres de sostenibilitat . Barcelona: ITEC. ISBN 9788478534555.

CUÉLLAR-FRANCA, Rosa M. y Adisa AZAPAGIC (2012) “Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses” Building and Environment ISSN 0360-1323.

d

DASCALAKI, Elena G., KALLIOPI G. Droutsas, Constantinos A. BALARAS y Simon KONTOYIANNIDIS (dic. de 2011). “Building typologies as a tool for assessing the energy performance of residential buildings.A case study for the Hellenic building stock”. En: Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

DEB K., AMRIT P., AGRAWA S., PRATAB A. y MEYARIVAN, T., A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA II. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6 (2): 182197. (2002). ISSN 1089-778X.

DELEUZE G. y GUATTARI F., Rizoma, Valencia, Pre-Textos. (2005).

DELEUZE G., El Pliegue, Leibniz y el Barroco, Barcelona, Paidós Básica. (1989).

DE FRANCISCO, Marcos. Plecs de prescripcions tècniques dels estudis de programació d'urbanització i d'edificació. Barcelona: Diputació de Barcelona. Àrea de Cooperació, 2002. Número OCLC 806498272.

DE HEREDIA SCASSO, Rafael. Arquitectura y Urbanismo Industrial: Diseño y construcción de plantas, edificios y polígonos industriales. 2ª ed. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Sección de publicaciones, 1981. ISBN 8474840171.

DE LA BARRERA POBLETE, Carlos Ignacio. Tesis Doctoral. Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura. Universidad Politècnica de Catalunya. 2010.

DE LUCA MARTÍNEZ, J. A.; SOTO PACHECO, Gloria M. and Caja de Ahorros de Murcia. Los distritos industriales como estrategia de desarrollo regional. Murcia: Caja Murcia. Obra Cultural, 1995. ISBN 8492012161.

DE LUIGI F. MANIEZZO V, GAMBARDELLA L.M. New Optimization Techniques in Engineering. Onwubolu, G. C., and B. V. Babu, 2004.

DESIGN STANDARDS POR INDUSTRIAL ROADS.

DGIEM (2008). Guía de rehabilitación energética de edificios de viviendas . Dirección General de Industria, Energía y Minas. Madrid.

DIEGO-MAS J., Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos. Aportación al control de la geometría de las actividades, Tesis doctoral, Universidad Politècnica de Valencia, (2006).

Directive 2002 /91 /EC (dic. de 2002). Energy performance of buildings.

Directive 2003 /87 /EC (oct. de 2003). Establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community.

Directive 2005 /32 /EC (jul. de 2005). Establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-using products.

Directive 2006 /32 /EC (abr. de 2006). Energy end-use efficiency and energy services.

Directive 2008 /98 /EC (nov. de 2008). Waste and repealing certain Directives.

Directive 2010 /31 /EU (mayo de 2010). Energy performance of buildings.

Directive 93 /76 /EEC (sep. de 1993). Limit carbon dioxide emissions by improving energy efficiency (SAVE).

DIRKS, Susanne. ¿Qué tan inteligente es su Ciudad? IBM Institute for Business Value. 2010.

Diseño de carreteras en áreas suburbanas. Comunidad de Madrid. Consejería de Política Territorial. Dirección General de Transportes. ISSN 11334762.

DIXIT, Manish Kumar, José L. FERNÁNDEZ-SOLÍS, Sarel LAVY y Charles H.CULP(ago. de 2010). "Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review". En: Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

DLMC (jun. de 2006). Literature review of life cycle costing (LCC) and life cycle assessment (LCA). Inf.téc. Davis Langdon Management Consulting.

DUPUY, Gabriel. El urbanismo de las redes: Teorías y métodos. Barcelona: Oikos-tau, 1998. ISBN 8428109370.

DURAND, Nicolas, JEAN-MARC Alliot. Algorithmes genetiques. Pdf, Marzo 2005. Número OCLC 881884786.

e

EC (2001). A Sustainable Europe for a Better World. A European Union Strategy for Sustainable Development (Commission's proposal to the Gothenburg European Council). European Commission (dic. de 2003).

EC y DGET (2010).EU energy and transport in figures. Statistical Pocketbook 2010.European Commission. Directorate-General for Energy and Transport. ISBN 9789279138157.

EC y JRC (2008). Environmental improvement potential of residential buildings .European Commission. Joint Research Centre. ISBN 9789279097676.

EC, JRC y IES (mar. de 2010 a). ILCD Handbook - Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment (LCA). European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability (mar. de 2010 b).

EEA (2002). Analysis and comparison of national and EU-wide projections of greenhouse gas emissions . European Environment Agency. Copenhagen. ISBN 9291674990.

EEA (2010). The european Environment State and outlook 2010: Consumption and the environment . No 1 /2010 . European Environment Agency. Copenhagen. ISBN 9789292131548.

ENERGÍA Y URBANISMO SOSTENIBLE. La ciudad del futuro. CIC, 2006, nº. 420. pp. 134-145. ISSN 1576-1118.

Energy - Yearly statistics 2008 . Statistical office of the European Union. ISBN 9789279146169.

ERKMAN, S.: Industrial ecology: an historical view. J. Cleaner production. Vol. 5. 1997.

ERLANDSSON, Martin y Mathias BORG (jul. de 2003). "Generic LCMethodology applicable for buildings, constructions and operation services—today practice and development needs". En: Building and Environment. ISSN 03601323.

ESTEBAN I NOGUERA, Juli. Elementos de ordenación urbana. Barcelona: Edicions UPC, 2001. ISBN 8483015129.

ESTEBAN I NOGUERA, Juli; and Barcelona. L'ordenació urbanística: Conceptes, eines i pràctiques. 2ª ed. Barcelona: Diputació Barcelona, 2007. ISBN 9788498032574.

ETRES (dic. de 2009). GEE1 – Guía de Eficiencia Energética para la rehabilitación de edificios existentes.

EUEGUE (mayo de 1994). Charter of European Cities & Towns Towards Sustainability. European Union Expert Group on the Urban Environment. Aalborg (oct. de 1997).

European Union Statistics on Income and Living Conditions. Statistical office of the European Union (2011).

EVANS J. y ARCHER S. Diversification and the Reduction of Dispersion: An Empirical Analysis. The Journal of Finance, 23 (5): 761 767. (1968). DOI 10.1111/j.1540-6261.1968.tb00315.x



FERNÁNDEZ DURÁN, Ramón. La explosión del desorden: La metrópoli como espacio de la crisis global. Madrid: Fundamentos, 1996. ISBN 8424507592.

FERNÁNDEZ, Alexandre. Urbanización e implantación de nuevas tecnologías urbanas: Algunas reflexiones sobre los casos de Burdeos y Bilbao a finales del siglo XIX y principios del XX. Scripta Nova: Revista electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, 2000, nº 4. ISSN 1138-9788.

Fernández Ortega, Luis (ene. de 2006). Prontuario de la construcción: manual de tablas y fórmulas. Madrid. ISBN 9788487440298.

Finnveden, Göran, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée y col.(oct. de 2009). “Recent developments in Life Cycle Assessment”. En: Journal of Environmental Management. ISSN 03014797.

FONSECA C. y FLEMING P., Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. In Stephanie Forrest, editor, Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, pages 416-432, San Mateo, California, University of Illinois at Urbana –Champaign, Morgan Kaufman Publishers. (1993). ISBN 1558602992.

FORREST, Stephanie. Genetic algorithms: Principles of natural selection applied to computation. Science, Vol. 261:872–878, Aug. 13, 1993.

Forsberg, Anna y Fredrik von Malmborg (feb. de 2004). “Tools for environmental assessment of the built environment”. En: Building and Environment. ISSN 03601323.

FOXALL J., El Libro de Visual C# 2005. Madrid, Anaya (2006). ISBN 9788441521216

FREDERICK SMITH, Stephen. A learning system based on genetic adaptive algorithms. University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA, USA, 1980. Número OCLC 8287515.

FRISCHKNECHT, Rolf, Niels Jungbluth, Hans-Jörg Althaus, Gabor Doka y col.(enero de 2005).“Theecoinvent Database: Overview and Methodological Framework. En: The International Journal of Life Cycle Assessment.

FRISCHKNECHT, Rolf, Niels JUNGBLUTH, Hans-Jörg ALTHAUS, Christian BAUER y col. (dic. de 2007 b). Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent v2.0 No. 3. Inf. téc. 3. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

FRISCHKNECHT, Rolf, Niels JUNGBLUTH, Hans-Jörg ALTHAUS, Gabor DOKA y col.(dic. de 2007 c). Overview and Methodology. Final report ecoinvent v2.0 No.

g

GAGO DÁVILA, Jesús; and Castella i Lleó, Junta. Ordenación de áreas industriales. Valladolid: Junta de Castilla y León. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, 1994. ISBN 8478463240.

GALLOWAY, DAVID. NEWMAN, PETER. 2014. How to design a sustainable heavy industrial estate. Renewable Energy. 67

GARCÍA CASCALES, J., KRAMER, L., ARANDA, P. (1924) "Proyecto de red de galerías para canalizaciones del subsuelo", Revista Arquitectura, Madrid.

GENG YONG et AL. EVALUATING THE APPLICABILITY OF THE CHINESE ECO-INDUSTRIAL PARK STANDARD IN TWO INDUSTRIAL ZONES. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China. International Journal of sustainable development & world Ecology. 2008.

GESTAL, MARCOS. Introducción a los algoritmos genéticos y a la programación genética. Universidad de A Coruña. 2010. ISBN 978-84-9749-422-9

GIL LONDOÑO. Algoritmos genéticos. PDF, Noviembre 2006.

GORGES-SCHLEUTER Martina. Explicit Parallelism of Genetic Algorithms through Population Structures. Springer-Verlag, London, UK, 1991

GERTSCH EROLES, Sabrina; and TORRES MARI, Pere. El proyecto de urbanización: Cómo minimizar el impacto ambiental. 2009. Número OCLC 804225429.

GECCO 2005 (Vol. 1 y 2), Genetic and Evolutionary Computation Conference, Libro del congreso, New York, ACM SIGEVO (2005). ISBN 3540406026 9783540406020 3540406034 9783540406037

GOVERNMENT OF WESTERN AUSTRALIA. Department of state Development. Oakajee Industrial Estate Structure Plan. Sustainability Report. 2012.

GOLDBERG D., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. New York: Addison-Wesley. (1989) ISBN 9780201157673.

GOLDBERG, David. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., Boston, MA, USA, 1989. ISBN 9780201157673.

GRACIA, Alvaro de, Lidia RINCÓN, Albert CASTELL, Melanie JIMÉNEZ y col.(sep. de 2010). "Life Cycle Assessment of the inclusion of phase change materials (PCM) in experimental buildings". Energy and Buildings. ISSN 03787788.

GRANT, JILL. Planning and designing industrial landscapes for eco-efficiency. Journal of cleaner Production. Vol. 5. 1997

GREINER D., A summarized overview of evolutionary multiobjective algorithms and new approaches, CEANI, USA. (2000). ISBN 9781846281372

GRUPO SPRILUR. Departamento de Industria, innovación, comercio y turismo. Gobierno Vasco. Guía para el desarrollo sostenible de los proyectos de urbanización.

Guerra, José Javier (mayo de 2008). "Usos y costumbres eficientes en el hogar". Jornada de Rehabilitación Energética. Madrid.

Guía para el uso de la instrucción EHE. Cálculo. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. ISBN 8478533702.

Guía para el uso de la instrucción EHE. Materiales, ejecución, control . Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. ISBN 8478533710.

Guía para el uso de la instrucción EFHE. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. ISBN 847853444X.

Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products. United Nations

Environment Programme. ISBN 9789280730210.

GUINEE, Jeroen, Marieke GORREE, Reinout HEIJUNGS, Gjalte HUPPES y col.(2004). Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards Vol. 7. ECO-Efficiency in Industry and Science. ISBN 9780306480553.

GUSTAVSSON, Leif y Anna JOELSSON (feb. de 2010). "Life cycle primary energy analysis of residential buildings": Energy and Buildings. ISSN 03787788.

GUSTAVSSON, Leif, Anna JOELSSON y Roger SATHRE (feb. de 2010). "Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building". Energy and Buildings. ISSN 03787788.

h |

HAAPIO, Appu y Pertti VIITANIEMI (oct. de 2008). "A critical review of building environmental assessment tools". Environmental Impact Assessment. ISSN 0195-9255.

HAITHAM, S. DEB, K. 2014. U-NSGA-III: A Unified Evolutionary Algorithm for Single, Multiple, and Many-Objective Optimization. Michigan State University. COIN Report Number 2014022.

HARVEY, Danny (sep. de 2006). A Handbook on Low-Energy Buildings and District-Energy Systems: Fundamentals, Techniques and Examples. Earthscan Publications Ltd. ISBN 184407-2436.

HASTINGS, Robert y Maria WALL (ene.de 2007). Sustainable Solar Housing: Strategies and Solutions.Vol1. Earthscan Publications Ltd. ISBN 1844073254.

HENRY, Nick. The new industrial spaces: Locational logic of a new production era. Número OCLC 772740758.

HENSEL M. y MENGES A. Emergence in Architecture, Architectural Design 74, no 3. (2004). ISBN 9780470866887.

HERAS, M^a del Rosario (ene. de 2010). "El parque de casas mal construidas energéticamente supera el 70 %". En: El Norte de Castilla .

HERCE, Manuel; and MAGRINYÀ, Francesc. La ingeniería en la evolución de la urbanística. Barcelona: Edicions UPC, 2002. ISBN 848301632X.

HERCE, Manuel; and MIRÓ FARRERONS, Joan. El soporte infraestructural de la ciudad. 2^a ed. Barcelona: Edicions UPC, 2006. ISBN 8483018586.

HERCE, Manuel; and Universitat Oberta de Catalunya. Infraestructuras y medio ambiente. Barcelona: UOC Universitat Oberta de Catalunya, 2010. ISBN 9788497880824; 9788497889018.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio; and Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Abastecimiento y distribución de agua. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008. ISBN 9788438003909.

HERNÁNDEZ MUÑOZ, Aurelio; Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos and Universidad Politécnica de Madrid. Saneamiento y alcantarillado: Vertidos de aguas residuales. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2007. ISBN 9788438003572.

HERNANDEZ, Patxi y Paul KENNY (jun. de 2010). "From net energy to zero energy buildings: Defining life cycle zero energy buildings (LC-ZEB)". Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

HERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, Juan Manuel y Xavier ROCA (jul. de 2012). "Energy and sensitivity analysis of Spanish dwelling stock". Proceedings of the European Conference on Product and Process Modelling

HMSO, London. ISBN 9780115508189.

HORMIGO VENTURA, Juan P.; HERCE, Manuel; and Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. La evolución de los factores de localización de actividades. 2006. Número OCLC 803764209.

HERTZ J., KROGH R. y PALMER R., Introduction to the Theory of Neural Computations. 1^a ed. AddisonWesley Publishing Company. Boston.USA.(1991).ISBN 0201503956; 9780201503951; 0201515601; 9780201515602

HOLLAND J. Adaptation in Natural and Artificial Systems, (An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence). Cambridge, London: MIT Press. (1975). ISBN 0585038449;9780585038445;0262082136;9780262082136;97802625811100262581116;0262275554;9780262275552

HOLLAND J., Emergence: From Chaos to Order. Reading, Mass.: Addison-Wesley. (1998).

HOLLAND J., Genetics Algorithms / Algoritmos Genéticos. Revista Scientific American. MIT Press. (1992).ISBN 9780201149432

HORN J., NAFPLIOTIS N. y GOLDBERG D., A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence. 1: 82 87. (1994). ISSN 1615-147X.

HUI Li, QUINGFU Zhang. 2007. Comparison Between NSGA-II and MOEA/D on a Set of Multiobjective Optimization Problems with Complicated Pareto Sets. Technical Report CES-476.



IDAE (jul. de 2007). Plan de Acción 2008-2012 de Ahorro y Eficiencia Energética en España . Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

IEA (2010). Energy Technology Perspectives 2010. Scenarios & Strategies to 2050. International Energy Agency. ISBN 9789264085978.

World Energy Outlook 2010. International Energy Agency. Paris. ISBN 9789264086241.

IEA Annex 31 (nov. de 2001). Comparative Applications . Background report. International Energy Agency.

Indovina, Francesco

INE (mar. de 2001). Censos de población y viviendas 2001. Instituto Nacional de Estadística.

INGO RECHENBERG. EVOLUTIONSSTRATEGIE: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Frommann-Holzboog Verlag, Stuttgart, Germany., 1970. ISBN-9783772803741.

Institution of Highways and Transportation and the Department of Transport (1987) Roads and Traffic in Urban Areas.

Instrucción de Autopistas (1975) Ministerio de Obras Públicas, Madrid.

INSTITUT CATALÀ DEL SÒL. Dels Polígons Industrials als Sectors d'Activitat Econòmica. Gestió integral: Programació, planejament, projecte, execució, conservació, gestió de recursos: Llibre d'estil. 2007.

INSTITUT CATALÀ DEL SÒL. Llibre d'estil dels Sectors d'Activitat Econòmica. 2012. ISBN 9788439376866.

INSTITUT D'ESTUDIS REGIONALS I METROPOLITANS DE BARCELONA, et al. Polígons d'Activitat Econòmica: Tendències de localització i accessibilitat. Barcelona: Institut d'Estudis Regionals i Metropolitans, 2007. ISBN 9788488068860.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA. Panorámica de la industria. Madrid: Instituto Nacional de Estadística, 2010. ISBN 9788426037589

INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACIÓN AHORRO DE LA ENERGÍA; and Geohabitat. Manual de Diseño. La Ciudad Sostenible. Madrid: IDAE. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2002. Número OCLC 803188162.

IPCC (2007). Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University. ISBN 9780521880114.

Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. ISBN 9291691224.

ISO 14040 :2006 (2006). Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.

ISO 14044 :2006 (2006). Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.

ISO/TS 21929 -12006 (2006). Sustainability in building construction. Sustainability indicators Part1. Framework for the development of indicators for buildings.

ISO/TS 21931 -1 2006 (2006). Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment for environmental performance of construction works.



JAYARAM k., Multiobjetive Production Scheduling, M. Tech. Thesis, Department of industrialand Management Engineering, Indian Institute of Technonogy Kanpur. (1998).

JENKINS, D.P.(feb. de 2010). “The value of retrofitting carbon-saving measures into fuel poor social housing”. En: Energy Policy. ISSN 0301-4215.

JHONSON S., Sistemas Emergentes: O que tienen en común hormigas, neuronas, ciudades y software, México, Fondo de cultura Económica, (2008). ISBN 9788475066226.

JOYANES, RODRIGUEZ y CASTÁN, C++, Madrid, MC GRAW HILL. (1999). ISBN 8448198441

J. ESHELMAN, LARRY; SCHAFFER, DAVID; A. CARUANA, RICHARD and RAJARSHI, DAS. A study of control parameters affecting online performance of genetic algorithms for function optimization. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1989.

J. HOLLAND. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, 1975. ISBN- 9780472084609.

J. R. KOZA. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. ISBN-9780262111706.

J.T., ALANDER. On optimal population size of genetic algorithms. In Computer Systems and Software Engineering, 6th Annual European Computer Conference, 1992.

J.WALSH, Michael; J.FOGEL, Lawrence; J.OWENS, Alvin. Artificial intelligence through simulated evolution. John Willey & Sons, New York, 1967. Número OCLC 223078340.

k

KALYANMOY Deb. An introduction to genetic algorithms. PDF. Print ISSN 0256-2499

KENNETH DE JONG, Alan. *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, 1975. Número OCLC- 48128328.

KNEIFEI, Joshua (mar. de 2010). "Life-cycle carbon and cost analysis of energy efficiency measures in new commercial buildings".Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

KNOTZER, Armin (2010). Energy Improvement Measures and their Effect on the Indoor Environment

KNOWLES J. y CORNE D., Approximating the Nondominated Front using the Pareto Archived Evolution Strategy. Evolutionary Computation,

Massachusetts Institute of Technology, (2000). ISSN 1063-6560.

KOHLER, Niklaus, STEADMAN, Philip. Uta (2009). "Research on the building stock and its applications". Building Research & Information ISSN 0961-3218.

KOPPEN, M. YOSHIDA, K. Substitute Distance Assignments in NSGA-II for handling Many-Objective Optimization Problems. Kyushu Institute of Technology.

KOZA J., Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. Cambridge: MIT Press. (1996). ISBN 9780262111706.

KOWALSKI, KAROL, J. ET AL. 2016. Eco-friendly materials for a new concept of asphalt pavement. Transportation Research Procedia.

Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. (ago. de 2002). Report of the World Summit on Sustainable Development. Johannesburg, South Africa. ISBN 9211045215.

KYOUNG-HEE, Kim (2011). "A comparative life cycle assessment of a transparent composite facade system and a glass curtain wall system". Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.



LAND CORP. 2008. Pinjarra Industrial Estate: Design guidelines

LAVOLA (jul. de 2009). Anàlisi prospectiva dels impactes socioambientals del sector energia.

LEY 38 /1999 (nov. de 1999). Ordenación de la Edificación.

LETHABY y WILLIAM, *Architecture: An Introduction to the History of the Art of Building*, (T.Butterworth Ltd. (1911). Número OCLC 1651320.

LI HUI, ZHANG QINGFU, *Comparison Between NSGA II and MOEA/D on a Set of Multiobjective Optimization Problems with Complicated Pareto Sets*. Technical Report CES-476. IEEE. October 2007

LIBERTY J. y HOVARTH D., *Aprenda C++*, Madrid, Anaya. (2005). ISBN 9788441518148.

LIDDAMENT T., *The Computationalist Paradigm in Design Research*, Design Studies, Vol 20, No 1. (1999). ISSN 0142-694X.

LÓPEZ, Fabián (mar. de 2006). "Sobre el uso y la gestión como los factores principales que determinan el consumo de energía en la edificación. Una aportación para reducir el impacto ambiental de los edificios." ISBN 9788439382102.

LÓPEZ-MESA, Belinda, ANGEL PITARCH, Ana y GALLEGO, Teresa (abr 2009). "Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors". *Building and Environment*. ISSN 0360-1323.

LÓPEZ PEREDA, PEDRO. *Manual de Vados y pasos peatonales*. Fundación ONCE. ISBN 84-88816-60-X

LORENTE, Julián. *Nuevas redes de acceso: La fibra, a debate*. Comunicaciones World, 2007, nº. 221. pp. 34-41. ISSN 1139-0867.

LUXÁN, Margarita, BARBERO BARRERA, Mar, GÓMEZ MUÑOZ, Gloria y ROMÁN LÓPEZ, Emilia (abr. de 2010). "Estudio para la elaboración del Plan RENOVE de acristalamientos en viviendas de la Comunidad de Madrid". 'Edificación sostenible. Revitalización y rehabilitación sostenible de barrios'. ISBN 9788461419203.

LUXÁN, Margarita, BARBERO BARRERA, Mar, GÓMEZ MUÑOZ, Gloria y ROMÁN LÓPEZ, Emilia (abr. de 2010 b). "Metodología de Evaluación para el Programa de Ayudas a las Actuaciones de Rehabilitación para la Mejora de la Sostenibilidad y Eficiencia Energética de las Edificaciones". 'Edificación sostenible. Revitalización y rehabilitación sostenible de barrios'. ISBN 9788461419203.



MACEDON RANGES SHIRE COUNCIL. Design Guidelines for Industrial & Commercial Development. 2012.

MADINA DOÑABEITIA, Carlos; and ARECHALDE UGARTECHE, Ibón. Las nuevas redes eléctricas inteligentes, su medida y su demanda. Dyna, 2011, vol. 86, nº. 3. pp. 300-307. ISSN 0012-736.

MAGRINYÀ, Francesc; HERCE, Manuel; and MIRÓ FARRERONS, Joan. Construcció de ciutat i xarxes d'infraestructures. 2ª ed. Barcelona: Edicions UPC, 2006. ISBN 9788483018781.

MAGRINYÀ, Francesc, et al. L'espai urbà de la mobilitat. Barcelona: Edicions UPC, 2007. ISBN 9788483019177.

MALMVIST, Tove, MAURITZ, Glaumann, SCARPELLINI, Sabina y ZABALZA, Ignacio (2011). "Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines". ISSN 0360-5442.

MANCHÓN, F.; SANTAMERA, J. (1995) Recomendaciones para el diseño y proyecto del viario urbano.

Manual de capacidad en carreteras. Asociación Técnica de la Carretera. Madrid. ISBN 9788487825958.

MARCOS GESTAL POSE. Introducción a los algoritmos genéticos. PDF, 2001. ISBN: 978-84-9749-422-9.

MARTÍNEZ ALIER, Joan. Ecología industrial y desarrollo sostenible: Perspectivas nacional, regional y urbana. Madrid: Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2003. ISSN 0422-2784

MARTÍNEZ, Alma. Definición de una red neuronal para clasificación por medio de un programa evolutivo. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, XXII: pp. 4 – 11, 2001.

MARTÍNEZ, Andrés; and Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia. Guía básica para el diseño de espacios públicos urbanos: Criterios y

recomendaciones. Valencia: CTAV Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia, 2011. ISBN 9788486828912.

MARTÍN GARCÍA, Jorge. Smart City ¿Un futuro al alcance de la mano?, Bit, 2012, nº. 188. pp. 49-51. ISSN 0210-3923.

MARGOLIS, Liat; and ROBINSON, Alexander. Living systems: Innovative materials and technologies for landscape architecture. Basel etc.: Birkhaeuser, 2007. ISBN 9783764377007.

MAYER, Armin (ago. de 2010). Energy Performance Contracting in the European Union. Introduction, Barriers and Prospects. Institute for Building Efficiency. ISBN 9789290840688.

MAYER, Armin, DEREK SUPPLE, Vollrad, KUHN, Sam (sep. de 2010). Energy Performance Contracting in the European Union: Creating Common "Model" Definitions, Processes and Contracts. Institute for Building Efficiency.

MCyT (nov. de 2003). The Spanish National Plan for Scientific Research, Development and Technological Innovation for the period 2004-2007. Ministerio de Ciencia y Tecnología. ISBN 8474749913.

MEADOWS, Donella H, MEADOWS, Dennis L, JØRGEN, Randers y WILLIAM, W. Behrens(1972).The Limits to Growth. Universe Books. ISBN 0876631650.

MEIJER, Frits, LAURE, Itard y SUNIKKA-BLANK, Minna (2009). "Comparing European residential building stocks: performance, renovation and policy opportunities". Building Research & Information ISSN 09613218.

MENOUFI, Karim, CASTELL, Albert, NAVARRO, Lidia y PÉREZ, Gabriel (abr. De 2012). "Evaluation of the environmental impact of experimental cubicles using Life Cycle Assessment: A highlight on the manufacturing phase". Applied Energy ISSN 03062619.

MICHELWICZ Z., Genetic algorithms + Data Structures = Evolutionary programs. 3ª ed. Springer. (1996). ISBN 9783540606765.

MIERZEJEWSKA, A. A. HOPGOOD. Transform ranking: a new method of fitness scaling in genetic algorithms. ISBN 978184882170.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2007 a). Documento de condiciones de aceptación de opciones simplificadas alternativas. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2007). Documento de condiciones de aceptación de Programas Informáticos Alternativos. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (2007 c). Memoria de Cálculo correspondiente a la Opción Simplificada para la Calificación de Eficiencia Energética de Edificios de Viviendas.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (mayo de 2008). Planificación de los sectores de electricidad y gas 2008-2016.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (jul. de 2010). Programa informático Calener.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio(2011). Certificación eficiencia energética.

Ministerio de Industria, Turismo y Comercio.(sep. de 2011). Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020.

Ministerio de Fomento; and Centro de Estudios Hidrográficos. Guía técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano. 3ª ed. Madrid: Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones, 2009. ISBN 9788477904915.

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (mar. de 2006). Cuarta comunicación nacional de España. Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (mar. de 2007). Libro Verde de Medio Ambiente Urbano.

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. (oct. de 2009). Consumo de energía por hogar.

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2009). Emisiones de CO2 del sector residencial.

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (mar de 2009). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España. Años 1990-2007.

Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino (abr. de 2011). Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de España. Años 1990-2009.

Ministerio De Obras Públicas, Transportes Y Medio Ambiente, Madrid.

Ministerio de Vivienda (mar. de 2008). Sobre una estrategia para dirigir al sector de la edificación hacia la eficiencia en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Ministerio de Vivienda (abr. de 2009). Código Técnico de la Edificación. Documento Básico HE. Ahorro de Energía. Ministerio de Vivienda. Estimación del parque de viviendas. Viviendas principales y no principales.

Ministerio de Vivienda(mayo de 2010). Stock de Viviendas Nuevas a 31 de diciembre de 2009. Ministerio de Vivienda.

MIRALLES-GUASCH, Carme; and DONAT MUÑOZ, Carles. Anàlisi de l'oferta i la demanda de polígons d'activitat a Catalunya. Papers: Regió Metropolitana De Barcelona: Territori, Estratègies, Planejament, 2007, n°. 45. pp. 8-36. ISSN 1888-3621.

MITCHELL M., An Introduction to Genetic Algorithms, Cambridge, Massachusetts. (1996). ISBN 9780262133166.

MONAHAN, J. y J.C. Powell (ene. de 2011). "An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework". Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

Montajes e instalaciones (nov. de 2005). "Valoración de unidades de obra". Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones. ISSN 0210-184X.

MONTERO VALLEJO, Manuel; and DE TERÁN, Fernando. Historia del urbanismo en España. Madrid: Cátedra, 1996. ISBN 8437614694;8437617081.

M.O.P.U. (1990) ISBN 9788449800917.

MORALES, Eduardo. Búsqueda, optimización y aprendizaje. PDF, Noviembre 2004.

MORALES BARROSO, José. La red del siglo XXI: Convergencia de las redes eléctrica y de telecomunicaciones. Anales de Mecánica y Electricidad, 2006, vol. 83, nº. 3. pp. 18-23. ISSN 0003-2506.

MORLEY, Stuart. Industrial and business space development: Implementation and urban renewal. London; New York: E. & F.N. Spon, 1989. ISBN 041914790X.

MOUJAHID, A.; INZA, I.; LARRAÑAGA P. Tema 2: Algoritmos genéticos. PDF, Febrero 2008.

Murias Rodríguez, Ángel. Estudio de bloques constructivos en algoritmos genéticos. PhD thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, 2007. Número OCLC 702630942.

n

NAASRA (1972), Sidney. Guide policy for geometric design of mayor urban roads. ISBN 9780855880446.

NOBLE, John; SMITH, Andrew (1992) Residential roads and footpaths. Layout considerations Department of the Environment, Department of Transport, HMSO, London. ISBN 9780117526419.

NEMRY, Françoise, UIHLEIN, Andreas, COLODEL, Cecilia, WETZEL, Christian (jul. de 2010). "Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union–Potential and costs". Energy and Buildings. ISSN 0378-7788.

NINYEROLA, Miquel, PONS, Xavier y ROURE, Joan Maria (2005). Atlas climático digital de la península ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. Bellaterra: Universidad Autónoma de Barcelona. ISBN 8493286087.



ONDATEGUI RUBIO, Julio César. Parques científicos e infraestructuras tecnológicas: Nuevos instrumentos de organización industrial. *Análisis Local*, 2006, nº. 64. pp. 33-46. ISSN 1575-5266.

ORTIZ, Oscar, CASTELLS, Francesc y SONNEMANN, Guido (ene. 2009). "Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA". *Construction and Building Materials*. ISSN 0950-0618

ORTIZ, Oscar, CASTELLS, Francesc y SONNEMANN, Guido (feb.2010). "Operational energy in the life cycle of residential dwellings. The experience of Spain and Colombia". *Applied Energy*. ISSN 0306-2619.

ORTIZ, Oscar, BONNET, Cécile, BRUNO, Joan Carles y CASTELLS, Francesc (mar.2009). "Sustainability based on LCM of residential dwellings. A case study in Catalonia, Spain". *Building and Environment*. ISSN 0360-1323.

ORTIZ, Oscar, PASQUALINO, Jorgelina C., DÍEZ, Gloria y CASTELLS, Francesc (sep.2010). "The environmental impact of the construction phase. An application to composite walls from a life cycle perspective". *Resources, Conservation and Recycling*. ISSN 0921-3449.

OSE (2009). *Sostenibilidad en España 2009*. Observatorio de la Sostenibilidad en España. ISBN 9788484763888.

O'ROURKE J., *Computational Geometry in C*, Second Edition. New York, Cambridge University Press. (2005). ISBN 9780521649766.

OSYCZKA A. *Multicriterion optimization in engineering with Fortran Programs*. 1ª ed. Ellis Horwood Limited. (1984). ISBN 0853124817; 9780853124818; 0470200197; 9780470200193.

p

PARETO W., Course de Economie Politique, Volume I & II. F. Rouge, Lausanne, Francia, (1896). ISBN 2600040145; 9782600040143.

PEÑA SASTRE, Mónica; HERCE, Manuel; and Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Evolución de la urbanización: Perspectivas económicas y ambientales.2001.

PERALES MADUEÑO, Francisco. La ejecución del planeamiento. Madrid: lustel, 2006. ISBN 8496440575.

PÉREZ LÓPEZ, Jesús Ramón. *Contribución a los métodos de optimización basados en procesos naturales y su aplicación a la medida de antenas en campo próximo*. PhD thesis, Universidad de Cantabria,

PÉREZ SERRADA, A., Una Introducción a la Computación Evolutiva. Tesis de Maestría. Universidad de Valladolid, España, (1996).

PETIT C., Touched by Nature: Putting Evolution to Work on the Assembly Line. U.S. News and world Report, (1998)

PEUPORTIER, Bruno y PUTZEYS, Katrien (feb. 2005). Intercomparison and Benchmarking of LCA-based Environmental Assessment and Design Tools for Buildings.

PEUPORTIER, Bruno. (2008) Eco-design for Buildings and Neighbourhoods. CRC Press. ISBN 978-I-138-02795-4

PIÉ NINOT, Ricard; Escola Sert; and Col.legi d'Arquitectes de Catalunya. Actuació en l'Espai Públic, l'Equipament i els Serveis. 2005.

PINZÓN LATORRE, Andrés. La simbiosis industrial en Kalundborg, Dinamarca. DEARQ: Revista de Arquitectura de la Universidad de Los Andes, 2009, nº. 4. pp. 155-161. ISSN 2011-3188.

PORTO REY, Enrique. Manual sobre las figuras. Proyecto de Urbanización y Proyecto de Obras Ordinarias: (Sus relaciones con el planteamiento urbanístico). Madrid: Munilla-Lería, 2000. ISBN 8489150427.

PRECEDO LEDO, Andrés. La Red Urbana. Madrid: Síntesis, 1990. ISBN 8477380309.

PricewaterhouseCoopers (2004). Efectos de la aplicación del Protocolo de Kioto en la economía española.

P. MOSCATO. *On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms*. Technical Report Caltech Concurrent Computation Program., 1989.

r |

RAMESH, T (2012). “Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context”.Applied Energy. ISSN 0306-2619.

RASHEED K., A genetic algorithm for continuous design optimization. Technical Report DCSTR-352. Department of Computer Science, Rutgers University. New Brunswick, NJ. Ph.D.,(1998).

Real Decreto 1027 /2007 (jul. de 2007). Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios.

Real Decreto 105 /2008 (feb. de 2008). Producción y gestión de los residuos de construcción y demolición.

Real Decreto 1247 /2008 (jul. de 2008). Instrucción de hormigón estructural (EHE-08).

Real Decreto 1370 /2006 (nov. de 2006). Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012.

Real Decreto 1627 /1997 (oct. de 1997). Disposiciones mínimas de seguridad y salud en las obras de construcción.

Real Decreto 2066 /2008 (dic. de 2008). Plan Estatal de Vivienda y Rehabilitación 2009-2012.

Real Decreto 314/2006 (mar. de 2006). Código Técnico de la Edificación.

Real Decreto 47 /2007 (ene. de 2007). Procedimiento básico para la certificación de eficiencia energética de edificios de nueva construcción.

Rehabilitación energética de edificios de viviendas . Madrid. WBCSD (feb. de 2010). Vision 2050: The new agenda for business . World Business Council for Sustainable Development. ISBN 9783940388568.

RIERA, P., PASQUAL, J. (1992) "The importance of urban underground land value in project evaluation: a case study of Barcelona's utility tunnel", Tunneling and Underground Space Technology Vol. 7, Pergamon Press Ltd., Londres.

ROBERTS, BRIAN H. The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: an Australian case of study. Journal of cleaner production. 2004.

ROCA, Jordi. (1996) "El valor económico del subsuelo", Ciudad y Territorio – Estudios Territoriales Vol. XXVIII, Ministerio de Fomento, Madrid.

ROCA, Jordi, ALCANTARA, Vicent y PADILLA, Emilio (nov. de 2007). Actividad económica, consumo final de energía y requerimientos de energía primaria en Cataluña,

RODRIGO, Julio, CAÑELLAS, Noemí, MENESES ,Montse (2008). El consumo de energía y el medio ambiente en la vivienda bibliografía 211 en España. Análisis de ciclo de vida (ACV). Fundación Gas Natural. ISBN 9788461226047.

RODRÍGUEZ, Jorge (abr. de 2010). "Rehabilitación energética del tejido urbano residencial. Evaluación previa para una mayor eficiencia". Edificación sostenible. Revitalización y rehabilitación sostenible de barrios'. ISBN 9788461419203.

ROSENTHAL, S. BORSCHBACH, M. 2014. Impact of Population Size and Selection within a Customized NSGA-II for Biochemical OPTimization Assessed on the Basis of the Average Cuboid Volume Indicator. University of applied sciences.FHDW. Germany

ROSSELLÓ-BATLE, Beatriz, MOIÀ, Andreu, CLADERA, Antoni y Víctor MARTÍNEZ (abr. de 2010). "Energy use, CO2 emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands". En: Energy and Buildings págs.547-558. ISSN 0378-7788.

ROSSI, Barbara, MARIQUE, Anne-Françoise y REITER, Sigrid (2012). "Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study". En: Building and Environment 51, págs. 402 -407. ISSN 0360-1323.

ROSSI, Barbara, MARIQUE, Anne-Françoise y REITER, Sigrid GLAUMANN, Mauritz (2012). "Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool". En: Building and Environment 51,págs.395-401. ISSN 0360-1323.

ROY, Poritosh, NEI, Daisuke, ORIKASA, Takahiro, XU, Qingyi y col.(ene. De 2009). "A review of life cycle assessment (LCA) on some food products". En: Journal of Food Engineering 90.1, págs.1-10. ISSN 0260-8774.

RUIZ, M.C. y ROMERO, E.(nov. de 2011). "Energy saving in the conventional design of a Spanish house using thermal simulation". En: Energy and Buildings 43.11,págs.3226-3235. ISSN 0378-7788.

RUMMING, Karin. Desarrollo urbano sostenible bajo el ejemplo representativo ecológico de la nueva urbanización de Kronsberg, 2007.

S

SAGHAFI, Mohammad Djavad y HOSSEINI TESHNIZI, Zahra Sadat (nov. de 2011). "Recycling value of building materials in building assessment systems". En: Energy and Buildings 43.11, págs.3181-3188. ISSN 0378 -7788.

SALAT, Serge (2009). "Energy loads, CO2 emissions and building stocks: morphologies, typologies, energy systems and behaviour". En: Building Research & Information 37.5, pág.598. ISSN 0961-3218.

SALOMON M., Algorithms for the vehicle routing and scheduling problem with time window constraints, Oper. Res., (1987). Número OCLC 14644339.

SÁNCHEZ GOYANES, Enrique. El tránsito al urbanismo sostenible. Práctica Urbanística: Revista mensual de urbanismo, 2006, nº. 52. pp. 19-36. ISSN 1579-4911.

SÁNCHEZ SEMBEROIZ, Iñigo. Alumbrado público eficiente. Equipamiento y Servicios Municipales, 2009, nº.143.pp.22-28. ISSN 1131-6381.

SANZ, Luis. Parques tecnológicos y científicos: Nuevos espacios globapolitanos. Cartuja Innova, 2006, nº.31. pp. 38. ISSN 1577-7294.

SARTORI, I. y HESTNES, A.G. (mar. de 2007). "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article". En: Energy and Buildings 39.3, págs.249-257. ISSN 0378-7788.

SARTORI, Igor, WACHENFELDT, Bjørn Jensen y HESTNES, Anne Grete (mayo de 2009). "Energy demand in the Norwegian building stock: Scenarios on potential reduction".En: Energy Policy 37.5, págs.1614-1627. ISSN 0301-4215.

SCHAFFER J., Multiobjective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms. First International Conference on Genetic Algorithms. (1985). OSTI Identifier 5673304.

SCHEUER, Chris, KEOLEIAN, Gregory A. y REPPE, Peter (nov. de 2003). "Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications". En:Energy and Buildings 35.10, págs.1049-1064. ISSN 0378-7788.

SEGARRA J., Vida artificial: del caos al orden. Alzira: España. Algar Editorial. (2002). ISBN 9788493138264.

SEGARRA SANCHIS, Javier. La Biotectura. Polígonos industriales ecológicos y otras apuestas de futuro. Comitè Econòmic i Social de la Comunitat Valenciana. Quintas conferencias sobre el medio ambiente:

Medio Ambiente y Empresa. Castellón, 18 al 20 de Noviembre de 2002.

SEGURA SANZ, Rodolfo, et al. *Actividad Industrial y Sistemas Urbanos: Evolución y tendencias de las tipologías y modelos de localización industrial en relación con la ciudad y las actividades urbanas*. Madrid: Mopu, 1989. ISBN 847433618X.

SEOPAN(ene. de 2009). *Annual report on the construction 2007*. Asociación de Empresas Constructoras de Ámbito Nacional de España.

SERRANO LÓPEZ, Miguel Ángel, CASTRILLO CABELLO, Miguel A. y LÓPEZ AENLLE, Manuel (2009). *Formulario-prontuario de estructuras: estructuras de acero, estructuras de hormigón, estructuras de madera*. ISBN 9788496486393.

SHARMA, Aashish, SAXENA, Abhishek, SETHI, Muneesh, SHREE, Venu y (ene. de 2011). "Life cycle assessment of buildings. A review". En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 .1, págs.871-875. ISSN 1364-0321.

SHEA K., AISH R. y GOURTOVAIA M., *Towards integrated performance-driven generative design tools*, [eCAADe '03] Graz University of Technology (Austria): 553-560, http://iam.tugraz.at/~e/cd/ecaade_files/pdfs/Friday/149_shea.pdf, [01/11/07]. ISSN 0926-5805

SHOAF J. y FOSTER J., *A Genetic Algorithms Solution to the Efficient Set Problem: A Technique for Portfolio Selection Based on the Markowitz Model*. In *Proceeding of the Decision Sciences Institute, Annual Meeting Orlando Florida, USA.* (1996).

SINGH, Amanjeet, BERGHORN, George, JOSHI, Satish y MATT, Syal (mar. de 2011). "Review of Life-Cycle Assessment Applications in Building Construction".En: *Journal of Architectural Engineering* 17.1, págs.15-23. ISSN 1076-0431,1943-5568.

SOLÉ BONET, Josep y CAATT (2003). *Aislamiento Térmico En La Edificación: El Cálculo De La Demanda Energética Como Herramienta De Diseño*. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Tarragona. Tarragona:Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Tarragona. ISBN 8495624257.

Sostenibilidad en España 2010. Observatorio de la Sostenibilidad en España. ISBN 9788484764205.

SRINIVAS N. y DEB K., Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*. Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of technology, Kanpur, India, (1994). ISSN 1063-6560.

SRINIVASAN, Ravi S., W. BRAHAM, William, E. CAMPBELL, Daniel y D. CURCIJA, Charlie (2012). "Re(De)fining Net Zero Energy: Renewable

STEADMAN P., *The Evolution of Designs: Biological Analogy in Architecture and the Applied Arts*. New York, Cambridge University Press. (1979). ISBN 0415447526; 9780415447522; 0415447534 9780415447539; 020393427X; 9780203934272.

STENDER, Joachim. *Parallel Genetic Algorithms: Theory and Applications*. IOS Press, 2003. ISBN 9789051990874.

Stockholm Conference. Stockholm (jun. de 1992). Earth Summit 1992: United Nations Conference on Environment and Development. Rio de Janeiro (1998).

SUSSEX COUNTY COUNCIL. *Design standards for industrial roads*. 2006

SYSWERDA, Gilbert. *Simulated Crossover in Genetic Algorithms*. 1992. ISBN 1-55860-066-3.

SZALAY, A. Zöld-Zs. (abr. de 2007). "What is missing from the concept of the new European Building Directive" En: *Building and Environment* 42.4, págs.1761-1769. ISSN 0360-1323.

t

TABULA (jun. de 2010). *Use of Building Typologies for Energy Performance Assessment of National Building Stocks. Existent Experiences in European Countries and Common Approach. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*. ISBN 9783941140141.

TAGAMI T. y KAWABE T., Genetic Algorithm with a Pareto Partitioning Method for Multiobjective Flowshop Scheduling. Kagawa Junior College,

- Japan, University of Tsukuba, Japan (1998). ISBN 9781475751840
- TESTA P. y WEISER D., Emergent Structural Morphology, Architectural Design 72, no1. (2002).
- TFB (mar. de 2010). Split-incentives- a case for the third party- Resolving the landlord-tenant dilemma through energy services. Technology Foundation Berlin.
- THORMARK, C.(ago. de 2006). "The effect of material choice on the total energy need and recycling potential of a building". En Building and Environment 41.8, págs.1019 -1026. ISSN 0360-1323.
- TORRES E., GUTIÉRREZ M. y GÁLVEZ P. Algoritmo Genético (Micro AG) en Optimización de Carteras. VI Conferencia Internacional de Finanzas, Universidad de Santiago de Chile. (2006).
- TOSCAZO G., Optimización Multiobjetivo Usando un Micro Algoritmo Genético. Tesis de Maestría. Universidad Veracruzana LANIA, México. (2001).
- TRANSPORT RESEARCH BOARD (1987) Manual of geometric design standards for Canadian roads. Metric Version.Roads and Transportation Association of Canada. Ottawa. ISSN 02721716.
- TURING A., Morphogenesis, Netherlands, P.T. Saunders. (1992). ISBN 0444884866.
- TURKSON, R. YAN, F. et Al. 2015. Modeling and Multiobjective Optimization of Engine Performance and Hydrocarbon Emissions via the Use of a Computer Aided Engineering Code and the NSGA-II Genetic Algoritm. University of Technology. Wuhan. China.

u

- UIHLEIN, Andreas y EDER, Peter (jun. de 2010). "Policy options towards an energy efficient residential building stock in the EU-27 ". En: Energy and Buildings 42 .6, págs.791-798. ISSN 0378-7788.

UNDESA (dic.de 2010). Secretary-General's Report on Objectives and Themes of the United Nations Conference. United Nations Department of Economic and Social Affairs.

UNEP (2005). Life Cycle Approaches. The road from analysis to practice United Nations Environment Programme.

UNION DES PROFESSIONNELS SUISSES DE LA ROUTE - VSS (1985) Norme suisse. VSS. Zurich. ISBN 905234750.

United Nations (1972). United Nations Conference on the Human Environment.

URMILA M. Diwekar. *Introduction To Applied Optimization*. Kluwer Academic Publishers, 2003. ISBN-1402074565.

USEPA (mayo de 2006). Life Cycle Assessment: Principles and Practice U.S. Environmental Protection Agency.

UYGUNOGLU, Tayfun y KEÇEBAS, Ali (2011). "LCC analysis for energy-saving in residential buildings with different types of construction masonry blocks". En: *Energy and Buildings* 43.9, págs. 2077-2085. ISSN 0378-7788.



VALLES FUEYO, Manuel. La industria en Asturias: Entre la arqueología y la innovación. Asociación de Geógrafos Españoles, 1995. Los nuevos asentamientos industriales: El paisaje de los polígonos industriales, pp. 27-40. ISBN 84-605-2925-8.

VERA, Nelson y BALDASANO, José M. (sep. de 2005). Atlas climático de irradiación solar a partir de imágenes del satélite NOAA. Aplicación a la península ibérica. ISBN 8468949981.

VERBEECK, G. y HENS, H. (abr. de 2010). "Life cycle inventory of buildings: A calculation method". En: Building and Environment 45.4, págs.1037-1041. ISSN 0360-1323.

VICENTE-SERRANO, Sergio M. (feb. de 2006). "Spatial and temporal analysis of droughts in the Iberian Peninsula(1910 -2000)". En: Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques 51.1, págs.83-97. ISSN 0262-6667.

VIDAL MUT, Carlos; and ALAVEDRA RIBOT, Pere. Estudi de l'evolució dels polígons industrials a Catalunya: Definició del nou polígon industrial ideal sostenible. 2009.

W

WCED(1987). Our common future. The Brundtland report. World Commission on Environment and. Development. Oxford: Oxford University Press. ISBN 9780192820808.

WEC (2008). Energy Efficiency Policies around the World: Review and Evaluation.World Energy Council. ISBN 0946121303.

WEISE, Thomas. Global optimization algorithms - theory and application. PDF, Mayo 2009. ISBN 9783642234248.

WESTERN AUSTRALIAN LAND AUTHORITY. Pinjarra Industrial Estate. Design guidelines. 2008

WHITLEY D., RANA S. y HECKENDORN R. Representation Issues in Neighborhood Search and Evolutionary Algorithms. Genetic Algorithms and Evolution Strategies in Engineering and Computer Science. (1998). ISBN 9783642880940.

WHITLEY, Darrell. A genetic algorithm tutorial. PDF. Número OCLC 258344162.

WMO (2009). Report of the World Climate Conference-3. Better climate information for a better future. Geneva, Switzerland. ISBN 9789263110480.

WOLFRAM S., A New Kind of Science. Washington: EEUU. Wolfram Publisher. (2002). ISBN 9780713991161.

X

XIANGPING ZHANG, ANDRES H. STROMMAN, ET AL. 2008. Model Centered Approach an Design of an Eco-Industrial Park around an Oil Refinery. Environ.

XIAODONG,Li; ZHU, Yimin y ZHANG, Zihui (mar. de 2010). "An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes".Building and Environment. ISSN 0360-1323.

y

YEO, Dong Hun Y D. GABBAL, Rene (2011). "Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization". En: Energy and Buildings 43 .8 , págs. 2028 -2033 . ISSN 0378-7788.

Z

ZABALZA, Ignacio, ARANDA, Alfonso y SCARPELLINI, Sabina (dic. de 2009). "Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification". En: Building and Environment 44.12, págs. 2510-2520. ISSN 0360-1323.

ZARZA BULLEGERAS, Daniel. Actividades productivas y urbanismo: actas de las jornadas celebradas en Córdoba del 23 al 25 de octubre de 1994. Junta de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Transportes, 1997. De Polígonos a Parques Industriales: La recuperación urbanística de los tejidos para la actividad productiva, pp. 183-198. ISBN 84-8095-093-5.

ZBIGNIEW, Michalewicz. *Genetic algorithms + data structures = evolution programs (2nd, extended ed.)*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 1994. ISBN 9783540606765.

ZITZLER, Eckart. Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications. Pdf, Noviembre 1999. ISBN 9783826568312.

ZITZLER E, Kalyanmoy, THIELE, L. y COELLO COELLO, C, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Zurich, Springer, (2001). ISBN 9783540369707.

PAGINAS WEB

<http://unfccc.int/2860.php> [13-05-2010]

<http://www.ipcc.ch/> [13-05-2010]

<http://www.obitko.com/tutorials/genetic-algorithms/index.php> [07-05-2010]

<http://lancet.mit.edu/~mbwall/presentations/IntroToGAs/> [07-05-10]

<http://www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html> [07-05-10]

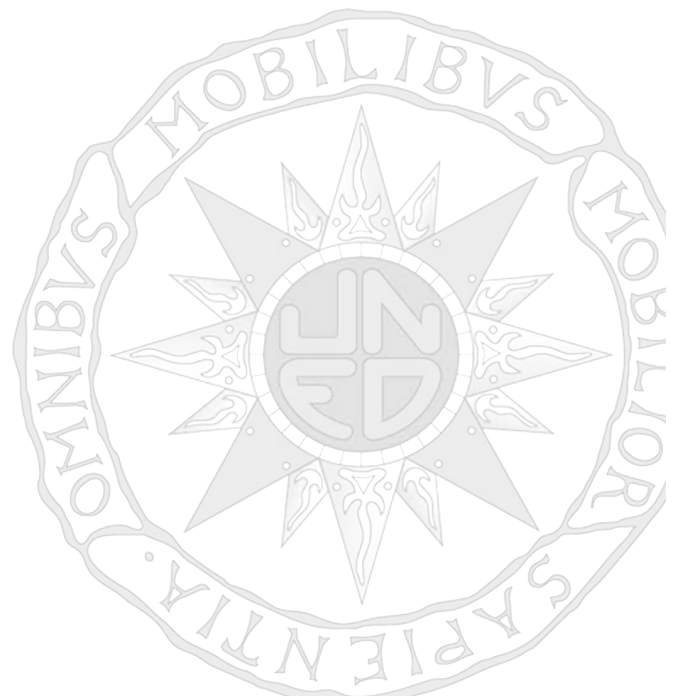
<http://www.genetic-programming.org/> [07-05-2010]

<http://www.aaschool.ac.uk/publications/ea/intro.html> [08-05-10]

<ftp://ftp.forum8.co.jp/forum8lib/pdf/VRsymposium/harvard-2-2.pdf> [08-05-10]

<http://projects.csail.mit.edu/emergentDesign/Genr8/> [07-05-10]
<http://www.armyofclerks.net/> [07-05-10]
http://www.inive.org/members_area/medias/pdf/Inive%5CIBPSA%5CUFS C558.pdf [14-05-2010]
http://www.lsi.upc.es/~iea/transpas/9_geneticos/sld002.htm [02-09-10]
<http://www.soton.ac.uk/~ajk/> [02-09-10]
http://www.elguille.info/colabora/2007/lafbegMSI_AlgoritmoGenetico.htm [02-09-10]
<http://www.laputan.org/metamorphosis/metamorphosis.html#Abstract> [02-09-10]
Algoritmos Genéticos como Estrategia de Diseño en Arquitectura
Carlos Ignacio de la Barrera Poblete
211
<http://hobbiton.thisside.net/genetic/> [02-09-10]
<http://kk.org/outofcontrol/> [02-09-10]
<http://jaga.sourceforge.net/> [02-09-10]
<http://www.fundacion.telefonica.com/at/delanda.html> [02-09-10]
<http://www.cddc.vt.edu/host/delanda/pages/algorithm.htm> [02-09-10]
<http://www.jweimar.de/ZAScriptmml/gliederung.html> [02-09-10]

ANEJOS



A ANEXO CODIFICACIÓN

ALELO DECIMAL	ALELO BINARIO	GEN		
		POSICION/ESPACIOS	FENOTIPO	CODIGO
1	00000001	1 4 LOCUS	SANEAMIENTO. TUBERÍAS	AA01
2	00000010			AA02
3	00000011			AA03
4	00000100			AA04
5	00000101			AA05
6	00000110			AA06
7	00000111			AA07
8	00001000			AA08
9	00001001			AA09
10	00001010			AA10
11	00001011			AA11
12	00001100	2 5 LOCUS	SANEAMIENTO. POZOS REG.	AB01
13	00001101			AB02
14	00001110			AB03
15	00001111			AB04
16	00010000			AB05
17	00010001			AB06
18	00010010	3 5 LOCUS	SANEAMIENTO.ARQUETAS	AC01
19	00010011			AC02
20	00010100			AC03
21	00010101			AC04
22	00010110			AC05
23	00010111			AC06
24	00011000			AC07
25	00011001	4 5 LOCUS	SANEAMIENTO.IMBORNALES	AD01
26	00011010			AD02
27	00011011			AD03
28	00011100			AD04
29	00011101			AD05
30	00011110			AD06
31	00011111			AD07
32	00100000	5 6 LOCUS	SANEAMIENTO. TAPAS	AE01
33	00100001			AE02
34	00100010	6 6 LOCUS	SANEAMIENTO. RELLENOS	AF01
35	00100011			AF02

36	00100100			AF03
37	00100101			AF04
38	00100110			AF05
39	00100111			AF06
40	00101000	7 6 LOCUS	AGUA. TUBERÍAS	BA01
41	00101001			BA02
42	00101010			BA03
43	00101011			BA04
44	00101100			BA05
45	00101101			BA06
46	00101110	8 6 LOCUS	AGUA. RELLENOS	BB01
47	00101111			BB02
48	00110000			BB03
49	00110001			BB04
50	00110010			BB05
51	00110011			BB06
52	00110100	9 6 LOCUS	RED INCENDIOS. TUBERÍAS	CA01
53	00110101			CA02
54	00110110			CA03
55	00110111			CA04
56	00111000			CA05
57	00111001	10 6 LOCUS	GAS. TUBERÍAS	DA01
58	00111010			DA02
59	00111011	11 6 LOCUS	TELECO. CANALIZ. Y ARQUET.	EA01
60	00111100			EA02
61	00111101			EA03
62	00111110			EA04
63	00111111	12 7 LOCUS	TELECO. CONDUCTORES	EB01
64	01000000			EB02
65	01000001			EB03
66	01000010			EB04
67	01000011			EB05
68	01000100			EB06
69	01000101			EB07
70	01000110	13 7 LOCUS	ELECTRICIDAD. CANALIZACIÓN	FA01
71	01000111			FA02
72	01001000			FA03
73	01001001			FA04
74	01001010	14 7 LOCUS	ELECTRICIDAD. CONDUCTORES	FB01
75	01001011			FB02
76	01001100			FB03
77	01001101			FB04
78	01001110			FB05
79	01001111			FB06
80	01010000			FB07

81	01010001			FB08
82	01010010			FB09
83	01010011			FB10
84	01010100			FB11
85	01010101	15 7 LOCUS	ALUMBRADO. SOPORTES	GA01
86	01010110			GA02
87	01010111			GA03
88	01011000			GA04
89	01011001			GA05
90	01011010			GA06
91	01011011			GA07
92	01011100			GA08
93	01011101	16 7 LOCUS	ALUMBRADO. LUMINARIA	GB01
94	01011110			GB02
95	01011111			GB03
96	01100000	17 7 LOCUS	ALUMBRADO. SISTEMA ILUM.	GC01
97	01100001			GC02
98	01100010			GC03
99	01100011			GC04
100	01100100			GC05
101	01100101	18 7 LOCUS	ACERAS. SUPERFICIE TRANSITO	HA01
102	01100110			HA02
103	01100111			HA03
104	01101000			HA04
105	01101001			HA05
106	01101010			HA06
107	01101011			HA06
108	01101100			HA07
109	01101101			HA08
110	01101110	19 7 LOCUS	ACERAS. BORDILLO	HB01
111	01101111			HB02
112	01110000			HB03
113	01110001	20 7 LOCUS	ACERAS. RIGOLA	HC01
114	01110010			HC02
115	01110011			HC03
116	01110100			HC04
117	01110101	21 7 LOCUS	BANDA APARCAMIENTO	IA01
118	01110110			IA02
119	01110111			IA03
120	01111000			IA04
121	01111001			IA05
122	01111010			IA06
123	01111011			IA07
124	01111100	22 8 LOCUS	CALZADA. EXPLANADA	JA01
125	01111101			JA02

126	01111110			JA03
127	01111111			JA04
128	10000000			JA05
129	10000001			JA06
130	10000010			JA07
131	10000011			JA08
132	10000100	23 8 LOCUS	CALZADA. BASE	KA01
133	10000101			KA02
134	10000110			KA03
135	10000111			KA04
136	10001000	24 8 LOCUS	CALZADA. FIRME, RODADURA	LA01
137	10001001			LA02
138	10001010			LA03
139	10001011			LA04
140	10001100			LA05
141	10001101			LA06
142	10001110			LA07
143	10001111			LA08
144	10010000			LA09
145	10010001			LA10
146	10010010			LA11
147	10010011			LA12
148	10010100			LA13
149	10010101			LA14
150	10010110	25 8 LOCUS	SEÑALIZACIÓN VERTICAL	MA01
151	10010111			MA02
152	10011000			MA03
153	10011001			MA04
154	10011010			MA05
155	10011011			MA06
156	10011100			MA07
157	10011101			MA08
158	10011110	26 8 LOCUS	SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL	NA01
159	10011111			NA02
160	10100000			NA03
161	10100001			NA04
162	10100010			NA05

B ANEXO CÓDIGO FUENTE

```

/*****\
***                                     ***
***          GENETIC ALGORITHM          ***
***                                     ***
***    Developed By : Prof. Kalyanmoy Deb ***
***    with assistance from his Students ***
***                                     ***
*** Last Edited : 06.10.2001           ***
*** .....                             ***

```

This is a GA implementation using binary and real coded variables. There is a sample input file (input) which can be used to run this code. Default values are suggested in the input file.

Code your objective function at the end of the code (in objective())

Variable boundaries can be fixed or flexible

Following selection operators are coded:

1. Tournament selection: Set MINM=1 for minimization and -1 for maximization
- 2 and 3. Roulette wheel or Stochastic remainder RW selection:

Only maximization is allowed (ENSURE MINM = -1 and the obj. func. is to be maximized). For minimizing f(x) use the following objective function for maximization:

$$\text{Fitness} = 1.0/(1.0+f(x))$$

Following crossover operators are allowed:

Binary coded GAs : single-point crossover

Real-coded GAs: SBX-eta or BLX-0.5

1. All variables upto a site are crossed and rest swapped
2. 50% variables are swapped at random (preferred)
3. Crossover is performed on a line

Mutation: bit-wise for Binary coded GAs and polynomial mutation (with eta) for Real coded GAs

Constraints are handled using simple penalty function approach

Fitness sharing in parameter space is also allowed (Stochastic rem RW is default selection operator)

The execution creates a file 'realga.out' for inspection.

Send Comments to De. K. Deb (deb@iitk.ac.in)

```

/*****/

```

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
#define BITS_PER_BYTE 8
#define UINTSIZE (BITS_PER_BYTE*sizeof(unsigned))
#define INFINITY 1e7
#define EPSILON 1e-6
#define PI 3.1415927
#define MAXVECSIZE 30
#define MAXPOPSIZE 1000
#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define BLX 0
#define SBX 1
#define ONESITE 1
#define UNIF 2
#define ONLINE 3
#define square(x) ((x)*(x))

```

```

/***** Current Objective Function *****/
#define prob1 /* define your problem at the end in objfunc() */
/*=====

```

TYPE DEFINITIONS :
=====*/

```
struct indiv
{
    float x[MAXVECSIZE]; /* variables */
    float obj; /* objective fn. value */
    float mod_obj; /* modified objective */
    unsigned *chrom; /* chromosome string */
    int parent1;
    int parent2; /* s.no. of parents */
    float cross_var; /* cross over variable */
};
```

```
typedef struct indiv INDIVIDUAL ;
typedef INDIVIDUAL *POPULATION ; /* array of individuals */
/*=====
```

FUNCTION PROTOTYPES :
=====*/

```
float objective();
float degraded_value();
float randomperc();
float get_beta();
float get_delta();
double noise();
float mdreal();
/*=====
```

GLOBAL VARIABLES :
=====*/

```
int pop_size, /* Population Size */
gen_no, /* Current generation number */
max_gen, /* Maximum no. of generations */
no_xover, /* No. of cross overs done */
no_mutation, /* No. of mutations done */
best_ever_gen, /* Generation no. of best ever indiv. */
num_var, /* Number of total design variables */
num_discr_var, /* Number of discrete variables */
lchrom, /* Length of chromosome */
chromsize, /* Number of bytes needed to store
lchrom strings */
cross_type, /* Cross over type ( SBX / BLX ) */
x_strategy,s_strategy, /* Cross-over strategy UNIF,ONLINE etc. */
maxrun, /* Maxm no. of GA runs for each set of
parameter values */
run, /* Actual run no. */
SHARING, /* Flag for Sharing ( True / False ) */
REPORT, /* Flag for Full reports (True/False) */
RIGID, /* Flag for rigid boundaries (T/F) */
BINGA, /* Flag for binary GA (T/F) */
REALGA, /* Flag for real-GA (T/F) */
READFILE, /* Flag for reading input from file */
tourneylist[MAXPOPSIZE], /* List of indices of individuals for
tournament selection routine */
tourneypos, /* Current position of tournament */
tourneysize, /* Tournament size ( = 2 for binary ) */
MINM;
float seed, /* Random seed number */
basic_seed, /* Basic seed number */
n_distribution_c, n_distribution_m,
p_xover, /* Cross over probability */
p_mutation, /* Mutation probability */
sum_obj, /* Sum of objective fn. values */
avg_obj, /* Average of objective fn. values */
max_obj, /* Maximum objective fn. value */
min_obj, /* Minimum objective fn. value */
minx[MAXVECSIZE], /* Minimum and maximum values of design */
```

```

    maxx[MAXVECSIZE], /* variables in a population */
    x_lower[MAXVECSIZE], /* Lower and Upper bounds on each */
    x_upper[MAXVECSIZE], /* design variable */
    sigma_share; /* Sharing distance */

POPULATION oldpop, newpop; /* Old and New populations */
INDIVIDUAL best_ever; /* Best fit individual till current gen.*/
/*****
SUBROUTINE FOR INPUTTING GLOBAL PARAMETERS :
*****/
input_parameters()
{
    int k;
    char ans;
    printf(" ");
    puts(".....");
    printf(" ");
    puts("..... REAL-CODED GENETIC ALGORITHM .....");
    printf(" ");
    puts("..... ===== :");
    printf(" ");
    puts("..... (c) R.B.Agrawal and K.Deb, 1995; .....");
    printf(" ");
    puts("..... All rights reserved. ....");
    printf(" ");
    puts(".....");

    printf("\n ARE YOU READING IT THROUGH A COMMENTED FILE (y/n) ?");
    do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='\n');
    if (ans == 'y') READFILE = TRUE;
    else READFILE = FALSE;

    if (READFILE) printf("\n Reading data from file .....");
    if (!READFILE) printf("\nHow many generations ? ----- : ");
    ignore_comment();
    scanf("%d",&max_gen);
    if (!READFILE) printf("\nPopulation Size ? ----- : ");
    ignore_comment();
    scanf("%d", &pop_size );
    if (pop_size > MAXPOPSIZE)
    {
        printf("\n Increase the value of MAXPOPSIZE in program");
        printf(" and re-run the program");
        exit(-1);
    }

    if (!READFILE) printf("\nCross Over Probability ? ( 0 to 1 ) : ");
    ignore_comment();
    scanf("%f",&p_xover);
    if (!READFILE) printf("\nMutation Probability ? ( 0 to 1 ) -- : ");
    ignore_comment();
    scanf("%f",&p_mutation);
    if (!READFILE)
        printf("\nNumber of variables (Maximum %d) ---- : ",MAXVECSIZE);
    ignore_comment();
    scanf("%d",&num_var);
    BINGA = REALGA = FALSE;
    if (!READFILE) printf("\n Binary or Real-coded parameters? (b for binary, r for real-coded) ");
    ignore_comment();
    do { ans = getchar(); } while (ans!= 'b' && ans !='r');
    if (ans == 'b') BINGA = TRUE;
    else REALGA = TRUE;
    if (BINGA) num_discr_var = num_var;
    ignore_comment();
    for (k=0; k<= num_var-1; k++)
    {

```



```

    if (!READFILE) printf("\nLower and Upper bounds of x[%d] ----- : ",k+1);
    scanf("%f %f",&x_lower[k],&x_upper[k]);
}

if (REALGA) {
    if (!READFILE) printf("\n Are these bounds rigid ? (y/n)");
    ignore_comment();
    do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='n');
    if (ans == 'y') RIGID = TRUE;
    else RIGID = FALSE;
} else {
    if (READFILE) {
        ignore_comment();
        ans = getchar();
        RIGID = TRUE;
    }
}
if (BINGA)
{
    if (!READFILE) printf("\n Total string length (each variable has equal string length)?");
    ignore_comment();
    scanf("%d",&lchrom);
}
else
if (READFILE) {
    ignore_comment();
    scanf("%d",&lchrom);
    lchrom=0;
}

if (!READFILE) printf("\nSharing to be done ? (y/n) ----- :");
ignore_comment();
do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='n');
if (ans == 'y')
{ SHARING = TRUE;
    if (!READFILE) printf("\nSigma share value ? ----- :");
    scanf("%f",&sigma_share);
}

else SHARING = FALSE;
if (!READFILE) printf ("\n Reports to be printed ? (y/n) ");
ignore_comment();
do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='n');
if (ans == 'y') REPORT = TRUE;
else REPORT = FALSE;
if (!READFILE) printf("\n How many runs ?");
ignore_comment();
scanf("%d",&maxrun);
if (!READFILE)

{
    printf("\n Enter selection operator --> ");
    printf("\n 1 : Tournament selection (min or max set by MINM in the code)");
    printf("\n 2 : Roulette wheel selection (always max)");
    printf("\n 3 : Stochastic remainder roulette wheel selection (always max)");
    printf("\n Give your choice :");
}

ignore_comment();
scanf("%d",&s_strategy);
if (s_strategy == 1) {
    if (!READFILE) printf("\n Enter tournament size ");
    ignore_comment();
    scanf("%d", &tourneysize);
} else

```

```

if (READFILE) {
    ignore_comment();
    scanf("%d",&tourneysize);
    tourneysize=0;
}
if (SHARING) s_strategy = 3; /* Stoch. Rem. RW is default */
printf("TTTTT %d \n",tourneysize);
if (REALGA)
{
    if (!READFILE)
    {
        printf("\n Give the strategy for X-over");
        printf("\n 1 : Polynomial distribution in one variable");
        printf("\n 2 : Polynomial distribution in all variables");
        printf("\n 3 : Polynomial distribution on a straight line");
        printf("\n Give your choice :");
    }
    ignore_comment();
    scanf("%d",&x_strategy);

    if (!READFILE) printf("\n Type of cross over ? ( s for SBX, b for BLX) ");
    ignore_comment();
    do { ans = getchar(); } while (ans!= 's' && ans !='b');
    if (ans == 's') cross_type = SBX;
    else cross_type = BLX;
    if (cross_type == SBX)
    {
        if (!READFILE) printf("\n Give eta for SBX and mutation?");
        ignore_comment();
        scanf("%f %f",&n_distribution_c,&n_distribution_m);
    }
}
else {
    ignore_comment();
    scanf("%d",&x_strategy);
    x_strategy = 1; /* binary crossover */
    ignore_comment();
    ans = getchar();
    ignore_comment();
    scanf("%f %f",&n_distribution_c,&n_distribution_m);
    n_distribution_c = 0; n_distribution_m = 0;
}
if (!READFILE) printf("\n Give random seed (0 to 1.0)");
ignore_comment();
scanf("%f",&basic_seed);
input_app_parameters();
}
/*=====
Ignores the comment from input ( ended by a ':')
=====*/
ignore_comment()
{
    if (READFILE == FALSE) return;
    do
    {
        while (getchar() != ':');
    }
}
/*=====
Initialises zero'th generation and global parameters
=====*/
initialize()
{
    float u;
    int k,k1,i,j,j1,stop;
    double temp[MAXVECSIZE],coef;
    unsigned mask=1,nbytes;

```

```

randomize();
app_initialize();
oldpop = (INDIVIDUAL *)malloc(pop_size*sizeof(INDIVIDUAL));
newpop = (INDIVIDUAL *)malloc(pop_size*sizeof(INDIVIDUAL));
if (oldpop == NULL) nomemory("oldpop in initialize()");
if (newpop == NULL) nomemory("newpop in initialize()");
chromsize = (lchrom/UINITSIZE);
if(lchrom%UINITSIZE) chromsize++;
nbytes = chromsize*sizeof(unsigned);
for(j = 0; j < pop_size; j++)
{
    if((oldpop[j].chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory("oldpop chromosomes");
    if((newpop[j].chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory("newpop chromosomes");
}
if((best_ever.chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
    nomemory("best_ever chromosomes");
for (k=0; k<= pop_size-1; k++)
{
    oldpop[k].parent1 = oldpop[k].parent2 = 0;
    for (j=num_discr_var; j<=num_var-1; j++)
    {
        u = randomperc();

        oldpop[k].x[j] = x_lower[j] * (1-u) + x_upper[j] * u;
    }
    for(k1 = 0; k1 < chromsize; k1++)
    {
        oldpop[k].chrom[k1] = 0;
        if(k1 == (chromsize-1))
            stop = lchrom - (k1*UINITSIZE);
        else
            stop = UINITSIZE;
        /* A fair coin toss */
        for(j1 = 1; j1 <= stop; j1++)
        {
            if(flip(0.5))
                oldpop[k].chrom[k1] = oldpop[k].chrom[k1]mask;
            if (j1 != stop) oldpop[k].chrom[k1] = oldpop[k].chrom[k1]<<1;
        }
    }
}
no_xover = no_mutation = 0;
copy_individual(&oldpop[0],&best_ever);
decode_string(&best_ever);
best_ever.obj = objective(best_ever.x);
}
/*=====
Decodes the string of the individual (if any) and puts the values in
the array of floats.
=====*/
decode_string(ptr_indiv)
INDIVIDUAL *ptr_indiv;
{
    double *temp,coef;
    int j;
    if (ptr_indiv == NULL) error_ptr_null("ptr_indiv in decode_string");
    if (BINGA)
    {
        temp = (double *) malloc(num_discr_var * sizeof(double));
        for(j=0; j<=num_discr_var - 1; j++) temp[j] = 0.0;
        decodevalue(ptr_indiv->chrom,temp);
        coef = pow(2.0,(double)(lchrom/num_discr_var)) - 1.0;
    }
}

```

```

    for(j=0; j<=num_discr_var - 1; j++)
    {
        temp[j] = temp[j]/coef;
        ptr_indiv->x[j] = temp[j]*x_upper[j] + (1.0 - temp[j])*x_lower[j];
    }
    free(temp);
}
}
/*=====
Prints an error message and terminates the program
=====*/
nomemory(string)
char *string;
{
    printf("\nmalloc: out of memory making %s!\n",string);
    printf("\n Program is halting .....");
    exit(-1);
}
/*=====
Gives error message of null pointer and terminates the program.
=====*/
error_ptr_null(string)
char *string;
{
    printf("\n Error !! Pointer %s found Null !",string);
    printf("\n Program is halting .....");
    exit(-1);
}
/*=====
Copys contents of one individual into another.
=====*/
copy_individual(indiv1,indiv2)
INDIVIDUAL *indiv1, *indiv2;
{
    int k;
    if (indiv1==NULL) error_ptr_null("indiv1 in copy_individual");
    if (indiv2==NULL) error_ptr_null("indiv2 in copy_individual");
    for (k=0; k<= MAXVECSIZE-1; k++)
        indiv2->x[k] = indiv1->x[k];
    indiv2->mod_obj = indiv1->mod_obj;
    indiv2->obj = indiv1->obj;
    indiv2->parent1 = indiv1->parent1;
    indiv2->parent2 = indiv1->parent2;
    indiv2->cross_var = indiv1->cross_var;
    for (k=0; k<= chromsize; k++)
        indiv2->chrom[k] = indiv1->chrom[k];
}
/*=====
Calculates statistics of current generation :
=====*/
statistics(gen)
int gen;
{
    INDIVIDUAL current_best;
    int k,j;
    float f;
    double pow(),bitpow,coef,temp[MAXVECSIZE];
    for (k=0; k<=pop_size-1; k++)
    {
        decode_string(&oldpop[k]);
        oldpop[k].obj = objective(oldpop[k].x);

        if (SHARING)
            oldpop[k].mod_obj = degraded_value(oldpop[k].obj,oldpop[k].x,oldpop);
        else oldpop[k].mod_obj = oldpop[k].obj;
    }
}

```

```

if ( gen == 0)
{
    if (SHARING)
        best_ever.mod_obj = degraded_value(best_ever.obj,best_ever.x,oldpop);
    else best_ever.mod_obj = best_ever.obj;
}
current_best = oldpop[0];
sum_obj = avg_obj = oldpop[0].obj;
max_obj = min_obj = oldpop[0].obj;
for (k=0; k<= num_var-1; k++) maxx[k] = minx[k] = oldpop[0].x[k];
for(k=1; k<= pop_size-1; k++)
{
    if(MINM * current_best.obj > MINM * oldpop[k].obj)
        current_best = oldpop[k];
    if(MINM * max_obj < MINM * oldpop[k].obj)
        max_obj = oldpop[k].obj;
    if(MINM * min_obj > MINM * oldpop[k].obj)
        min_obj = oldpop[k].obj;
    sum_obj += oldpop[k].obj;
    for (j=0; j<= num_var-1; j++)
    {
        if (MINM * maxx[j] < MINM * oldpop[k].x[j]) maxx[j] = oldpop[k].x[j];
        if (MINM * minx[j] > MINM * oldpop[k].x[j]) minx[j] = oldpop[k].x[j];
    }
};
avg_obj = sum_obj/pop_size;
if (MINM * current_best.obj < MINM * best_ever.obj)
{ copy_individual(&current_best, &best_ever);
  best_ever_gen = gen;
}
app_statistics();
}
/*=====
Decodes the value of a group of binary strings and puts the decoded
values into an array 'value'.
=====*/
decodevalue(chrom,value)
unsigned *chrom;
double value[];
{
    int k,j,stop,tp,bitpos,mask=1,position,bits_per_var;
    double pow(), bitpow;
    if (BINGA == FALSE) return;
    if (chrom == NULL) error_ptr_null("chrom in decodevalue");
    bits_per_var = lchrom/num_discr_var;
    for(k = 0; k < chromsize; k++)
    {
        if(k == (chromsize-1))
            stop = lchrom-(k*UINTSIZE);
        else
            stop = UINTSIZE;
        /* loop thru bits in current byte */
        tp = chrom[k];
        for(j = 0; j < stop; j++) {
            bitpos = j + UINTSIZE*k;
            /* test for current bit 0 or 1 */
            if((tp&mask) == 1) {
                position = bitpos / bits_per_var;
                bitpos -= position * bits_per_var;
                bitpow = pow(2.0,(double)(bits_per_var- bitpos-1));
                value[position] += bitpow;
            }
            tp = tp>>1;
        }
    }
}
}

```

```

/*=====
DEGRADED VALUE (DUE TO SHARING) OF ACUTAL OBJECTIVE FUNCTION VALUE :
=====*/
float degraded_value(f,x,pop)
float f, x[];
POPULATION pop;
{
    int k,j;
    float summation,dist,dist_sq;
    if (pop == NULL) error_ptr_null("pop in degraded_value");
    if (x ==NULL) error_ptr_null("x in degraded_value");
    summation = 0;
    for (k=0; k<= pop_size-1; k++)
    {
        dist_sq = 0;
        for (j=0; j<= num_var-1; j++)
            dist_sq += (x[j] - pop[k].x[j]) * (x[j] - pop[k].x[j]) ;
        dist = sqrt(dist_sq);
        if (dist <= sigma_share) summation += 1.0 - dist/sigma_share;
    }
    if (summation < 1.0) summation = 1.0;
    return (f/summation);
}
/*=====
GENERATION OF NEW POPULATION through SELECTION, XOVER & MUTATION :
=====*/
generate_new_pop()
{
    int k,mate1,mate2;
    app_computation();
    switch (s_strategy)
    {
        case 1 : preselect_tour(); break;
        case 2 : preselect_rw(); break;
        case 3 : preselect_sr(); break;
    }
    for (k=0; k<= pop_size-1; k +=2)
    {
        switch (s_strategy)
        {
            case 1 : mate1 = tour_select(); mate2 = tour_select(); break;
            case 2 : mate1 = rw_select(); mate2 = rw_select(); break;
            case 3 : mate1 = sr_select(); mate2 = sr_select(); break;
        }
        switch( x_strategy)
        {
            case ONESITE : cross_over_1_site(mate1,mate2,k,k+1); break;
            case UNIF : cross_over_unif(mate1,mate2,k,k+1); break;
            case ONLINE: cross_over_line(mate1,mate2,k,k+1); break;
        }
        mutation(&newpop[k]);
        mutation(&newpop[k+1]);
        newpop[k].parent1 = newpop[k+1].parent1 = mate1+1;
        newpop[k].parent2 = newpop[k+1].parent2 = mate2+1;
    }
}
/*=====
Binary cross over routine.
=====*/
binary_xover (parent1, parent2, child1, child2)
unsigned *parent1, *parent2, *child1, *child2;
/* Cross 2 parent strings, place in 2 child strings */
{
    int j, jcross, k;
    unsigned mask, temp;

```

```

if (BINGA == FALSE) return;
if (parent1 == NULL) error_ptr_null("parent1 in binary_xover");
if (parent2 == NULL) error_ptr_null("parent2 in binary_xover");
if (child1 == NULL) error_ptr_null("child1 in binary_xover");
if (child2 == NULL) error_ptr_null("child2 in binary_xover");

jcross = rd(1, (lchrom - 1)); /* Cross between 1 and l-1 */
for(k = 1; k <= chromsize; k++)
{
    if(jcross >= (k*UINTSIZE))
    {
        child1[k-1] = parent1[k-1];
        child2[k-1] = parent2[k-1];
    }
    else if((jcross < (k*UINTSIZE)) && (jcross > ((k-1)*UINTSIZE)))
    {
        mask = 1;
        for(j = 1; j <= (jcross-1-((k-1)*UINTSIZE)); j++)
        {
            temp = 1;
            mask = mask<<1;
            mask = mask|temp;
        }
        child1[k-1] = (parent1[k-1]&mask)|(parent2[k-1]&(~mask));
        child2[k-1] = (parent1[k-1]&(~mask))|(parent2[k-1]&mask);
    }
    else
    {
        child1[k-1] = parent2[k-1];
        child2[k-1] = parent1[k-1];
    }
}
}
}
/*=====
Creates two children from parents p1 and p2, stores them in addresses
pointed by c1 and c2. low and high are the limits for x values and
rand_var is the random variable used to create children points.
=====*/

create_children(p1,p2,c1,c2,low,high,rand_var)
float p1,p2,*c1,*c2,low,high,*rand_var;
{
    float difference,x_mean,beta;
    float u,distance,umax,temp,alpha;
    int flag;
    if (c1 == NULL) error_ptr_null("c1 in create_children");
    if (c2 == NULL) error_ptr_null("c2 in create_children");
    if (rand_var == NULL) error_ptr_null("rand_var in create_children");
    flag = 0;
    if ( p1 > p2) { temp = p1; p1 = p2; p2 = temp; flag = 1; }
    x_mean = ( p1 + p2) * 0.5;
    difference = p2 - p1;
    if ( (p1-low) < (high-p2) ) distance = p1-low;
    else distance = high-p2;
    if (distance < 0.0) distance = 0.0;
    if (RIGID && (difference > EPSILON))
    {
        alpha = 1.0 + (2.0*distance/difference);
        umax = 1.0 - (0.5 / pow((double)alpha,(double)(n_distribution_c+1.0)));
        *rand_var = umax * randomperc();
    }
    else *rand_var = randomperc();
    beta = get_beta(*rand_var);
    if (fabs(difference*beta) > INFINITY) beta = INFINITY/difference;
    *c2 = x_mean + beta * 0.5 * difference;
}

```

```

*c1 = x_mean - beta * 0.5 * difference;
if (flag == 1) { temp = *c1; *c1 = *c2; *c2 = temp; }
}
/*=====
cross over using strategy of 1 cross site with swapping .
A random variable is chosen and crossed over. The variables on left
side are passed as it is and those on right are swapped between the
two parents.
=====*/
cross_over_1_site(first,second,childno1,childno2)
int first,second,childno1,childno2;
{
    int k,site;
    float u;
    if (flip(p_xover)) /* Cross over has to be done */
    {
        no_xover++;
        if (BINGA)
            binary_xover(oldpop[first].chrom,oldpop[second].chrom,
                newpop[childno1].chrom,newpop[childno2].chrom);
        if ( REALGA )
        {
            site = rnd(num_discr_var,num_var-1);
            for (k=0; k<=site-1; k++)
            {
                newpop[childno1].x[k] = oldpop[first].x[k];
                newpop[childno2].x[k] = oldpop[second].x[k];
            }
            for (k=site+1; k<=num_var-1; k++)
            {
                newpop[childno2].x[k] = oldpop[first].x[k];
                newpop[childno1].x[k] = oldpop[second].x[k];
            }
            create_children(oldpop[first].x[site],oldpop[second].x[site],
                &(newpop[childno1].x[site]),&(newpop[childno2].x[site]),
                x_lower[site],x_upper[site],&u);
            newpop[childno1].cross_var = newpop[childno2].cross_var = u;
        }
    }
    /* Cross over done */
    else /* Passing x-values straight */
    {
        if (BINGA)
            for (k=0; k<=chromsize; k++)
            {
                newpop[childno1].chrom[k] = oldpop[first].chrom[k];
                newpop[childno2].chrom[k] = oldpop[second].chrom[k];
            }
        for (k=0; k<=num_var-1; k++)
        {
            newpop[childno1].x[k] = oldpop[first].x[k];
            newpop[childno2].x[k] = oldpop[second].x[k];
        }
    }
}
/*=====
CROSS - OVER USING strategy of uniform 50% variables
For one variable problem, it is crossed over as usual.
For multivariables, each variable is crossed over with a probability
of 50 % , each time generating a new random beta.
=====*/
cross_over_unif(first,second,childno1,childno2)
int first,second,childno1,childno2;
{
    float difference,x_mean,beta;
    float u = 0.0;
    int site,k;

```



```

if (flip(p_xover)) /* Cross over has to be done */
{
no_xover++;
if (BINGA)
binary_xover(oldpop[first].chrom,oldpop[second].chrom,
newpop[childno1].chrom,newpop[childno2].chrom);
if (REALGA)
{
for (site = num_discr_var; site<=num_var-1; site++)
{
if(flip(0.5) || (num_var==1))
{
create_children(oldpop[first].x[site],oldpop[second].x[site],
&(newpop[childno1].x[site]),&(newpop[childno2].x[site]),
x_lower[site],x_upper[site],&u);
}
else
{
newpop[childno1].x[site] = oldpop[first].x[site];
newpop[childno2].x[site] = oldpop[second].x[site];
}
/* for loop */
newpop[childno1].cross_var = newpop[childno2].cross_var = u;
} /* if REALGA */
} /* Cross over done */
else /* Passing x-values straight */
{
if (BINGA)
for (k=0; k<=chromsize; k++)
{
newpop[childno1].chrom[k] = oldpop[first].chrom[k];
newpop[childno2].chrom[k] = oldpop[second].chrom[k];
}
for (site=0; site<=num_var-1; site++)
{
newpop[childno1].x[site] = oldpop[first].x[site];
newpop[childno2].x[site] = oldpop[second].x[site];
}
}
}
}
/*=====
CROSS - OVER strategy ON A STRAIGHT LINE
A random beta is generated and used to decide all the design
variables for children. The effect is that offsprings are generated
on a straight line joining the parents.
=====*/
cross_over_line(first,second,childno1,childno2)
int first,second,childno1,childno2;
{
float difference,x_mean,beta;
float u,distance,dist1,dist2,alpha,min_alpha,umax;
float p1,p2,temp;
int site,k;
if (flip(p_xover)) /* Cross over has to be done */
{
if (RIGID)
{
min_alpha = INFINITY;
for (site=0; site <= num_var-1; site++)
{
p1 = oldpop[first].x[site];
p2 = oldpop[second].x[site];
if ( p1 > p2) { temp = p1; p1 = p2; p2 = temp; }
difference = p2 -p1;
}
}
}
}

```

```

    dist1 = p1 - x_lower[site] ;
    dist2 = x_upper[site] - p2;
    if (dist1 < dist2) distance = dist1; else distance = dist2;
    if (distance < 0.0) distance = 0.0;
    if (difference > EPSILON)
    {
        alpha = 1.0 + (2.0*distance/difference);
        if (min_alpha > alpha) min_alpha = alpha;
    }
}
if ( min_alpha < 0.0) min_alpha = 0.0;
umax = 1.0- (0.5/pow((double)min_alpha,(double)(n_distribution_c+1.0)));
u = umax * randomperc();
}
else u = randomperc();
beta = get_beta(u);
no_xover++;
if (BINGA)
binary_xover(oldpop[first].chrom,oldpop[second].chrom,
newpop[childno1].chrom,newpop[childno2].chrom);
newpop[childno1].cross_var = newpop[childno2].cross_var = u;

if (REALGA)
{
    for (site = 0; site<=num_var-1; site++)
    {
        x_mean = (oldpop[first].x[site] + oldpop[second].x[site]) * 0.5;
        difference = oldpop[second].x[site] - oldpop[first].x[site];
        if (fabs(difference*beta) > INFINITY) beta = INFINITY/difference;
        newpop[childno1].x[site] = x_mean + beta * 0.5 * difference;
        newpop[childno2].x[site] = x_mean - beta * 0.5 * difference;
    }
    /* for loop */
}
/* if REALGA*/
}
/* Cross over done */

else /* Passing x-values straight */
{
    if (BINGA)
    for (k=0; k<=chromsize; k++)
    {
        newpop[childno1].chrom[k] = oldpop[first].chrom[k];
        newpop[childno2].chrom[k] = oldpop[second].chrom[k];
    }
    for (site=0; site<=num_var-1; site++)
    {
        newpop[childno1].x[site] = oldpop[first].x[site];
        newpop[childno2].x[site] = oldpop[second].x[site];
    }
}
}
}
/*=====
Calculates beta value for given random number u (from 0 to 1)
If input random numbers (u) are uniformly distributed for a set of
inputs, this results in uniform distribution of beta values in case
of BLX , and Binary Probability distribution simulation in case of
SBX.
=====*/
float get_beta(u)
float u;
{
    float beta;
    if (cross_type == BLX) return(2.0*u);
    if (1.0-u < EPSILON ) u = 1.0 - EPSILON;
    if ( u < 0.0) u = 0.0;
    if (u < 0.5) beta = pow(2.0*u,(1.0/(n_distribution_c+1.0)));
    else beta = pow( (0.5/(1.0-u)),(1.0/(n_distribution_c+1.0)));
}

```

```

return beta;
}
/*=====
For given u value such that -1 <= u <= 1, this routine returns a
value of delta from -1 to 1. Exact value of delta depends on specified
n_distribution. This is called by mutation().
=====*/
float get_delta(u)
float u;
{
float delta;
int negative = FALSE; /* Flag for negativeness of delta */
if (cross_type == BLX) return(u);
if(u <= -1.0) u = -1.0;
if(u >1.0) u = 1.0;
if(u < 0.0) { u = -u;
negative = TRUE;
}
delta = 1.0 - pow((1.0 - u),(1.0 / (n_distribution_m + 1.0)));
if(negative) return (-delta);
else return delta;
}
/*=====
Binary mutation routine ( borrowed from sga.c )
=====*/
binmutation(child)
unsigned *child;
/* Mutate an allele w/ pmutation, count # of mutations */
{
int j, k, stop;
unsigned mask, temp = 1;

if (BINGA == FALSE) return;
if (child== NULL) error_ptr_null(" child in binmutation");
for(k = 0; k < chromsize; k++)
{
mask = 0;
if(k == (chromsize-1))
stop = lchrom - ((k-1)*UINTSIZE);
else
stop = UINTSIZE;
for(j = 0; j < stop; j++)
{
if(flip(p_mutation))
{
mask = mask|(temp<<j);
}
}
child[k] = child[k]^mask;
}
}
/*=====
Mutation Using polynomial probability distribution. Picks up a random
site and generates a random number u between -1 to 1, ( or between
minu to maxu in case of rigid boudaries) and calls the routine
get_delta() to calculate the actual shift of the value.
=====*/
mutation(indiv)
INDIVIDUAL *indiv;
{
float distance1,distance2,x,delta,minu,maxu,u;
int k, site;
if (indiv == NULL) error_ptr_null("indiv in mutation");
if(flip (p_mutation) && REALGA)
{
site = rnd(num_discr_var,num_var - 1);

```

```

no_mutation++;
if(fabs(x_upper[site]-x_lower[site]) < EPSILON) return;
/* calculation of bounds on delta */
if(RIGID)
{ x = indiv->x[site];
  distance1 = x - x_lower[site];
  distance2 = x_upper[site] - x;
  delta = 2.0 * distance1 / (x_upper[site] - x_lower[site]);
  if (delta > 1.0) delta = 1.0;
  minu = -1.0 + pow((1.0 - delta),(n_distribution_m + 1.0));
  delta = 2.0 * distance2 / (x_upper[site] - x_lower[site]);
  if (delta > 1.0) delta = 1.0;
  maxu = 1.0 - pow((1.0 - delta),(n_distribution_m + 1.0));
  u = rndreal(minu,maxu);
}
else u = rndreal(-1.0,1.0);
/* calculation of actual delta value */
delta = get_delta(u) * 0.5 * (x_upper[site] - x_lower[site]);
indiv->x[site] += delta;
} /* if flip() */
if (BINGA) binmutation(indiv->chrom);
}
/*=====
Reporting the user-specified parameters :
fp is the file pointer to output file.
=====*/
initreport(fp)
FILE *fp;
{
  int k;
  if (fp == NULL) error_ptr_null(" File fp in initreport");
  fprintf(fp, "\n\n=====");
  fprintf(fp, "\n      INITIAL REPORT      ");
  fprintf(fp, "\n=====");
  if (BINGA) fprintf(fp, "\n BINARY-CODED GA ");
  if (REALGA)
  {
    if (cross_type == SBX) fprintf(fp, "\n REAL-CODED GA (SBX)");
    else fprintf(fp, "\n REAL-CODED GA (BLX)");
  }
  switch (s_strategy)
  {
    case 1 : fprintf(fp, "\n Tournament Selection Used (Size = %d)", tourneysize); break;
    case 2 : fprintf(fp, "\n Roulette Wheel Selection Used"); break;
    case 3 : fprintf(fp, "\n Stochastic Remainder RW Selection Used"); break;
  }
  switch (x_strategy)
  {
    case ONESITE : fprintf(fp, "\n Crossover Strategy : 1 xsite with swapping"); break;
    case UNIF : fprintf(fp, "\n Crossover Strategy : Uniformly all variables 50 \% ");
               break;
    case ONLINE : fprintf(fp, "\n Crossover Strategy : On a straight line"); break;
    default : fprintf(fp, "\n CROSSOVER NOT SET CORRECTLY "); break;
  }
  if (BINGA)
    fprintf(fp, "\n Mutation Strategy: Bit-wise Mutation");
  else
    fprintf(fp, "\n Mutation Strategy: Polynomial Mutation");
  fprintf(fp, "\n Variable Boundaries : ");
  if (RIGID) fprintf(fp, " Rigid");
  else fprintf(fp, " Flexible");
  fprintf(fp, "\n Population size      : %d", pop_size);
  fprintf(fp, "\n Total no. of generations : %d", max_gen);
  fprintf(fp, "\n Cross over probability   : %6.4f", p_xover);
  fprintf(fp, "\n Mutation probability    : %6.4f", p_mutation);
  if (SHARING)
  {

```

```

    fprintf(fp, "\n Sharing to be done :");
    fprintf(fp, "\n Sigma-share value      : %6.4f", sigma_share);
}
if (BINGA)
    fprintf(fp, "\n String length          : %d", lchrom);
fprintf(fp, "\n Number of variables      : %d", num_var);
fprintf(fp, "\n Total Runs to be performed : %d", maxrun);
if ((REALGA) && (cross_type == SBX)) {
    fprintf(fp, "\n Exponent (n for SBX)      : %7.2f", n_distribution_c);
    fprintf(fp, "\n Exponent (n for Mutation) : %7.2f", n_distribution_m);
}
if (s_strategy == 1)
    fprintf(fp, "\n Lower and Upper bounds   :");
for (k=0; k<=num_var-1; k++)
    fprintf(fp, "\n %8.4f <= x%d <= %8.4f", x_lower[k], k+1, x_upper[k]);
fprintf(fp, "\n===== \n");
app_initreport();
}
/*=====
Writes a given string of 0's and 1's
puts a ` ` between each substring (one substring for one variable)
Leftmost bit is most significant bit.
=====*/
writechrom(chrom, fp)
unsigned *chrom;
FILE *fp;
{
    int j, k, stop, bits_per_var, count=0;
    unsigned mask = 1, tmp;
    if (fp == NULL) error_ptr_null(" File fp in initreport");
    if (BINGA == FALSE) return;
    if (chrom == NULL) error_ptr_null("chrom in writechrom");
    bits_per_var = lchrom/num_discr_var;
    for(k = 0; k < chromsize; k++)
    {
        tmp = chrom[k];
        if(k == (chromsize-1))
            stop = lchrom - (k*UINTSIZE);
        else
            stop = UINTSIZE;
        for(j = 0; j < stop; j++)
        {
            if(tmp&mask)
                fprintf(fp, "1");
            else
                fprintf(fp, "0");
            count++;
            if ((count % bits_per_var) == 0) && (count < lchrom))
                fprintf(fp, "-");
            tmp = tmp>>1;
        }
    }
}
/*=====
Reporting the statistics of current population ( gen. no. 'num'):
fp is file pointer to output file.
=====*/
report(fp, num)
FILE *fp;
int num;
{
    int k, j;
    FILE *fp_x, *fp_y;
    char string[30];
    if (fp == NULL) error_ptr_null(" file fp in report()");
    if (REPORT)

```

```

{
/* ----- */
/* WRITING IN THE OUTPUT FILE FOR INSPECTION */
/* ----- */
fprintf(fp,"n===== Generation No. : %3d =====",num);
fprintf(fp,"n No. x Fitness Parents random ");
fprintf(fp,"n=====");
for (k=0; k<= pop_size-1; k++)
{
fprintf(fp,"n %3d. [%8.5f] ->",k+1,oldpop[k].x[0]);
for (j= 1; j<=num_var-1; j++)
fprintf(fp,"n [%8.5f] ->",oldpop[k].x[j]);
fprintf(fp," %8.5f (%3d %3d) %8.5f", oldpop[k].obj,
oldpop[k].parent1,oldpop[k].parent2,oldpop[k].cross_var);
if (num_discr_var >= 1)
{ fprintf(fp,"n String = ");
writechrom(oldpop[k].chrom,fp); }
}
}
if ((REPORT) || (num==max_gen))
{
fprintf(fp,"n=====");
fprintf(fp,"nMax = %8.5f Min = %8.5f Avg = %8.5f",
max_obj,min_obj,avg_obj);
fprintf(fp,"nNo. of mutations = %d ; No. of x-overs = %d",
no_mutation,no_xover);
fprintf(fp,"nBest ever = %f -> fitness: %f (from generation : %d)",
best_ever.x[0],best_ever.obj,best_ever_gen);
for (j=1; j<=num_var-1; j++)
fprintf(fp,"n %f",best_ever.x[j]);
if (num_discr_var) { fprintf(fp,"nBest_ever String = ");
writechrom(best_ever.chrom,fp); }
fprintf(fp,"n=====");
fprintf(fp,"n\n");
}
app_report();
}
/*=====
Releases the memory for all mallocs
=====*/

free_all()
{
int i;
for(i = 0; i < pop_size; i++)
{
free(oldpop[i].chrom);
free(newpop[i].chrom);
}
free(oldpop);
free(newpop);
free(best_ever.chrom);
app_free();
}
/*=====
Writes the results of GA run in the output file
=====*/
write_in_file(fp,sno,x,obj,trials)
FILE *fp;
int sno, trials;
float *x,obj;
{
int k;
if (fp == NULL) error_ptr_null(" file fp in write_in_file");
if (x == NULL) error_ptr_null(" x in write_in_file");
fprintf(fp,"n%3d. %10.7f %6d %10.6f to %10.6f",

```

```

        sno,x[0],trials,minx[0],maxx[0]);
for (k =1; k<= num_var-1; k++)
    fprintf(fp,"ln      %10.7f      %10.6f to %10.6f",
            x[k],minx[k],maxx[k]);
if (num_discr_var) { fprintf(fp," ");
                    writechrom(best_ever.chrom,fp); }
fprintf(fp,"ln      OBJECTIVE = %10.7f      ",obj);
fprintf(fp,"ln      Random Seed Number : %6.4f      ",seed);
printf(" After %d Generations : ",trials/pop_size);
printf("ln      OBJECTIVE = %10.7f      ",obj);
printf("ln Random Seed Number : %6.4f      ",seed);
}
/*=====
MAIN PROGRAM ;
=====*/

main()
{
FILE *fp_out;          /* File pointer for output file      */
int runno=0, k;
POPULATION temp;      /* A temporary pointer of population      */
/*-----*/
/* Program starts here :      */
/*-----*/
input_parameters();
fp_out = fopen("realga.out","w+");
select_memory();
select_memory_rw();
select_memory_sr();
initreport(fp_out);
for (run = 1; run<= maxrun; run++)
{
printf("lnRun No. %d : Wait Please .....",run);
fprintf(fp_out,"lnRun No. %d ",run);
seed = basic_seed + (1.0-basic_seed)*(float)(run-1)/(float)maxrun;
if (seed > 1.0) printf("ln Warning !!! seed number exceeds 1.0");
gen_no = 0;
initialize();
statistics(gen_no);
report(fp_out,0);
for(gen_no = 1; gen_no<=max_gen; gen_no++)
{
generate_new_pop();
temp = oldpop;
oldpop = newpop;
newpop = temp;
statistics(gen_no);
report(fp_out,gen_no);
};          /* One GA run is over */
free_all();
}          /* for loop of run */
fclose(fp_out);
app_closure();
select_free_sr();
select_free_rw();
printf("ln Results are stored in file 'realga.out' ");
puts("ln O.K Good bye !!!");
}
/****** End of Main Program *****/
/*-----*/
/* random.c - contains random number generator and related */
/* utilities,          */
/* Source : sga.c (c) E.Goldberg 1986
/*-----*/
/* variables are declared static so that they cannot      */
/* conflict with names of other global variables in other */
/* files. See K&R, p 80, for scope of static      */

```

```

static double oldrand[55]; /* Array of 55 random numbers */
static int jrand; /* current random number */
static double rndx1,rndx2; /* used with random normal deviate */
static int rndcalflag; /* used with random normal deviate */
initrandomnormaldeviate()
/* initialization routine for randomnormaldeviate */
{
    rndcalflag = 1;
}
double noise(mu ,sigma)
/* normal noise with specified mean & std dev: mu & sigma */
double mu, sigma;
{
    double randomnormaldeviate();
    return((randomnormaldeviate()*sigma) + mu);
}
double randomnormaldeviate()
/* random normal deviate after ACM algorithm 267 / Box-Muller Method */
{
    double sqrt(), log(), sin(), cos();
    float randomperc();
    double t;
    if(rndcalflag)
    {
        rndx1 = sqrt(- 2.0*log((double) randomperc()));
        t = 6.2831853072 * (double) randomperc();
        rndx2 = sin(t);
        rndcalflag = 0;
        return(rndx1 * cos(t));
    }
    else
    {
        rndcalflag = 1;
        return(rndx2 * rndx1);
    }
}
advance_random()
/* Create next batch of 55 random numbers */
{
    int j1;
    double new_random;
    for(j1 = 0; j1 < 24; j1++)
    {
        new_random = oldrand[j1] - oldrand[j1+31];
        if(new_random < 0.0) new_random = new_random + 1.0;
        oldrand[j1] = new_random;
    }
    for(j1 = 24; j1 < 55; j1++)
    {
        new_random = oldrand [j1] - oldrand [j1-24];
        if(new_random < 0.0) new_random = new_random + 1.0;
        oldrand[j1] = new_random;
    }
}
int flip(prob)
/* Flip a biased coin - true if heads */
float prob;
{
    float randomperc();
    if(randomperc() <= prob)
        return(1);
    else
        return(0);
}
randomize()
/* Get seed number for random and start it up */

```



```

{
    int j1;
    for(j1=0; j1<=54; j1++) oldrand[j1] = 0.0;
    jrand=0;
    warmup_random(seed);
    inirandomnormaldeviate();
}
float randomperc()
/* Fetch a single random number between 0.0 and 1.0 - */
/* Subtractive Method . See Knuth, D. (1969), v. 2 for */
/* details.Name changed from random() to avoid library */
/* conflicts on some machines */
{
    jrand++;
    if(jrand >= 55)
    {
        jrand = 1;
        advance_random();
    }
    return((float) oldrand[jrand]);
}
int rnd(low, high)
/* Pick a random integer between low and high */
int low,high;
{
    int i;
    float randomperc();
    if(low >= high)
        i = low;
    else
    {
        i = (randomperc() * (high - low + 1)) + low;
        if(i > high) i = high;
    }
    return(i);
}
float rndreal(lo ,hi)
/* real random number between specified limits */
float lo, hi;
{
    return((randomperc() * (hi - lo)) + lo);
}
warmup_random(random_seed)
/* Get random off and running */
float random_seed;
{
    int j1, ii;
    double new_random, prev_random;
    oldrand[54] = random_seed;
    new_random = 0.00000001;
    prev_random = random_seed;
    for(j1 = 1 ; j1 <= 54; j1++)
    {
        ii = (21*j1)%54;
        oldrand[ii] = new_random;
        new_random = prev_random-new_random;
        if(new_random<0.0) new_random = new_random + 1.0;
        prev_random = oldrand[ii];
    }
    advance_random();
    advance_random();
    advance_random();
    jrand = 0;
}
/*-----*/
/* Files for tournament selection : */

```

```

/* Source : sga.c (c) E.Goldberg          */
/*-----*/
select_memory()
{
  unsigned nbytes;
  if(tourneysize > pop_size)
  {
    printf("FATAL: Tournament size (%d) > pop_size (%d)\n",
           tourneysize,pop_size);
    exit(-1);
  };
}
preselect_tour()
{
  reset1();
  tourneypos = 0;
}
int tour_select()
{
  int pick, winner, i;
  /* If remaining members not enough for a tournament, then reset list */
start_select :
  if((pop_size - tourneypos) < tourneysize)
  {
    reset1();
    tourneypos = 0;
  }

  /* Select tourneysize structures at random and conduct a tournament */
  winner=tourneylist[tourneypos];
/* Added by RBA */
  if( winner < 0 || winner > pop_size-1) {
    printf("\n Warning !! ERROR1");
    printf(" tourpos = %d",tourneypos);
    printf(" winner = %d",winner);
    preselect_tour();
    goto start_select; }
  for(i=1; i<tourneysize; i++)
  {
    pick=tourneylist[i+tourneypos];

/* Added by RBA */
    if (pick < 0 || pick > pop_size-1) { preselect_tour();
      printf("\n Warning !! ERROR2");
      goto start_select; }
    if(MINM * oldpop[pick].mod_obj < MINM * oldpop[winner].mod_obj) winner=pick;
  }
  /* Update tourneypos */
  tourneypos += tourneysize;
  return(winner);
}
/* Selection routines */
/* Roulette Wheel selection */
select_memory_rw()
{
}
select_free_rw()
{
}
preselect_rw()
{
  int j;
  sum_obj = 0;
  for(j = 0; j < pop_size; j++) sum_obj += oldpop[j].obj;
}
int rw_select()

```

```

/* roulette-wheel selection */
{
    extern float randomperc();
    float sum, pick;
    int i;
    pick = randomperc();
    sum = 0;
    if(sum_obj != 0)
    {
        for(i = 0; (sum < pick) && (i < pop_size); i++)
            sum += oldpop[i].obj/sum_obj;
    }
    else
        i = rnd(0,pop_size-1);
    return(i-1);
}

/* Stochastic Remainder Roulette Wheel */
static int *choices, nremain;
static float *fraction;
select_memory_sr()
{
    /* allocates auxiliary memory for stochastic remainder selection */
    unsigned nbytes;
    int j;
    nbytes = pop_size*sizeof(int);
    if((choices = (int *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory(stderr,"choices");
    nbytes = pop_size*sizeof(float);
    if((fraction = (float *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory(stderr,"fraction");
}
select_free_sr()
{
    /* frees auxiliary memory for stochastic remainder selection */
    free(choices);
    free(fraction);
}
preselect_sr()
/* preselection for stochastic remainder method */
{
    int j, jassign, k;
    float expected;
    if(avg_obj == 0)
    {
        for(j = 0; j < pop_size; j++) choices[j] = j;
    }
    else
    {
        j = 0;
        k = 0;

        /* Assign whole numbers */
        do
        {
            expected = ((oldpop[j].obj)/avg_obj);
            jassign = expected;
            /* note that expected is automatically truncated */
            fraction[j] = expected - jassign;
            while(jassign > 0)
            {
                jassign--;
                choices[k] = j;
                k++;
            }
            j++;
        }
    }
}

```

```

    }
    while(j < pop_size);
    j = 0;
    /* Assign fractional parts */
    while(k < pop_size)
    {
        if(j >= pop_size) j = 0;
        if(fraction[j] > 0.0)
        {
            /* A winner if true */
            if(flip(fraction[j]))
            {
                choices[k] = j;
                fraction[j] = fraction[j] - 1.0;
                k++;
            }
        }
        j++;
    }
    nremain = pop_size - 1;
}
int sr_select()
/* selection using remainder method */
{
    int jpick, slect;
    jpick = md(0, nremain);
    slect = choices[jpick];
    choices[jpick] = choices[nremain];
    nremain--;
    return(slect);
}

reset1()
/* Name changed from reset because of clash with lib. function - RBA */
/* Shuffles the tourneylist at random */
{
    int i, rand1, rand2, temp_site;
    for(i=0; i<pop_size; i++) tourneylist[i] = i;
    for(i=0; i < pop_size; i++)
    {
        rand1= md(0,pop_size-1);
        rand2= md(0,pop_size-1);

        temp_site = tourneylist[rand1];
        tourneylist[rand1]=tourneylist[rand2];
        tourneylist[rand2]=temp_site;
    }
}
/***** APPLICATION ORIENTED ROUTINES *****/
/**** Change these routines for your particular application *****/
input_app_parameters()
/* Input your application dependent parameters here and put the
output in global variables */
{
}
app_computation()
/* this routine should contain any application-dependent computations */
/* that should be performed before each GA cycle.
called by generate_new_pop */
{
}
app_free()

/* application dependent free() calls, called by free_all() */
{

```

```

}
app_initialize()
/* application dependent initialization routine called by initialize() */
{
}
app_initreport()
/* Application-dependent initial report called by initreport() */
{
}
app_report()
/* Application-dependent report, called by report() */
{
}
app_statistics()
/* Application-dependent statistics calculations called by statistics() */
{
}
app_closure()
/* Application-dependent work which should be done before closure of
the main program. called by main() */
{
}
/*=====
OBJECTIVE FUNCTION ( Supposed to be minimized) :
Change it for different applications
=====*/
float objective(x)
float *x;
{
float term1,term2, term3, pi;
float g, penalty_coef;
if (x == NULL) error_ptr_null("x in objective()");
#ifdef prob1
MINM = -1;
term1 = (x[0]*x[0]+x[1]-11.0)*(x[0]*x[0]+x[1]-11.0);
term2 = (x[0]+x[1]*x[1]- 7.0)*(x[0]+x[1]*x[1]- 7.0);
term3 = term1+term2;
penalty_coef = 0.0;
g = (square(x[0]-5.0) + square(x[1]))/26.0 - 1.0;
if (g < 0.0) term3 = term3 + penalty_coef * g * g;
return(1.0/(1.+term3));

#endif

#ifdef can
MINM = 1;
pi = 4.0 * atan(1.0);
term3 = pi * x[0] * x[0]/2.0 + pi * x[0] * x[1];
penalty_coef = 1.0e4;
g = (pi * x[0] * x[0] * x[1]/4.0 - 400.0)/400.0;
if (g < 0.0) term3 = term3 + penalty_coef * g * g;
return(term3);
#endif
}

/****** END OF FILE *****/

```

C ANEXO CÓDIGO ALGORITMO GENETICO CON RESTRICCIONES

```

/*****\
***                                     ***
***          GENETIC ALGORITHM          ***
***                                     ***
***      Developed By : Prof. Kalyanmoy Deb      ***
***      with assistance from his Students      ***
***                                     ***
*** Last Edited : 15.11.2001                ***
*** .....                                    ***

```

This is a GA implementation using binary and real coded variables. Mixed variables can be used. Constraints can also be handled. All constraints must be greater-than-equal-to type ($g \geq 0$) and normalized (see the sample problem in prob1 in objective()).

There are three sample input file (inp-r for real-coded variables only, inp-b for binary-coded variables only, and inp-rb for a mixed real and binary variables) which can be used to run this code. The template file for each input data file is also included (input-real, input-binary, and input-real+binary).

Code your objective function and constraints at the end of the code (in objective()). Variable boundaries for real-coded variables can be fixed or flexible.

Following selection operator is coded:

Tournament selection: Set MINM=1 for minimization and -1 for maximization in objective().

For binary strings, single-point crossover and for real parameters simulated binary crossover (SBX) are used.

Mutation: bit-wise for Binary coded GAs and polynomial mutation (with eta) for Real coded GAs

Constraints are handled using Deb's parameter-less approach (see CMAME, 2000 paper)

Niching allows restricted tournament selection. Recommended for complex and disconnected feasible regions. (Niching parameter of 0.1 is recommended.)

The execution creates a file 'result.out' which contains the input data and best solution obtained by the GA. The feasibility of the best solution and constraint values are also marked.

The report.out contains population record of each generation.

The file 'plot.out' contains a gnuplot-compatible data file for plotting best, avg, and worst population fitness versus generation number.

Send Comments to De. K. Deb (deb@iitk.ac.in)

```

*****/

```

```

#include<stdio.h>
#include<math.h>
#define BITS_PER_BYTE 8
#define UINITSIZE (BITS_PER_BYTE*sizeof(unsigned))
#define INFINITY 1e7
#define EPSILON 1e-6
#define PI 3.1415927
#define MAXVECSIZE 30
#define MAXPOPSIZE 500
#define MAXCONSTR 10
#define TRUE 1
#define FALSE 0

```

```

#define square(x) ((x)*(x))
/***** Current Objective Function *****/
#define prob1 /* define your problem at the end in objfunc() */
/*=====
TYPE DEFINITIONS :
=====*/
struct indiv
{ double xreal[MAXVECSIZE]; /* real-coded variables */
  double xbin[MAXVECSIZE]; /* binary-coded variables */
  double obj,penalty; /* objective fn. etc. */
  double cons[MAXCONSTR];
  unsigned *chrom; /* chromosome string */
  int parent1;
  int parent2; /* s.no. of parents */
  int cross_var; /* cross over variable */
};
typedef struct indiv INDIVIDUAL ;
typedef INDIVIDUAL *POPULATION ; /* array of individuals */

/*=====
FUNCTION PROTOTYPES :
=====*/
void objective();
double randomperc();
double get_beta();
double get_delta();
/*=====
GLOBAL VARIABLES :
=====*/
int pop_size, /* Population Size */
gen_no, /* Current generation number */
max_gen, /* Maximum no. of generations */
no_xover, /* No. of cross overs done */
no_mutation,binmut, /* No. of mutations done */
best_ever_gen, /* Generation no. of best ever indiv. */
nvar_bin, /* Number of total design variables */
nvar_real,
lchrom, /* Length of chromosome */
chromsize, /* Number of bytes needed to store
lchrom strings */
maxrun, /* Maxm no. of GA runs for each set of
parameter values */
run, /* Actual run no. */
SHARING, /* Flag for Sharing ( True / False) */
REPORT, /* Flag for Full reports (True/False) */
RIGID, /* Flag for rigid boundaries (T/F) */
tourneylist[MAXPOPSIZE], /* List of indices of individuals for
tournament selection routine */
tourneypos, /* Current position of tournament */
tourneysize, /* Tournament size ( = 2 for binary) */
MINM,
nc, /* Number of constraints */
critical_size; /* subpopulation size used in TS (0.25*N) */

int chr_len[MAXVECSIZE]; /* chrom length for each variable */
double seed, /* Random seed number */
basic_seed, /* Basic seed number */
n_distribution_c, n_distribution_m,
p_xover, /* Cross over probability */

```

```

p_mutation_bin,p_mutation_real, /* Mutation probability */
sum_obj, /* Sum of objective fn. values */
avg_obj, /* Average of objective fn. values */
max_obj, /* Maximum objective fn. value */
min_obj, /* Minimum objective fn. value */
minx_bin[MAXVECSIZE], /* Minimum and maximum values of design */
maxx_bin[MAXVECSIZE], /* variables in a population */
minx_real[MAXVECSIZE], /* Minimum and maximum values of design */
maxx_real[MAXVECSIZE], /* variables in a population */
xbin_lower[MAXVECSIZE], /* Lower and Upper bounds on each */
xbin_upper[MAXVECSIZE], /* design variable */
xreal_lower[MAXVECSIZE], /* Lower and Upper bounds on each */
xreal_upper[MAXVECSIZE], /* design variable */
sigma_share; /* Sharing distance */

POPULATION oldpop, newpop; /* Old and New populations */
INDIVIDUAL best_ever,current_best; /* Best fit individual till current gen.*/

```

```

/*=====
SUBROUTINE FOR INPUTTING GLOBAL PARAMETERS :
=====*/

```

```

input_parameters()
{
    int k;
    char ans;
    printf(" ");
    puts(".....");
    printf(" ");
    puts("..... REAL-CODED GENETIC ALGORITHM .....");
    printf(" ");
    puts("..... ===== .....");
    printf(" ");
    puts("..... Kalyanmoy Deb and his students at KanGAL .....");
    printf(" ");
    puts("..... All rights reserved. ....");
    printf(" ");
    puts(".....");
    printf("\nHow many generations ? ----- : ");
    scanf("%d",&max_gen);
    printf("\nPopulation Size ? ----- : ");
    scanf("%d", &pop_size );
    if (pop_size > MAXPOPSIZE)
    {
        printf("\n Increase the value of MAXPOPSIZE in program");
        printf(" and re-run the program");
        exit(-1);
    }
    printf("\nNumber of binary-coded variables (Maximum %d) ---- : ",MAXVECSIZE);
    scanf("%d",&nvar_bin);
    printf("\nNumber of real-coded variables (Maximum %d) ---- : ",MAXVECSIZE);
    scanf("%d",&nvar_real);
    if (nvar_bin > 0)
        for (k=0, lchrom = 0; k < nvar_bin; k++)
        {
            printf("\nString length and Lower and Upper bounds of xbin[%d] ---- : ",k+1);
            scanf("%d %lf %lf",&chr_len[k],&xbin_lower[k],&xbin_upper[k]);
            lchrom += chr_len[k];
        }
    if (nvar_real > 0)
        for (k=0; k < nvar_real; k++)

```



```

    {
        printf("\nLower and Upper bounds of xreal[%d] ----- : ",k+1);
        scanf("%lf %lf",&xreal_lower[k],&xreal_upper[k]);
    }
if (nvar_real > 0) {
    printf("\n Are the real-parameter bounds rigid ? (y/n) ");
    do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='\n');
    if (ans == 'y') RIGID = TRUE;
    else RIGID = FALSE;
}
printf("\nparameter-space niching to be done ? (y/n) ----- : ");
do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='\n');
if (ans == 'y')
{ SHARING = TRUE;
  printf("\nNiching parameter value ? ----- : ");
  scanf("%lf",&sigma_share);
}
else SHARING = FALSE;
printf ("\n Reports to be printed ? (y/n) ");
do { ans = getchar(); } while (ans!= 'y' && ans !='\n');
if (ans == 'y') REPORT = TRUE;
else REPORT = FALSE;
printf("\n How many runs ? ");
scanf("%d",&maxrun);
tourneysize=2;
printf("\nCross Over Probability? (0 to 1): ");
scanf("%lf",&p_xover);
if (nvar_bin > 0)
{
  printf("\nMutation Probability for binary strings? (0 to 1) : ");
  scanf("%lf",&p_mutation_bin);
}
if (nvar_real > 0)
{
  printf("\nMutation Probability for real variables? (0 to 1) : ");
  scanf("%lf",&p_mutation_real);
}
if (nvar_real > 0)
{
  printf("\n Give distr. index for SBX and mutation? ");
  scanf("%lf %lf",&n_distribution_c,&n_distribution_m);
}
printf("\n Give random seed (0 to 1.0) ");
scanf("%lf",&basic_seed);
critical_size = pop_size/4;
input_app_parameters();
}
/*=====
Initialises zero'th generation and global parameters
=====*/
initialize()
{
  double u;
  int k,k1,i,j,j1,stop;
  double temp[MAXVECSIZE],coef;
  unsigned mask=1,nbytes;
  randomize();
  app_initialize();
  oldpop = (INDIVIDUAL *)malloc(pop_size*sizeof(INDIVIDUAL));
  newpop = (INDIVIDUAL *)malloc(pop_size*sizeof(INDIVIDUAL));
  if (oldpop == NULL) nomemory("oldpop in initialize()");
}

```

```

if (newpop == NULL) nomemory("newpop in initialize()");
chromsize = (lchrom/UINTSIZE);
if(lchrom%UINTSIZE) chromsize++;
nbytes = chromsize*sizeof(unsigned);
if (nvar_bin > 0)
for(j = 0; j < pop_size; j++)
{
    if((oldpop[j].chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory("oldpop chromosomes");

    if((newpop[j].chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory("newpop chromosomes");
}
if (nvar_bin > 0)
{
    if((best_ever.chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory("best_ever chromosomes");
    if((current_best.chrom = (unsigned *) malloc(nbytes)) == NULL)
        nomemory("current_best chromosomes");
}
for (k=0; k < pop_size; k++)
{
    oldpop[k].obj = 0.0;
    oldpop[k].parent1 = oldpop[k].parent2 = 0;
    oldpop[k].penalty = 0.0; oldpop[k].cross_var = 0;
    for (j=0; j < nc; j++)
        oldpop[k].cons[j] = 0.0;

    for (j=0; j < nvar_real; j++)
    {
        u = randomperc();
        oldpop[k].xreal[j] = xreal_lower[j] * (1-u) + xreal_upper[j] * u;
    }
    for(k1 = 0; k1 < chromsize; k1++)
    {
        oldpop[k].chrom[k1] = 0;
        if(k1 == (chromsize-1))
            stop = lchrom - (k1*UINTSIZE);
        else
            stop = UINTSIZE;
        /* A fair coin toss */
        for(j1 = 1; j1 <= stop; j1++)
        {
            if(flip(0.5))
                oldpop[k].chrom[k1] = oldpop[k].chrom[k1]|mask;
            if (j1 != stop) oldpop[k].chrom[k1] = oldpop[k].chrom[k1]<<1;
        }
    }
}
no_xover = no_mutation = binmut = 0;
copy_individual(&oldpop[0],&best_ever);
decode_string(&best_ever);
objective(&best_ever);
}
/*=====
Decodes the string of the individual (if any) and puts the values in
the array of doubles.
=====*/
decode_string(ptr_indiv)
INDIVIDUAL *ptr_indiv;

```

```

{
double *temp,coef;
int j;
if (ptr_indiv == NULL) error_ptr_null("ptr_indiv in decode_string");
if (nvar_bin > 0)
{
temp = (double *) malloc(nvar_bin * sizeof(double));
for(j=0; j < nvar_bin; j++)
temp[j] = 0.0;
decodevalue(ptr_indiv->chrom,temp);
for(j=0; j < nvar_bin; j++)
{
coef = pow(2.0,(double)(chr_len[j]) - 1.0);
temp[j] = temp[j]/coef;
ptr_indiv->xbin[j] = temp[j]*xbin_upper[j] + (1.0 - temp[j])*xbin_lower[j];
}
free(temp);
}
}
}
/*=====
Prints an error message and terminates the program
=====*/
nomemory(string)
char *string;
{
printf("\nmalloc: out of memory making %s!\n",string);
printf("\n Program is halting .....");
exit(-1);
}
/*=====
Gives error message of null pointer and terminates the program.
=====*/
error_ptr_null(string)
char *string;
{
printf("\n Error !! Pointer %s found Null !",string);
printf("\n Program is halting .....");
exit(-1);
}
}
/*=====
Copys contents of one individual into another.
=====*/
copy_individual(indiv1,indiv2)
INDIVIDUAL *indiv1, *indiv2;
{
int k;
if (indiv1==NULL) error_ptr_null("indiv1 in copy_individual");
if (indiv2==NULL) error_ptr_null("indiv2 in copy_individual");
for (k=0; k < nvar_bin; k++)
indiv2->xbin[k] = indiv1->xbin[k];
for (k=0; k < nvar_real; k++)
indiv2->xreal[k] = indiv1->xreal[k];
for (k=0; k < nc; k++)
indiv2->cons[k] = indiv1->cons[k];
indiv2->obj = indiv1->obj;
indiv2->penalty = indiv1->penalty;
indiv2->parent1 = indiv1->parent1;
indiv2->parent2 = indiv1->parent2;
indiv2->cross_var = indiv1->cross_var;
for (k=0; k < chromsize; k++)
indiv2->chrom[k] = indiv1->chrom[k];
}
}
}

```

```

}
/*=====
Calculates statistics of current generation :
=====*/
statistics(gen)
int gen;
{
// INDIVIDUAL current_best;
int k,j, change_flag;
double f;
double pow(),bitpow,coef,temp[MAXVECSIZE];
for (k=0; k < pop_size; k++)
{
decode_string(&oldpop[k]);
objective(&(oldpop[k]));
}
copy_individual(&oldpop[0], &current_best);
sum_obj = avg_obj = oldpop[0].obj;
max_obj = min_obj = oldpop[0].obj;
for (k=0; k < nvar_bin; k++)
maxx_bin[k] = minx_bin[k] = oldpop[0].xbin[k];
for (k=0; k < nvar_real; k++)
maxx_real[k] = minx_real[k] = oldpop[0].xreal[k];
for(k=1; k < pop_size; k++)
{
if (current_best.penalty > oldpop[k].penalty)
copy_individual(&oldpop[k], &current_best);
else if ((current_best.penalty <= 0.0) && (oldpop[k].penalty <= 0.0))
if (MINM * current_best.obj > MINM * oldpop[k].obj)
copy_individual(&oldpop[k], &current_best);
if(MINM * max_obj < MINM * oldpop[k].obj)
max_obj = oldpop[k].obj;
if(MINM * min_obj > MINM * oldpop[k].obj)
min_obj = oldpop[k].obj;
sum_obj += oldpop[k].obj;
for (j=0; j < nvar_bin; j++)
{
if (MINM * maxx_bin[j] < MINM * oldpop[k].xbin[j]) maxx_bin[j] = oldpop[k].xbin[j];
if (MINM * minx_bin[j] > MINM * oldpop[k].xbin[j]) minx_bin[j] = oldpop[k].xbin[j];
}
for (j=0; j < nvar_real; j++)
{
if (MINM * maxx_real[j] < MINM * oldpop[k].xreal[j]) maxx_real[j] = oldpop[k].xreal[j];
if (MINM * minx_real[j] > MINM * oldpop[k].xreal[j]) minx_real[j] = oldpop[k].xreal[j];
}
}
}
avg_obj = sum_obj/pop_size;
change_flag = 0;
if (best_ever.penalty > current_best.penalty) change_flag = 1;
else if ((best_ever.penalty <= 0.0) && (current_best.penalty <= 0.0))
if (MINM * best_ever.obj > MINM * current_best.obj)
change_flag = 1;
if (change_flag == 1)
{
copy_individual(&current_best, &best_ever);
best_ever_gen = gen;
}
app_statistics();
}

```

```

/*=====
Decodes the value of a group of binary strings and puts the decoded
values into an array 'value'.
=====*/
decodevalue(chrom,value)
unsigned *chrom;
double value[];
{
    int k,j,stop,tp,bitpos,mask=1,position,bits_per_var,count;
    double pow(), bitpow;
    if (nvar_bin <= 0) return;
    if (chrom == NULL) error_ptr_null("chrom in decodevalue");
    position = 0; count = 0;
    for(k = 0; k < chromsize; k++)
    {
        if(k == (chromsize-1))
            stop = lchrom-(k*UINTSIZE);
        else
            stop = UINTSIZE;
        /* loop thru bits in current byte */
        tp = chrom[k];
        for(j = 0; j < stop; j++) {
            bits_per_var = chr_len[position];
            bitpos = j + UINTSIZE*k;
            /* test for current bit 0 or 1 */
            if((tp&mask) == 1) {
                // position = bitpos / bits_per_var;
                // bitpos -= position * bits_per_var;
                bitpow = pow(2.0,(double)(count));
                value[position] += bitpow;
            }
            tp = tp>>1; count++;
            if (count >= chr_len[position])
            {
                position += 1;
                count = 0;
            }
        }
    }
}
/*=====
GENERATION OF NEW POPULATION through SELECTION, XOVER & MUTATION :
=====*/
generate_new_pop()
{
    int k,mate1,mate2;
    app_computation();
    preselect_tour();
    for (k=0; k < pop_size; k += 2)
    {
        // selection
        if (SHARING)
        {
            mate1 = tour_select_constr();
            mate2 = tour_select_constr();
        }
        else
        {
            mate1 = tour_select();
        }
    }
}

```

```

        mate2 = tour_select();
    }
    // crossover
    cross_over(mate1,mate2,k,k+1);
    // mutation
    mutation(&newpop[k]);
    mutation(&newpop[k+1]);
    newpop[k].parent1 = newpop[k+1].parent1 = mate1+1;
    newpop[k].parent2 = newpop[k+1].parent2 = mate2+1;
}
}
/*=====
Binary cross over routine.
=====*/
binary_xover (parent1, parent2, child1, child2, x_site)
unsigned *parent1, *parent2, *child1, *child2;
int *x_site;
/* Cross 2 parent strings, place in 2 child strings */
{
    int j, jcross, k;
    unsigned mask, temp;
    if (nvar_bin <= 0) return;
    if (parent1 == NULL) error_ptr_null("parent1 in binary_xover");
    if (parent2 == NULL) error_ptr_null("parent2 in binary_xover");
    if (child1 == NULL) error_ptr_null("child1 in binary_xover");
    if (child2 == NULL) error_ptr_null("child2 in binary_xover");
    jcross = rnd(1 ,(lchrom - 1));/* Cross between 1 and l-1 */
    for(k = 1; k <= chromsize; k++)
    {
        if(jcross >= (k*UINTSIZE))
        {
            child1[k-1] = parent1[k-1];
            child2[k-1] = parent2[k-1];
        }
        else if((jcross < (k*UINTSIZE)) && (jcross > ((k-1)*UINTSIZE)))
        {
            mask = 1;
            for(j = 1; j <= (jcross-1-((k-1)*UINTSIZE)); j++)
            {
                temp = 1;
                mask = mask<<1;
                mask = mask|temp;
            }
            child1[k-1] = (parent1[k-1]&mask)|(parent2[k-1]&(~mask));
            child2[k-1] = (parent1[k-1]&(~mask)|(parent2[k-1]&mask);
        }
        else
        {
            child1[k-1] = parent2[k-1];
            child2[k-1] = parent1[k-1];
        }
    }
    *x_site = jcross;
}
/*=====
Creates two children from parents p1 and p2, stores them in addresses
pointed by c1 and c2. low and high are the limits for x values and
rand_var is the random variable used to create children points.
=====*/

```

```

create_children(p1,p2,c1,c2,low,high,rand_var)
double p1,p2,*c1,*c2,low,high,*rand_var;
{
    double difference,x_mean,beta,v2,v1;
    double u,distance,umax,temp,alpha;
    int flag;
    if (c1 == NULL) error_ptr_null("c1 in create_children");
    if (c2 == NULL) error_ptr_null("c2 in create_children");
    if (rand_var == NULL) error_ptr_null("rand_var in create_children");
    flag = 0;
    if ( p1 > p2) { temp = p1; p1 = p2; p2 = temp; flag = 1; }
    x_mean = (p1 + p2) * 0.5;
    difference = p2 - p1;
    if ( (p1-low) < (high-p2) ) distance = p1-low;
    else distance = high-p2;
    if (distance < 0.0) distance = 0.0;
    if (RIGID && (difference > EPSILON))
    {
        alpha = 1.0 + (2.0*distance/difference);
        umax = 1.0 - (0.5 / pow((double)alpha,(double)(n_distribution_c+1.0)));
        *rand_var = umax * randomperc();
    }
    else *rand_var = randomperc();
    beta = get_beta(*rand_var);
    if (fabs(difference*beta) > INFINITY) beta = INFINITY/difference;
    v2 = x_mean + beta * 0.5 * difference;
    v1 = x_mean - beta * 0.5 * difference;
    if (v2 < low) v2 = low;
    if (v2 > high) v2 = high;
    if (v1 < low) v2 = low;
    if (v1 > high) v2 = high;
    *c2 = v2; *c1 = v1;
    // if (flag == 1) { temp = *c1; *c1 = *c2; *c2 = temp; }
}
}
/*=====
CROSS - OVER USING strategy of uniform 50% variables
For one variable problem, it is crossed over as usual.
For multivariables, each variable is crossed over with a probability
of 50 % , each time generating a new random beta.
=====*/
cross_over(first,second,childno1,childno2)
int first,second,childno1,childno2;
{
    double difference,x_mean,beta;
    double u = 0.0;
    int site,k,x_s;
    x_s = 0;
    if (flip(p_xover)) /* Cross over has to be done */
    {
        no_xover++;
        if (nvar_bin > 0)
        {
            binary_xover(oldpop[first].chrom,oldpop[second].chrom,
                newpop[childno1].chrom,newpop[childno2].chrom,&x_s);
            newpop[childno1].cross_var = newpop[childno2].cross_var = x_s;
        }
    }
    if (nvar_real > 0)
    {
        for (site = 0; site < nvar_real; site++)
        {
            if(flip(0.5) || (nvar_real == 1))

```

```

        {
            create_children(oldpop[first].xreal[site],oldpop[second].xreal[site],
                &(newpop[childno1].xreal[site]),&(newpop[childno2].xreal[site]),
                xreal_lower[site],xreal_upper[site],&u);
        }
    else
    {
        newpop[childno1].xreal[site] = oldpop[first].xreal[site];
        newpop[childno2].xreal[site] = oldpop[second].xreal[site];
    }
} /* for loop */
if (nvar_bin == 0)
    newpop[childno1].cross_var = newpop[childno2].cross_var = 0;
} /* if REALGA */
} /* Cross over done */

else /* Passing x-values straight */
{
    for (k=0; k < chromsize; k++)
    {
        newpop[childno1].chrom[k] = oldpop[first].chrom[k];
        newpop[childno2].chrom[k] = oldpop[second].chrom[k];
    }
    for (site=0; site < nvar_real; site++)
    {
        newpop[childno1].xreal[site] = oldpop[first].xreal[site];
        newpop[childno2].xreal[site] = oldpop[second].xreal[site];
    }
    for (site=0; site < nvar_bin; site++)
    {
        newpop[childno1].xbin[site] = oldpop[first].xbin[site];
        newpop[childno2].xbin[site] = oldpop[second].xbin[site];
    }
    newpop[childno1].cross_var = newpop[childno2].cross_var = 0;
}
}
/*=====
Calculates beta value for given random number u (from 0 to 1)
If input random numbers (u) are uniformly distributed for a set of
inputs, this results in uniform distribution of beta values in case
of BLX , and Binary Probability distribution simulation in case of
SBX.
=====*/
double get_beta(u)
double u;
{
    double beta;
    if (1.0-u < EPSILON ) u = 1.0 - EPSILON;
    if ( u < 0.0) u = 0.0;
    if (u < 0.5) beta = pow(2.0*u,(1.0/(n_distribution_c+1.0)));
    else beta = pow( (0.5/(1.0-u)),(1.0/(n_distribution_c+1.0)));
    return beta;
}
/*=====
For given u value such that -1 <= u <= 1, this routine returns a
value of delta from -1 to 1. Exact value of delta depends on specified
n_distribution. This is called by mutation().
=====*/
double get_delta(u, delta_l, delta_u)
    double u, delta_l, delta_u;
{

```



```

double delta, aa;
if (u >= 1.0-1.0e-9) delta = delta_u;
else if (u <= 0.0+1.0e-9) delta = delta_l;
else
{
    if (u <= 0.5)
    {
        aa = 2.0*u + (1.0-2.0*u)*pow((1+delta_l),(n_distribution_m + 1.0));
        delta = pow(aa, (1.0 / (n_distribution_m + 1.0))) - 1.0;
    }
    else
    {
        aa = 2.0*(1-u) + 2.0*(u-0.5)*pow((1-delta_u),(n_distribution_m + 1.0));
        delta = 1.0 - pow(aa, (1.0 / (n_distribution_m + 1.0)));
    }
}
if (delta < -1.0 || delta > 1.0)
{
    printf("Error in mutation!! delta = %f\n",delta);
    exit(-1);
}
return (delta);
}

/*=====
Binary mutation routine ( borrowed from sga.c )
=====*/
binmutation(child)
unsigned *child;
/* Mutate an allele w/ pmutation, count # of mutations */
{
    int j, k, stop;
    unsigned mask, temp = 1;
    if (nvar_bin <= 0) return;
    if (child== NULL) error_ptr_null(" child in binmutation");
    for(k = 0; k < chromsize; k++)
    {
        mask = 0;
        if(k == (chromsize-1))
            stop = lchrom - (k*UINTSIZE);
        else
            stop = UINTSIZE;
        for(j = 0; j < stop; j++)
        {
            if(flip(p_mutation_bin))
            {
                mask = mask|(temp<<j);
                binmut++;
            }
        }
        child[k] = child[k]^mask;
    }
}

/*=====
Mutation Using polynomial probability distribution. Picks up a random
site and generates a random number u between -1 to 1, ( or between
minu to maxu in case of rigid boudaries) and calls the routine
get_delta() to calculate the actual shift of the value.
=====*/
mutation(indiv)

```

```

INDIVIDUAL *indiv;
{
  double distance1,x,delta_l,delta_u,delta,u;
  int k, site;
  if (indiv == NULL) error_ptr_null("indiv in mutation");
  if (nvar_real > 0)
    for (site = 0; site < nvar_real; site++)
      {
        if(flip(p_mutation_real))
          {
            no_mutation++;
            if(RIGID)
              {
                x = indiv->xreal[site];
                distance1 = xreal_lower[site] - x;
                delta_l = distance1/(xreal_upper[site] - xreal_lower[site]);
                if (delta_l < -1.0) delta_l = -1.0;
                distance1 = xreal_upper[site] - x;
                delta_u = distance1/(xreal_upper[site] - xreal_lower[site]);
                if (delta_u > 1.0) delta_u = 1.0;
                if (-1.0*delta_l < delta_u) delta_u = -1.0 * delta_l;
            else delta_l = -1.0 * delta_u;
              }
            else
              {
                delta_l = -1.0;
                delta_u = 1.0;
              }
            u = randomperc();
            /* calculation of actual delta value */
            delta = get_delta(u, delta_l, delta_u)
              * (xreal_upper[site] - xreal_lower[site]);
            indiv->xreal[site] += delta;

            if (indiv->xreal[site] < xreal_lower[site])
              indiv->xreal[site] = xreal_lower[site];
            if (indiv->xreal[site] > xreal_upper[site])
              indiv->xreal[site] = xreal_upper[site];
          } /* if flip() */
      }
  if (nvar_bin > 0)
    binmutation(indiv->chrom);
}

/*=====
Reporting the user-specified parameters :
fp is the file pointer to output file.
=====*/
initreport(fp)
FILE *fp;
{
  int k;
  if (fp == NULL) error_ptr_null(" File fp in initreport");
  fprintf(fp,"\\n\\n=====");
  fprintf(fp,"\\n      INITIAL REPORT      ");
  fprintf(fp,"\\n=====");
  fprintf(fp,"\\n Variable Boundaries : ");
  if (nvar_real > 0)
    if (RIGID) fprintf(fp," Rigid");
    else   fprintf(fp," Flexible");
}

```

```

fprintf(fp, "\n Population size      : %d", pop_size);
fprintf(fp, "\n Total no. of generations  : %d", max_gen);
fprintf(fp, "\n Cross over probability   : %6.4f", p_xover);
if (nvar_bin > 0)
    fprintf(fp, "\n Mutation probability (binary): %6.4f", p_mutation_bin);
if (nvar_real > 0)
    fprintf(fp, "\n Mutation probability (real): %6.4f", p_mutation_real);
if (SHARING)
{
    fprintf(fp, "\n Niching to be done :");
    fprintf(fp, "\n Niching parameter value: %6.4f", sigma_share);
}
if (nvar_bin > 0)
    fprintf(fp, "\n Total String length      : %d", lchrom);
if (nvar_bin > 0)
    fprintf(fp, "\n Number of binary-coded variables: %d", nvar_bin);
if (nvar_real > 0)
    fprintf(fp, "\n Number of real-coded variables : %d", nvar_real);
fprintf(fp, "\n Total Runs to be performed : %d", maxrun);
if (nvar_real > 0)
{
    fprintf(fp, "\n Exponent (n for SBX)      : %7.2f", n_distribution_c);
    fprintf(fp, "\n Exponent (n for Mutation) : %7.2f", n_distribution_m);
}
fprintf(fp, "\n Lower and Upper bounds  :");
for (k=0; k < nvar_bin; k++)
    fprintf(fp, "\n %8.4f <= x_bin[%d] <= %8.4f, string length = %d", xbin_lower[k], k+1, xbin_upper[k], chr_len[k]);
for (k=0; k < nvar_real; k++)
    fprintf(fp, "\n %8.4f <= x_real[%d] <= %8.4f", xreal_lower[k], k+1, xreal_upper[k]);
fprintf(fp, "\n===== \n");
app_initreport();
}
/*=====
Writes a given string of 0's and 1's
puts a '-' between each substring (one substring for one variable)
Leftmost bit is most significant bit.
=====*/
writechrom(chrom, fp)
unsigned *chrom;
FILE *fp;
{
    int j, k, stop, bits_per_var, count=0, bitcount, position;
    unsigned mask = 1, tmp;
    if (fp == NULL) error_ptr_null(" File fp in initreport");
    if (nvar_bin <= 0) return;
    if (chrom == NULL) error_ptr_null("chrom in writechrom");
    position = 0;
    bitcount = 0;
    for(k = 0; k < chromsize; k++)
    {
        tmp = chrom[k];
        if(k == (chromsize-1))
            stop = lchrom - (k*UINTSIZE);
        else
            stop = UINTSIZE;
        for(j = 0; j < stop; j++)
        {
            bits_per_var = chr_len[position];
            if(tmp & mask)
                fprintf(fp, "1");

```

```

        else
            fprintf(fp,"0");
        count++; bitcount++;
        if (( (count % bits_per_var) == 0) && (count < lchrom))
            fprintf(fp,"-");
        tmp = tmp>>1;
        if (bitcount >= chr_len[position])
        {
            bitcount = 0;
            position += 1;
        }
    }
}
}
void writeindv(ind)
    INDIVIDUAL ind;
{
    int i;
    for (i=0; i<nvar_bin; i++)
        printf(" %lf",ind.xbin[i]);
    for (i=0; i<nvar_real; i++)
        printf(" %lf",ind.xreal[i]);
    printf("Obj=%lf penalty = %lf parent1 = %d parent2 = %d",ind.obj,ind.penalty,ind.parent1,ind.parent2);
    printf("cross_site = %lf ",ind.cross_var);
    for (i=0; i<chromsize; i++)
        printf(" %d",ind.chrom[i]);
}
/*=====
Reporting the statistics of current population ( gen. no. 'num'):
fp is file pointer to output file.
=====*/
report(fr,fp,fl,num)
FILE *fr,*fp,*fl;
int num;
{
    int k,j;
    char string[30];
    if (fr == NULL) error_ptr_null(" file fr in report()");
    if (fp == NULL) error_ptr_null(" file fp in report()");
    if (num == 0)
        fprintf(fl,"\n# Generation Number Best Fitness Average Fitness Worst Fitness");
    fprintf(fl,"\n %d %lf %lf %lf",num,min_obj,avg_obj,max_obj);
    if (REPORT)
    {
        /* ----- */
        /* WRITING IN THE OUTPUT FILE FOR INSPECTION */
        /* ----- */
        fprintf(fr,"\n===== Generation No. : %3d =====",num);
        fprintf(fr,"\n No. Binary|Real x Constr. violation Fitness Parents Cross-site ");
        fprintf(fr,"\n=====");
        for (k=0; k < pop_size; k++)
        {
            fprintf(fr,"\n%3d. ",k+1);
            if (nvar_bin > 0)
            {
                for (j=0; j < nvar_bin; j++)
                    fprintf(fr," %8.5lf",oldpop[k].xbin[j]);
            }
            fprintf(fr,"|");
        }
    }
}

```

```

        if (nvar_real > 0)
        {
            for (j=0; j<nvar_real; j++)
                fprintf(fr, "%8.5lf", oldpop[k].xreal[j]);
        }
        for (j=0; j<nc; j++)
            fprintf(fr, "%8.5lf", oldpop[k].cons[j]);
        fprintf(fr, "%8.5lf", oldpop[k].penalty);
        fprintf(fr, "%8.5lf (%3d %3d)", oldpop[k].obj,
                oldpop[k].parent1, oldpop[k].parent2);
        if (nvar_bin > 0) fprintf(fr, " %d", oldpop[k].cross_var);
        if (nvar_bin > 0)
        {
            fprintf(fr, "\n String = ");
            writechrom(oldpop[k].chrom, fr);
        }
    }
}
if (num==max_gen)
{
    fprintf(fp, "\n=====");
    fprintf(fp, "\nMax = %8.5lf Min = %8.5lf Avg = %8.5lf",
            max_obj, min_obj, avg_obj);
    fprintf(fp, "\nMutations (real)= %d ; Mutations (binary) = %d ; Crossovers = %d",
            no_mutation, binmut, no_xover);
    fprintf(fl, "\n");
    if (best_ever.penalty <= 0.0)
    {
        fprintf(fp, "\nBest ever fitness: %lf (from generation : %d)\n",
                best_ever.obj, best_ever_gen);
        fprintf(fp, "Variable vector: Binary | Real -> ");
        for (j=0; j < nvar_bin; j++)
            fprintf(fp, "%lf", best_ever.xbin[j]);
        fprintf(fp, "|");
        for (j=0; j < nvar_real; j++)
            fprintf(fp, "%lf", best_ever.xreal[j]);
        if (nvar_bin > 0)
        {
            fprintf(fp, "\nBest_ever String = ");
            writechrom(best_ever.chrom, fp);
        }
        fprintf(fp, "\nConstraint value:");
        for (j=0; j < nc; j++)
            fprintf(fp, "%lf", best_ever.cons[j]);
        fprintf(fp, "| Overall penalty: %lf", best_ever.penalty);
    }
    else
        fprintf(fp, "No feasible solution found!\n");
    fprintf(fp, "\n=====");
    fprintf(fp, "\n\n");
}
app_report();
}
/*=====
Releases the memory for all mallocs
=====*/
free_all()
{
    int i;

```

```

if (nvar_bin > 0)
{
    for(i = 0; i < pop_size; i++)
    {
        free(oldpop[i].chrom);
        free(newpop[i].chrom);
    }
    free(best_ever.chrom);
    free(current_best.chrom);
}
free(oldpop);
free(newpop);
app_free();
}
/*=====
MAIN PROGRAM ;
=====*/
main()
{
    FILE *fp_out, *fp_rep, *fp_plot; /* File pointer for output file */
    int runno=0, k;
    POPULATION temp; /* A temporary pointer of population */
    /*-----*/
    /* Program starts here : */
    /*-----*/
    input_parameters();
    fp_out = fopen("result.out","w+");
    fp_rep = fopen("report.out","w");
    fp_plot= fopen("plot.out","w");
    select_memory();
    initreport(fp_out);
    for (run = 1; run <= maxrun; run++)
    {
        printf("\nRun No. %d : Wait Please .....",run);
        fprintf(fp_out,"\nRun No. %d ",run);
        seed = basic_seed + (1.0-basic_seed)*(double)(run-1)/(double)maxrun;
        if (seed > 1.0) printf("\n Warning !!! seed number exceeds 1.0");
        gen_no = 0;
        initialize();
        statistics(gen_no);
        report(fp_rep,fp_out,fp_plot,0);
        for(gen_no = 1; gen_no <= max_gen; gen_no++)
        {
            generate_new_pop();
            temp = oldpop;
            oldpop = newpop;
            newpop = temp;
            statistics(gen_no);
            report(fp_rep,fp_out,fp_plot,gen_no);
        };
        /* One GA run is over */
        free_all();
    } /* for loop of run */
    fclose(fp_out); fclose(fp_rep); fclose(fp_plot);
    app_closure();
    printf("\n Results are stored in file 'result.out', 'report.out', and 'plot.out'\n");
}
/****** End of Main Program *****/
/*----- */
/* random.c - contains random number generator and related */

```

```

/* utilities, */
/* Source : sga.c (c) E.Goldberg 1986
/*----- */
/* variables are declared static so that they cannot */
/* conflict with names of other global variables in other */
/* files. See K&R, p 80, for scope of static */
static double oldrand[55]; /* Array of 55 random numbers */
static int jrand; /* current random number */
advance_random()
/* Create next batch of 55 random numbers */
{
    int j1;
    double new_random;
    for(j1 = 0; j1 < 24; j1++)
    {
        new_random = oldrand[j1] - oldrand[j1+31];
        if(new_random < 0.0) new_random = new_random + 1.0;
        oldrand[j1] = new_random;
    }
    for(j1 = 24; j1 < 55; j1++)
    {
        new_random = oldrand[j1] - oldrand[j1-24];
        if(new_random < 0.0) new_random = new_random + 1.0;
        oldrand[j1] = new_random;
    }
}
int flip(prob)
/* Flip a biased coin - true if heads */
double prob;
{
    double randomperc();
    if(randomperc() <= prob)
        return(1);
    else
        return(0);
}
randomize()
/* Get seed number for random and start it up */
{
    int j1;
    for(j1=0; j1<=54; j1++) oldrand[j1] = 0.0;
    jrand=0;
    warmup_random(seed);
}
double randomperc()
/* Fetch a single random number between 0.0 and 1.0 - */
/* Subtractive Method . See Knuth, D. (1969), v. 2 for */
/* details.Name changed from random() to avoid library */
/* conflicts on some machines */
{
    jrand++;
    if(jrand >= 55)
    {
        jrand = 1;
        advance_random();
    }
    return((double) oldrand[jrand]);
}
int rnd(low, high)
/* Pick a random integer between low and high */

```

```

int low,high;
{
    int i;
    double randomperc();
    if(low >= high)
        i = low;
    else
    {
        i = (randomperc() * (high - low + 1)) + low;
        if(i > high) i = high;
    }
    return(i);
}
double rndreal(lo ,hi)
/* real random number between specified limits */
double lo, hi;
{
    return((randomperc() * (hi - lo)) + lo);
}
warmup_random(random_seed)
/* Get random off and running */
double random_seed;
{
    int j1, ii;
    double new_random, prev_random;
    oldrand[54] = random_seed;
    new_random = 0.000000001;
    prev_random = random_seed;
    for(j1 = 1 ; j1 <= 54; j1++)
    {
        ii = (21*j1)%54;
        oldrand[ii] = new_random;
        new_random = prev_random-new_random;
        if(new_random<0.0) new_random = new_random + 1.0;
        prev_random = oldrand[ii];
    }
    advance_random();
    advance_random();
    advance_random();
    jrand = 0;
}
/*-----*/
/* Files for tournament selection : */
/* Source : sga.c (c) E.Goldberg */
/*-----*/
select_memory()
{
    unsigned nbytes;
    if(tourneysize > pop_size)
    {
        printf("FATAL: Tournament size (%d) > pop_size (%d)\n",
            tourneysize,pop_size);
        exit(-1);
    }
}
preselect_tour()
{
    reset1();
    tourneypos = 0;
}

```



```

int tour_select()
{
    int pick, winner, i;
    /* If remaining members not enough for a tournament, then reset list */
start_select :
    if((pop_size - tourneypos) < tourneysize)
    {
        reset1();
        tourneypos = 0;
    }
    /* Select tourneysize structures at random and conduct a tournament */
    winner=tourneylist[tourneypos];
/* Added by RBA */
    if( winner < 0 || winner > pop_size-1) {
        printf("\n Warning !! ERROR1");
        printf(" tourpos = %d",tourneypos);
        printf(" winner = %d",winner);
        preselect_tour();
        goto start_select; }

    for(i=1; i<tourneysize; i++)
    {
        pick=tourneylist[i+tourneypos];
/* Added by RBA */
        if (pick < 0 || pick > pop_size-1) { preselect_tour();
            printf("\n Warning !! ERROR2");
            goto start_select; }

            // case 1:
            if (oldpop[winner].penalty > oldpop[pick].penalty) winner = pick;
            else if ((oldpop[winner].penalty <= 0.0) && (oldpop[pick].penalty <= 0.0))
            {
                if(MINM * oldpop[pick].obj < MINM * oldpop[winner].obj) winner=pick;
            }
        }

        /* Update tourneypos */
        tourneypos += tourneysize;
        return(winner);
    }
double distanc(one,two)
    int one,two;
{
    int k;
    double sum;
    sum = 0.0;
    for (k=0; k<nvar_bin; k++)
        sum += square((oldpop[one].xbin[k]-oldpop[two].xbin[k])/(xbin_upper[k]-xbin_lower[k]));
    for (k=0; k<nvar_real; k++)
        sum += square((oldpop[one].xreal[k]-oldpop[two].xreal[k])/(xreal_upper[k]-xreal_lower[k]));
    return (sqrt(sum/(nvar_bin + nvar_real)));
};
int tour_select_constr()
{
    int pick, winner, i, minus=0, rand_pick, rand_indv, flag, indv;
    /* If remaining members not enough for a tournament, then reset list */
start_select :
    if((pop_size - tourneypos) < tourneysize)
    {
        reset1();
        tourneypos = 0;
    }
}

```

```

}
/* Select tourneysize structures at random and conduct a tournament */
winner = tourneylist[tourneypos];
/* Added by RBA */
if( winner < 0 || winner > pop_size-1)
{
printf("\n Warning !! ERROR1");
printf(" tourpos = %d",tourneypos);
printf(" winner = %d",winner);
preselect_tour();
goto start_select;
}
for(i=1; i<tourneysize; i++)
{
pick = tourneylist[i+tourneypos];
if((oldpop[winner].penalty>0.0) && (oldpop[pick].penalty<=0.0))
winner = pick;
else if((oldpop[winner].penalty>0.0)&&(oldpop[pick].penalty>0.0))
{
if(oldpop[pick].penalty < oldpop[winner].penalty)
winner=pick;
}
else if((oldpop[winner].penalty<=0.0)&&(oldpop[pick].penalty<=0.0))
{
if(distanc(winner,pick) < sigma_share)
{
if (MINM * oldpop[pick].obj < MINM * oldpop[winner].obj)
winner=pick;
}
else
{
minus = -1;
for (indv = flag = 0; indv<critical_size && flag==0; indv++)
{
rand_indv = rd(0,pop_size-1);
rand_pick = tourneylist[rand_indv];
if(oldpop[rand_pick].penalty <= 0.0)
{
if(distanc(winner,rand_pick) < sigma_share)
{
flag = 1;
if (MINM * oldpop[rand_pick].obj < MINM * oldpop[winner].obj)
winner=rand_pick;
}
}
}
}
}
}
if (pick < 0 || pick > pop_size-1)
{
preselect_tour();
printf("\n Warning !! ERROR2");
goto start_select;
}
}
/* Update tourneypos */
tourneypos += tourneysize + minus;
return(winner);
}

```

```

reset1()
/* Name changed from reset because of clash with lib. function - RBA */
/* Shuffles the tourneylist at random */
{
    int i, rand1, rand2, temp_site;
    for(i=0; i<pop_size; i++) tourneylist[i] = i;
    for(i=0; i < pop_size; i++)
    {
        rand1= rnd(0,pop_size-1);
        rand2= rnd(0,pop_size-1);
        temp_site = tourneylist[rand1];
        tourneylist[rand1]=tourneylist[rand2];
        tourneylist[rand2]=temp_site;
    }
}
/***** APPLICATION ORIENTED ROUTINES *****/
/**** Change these routines for your particular application *****/
input_app_parameters()
/* Input your application dependent parameters here and put the
output in global variables */
{
}
app_computation()
/* this routine should contain any application-dependent computations */
/* that should be performed before each GA cycle.
called by generate_new_pop */
{
}
app_free()
/* application dependent free() calls, called by free_all() */
{
}
app_initialize()
/* application dependent initialization routine called by initialize() */
{
}
app_initreport()
/* Application-dependent initial report called by initreport() */
{
}
app_report()
/* Application-dependent report, called by report() */
{
}
app_statistics()
/* Application-dependent statistics calculations called by statistics() */
{
}
app_closure()
/* Application-dependent work which should be done before closure of
the main program. called by main() */
{
}
/*****
OBJECTIVE FUNCTION ( Supposed to be minimized) :
Change it for different applications
******/
void objective(indv)
INDIVIDUAL *indv;
{

```

```

int i;
double term1,term2, term3, pi, your_func;
double g[MAXCONSTR], gsum, x[2*MAXVECSIZE];
// if (indv == NULL) error_ptr_null("x in objective()");
for (i=0; i < nvar_bin; i++)
    x[i] = indv->xbin[i];
for (i=nvar_bin; i < nvar_bin+nvar_real; i++)
    x[i] = indv->xreal[i-nvar_bin];
#ifdef prob1
    MINM = 1; // for maximization use -1
    term1 = (x[0]*x[0]+x[1]-11.0)*(x[0]*x[0]+x[1]-11.0);
    term2 = (x[0]+x[1]*x[1]- 7.0)*(x[0]+x[1]*x[1]- 7.0);
    term3 = term1+term2;
    your_func = term3;
    nc = 1;
    // add normalized constraints here
    g[0] = (square(x[0]-5.0) + square(x[1]))/26.0 - 1.0;
#endif
#ifdef can
    MINM = 1;
    pi = 4.0 * atan(1.0);
    term3 = pi * x[0] * x[0]/2.0 + pi * x[0] * x[1];
    your_func = term3;
    nc = 1;
    g[0] = (pi * x[0] * x[0] * x[1]/4.0 - 400.0)/400.0;
#endif

#ifdef prob2
    MINM = 1;
    term1 = 5*(x[0] + x[1] + x[2] + x[3]);
    for (i = 0; i<4; i++)
        term1 += -5*x[i]*x[i];
    for (i = 4; i<=12; i++) term1 += -x[i];
    your_func = term1;
    nc = 9;
    g[0] = (10 - 2*(x[0] + x[1]) - x[9] - x[10] )/10;
    g[1] = (10 - 2*(x[0] + x[2]) - x[9] - x[11] )/10;
    g[2] = (10 - 2*(x[1] + x[2]) - x[10] - x[11] )/10;
    g[3] = x[0] - x[9]/8.0;
    g[4] = x[1] - x[10]/8.0;
    g[5] = x[2] - x[11]/8.0;
    g[6] = x[3] + 0.5*x[4] - 0.5*x[9];
    g[7] = x[5] + 0.5*x[6] - 0.5*x[10];
    g[8] = x[7] + 0.5*x[8] - 0.5*x[11];
#endif

#ifdef yours // define `yours' in the beginning of the code
    MINM = 1; // use -1 for maximization
    // Put your function here
    nc = 0;
    // Put your constraints here
#endif
indv->obj = your_func;
for (i=0, gsum=0.0; i<nc; i++)
{
    indv->cons[i] = g[i];
    if (g[i] < 0.0) gsum += -1.0 * g[i];
}
indv->penalty = gsum;
}
/***** END OF FILE *****/

```

C ANEXO VALORES SOSTENIBILIDAD

Nº	GRUPO	CODIGO	PARTIDA DE OBRA	UD	€	CO ₂ (kg)	MJ
1	SANEAMIENTO. TUBERÍAS	AA01	Tubería PVC color GRIS de 250 mm de diámetro nominal, de 10 bar de presión, unión elástica con anilla elastomérica de estanqueidad, según la norma UNE-EN 1452-2, con grado de dificultad medio y colocado en el fondo de la zanja.	m	110,71	45,24	293,63
2		AA02	Tubería PVC color Teja de 250 mm de diámetro nominal, de 10 bar de presión, unión elástica con anilla elastomérica de estanqueidad, según la norma UNE-EN 1452-2, con grado de dificultad medio y colocado en el fondo de la zanja	m	111,61	47,74	296,10
3		AA03	Tubería de polietileno PE-HD 100 de 160 mm de diámetro nominal, de 10 bar de presión nominal, serie SDR 17, UNE-EN 12201-2, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	64,29	32,54	214,56
4		AA04	Tubería Polipropileno PP-R de diámetro de 140x19,2 mm, serie S 3,2 según UNE-EN ISO 15874-2, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	70,46	37,59	254,59
5		AA05	Tubería Poliester reforzado con fibra de vidrio laminado de 300 mm de diámetro nominal unido con resina y láminas de fibra de vidrio colocado en el fondo de la zanja.	m	180,82	75,73	454,1
6		AA06	Tubería de amiantocemento para saneamiento bajo acera o calzada prevista, compuesta por un tubo de D=400 mm., colocados en fondo de zanja de 70 cm. de ancho y 180 cm. de profundidad, incluyendo excavación de zanjas y relleno con productos de excavación seleccionados y compactados manualmente los 90 cm incluso parte proporcional de pozos de registro y uniones.	m	246,72	389,52	3841,04
7		AA07	Tubería hormigón en masa de D=30cm fabricada con hormigón en masa HM-20/P/20/I/a de resistencia característica 20N/mm ² , consistencia plástica y tamaño máximo del árido 20mm para ambiente de exposición tipo I/a sobre solera de 10cm, incluso transporte, vertido, vibrado y curado del hormigón.	m	56,71	53,25	371,94
8		AA08	Tubería Hormigón armado de 400mm de diámetro nominal clase 3, según ASTM C 76 con unión de campana y anilla elastomérica colocado en zanja, incluso transporte, vertido, vibrado y curado del hormigón.	m	42,42	150,41	1361,14
9		AA09	Tubería de gres	m			
10		AA10	Tubería Hormigón con camisa de chapa de acero de 90x160cm, rejuntado interiormente con mortero de cemento 1:4, sobre solera de 25cm, recubierto hasta 2/3 del tubo y argollado con hormigón en masa HM-20/P/20/I.	m	337,11	466,13	4016,28
11		AA11	Tubería fundición dúctil de diámetro nominal interior 250mm, según la norma ISO 2531, unión de campana con anilla elastomérica y contrabrida de estanqueidad, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	144,69	104,74	1301,4
12	SANEAMIENTO. POZOS REG.	AB01	Pozo de registro con anillos prefabricados de hormigón en masa con un diámetro interior de 80 cm. y una altura total de pozo de 1,1 m., formado por cubeta	ud	140,26	402,24	3752,08

			base de pozo de 1,15 m. de altura sobre solera de hormigón HNE-20 N/mm ² ligeramente armada, anillos de 1 metro de altura, y cono asimétrico de remate final de 60 cm. de altura, incluso sellado del encaje de las piezas machiembradas, recibido de pates y tapa de hormigón de 60 cm.				
13		AB02	Pozo de registro de polietileno de 160cm de diámetro interior y altura total de pozo de 1,2m.	ud	50,21	98,24	860,04
14		AB03	Pozo de registro de obra de fábrica de hormigón de 100cm de diámetro y 3,5m de profundidad, con solera de hormigón en masa HM-20/P/20/l, de 15cm de espesor con media caña para tubo de diámetro 40 cm, pared de ladrillo calado de 14cm de grosor, recubierto con mortero, construcción y tapa de fundición gris de 70cm de diámetro y escalones de hierro de 200x200x200mm.	ud	1462,02	1340,22	13239,5
15		AB04	Pozo de registro de obra de fábrica de ladrillo de 90cm de diámetro y 3m de profundidad, con solera de hormigón en masa HM-20/P/20/l, de 15cm de espesor con media caña para tubo de diámetro 40 cm, pared de ladrillo calado de 14cm de grosor, recubierto con mortero, construcción y tapa de fundición gris de 75cm de diámetro y escalones de hierro de 200x200x200mm.	ud	1286,42	1124,07	11247,34
16		AB05	Pozo de registro de hormigón en masa in situ con un diámetro interior de 100 cm. y una altura total de pozo de 2,6 m., formado por cubeta base de pozo de 1,15 m. de altura sobre solera de hormigón HNE-20 N/mm ² ligeramente armada, anillos de 1 metro de altura, y cono asimétrico de remate final de 60 cm. de altura, incluso sellado del encaje de las piezas machiembradas, recibido de pates y tapa de hormigón de 60 cm.	ud	361,04	1412,21	14001,62
17		AB06	Pozo de registro de poppropileno de 120cm de diámetro interior y altura total de pozo de 1,2m	ud	41,04	80,27	712,51
18	SANEAMIENTO. ARQUETAS	AC01	Arqueta de hormigón prefabricado formada por tres cuerpos, sin perfil lateral, de 204x500mm y entre 930 y 1200mm de altura, para acoplar a canales de 150mm de anchura, con reja de acero galvanizado nervada clase A15 según la norma UNE-EN 1433, fijada con valla a la arqueta, colocada sobre base de hormigón en solera de 100mm de grosor y paredes de 100mm de grosor.	ud	124,24	63,03	675,29
19		AC02	Arqueta de registro de ladrillo para cruces de calzada para red de alumbrado público, de 40x40x60 cm., totalmente terminada.	ud	53,96	50,27	512,03
20		AC03	Arqueta de hormigón in situ de 38x38x55cm con paredes de 10cm de grosor de hormigón en masa HM-20/P/20/l, resistencia característica 20N/mm ² , consistencia plástica, tamaño máximo del árido 20mm para ambiente de exposición tipo I y solera de ladrillo calado sobre lecho de arena, incluso transporte, vertido, vibrado y curado del hormigón.	ud	65,68	52,05	545,05
21		AC04	Arqueta de PVC de 600x600mm de paso libre, apoyada, fijada con tornillos y colocada con mortero	ud	87,08	35,12	342,08
22		AC05	Arqueta de polietileno de 600x600mm de paso libre, apoyada, fijada con tornillos y colocada con mortero	ud	75,38	31,24	309,32
23		AC06	Arqueta de Acero de 400x400mm de paso libre, apoyada, fijada con tornillos y colocada con mortero.	ud	249,81	43,6	763,43
24		AC07	Arqueta de fundición dúctil de 600x600mm de paso libre y clase B125 según norma UNE-EN 124, colocada con mortero	ud	116,64	75,76	870,36
25	SANEAMIENTO. IMBORNALES	AD01	Imbornal 90x50x50 cm. de hormigón prefabricado,	ud	76,61	58,62	596,21

			para recogida de aguas pluviales, sobre solera de hormigón HNE-20/P/20 N/mm ² de 10 cm. de espesor y recibido con mortero de cemento y arena de río M 5 según UNE-EN 998-2, totalmente instalado, según CTE/DB-HS 5.				
26		AD02	Imbornal de Fábrica de ladrillo cerámico de dimensiones 90x45x45 cm para recogida de aguas pluviales colocado.	ud	61,21	50,15	512,06
27		AD03	Imbornal 90x50x50 cm. de hormigón in situ , para recogida de aguas pluviales, sobre solera de hormigón HNE-20/P/20 N/mm ² de 10 cm. de espesor y recibido con mortero de cemento y arena de río.	ud	77,86	56,26	551,04
28		AD04	Imbornal de PVC de dimensiones 80x40x40cm para recogida de aguas pluviales colocado	ud	34,53	31,17	312,08
29		AD05	Imbornal de Polietileno de dimensiones 90x50x50cm para recogida de aguas pluviales colocado	ud	17,21	25,42	230,31
30		AD06	Imbornal de polipropileno de dimensiones 90x45x40cm para recogida de aguas pluviales colocado	ud	18,06	26,12	248,23
31		AD07	Imbornal de fundición dúctil de dimensiones 80x45x45cm para recogida de aguas pluviales colocado	ud	41,36	36,48	362,31
32	SANEAMIENTO. TAPAS	AE01	Tapa de hormigón armado HA-25/P/20/IIb , resistencia característica 25 N/mm ² , consistencia plástica, tamaño máximo del árido 20mm para ambiente de exposición IIb, con acero corrugado en redondos B500S, practicable de dimensiones 90x90x6cm y 117kg anclada y colocada, incluso parte proporcional de apeos despuntes, solapes, vertido, vibrado y curado del hormigón.	ud	75,22	264,32	3152,68
33		AE02	Tapa de fundición dúctil para pozo de registro de D=70cm de paso libre y tapa abatible de 145 kg de peso, colocada con mortero.	m	111,17	383,64	4775,9
34	SANEAMIENTO. RELLENOS	AF01	Relleno de hormigón en masa HM-20/P/40/I, de resistencia característica 20N/mm ² , consistencia plástica, tamaño máximo del árido 40 mm, para ambiente de exposición tipo I, vertido desde camión, extendido y vibrado manual con acabado reglado y curado del hormigón.	m ³	93,10	194,87	1143,89
35		AF02	Relleno de arena procedente de cantera con extendido y compactación del material al 95% del PM.	m ³	31,90	31,22	325,69
36		AF03	Relleno de gravacemento SC20 con extendido y compactación al 98% del PM.	m ³	42,90	81,06	545,36
37		AF04	Relleno de árido reciclado adecuado procedente de la excavación, incluido extendido y compactado al 95% del PM.	m ³	22,43	34,38	372,11
38		AF05	Relleno de hormigón HM20/P/40/I con árido reciclado procedente de la excavación y elaborado en planta en obra, colocado con extendidora y compactado al 100% del PM.	m ³	46,56	225,74	1192,99
39		AF06	Relleno con tierra procedente de acopio en la excavación, incluso extendido y compactado al 95% del PM.	m ³	17,22	35,24	375,39
40	AGUA. TUBERÍAS	BA01	Tubería Hormigón con camisa de chapa de acero de 90x160cm, rejuntado interiormente con mortero de cemento 1:4, sobre solera de 25cm, recubierto hasta 2/3 del tubo y argollado con hormigón en masa HM-20/P/20/I de 20 N/mm ² de resistencia característica, consistencia plástica y tamaño máximo del árido 20mm para ambiente e exposición tipo I.	m	337,11	466,13	4016,28
41		BA02	Tubería de fundición dúctil de 250mm de diámetro nominal interior, según la norma ISO 2531, unión de campana con anilla elastomérica para gua y contrabrida de estanqueidad, con grado de dificultad medio y	m	144,69	104,74	1301,4

			colocada en el fondo de la zanja.				
42		BA03	Tubería de acero negro con soldadura de 2"1/2 de diámetro, según la norma DIN EN ISO 2440 ST-00, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en el fondo de la zanja.	m	53,97	150,08	11,99
43		BA04	Tubería de polietileno PE 100, de 160mm de diámetro nominal, de 10 bar de presión nominal, serie SDR17, UNE-EN12201-2, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	64,29	32,54	214,56
44		BA05	Tubería de polipropileno PP-R a presión de diámetro 40x6,7 mm, serie S2,5 según UNE-EN ISO 15874-2, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	12,19	10,74	72,74
45		BA06	Tubería de Etileno-propileno de densidad media de 32mm de diámetro nominal exterior, de la serie SDR11, según norma UNE53333, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	9,40	5,71	38,71
	AGUA. RELLENOS			m ³	93,10	194,87	1143,89
46		BB01	Relleno de hormigón en masa HM-20/P/40/I, de resistencia característica 20N/mm ² , consistencia plástica, tamaño máximo del árido 40 mm, para ambiente de exposición tipo I, vertido desde camión, extendido y vibrado manual con acabado reglado y curado del hormigón.				
47		BB02	Relleno de arena procedente de cantera con extendido y compactación del material al 95% del PM.	m ³	31,90	31,22	325,69
48		BB03	Relleno de gravacemento SC20 con extendido y compactación al 98% del PM.	m ³	42,90	81,06	545,36
49		BB04	Relleno de árido reciclado adecuado procedente de la excavación, incluido extendido y compactado al 95% del PM.	m ³	22,43	34,38	372,11
50		BB05	Relleno de hormigón HM20/P/40/I con árido reciclado procedente de la excavación y elaborado en planta en obra, colocado con extendidora y compactado al 100% del PM.	m ³	46,56	225,74	1192,99
51		BB06	Relleno con tierra procedente de acopio en la excavación, incluso extendido y compactado al 95% del PM.	m ³	17,22	35,24	375,39
	RED INCENDIOS. TUBERÍAS			m	5,35	3,08	20,13
52		CA01	Tubería de polietileno de designación PE 40, de 32mm de diámetro nominal, de 6 bar de presión nominal, serie SDR11, UNE-EN 12201-2, conectado a presión, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	13,36	9,24	62,63
53		CA02	Tubería de PVC de 50 mm de diámetro nominal exterior, de 16 bar de presión nominal, encolado, según la norma UNE-EN 1452-2, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	62,27	52,73	650,17
54		CA03	Tubería de fundición dúctil de 100mm de diámetro nominal interior, según la norma ISO 2531, unión de campana con anilla elastomérica de estanqueidad para agua, con grado de dificultad medios y colocado en fondo de zanja.	m	26,42	7,59	101,12
55		CA04	Tubería de acero galvanizado sin soldadura de diámetro nominal 1", según la norma DIN EN ISO 2440 ST-35, roscada con grado de dificultad medio y colocada en fondo de zanja	m			
56		CA05	Tubería de fibrocemento				
	GAS. TUBERÍAS			m	3,32	1,59	10,76
57		DA01	Tubería de polietileno de designación PE 40, de 16mm de diámetro nominal, de 4 bar de presión nominal, serie SD7,4 UNE EN 53333, conectado a presión, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m	21,96	5,03	62,97
58		DA02	Tubería de Acero UNE 10208 de diámetro nominal 1", según la norma DIN EN ISO 2440 ST-35, soldado, con grado de dificultad medio y colocado en fondo de zanja.	m			
59	TELECO.		Canalización con tubo de hormigón prefabricado de	m	52,08	36,01	256,61

	CANALIZ. Y ARQUET.	EA01	D=20cm y dado de recubrimiento de 40x40cm con hormigón HM-20/P/20/I, resistencia característica del hormigón 20N/mm ² , consistencia plástica y tamaño máximo del árido 20mm para ambiente de exposición tipo I, incluso transporte a obra y colocación.				
60		EA02	Canalización zanja de 40x40 cm con medios mecánicos, en suelo de dureza media y posterior relleno con áridos seleccionados procedentes de acopio en obra, incluso extracción, carga, acopio, relleno y compactación al 96% del PM.	m	31,04	14,17	132,81
61		EA03	Tubo PE corrugado flexible de 50mm de diámetro nominal, aislante y no propagador de la llama, resistencia al impacto de 3J, resistencia a compresión de 250N, montado como una canalización enterrada.	m	1,96	3,69	24,98
62		EA04	Tubo rígido de PVC liso de 32mm de diámetro nominal, aislante y no propagador de la llama, con una resistencia al impacto de 3J, resistencia compresión de 250N, de 1,1mm de grosor, con unión encolada y como canalización enterrada.	m	3,08	1,57	10,64
	TELECO. CONDUCTORES	EB01	Conductor cobre sólido de designación UNE RV-K 0,6/1 Kv, unipolar de sección 1x2,5mm ² colocado en tubo rígido de PVC.	m	1,22	0,69	5,84
63		EB02	Conductor aluminio designación UNE VV 0,6/1kV, unipolar de sección 1x25 mm ² .colocado en tubo rígido de PVC.	m	3,53	1,76	18,77
64		EB03	Conductor fibra óptica de 4x7,2mm con recubrimiento ajustado y refuerzo de aramida , con cubierta de PVC .	m	2,62	0,93	9,15
65		EB04	Cable coaxial RG-6 de 75 Ohm de impedancia característica media, con conductor central de cobre de 1,15 mm de diámetro, dieléctrico de polietileno celular, pantalla de cinta de aluminio/polipropileno/aluminio, malla de hilos trenzados de cobre y cubierta exterior de PVC de 6,9 mm de diámetro de color blanco.	m	1,35	1,02	9,84
66		EB05	Conductos cobre estañado 6 mm ² entubado en tubo corrugado D = 32 mm.	m	1,63	1,25	13,42
67		EB06	Conductor Acero recubierto de cobre con aislamiento de poliéster y cinta aluminizada con recubrimiento de PVC .	m	3,71	2,01	19,37
68		EB07	Conductor de acero recubierto de cobre con aislamiento de poliéster y cinta aluminizada con malla acero al 60% y recubrimiento exterior de PVC .	m	4,32	2,54	23,41
69	ELECTRICIDAD. CANALIZACIÓN	FA01	Tubo PVC rígido de 32mm de diámetro nominal, aislante y no propagador de la llama, con una resistencia al impacto de 3J, resistencia a compresión de 250N, de 1,1mm de grosor, con unión encolada y con canalización enterrada.	m	3,08	1,57	10,64
70		FA02	Tubo PE 40 de 16mm de diámetro nominal, aislante y no propagador de la llama con una resistencia al impacto de 3J, resistencia a compresión de 350N de 1,5 mm de grosor, con unión encolada y con canalización enterrada.	m	2,18	3,21	17,85
71		FA03	Tubo acero de acero galvanizado de 25mm de diámetro nominal, resistencia al impacto de 20J, resistencia a compresión de 4000N con unión enchufada y montado superficialmente.	m	5,3	2,44	32,46
72		FA04	Relleno de árido selecciona procedente de la excavación, incluido extendido y compactado al 95% del PM.	m ³	22,43	34,38	372,11
73	ELECTRICIDAD. CONDUCTORES						
74		FB01	Cable de Cobre HDPE de 2x1,5mm ² de sección, tensión nominal 300/500V aislamiento de silicona, pantalla de cinta de aluminio y polietileno de 0,25 mm ² de sección, de color verde, cubierta de polietileno de alta densidad, de color naranja, y con las siguientes características: no	m	2,01	1,19	10

		propagación de la llama, no propagación del incendio, baja emisión de humos opacos, reducida emisión de gases tóxicos, libre de halógenos, nula emisión de gases corrosivos, resistencia al fuego, resistencia a la absorción de agua, resistencia al frío y resistencia a los rayos ultravioleta. Según UNE 211025.				
75	FB02	Cable Cobre esmaltado HDPE multiconductor , tensión nominal 450/750 V, con conductores de cobre recocido y esmaltado, flexible (clase 5), de 2x1,5 mm ² de sección, aislamiento de elastómero reticulado, cubierta exterior de polietileno, de color negro, y con las siguientes características: no propagación de la llama, resistencia a la absorción de agua, resistencia al frío, resistencia a los rayos ultravioleta, resistencia a los agentes químicos, resistencia a las grasas y aceites y resistencia a la abrasión. Según UNE-EN 50525-2-21.	m	1,43	1,21	10,07
76	FB03	Cable Aluminio HDPE unipolar, tensión nominal 0,6/1 kV, de seguridad en caso de incendio (S), con conductor de aluminio, rígido (clase 2), de 1x16 mm ² de sección, aislamiento de polietileno de alta densidad (HDPE), cubierta de material libre de halógenos y con las siguientes características: no propagación de la llama, baja emisión de humos opacos, libre de halógenos, nula emisión de gases corrosivos, resistencia a la absorción de agua, resistencia al frío, resistencia a los rayos ultravioleta, resistencia a los agentes químicos, resistencia a las grasas y aceites y resistencia a los golpes. Según UNE-EN 50525-2-21.	m	1,18	1,17	8,97
77	FB04	Cable eléctrico Cobre LDPE unipolar, de alta deslizabilidad, tensión nominal 450/750 V, con conductor de cobre recocido, flexible (clase 5), de 1x2,5 mm ² de sección, aislamiento de polietileno de baja densidad y con las siguientes características: no propagación de la llama, no propagación del incendio, libre de halógenos y resistencia a la absorción de agua. Según UNE 21031-3.	m	0,82	1,38	9,54
78	FB05	Cable eléctrico Cobre esmaltado LDPE unipolar, de alta deslizabilidad, tensión nominal 450/750 V, con conductor de cobre recocido y esmaltado, flexible (clase 5), de 1x2,5 mm ² de sección, aislamiento de polietileno de baja densidad y con las siguientes características: no propagación de la llama, no propagación del incendio, libre de halógenos y resistencia a la absorción de agua	m	1,75	1,46	9,86
79	FB06	Cable eléctrico Aluminio LDPE+Plomo de tensión nominal entre fases de 72,5 kV, 240mm ² de sección, con conductor de cobre recocido clase2 formado por conductores concéntricos inferiores a 1000mm ² , con pantalla realizada con tubos de aluminio y camisa de plomo y aislamiento de polietileno de alta densidad no propagador de la llama, no propagador del incendio y libre de alógenos.Según IEC 60840 e IEC 62067	m	15,23	23,78	186,35
80	FB07	Cable de Cobre HDPE+Plomo de tensión nominal entre fases de 72,5 kV, 240mm ² de sección, con conductor de cobre recocido clase2 formado por conductores concéntricos inferiores a 1000mm ² , con pantalla realizada con tubos de cobre y camisa de plomo y aislamiento de polietileno de alta densidad no propagador de la llama, no propagador del incendio y libre de alógenos. Según IEC 60840 e IEC 62067	m	16,54	27,56	216,73
81	FB08	Cable Cobre esmaltado HDPE+plomo de tensión nominal entre fases de 72,5 kV, 240mm ² de sección, con conductor de cobre esmaltado clase2 formado por conductores concéntricos inferiores a 1000mm ² , con pantalla realizada con tubos de cobre y camisa de plomo y aislamiento de polietileno de alta densidad no propagador de la llama, no propagador del incendio y libre de alógenos. Según IEC 60840 e IEC 62067.	m	18,89	26,28	213,62

82		FB09	Cable eléctrico Aluminio XLPE+HDPE , tensión nominal 0,6/1 kV, con conductores de aluminio, rígido (clase 2), de 2x4 mm ² de sección, aislamiento de polietileno reticulado y polietileno de alta densidad (XLPE+HDPE), y con las siguientes características: resistencia a la absorción de agua, resistencia al frío y resistencia a los rayos ultravioleta. Según UNE 21030-2.	m	1,13	1,08	8,63
83		FB10	Cable eléctrico unipolar Cobre XLPE+HDPE+Capa , proceso de fabricación del aislamiento mediante triple extrusión en línea catenaria, con reticulación del aislamiento mejorada y capa semiconductor externa extraíble en frío, tipo AL RHZ1-2OL 12/20 kV, tensión nominal 12/20 kV, con conductor formado por cuerda redonda compacta de hilos de aluminio, con barrera contra la propagación longitudinal de la humedad, rígido (clase 2), de 1x95/16 mm ² de sección, capa interna extrusionada de material semiconductor, aislamiento de polietileno reticulado (XLPE), capa externa extrusionada de material semiconductor, separable en frío, barrera contra la propagación longitudinal de la humedad, pantalla de hilos de cobre en hélice con cinta de cobre a contraespira, de 16 mm ² de sección, separador de cinta de polietileno de alta densidad(HDPE).	m	8,84	9,83	105,61
84		FB11	Cable eléctrico unipolar Cobre XLPE+HDPE+Capa semiconductor , proceso de fabricación del aislamiento mediante triple extrusión en línea catenaria, con reticulación del aislamiento mejorada y capa semiconductor externa extraíble en frío, tipo AL RHZ1-2OL 12/20 kV, tensión nominal 12/20 kV, con conductor formado por cuerda redonda compacta de hilos de aluminio, con barrera contra la propagación longitudinal de la humedad, rígido (clase 2), de 1x95/16 mm ² de sección, capa interna extrusionada de material semiconductor, aislamiento de polietileno reticulado (XLPE), capa externa extrusionada de material semiconductor, separable en frío, barrera contra la propagación longitudinal de la humedad, pantalla de hilos de cobre en hélice con cinta de cobre a contraespira, de 16 mm ² de sección, separador de cinta de polietileno de alta densidad(HDPE).	m	9,61	10,42	127,93
85	ALUMBRADO. SOPORTES	GA01	Columna de Fibre de vidrio+poliéster de forma troncocónica de 3,7m de altura con pletina en coronación y base de diámetro nominal de 140mm y 4mm de espesor.	ud	214,27	61,14	600,28
86		GA02	Columna de plancha de acero galvanizado de forma troncocónica de 2,5 m de altura, sin pletina en coronación y con pletina y puerta en base, según la norma UNE-EN 40-5, colocada sobre dado de hormigón.	ud	226,81	192,2	1705,98
87		GA03	Báculo troncocónico de Acero de 5m de altura y 1m de saliente, con brazo y pletina y puerta en base, según la norma UNE-EN 40-5, colocado sobre dado de hormigón.	ud	389,45	426,95	3064,89
88		GA04	Columna de Fundición dúctil de forma troncocónica de 3,6m de altura sin pletina en coronación colocada sobre base hormigón.	ud	189,31	208,62	1980,27
89		GA05	Columna de Hormigón de forma prismática de 15x15cm y 3m de altura anclada a suelo mediante dado de hormigón.	ud	235,27	795,34	7627,65
90		GA06	Columna de Fibra de carbono tubular de 5m de altura formada por un primer tramo de diámetro 205mm y un segundo tramo de diámetro 100mm estriado, puerta en base y anclada sobre dado de hormigón.	ud	1177,14	75,21	762,53
91		GA07	Columna de Madera laminada de forma prismática de 20x20cm y 3,5m de altura esmaltada en 3 capas y anclaje a suelo. Según norma UNE-EN 40	ud	235,14	146,70	1403,07
92		GA08	Columna de Aluminio inyectado , palo en aluminio extrusionado con caja de registro y acabado en antracita,	ud	269,14	210,24	2101,08

			difusor de cristal templado transparente y protección de grado 1.Anclaje a suelo.				
93	ALUMBRADO. LUMINARIA	GB01	Luminaria simétrica de PVC con lámpara de luz mixta de 250W, de precio superior, bastidor de PVC y cúpula reflectora y acoplada a la columna.	ud	156,66	143,97	979,1
94		GB02	Luminaria de Aluminio con difusor esférico y lámpara de incandescencia de 100W, simétrica, de forma esférica y soporte de aluminio y acoplada al soporte.	ud	213,24	51,67	350,5
95		GB03	Luminaria asimétrica para viales con difusor de Polipropileno y lámpara de vapor de mercurio de 50W, de precio alto, cerrada y acoplada a la columna.	ud	126,77	170,67	1160,7
96	ALUMBRADO. SISTEMA ILUM.	GC01	Luminaria simétrica con difusor troncocónico de plástico y lámpara de vapor de sodio a presión alta (VSAP) a 50W, de precio alto con bastidor metálico y cúpula reflectora acoplada al soporte.	ud	202,58	161,5	1098,5
97		GC02	Luminaria asimétrica para viales, sin difusor, y lámpara de vapor de sodio a presión baja (VSBP) de 35 W, de precio alto, abierta y alojamiento para un equipo, acoplada al soporte.	ud	176,64	170,18	1157,7
98		GC03	Iluminación halógena metálica de designación PAR20 de 64mm de diámetro , con casquete E27, de 250 W de potencia máxima y 230 V de tensión de alimentación, con una temperatura de color de 2900K y un grado de rendimiento del color de Ra=100	ud	20,22	15,16	151,6
99		GC04	Luminaria simétrica con difusor troncocónico de plástico y lámpara de vapor de mercurio (VMCC) de 80 W de precio alto, con bastidor metálico y cúpula reflectora y acoplada al soporte.	ud	152,22	84,84	577,03
100		GC05	Iluminación LED de 24W de potencia y 230V de tensión de alimentación con una temperatura de 2700K, 250W de potencia equivalente e índice de reproducción cromática=80.	ud	15	8,42	79,24
101	ACERAS. SUPERFICIE TRANSITO	HA01	Baldosa de hormigón monocapa FACOSA espesor 6 cm. gris, sobre solera de hormigón HM-20 N/mm2. Tmáx. 40 mm. y 10 cm. de espesor, y capa intermedia de arena de río de 5 cm. de espesor, incluso recebado de juntas con arena, compactado de adoquín y remates.	m ²	27,97	100,42	984,73
102		HA02	Acera de adoquín de losa caliza blanca de 50x25x5 cm., sobre solera de hormigón HM-20 N/mm2. Tamaño máximo. 40 mm. y 10 cm. de espesor, incluso enlechado y limpieza.	m ²	67,09	25,13	221,42
103		HA03	Acera adoquín monocapa de hormigón FACOSA espesor 6 cm. color, sobre base de hormigón HM-20 N/mm2. Tmáx. 40 mm. y 10 cm. de espesor, y capa intermedia de arena de río de 5 cm. de espesor, incluso recebado de juntas con arena, compactado del adoquín y remates.	m ²	29,85	106,21	994,82
104		HA04	Acera formada por pavimento continuo de hormigón semipulido, HM-25/P/20 de 15 cm de espesor, y armado con 15 Kg/m3 de fibras metálicas WLS 50/1.05 de COPSA y lámina de polietileno galga 400 entre base compactada y hormigón., i/suministro de hormigón al que se ha incorporado la fibra metálica, extendido, regleado, vibrado y nivelado del hormigón, fratasado mecánico de la superficie, suministro y aplicación de líquido de curado PRECURING-D de COPSA, y aserrado mecánico de las	m ²	24,95	84,23	753,29

			juntas de retracción con disco de diamante encuadrando paños de 6x6 m. Encofrado y desencofrado de las juntas de hormigonado. Sellado de juntas con masilla de poliuretano de elasticidad permanente COPSAFLEX 11-C. Incluso replanteo general del pavimento.				
105		HA05	Acera formada por pavimento continuo de hormigón semipulido, HM-25/P/20 de 15 cm de espesor, y armado con 0.6 Kg/m3 de fibras de polipropileno PREFIB multifilamento de 12 mm. de COPSA y lámina de polietileno galga 400 entre base compactada y hormigón., i/suministro de hormigón al que se ha incorporado la fibra de polipropileno, extendido, regleado, vibrado y nivelado del hormigón, fratasado mecánico de la superficie, suministro y aplicación de líquido de curado PRECURING-D de COPSA, y aserrado mecánico de las juntas de retracción con disco de diamante encuadrando paños de 6x6 m. Encofrado y desencofrado de las juntas de hormigonado. Sellado de juntas con masilla de poliuretano de elasticidad permanente COPSAFLEX 11-C. Incluso replanteo general del pavimento.	m ²	17,86	49,26	486,47
106		HA06	Pavimento con losa caliza tipo "Calatorao" de 5 cm. de grosor, labrada a martillina, sobre solera de hormigón HM-20 N/mm2. Tmáx. 40 mm. y 10 cm. de espesor, i/enlechado y limpieza.	m ²	81,17	27,14	241,52
107		HA06	Pavimento mezcla bituminos en caliente tipo D-12 con espesor de 6cm.	m ²	24,85	85,42	810,49
108		HA07	Pavimento de acera con baldosa de garbancillo de 30x30 cm., sobre solera de hormigón de HM-20 N/mm2. Tmáx. 40 mm. y 10 cm. de espesor, i/enlechado y limpieza.	m ²	35,93	50,21	185,43
109		HA08	Pavimento de acera con canto rodado de tamaño 50/80 mm., sobre solera de hormigón HM-20 N/mm2. Tmáx. 40 de 10 cm. de espesor, recibido con mortero de cemento y arena de río M 5 según UNE-EN 998-2, incluso enlechado y limpieza.	m ²	67,52	24,37	235,27
110	ACERAS. BORDILLO	HB01	Acera de fundición de 20mm de grosor y 200mm de altura, incluidos elementos de anclado soldados y colocados sobre base de hormigón en masa HM-20/P/40/I.	m	39,79	4,26	41,53
111		HB02	Acera recta de piedra natural granítica escuadrada de 12x30cm, colocada sobre explanada compactada y rejuntada con mortero.	m	42,89	2,2	18,62
112		HB03	Acera recta de piezas de hormigón prefabricado con sección normalizada para viandantes A2 de 20x10cm, para ambiente de exposición climática húmedo, clase resistente a la abrasión H y clase resistente a flexión T(R-5MPa), según UNE-EN 1340, colocada sobre explanada compacta y rejuntada con mortero.	m	20,57	11,87	122,54

113	ACERAS. RIGOLA	HC01	Rigola de hormigón prefabricada con hormigón HM-30/P/20/I (resistencia característica 30N/mm ²) consistencia plástica, tamaño máximo del árido 20mm para ambiente de exposición tipo I, de dimensiones 20x30 y acabado fratasado.	m	7,51	16,2	167,25
114		HC02	Rigola de hormigón in situ HM-20/S/40/I, (resistencia característica 20N/mm ²), de consistencia seca, tamaño máximo del árido 40mm, ambiente de exposición normal, incluso vertido, extendido vibrado y curado del hormigón.	m ³	99,58	202,87	1189,62
115		HC03	Rigola de piedra natural de 20cm de anchura con adoquines de piedra granítica de 10x8x10cm colocados con mortero de cemento 1:6, elaborado en obra con hormigonera de 165l.	m	25,9	3,34	21,61
116		HC04	Rigola de fundición de dimensiones 20mm de espesor y 300mm de altura, incluidos elementos de anclaje soldados.	m	28,47	4,26	41,53
117	BANDA APARCAMIENTO	IA01	Pavimento de hormigón en masa , vibrado, de resistencia característica HM-20 N/mm ² ., tamaño máximo 40 mm. y consistencia plástica, en pavimento de aparcamiento en calzada, acabado con textura superficial impermeable.	m ³	103,34	214,12	2139,25
118		IA02	Pavimento de hormigón drenante HM-30/B/30/I (resistencia característica 30 N/mm ²) consistencia blanda, tamaño máximo del árido 30mm, vertido desde camión incluso vibrado mecánico, acabado reglado y curado del hormigón.	m ³	110,75	266,92	1449,67
119		IA03	Calzada de hormigón impreso "in situ" de 15 cm de espesor formado por hormigón HM-20/P/20 N/mm ² . y RODASOL impreso de COPSA.	m ²	25,41	142,16	1263,75
120		IA04	Pavimento de aglomerado asfáltico de composición densa D-12 con granulado granítico y betún asfáltico de penetración, estendido y compactado al 98% del Marshall	t	71,11	299,56	2110,09
121		IA05	Pavimento de aglomerado asfáltico reciclado de composición densa D-12 con granulado granítico estabilizado con emulsión bituminosa catiónica C60B4 ADH	t	32,53	85,24	796,38
122		IA06	Pavimento de adoquín de hormigón prefabricado en aparcamiento y calzada tráfico ligero, con cualquier trabazón, sobre explanación con índice CBR superior a 10, con adoquín monocapa de hormigón FACOSA espesor 6 cm. gris, sobre base de zahorra natural de 20 cm., y capa intermedia de arena de río de 4 cm. de espesor, incluso recebado de juntas con arena, compactado de adoquín, remates y apisonado de base.	m ²	17,40	100,78	962,15
123		IA07	Pavimento para aparcamiento o zonas peatonales a base de adoquín de granito nacional "Quintana" o similar, de piezas de 10x20 cm. ó 13x13 cm., grueso 8 cm., terminación rugosa, colocados con mortero de cemento y arena de río M 10 según UNE-EN 998-2, sin incluir solera o base de asiento.	m ²	56,41	24,78	236,82
124	CALZADA. EXPLANADA	JA01	Suelo tolerable procedente de préstamo en obra para base y explanada, incluso transporte desde acopio en obra, vertido y compactación al 97% del PM.	m ³	11,58	27,43	268,92
125		JA02	Suelo adecuado procedente de préstamo en obra para explanada, incluso transporte desde acopio en obra, vertido y compactación al 97% del PM.	m ³	13,65	35,24	375,39
126		JA03	Suelo seleccionado tipo 2 procedente de cantera para base de calzada, incluso transporte desde cantera, vertido	m ³	16,24	34,38	372,11

			y compactación al 97% del PM.				
127		JA04	Suelo seleccionado 3 procedente de cantera para base de calzada, incluso transporte desde cantera, vertido y compactación al 97% del PM	m ³	17,78	35,41	376,21
128		JA05	Suelo estabilizado 1 con cemento CEMI para base de calzada procedente de préstamo incluso disgregación, transporte mezclado, vertido, curado, riego y compactación al 98%PM.	m ³	24,52	56,15	561,29
129		JA06	Suelo estabilizado 2 con cemento CEMII/A-Q 32,5 para base de calzada procedente de préstamo incluso disgregación, transporte mezclado, vertido, curado, riego y compactación al 98%PM	m ³	27,38	62,28	684,42
130		JA07	Suelo estabilizado 3 CEMII/A-S 32,5 para base de calzada procedente de préstamo incluso disgregación, transporte mezclado, vertido, curado, riego y compactación al 98%PM	m ³	30,14	76,12	798,73
131		JA08	Base de hormigón en masa , vibrado, de resistencia característica HM-20 N/mm ² ., tamaño máximo 40 mm y consistencia plástica, acabado con textura superficial ranurada.	m ³	55,18	194,86	1143,89
132	CALZADA. BASE	KA01	Calzada M.B.C. tipo D-20 con espesor de 6cm, de granulado granítico y betún asfáltico de penetración, extendido y compactación al 98% del ensayo Marshall.	t	56,37	299,56	2110,09
133		KA02	Calzada de MBC tipo S-12 con con espesor de 15cm, de granulado calcáreo y betún asfáltico de penetración, extendido y compactación al 98% del ensayo Marshall.	t	54,24	284,46	2104,62
134		KA03					
135		KA04	Base de macadam ordinario, con árido calizo de machaqueo de tamaño 5/7 cm., puesto en obra por medios mecánicos, compactado y consolidado, incluso recebado, medido sobre perfil.	m ³	41,02	36,82	386,21
136	CALZADA. FIRME, RODADURA	LA01	Calzada para tráfico T-4 y explanada E-2 correspondiente a la sección tipo 423 del catálogo de secciones de firmes de la Instrucción 6.1-I.C. y 6.2-I.C. formada por: 22 cm de suelo-cemento, riego de imprimación con emulsión ECL-I y 8 cm de MBC D-12 , i/p.p. de betún asfáltico 60/70 y filler de aportación incluso extendido y compactado de cada capa, totalmente terminada.	m ²	72,91	309,56	2712,14
137		LA02	Pavimento de MBC de composición semidensa S-20 con granulado calcáreo, betún asfáltico de penetración 60/70 y filler calizo de aportación, incluso extendido y compactación al 98% del ensayo Marshall.	t	68,62	299,21	2106,75
138		LA03	Pavimento de MBC de composición gruesa G-20 con granulado calcáreo, betún asfáltico de penetración 60/70 y filler calizo de aportación, incluso extendido y compactación al 98% del ensayo Marshall	t	62,59	284,27	2086,73
139		LA04	Pavimento de mezcla bituminosa discontinua en caliente de composición M-8 con granulado granítico y betún modificado, en capa de tránsito de 2 cm de espesor.	m ²	3,54	15,62	109,41
140		LA05	Pavimento de mezcla bituminosa discontinua en caliente de composición F-8 con granulado granítico y betún modificado, en capa de tránsito de 2 cm de espesor	m ²	3,66	15,64	110,28
141		LA06	Pavimento de MBF de composición densa D-20 con granulado granítico y betún asfáltico de penetración 60/70 y filler calizo de aportación, incluso extendido y compactación al 98% del ensayo Marshall	t	58,08	322,21	2263,92
142		LA07	Pavimento de 20 cm. de espesor con hormigón en masa , vibrado, de resistencia característica HM-20 N/mm ² ., tamaño máximo 40 mm. y consistencia plástica, acabado con textura superficial ranurada, más	m ²	78,52	247,32	2251,12

			terminación con pavimento de M.B.C. tipo D-12 de espesor 6 cm. + paquete de zahorras naturales compactadas de espesor 25 cm., para calzadas.				
143		LA08	Pavimento de Gravacemiento de grano medio de 60mm de grosor colocado con mortero de cemento 1:6..	m ²	153,67	104,21	1056,82
		LA09	Capa amortiguadora de aglomerado sintético para pavimento multicapa a base de resinas sintéticas y partículas de caucho y pintura acrílica, de aplicación manual, y una dotación de 1,8kg/m ² .	m ²	21,24	23,61	159,88
144		LA10	Pavimento de césped artificial de fibras de poliolefina de altura no superior a 10mm, colocado sobre cinta adhesiva para pavimentos textiles y adhesivo de aplicación unilateral de poliuretano, con lastre de arena de sílice.	m ²	45,36	12,92	87,87
145		LA11	Pavimento de Zahorra artificial de grano medio, de 25cm de espesor incluso extendido y compactación al 98% del P.M.	m ²	38,45	30,43	336,37
146		LA12	Pavimento de macadam ordinario, con árido calizo de machaqueo de tamaño 5/7 cm., puesto en obra por medios mecánicos, compactado y consolidado, incluso recebado, medido sobre perfil.	m ³	41,02	36,82	386,21
147		LA13	Pavimento de MB drenante con granulado calcáreo, betún asfáltico de penetración 60/70 y filler calizo de aportación, incluso extendido y compactación al 98% del ensayo Marshall.	m ²	61,42	216,75	2031,76
148		LA14					
149							
150	SEÑALIZACIÓN VERTICAL	MA01	Poste acero para señal vertical, colocado	ud	21,75	19,68	196,48
151		MA02	Poste fundición gris para señal vertical, colocado	ud	18,52	17,21	187,61
152		MA03	Poste acero galvanizado para señal vertical, colocado.	ud	23,94	19,72	201,12
153		MA04	Poste aluminio para señal vertical, colocado	ud	17,42	16,57	162,57
154		MA05	Poste polietileno para señal vertical, colocado	ud	14,39	11,24	104,63
155		MA06	Poste madera para señal vertical, colocado	ud	17,64	9,21	84,71
156		MA07	Poste de fibra de vidrio para señal vertical, colocado	ud	22,19	8,12	80,49
157		MA08	Poste de fibra de carbono para señal vertical, colocado	ud	46,42	9,21	87,52
158	SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL	NA01	Superficie realmente pintada, con pintura reflectante y microesferas de vidrio , con máquina autopropulsada.	m ²	11,65	6,88	48,96
159		NA02	Superficie realmente pintada, con pintura fotoluminiscente , con máquina autopropulsada.	m ²	15,51	5,21	40,62
160		NA03	Superficie realmente pintada, con pintura de poliuretano , con máquina autopropulsada.	m ²	9,62	4,02	35,21
161		NA04	Superficie realmente pintada, con pintura alcídica , con máquina autopropulsada	m ²	12,27	6,94	52,21
162		NA05	Superficie realmente pintada, con pintura al agua , con máquina autopropulsada	m ²	10,04	4,85	45,64