

MODELADO DE UNA VÁLVULA DE EXPANSIÓN ELECTRÓNICA DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN Y AIRE ACONDICIONADO POR TÉCNICAS DE SUBESPACIOS

A. M. RAMÍREZ¹, PROF. DR. G. BARRETO¹, PROF. DR. L. F. DE MOURA²

1Departamento de Máquinas, Componentes y Sistemas Inteligentes, DMCSI. Facultad de Ingeniería Eléctrica y de Computación. Universidad Estatal de Campinas-UNICAMP. Brasil.

anitarka@gmail.com, gbarreto@dmcsi.fee.unicamp.br

2Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, DETF. Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Estatal de Campinas-UNICAMP. Brasil.

felipe@fem.unicamp.br

En este trabajo se presenta el modelado de una válvula de expansión electrónica modificada a partir de datos experimentales de entradas y salidas, con el objetivo de tener un sistema de refrigeración y aire acondicionado eficiente, combinando electrónica de potencia y computación como una solución para conservación de energía. El modelado y la validación son realizadas usando una implementación computacional del algoritmo N4SID, la cual cuenta con la posibilidad de elegir entre una combinación con el algoritmo MOESP o CVA en uno de sus pasos intermedios.

Palabras-clave: Identificación de Sistemas Multivariados, Modelado Matemático Multivariado, Modelos en Espacio de Estado, Métodos de Subespacios, Algoritmos N4SID, MOESP y CVA, Sistemas de Refrigeración y Aire Acondicionado, Válvula de Expansión Electrónica.

1. Introducción

Un sistema de refrigeración y aire acondicionado tiene como objetivo enfriar un ambiente de forma controlada con el fin de viabilizar procesos, procesar y conservar productos o simplemente efectuar climatización para el confort térmico. Esto es posible a través de un ciclo termodinámico donde el calor es extraído del ambiente a ser refrigerado y enviado para el ambiente externo. Los ciclos de refrigeración principales son por absorción, magnetismo o compresión de vapor. El sistema de refrigeración en el cual fueron realizados los ensayos y obtenidos los datos de este trabajo utiliza como principio termodinámico la compresión de vapor.

La eficiencia energética puede ser obtenida a través de cambios en cada uno de estos subsistemas usando procedimientos de control y gerenciamiento total de los equipamientos. Por ejemplo, en el ciclo de refrigeración por compresión de vapor la eficiencia energética puede ser adquirida de forma directa con el control de ventiladores y compresores y de forma indirecta con el control de la válvula de expansión. Operando estos equipamientos próximos de su límite de eficiencia termodinámica es posible conseguir una reducción energética, sin embargo, ésta no se garantiza maximizando la eficiencia de los componentes individuales. Como método de gerenciamiento para reducir los costos de energía y anticipar los periodos de carga máxima puede ser usado en un sistema de refrigeración y aire acondicionado el almacenamiento de energía térmica, donde se produce y acumula capacidad frigorífica en un banco de hielo durante las horas de más baja demanda de electricidad (horas fuera de pico). Por otro lado, un método teóricamente eficiente de gerenciamiento de ciclos por compresión de vapor consiste en la combinación de dos importantes controles en el sistema, el control variable de velocidad del compresor y el control del grado de sobrecalentamiento del fluido refrigerante a partir de la válvula de expansión. En este trabajo fueron considerados apenas el control del grado de sobrecalentamiento a través de la variación de la abertura de la válvula de expansión.

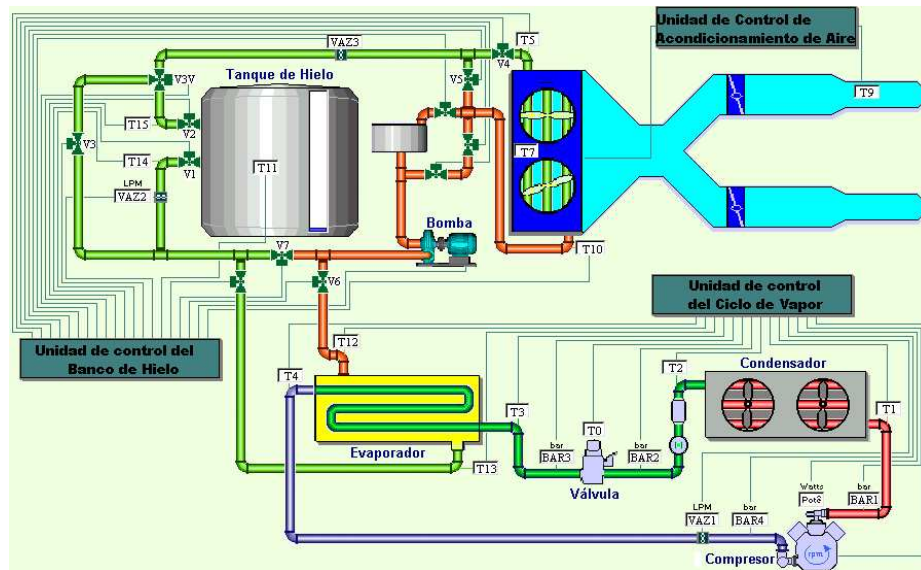


Figura 1. Configuración esquemática del Sistema de Refrigeración y Aire Acondicionado.

El objetivo aquí es obtener un modelo matemático en espacio de estados para la válvula de expansión electrónica a partir de los datos de temperatura, presión y abertura que fueron obtenidos a través de ensayos experimentales en el sistema de acondicionamiento de aire donde está implementada ésta la válvula modificada. Para realizar el modelado es usada la representación en espacio de estado utilizando algoritmos basados en subespacios, generados por entradas y salidas pasadas. Dicha representación ha sido estudiada e implementada en el control moderno y viene siendo una alternativa en relación a los tradicionales algoritmos de identificación de sistemas que utilizan métodos basados en la predicción de errores. A través de los algoritmos de identificación en espacio de estado implementados fueron obtenidos modelos del comportamiento del sistema y validados los resultados.

Estas técnicas de subespacios para encontrar modelos de sistemas MIMO (múltiples entradas y múltiples salidas) usadas para el sistema de refrigeración y aire acondicionado, pueden así mismo ser aplicadas para cualquier tipo de sistema real del cual se desconozcan sus parámetros internos y sus ecuaciones físicas, entre otras características, situación que normalmente ocurre en la vida cotidiana. De manera que solo conociendo las señales de entrada y de salida de algún componente o conjunto de componentes, es posible encontrar las matrices en espacio de estado que sean capaces de describirlo completamente, por tanto de predecir estados futuros o simplemente de simularlo. Las implementaciones de los algoritmos basados en subespacios admiten tener una rápida manipulación y tratamiento de los datos, permitiendo al usuario estimar los parámetros deseados e identificar el sistema de una forma menos compleja y mas interactiva. Estos algoritmos han sido implementados por importantes software comerciales como *Matlab System Identification Toolbox* [1] (descrito por Ljung 1999 [2]).

La importancia de encontrar los modelos de este sistema de refrigeración radica en la necesidad de controlar de manera automática cada uno de sus componentes, dando paso a una mayor economía de energía del sistema total. Teniendo en cuenta que son desconocidos los parámetros internos de los componentes usados y que algunos de ellos sufrieron variaciones en su diseño, no podían ser usados los modelos típicos de ellos y por lo tanto se utilizaron las técnicas de subespacios para encontrar dichos modelos.

2. Descripción del sistema de refrigeración y aire acondicionado

El sistema de refrigeración y aire acondicionado usado posee un sistema de almacenamiento de energía utilizando un “banco de hielo” que disminuye el trabajo del sistema de refrigeración. El sistema es mostrado en la (Fig. 1). Este tipo de climatización del ambiente tiene un costo de operación más barato además de contribuir para la disminución de la sobrecarga del sistema de generación y de distribución de electricidad. La tecnología permite que el frío sea generado fuera del horario pico, en el periodo comprendido entre las 21h y las 6h (donde las tarifas energéticas son menores) para ser utilizado el resto del día. Una gran ventaja de este método es que no es tan seco como el generado por el aire acondicionado convencional, brindando mayor confortabilidad y bienestar a los usuarios.

El subsistema del ciclo de refrigeración por compresión de vapor tiene la función de consumir el mínimo posible de energía al absorber el calor generado por la carga térmica (o capacidad frigorífica) y enviarlo para la atmosfera. Este subsistema está compuesto por cuatro elementos básicos: condensador, evaporador, compresor y válvula de expansión [3].

- **Condensador:** trocador gas-líquido que está encargado de reenviar el calor absorbido por el fluido refrigerante para la atmósfera.
- **Evaporador:** trocador de calor con flujo en contracorriente donde es absorbida la carga térmica del sistema de enfriamiento a través de la evaporación del fluido refrigerante.
- **Compresor:** equipamiento que eleva la presión y la temperatura del gas del fluido refrigerante hasta la temperatura del condensador.
- **Válvula de expansión:** mantiene a diferentes presiones los dos trocadores de calor (condensador y evaporador) y regula el flujo del refrigerante que va para el evaporador, manteniendo constante el grado de sobrecalentamiento en la entrada del compresor.

3. Válvula de expansión electrónica a ser modelada

Para análisis de estrategias de control de sistemas de refrigeración y aire acondicionado, fue diseñada y construida en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Unicamp una estación de ensayos descrita detalladamente en el trabajo de Carvajal en 2004 [3]. La válvula de expansión electrónica usada en esta estación fue construida a partir de una válvula termostática convencional balanceada externamente. La válvula fue alterada de tal manera que se retiró la cámara del bulbo sensor y se substituyó por un motor de paso. El motor está acoplado a un sistema multiplicador de torque (formado por un conjunto de engranajes) que accionan una leva sobre el diafragma, haciendo que una asta se disloque produciendo la abertura o cierre de la válvula de expansión (Fig. 2).

El funcionamiento de la válvula de expansión termostática consiste en que una presión, generada por el fluido localizado en la cámara del bulbo sensor de temperatura (parte alta de la válvula), actúa en la parte superior del diafragma y es contrapuesta por la presión del fluido refrigerante contenido en la cámara del fluido refrigerante (parte baja de la válvula). Cuando la temperatura en la salida del evaporador es mayor que la temperatura preestablecida de sobrecalentamiento, entonces se genera una sobre-presión en el refrigerante que se encuentra en forma de vapor (conocido como gas) dentro del bulbo, ultrapasando la presión del evaporador y haciendo que la válvula abra hasta encontrar el equilibrio de las presiones en el diafragma. En el caso contrario, cuando la temperatura en la salida del evaporador es menor que la temperatura preestablecida de sobrecalentamiento, una caída de presión en el bulbo sensor hace que el diafragma se disloque y entonces la válvula cierre [3].

Usando una válvula de expansión electrónica es posible admitir en el evaporador solamente la cantidad de fluido refrigerante que puede ser vaporizado, lo que permite el completo uso de la capacidad del mismo. El equipamiento completo de refrigeración, de esta manera, puede funcionar con mayor eficiencia y proporcionar un mejor confort térmico.

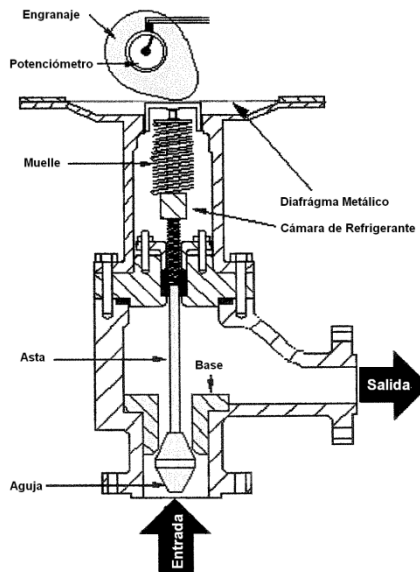


Figura 2. Válvula de Expansión Electrónica Modelada

Encontrando el modelo matemático de la válvula de expansión modificada del sistema de refrigeración y aire acondicionado es posible programar un control automático y de la misma forma aprovechar todas las ventajas y características de cada uno de los componentes, dando paso a su optimización.

4. Eficiencia energética

El aprovechamiento de bajas presiones y temperaturas de condensación que los compresores pueden trabajar permite tener un beneficio en la eficiencia energética. Por otro lado, las válvulas de expansión proporcionan el máximo aprovechamiento del evaporador elevando la presión de evaporación y manteniéndolo lleno de líquido refrigerante, garantizando que ésta reciba continuamente la cantidad de fluido refrigerante necesaria para mantener un sobrecalentamiento constante en función de carga térmica y evitando así daños en el compresor. Este control provee mejoras en la eficiencia del sistema y beneficios adicionales en la economía de energía. Como son ideales para reducir el consumo energético, son usadas en edificios verdes y construcciones sustentables. Contribuyen también con la reducción del calentamiento global y la optimización de sistemas de refrigeración en grandes empresas en las cuales son implementadas. El consumo de potencia eléctrica del compresor es proporcional al porcentaje de abertura de la válvula de expansión: a mayor abertura de la válvula, mayor el flujo de refrigerante a través del compresor, por lo tanto, mayor potencia es consumida, y viceversa [3].

La válvula de expansión modificada usada en el sistema anteriormente descrito, alcanza rápidamente la estabilidad y se mantiene con pequeño error, esto ya asegura economía energética de forma significativa. Por tanto, al automatizar la válvula a partir de su modelo matemático, el consumo de energía del sistema de refrigeración y aire acondicionado será menor por los hechos expuestos.

5. Modelado matemático multivariado usando métodos de subespacios

Existen diversos algoritmos para identificación de múltiples entradas y de múltiples salidas (MIMO) combinando sistemas determinísticos y estocásticos a partir de las entradas y salidas medidas. Cuando se tiene un sistema de control con entradas y salidas conocidas, la determinación de un sistema lineal de control en el modelo en espacio de estados resuelve el problema de identificación del comportamiento del mismo. En el modelado de esta válvula de expansión electrónica el problema es determinar el modelo en espacio de estados de una combinación desconocida determinística,

incluyendo su orden y la cuádrupla de matrices (**A, B, C, D**) partiendo de algoritmos que exploran las propiedades de subespacios para los datos proporcionados por el sistema multivariable [4].

En la actualidad, son usados tres grandes familias de algoritmos de identificación de subespacios, la primera es N4SID (*Numerical Algorithms for Subspace State Space System identification*) desarrollado por Overschee y De Moor [5], MOESP (*MIMO Output Error State sPace*) por Verhaegen [6] y CVA (*Canonical Variable Algorithm*) por Larimore [7]. Según Overschee y De Moor [8] el objetivo de identificación es encontrar un modelo suficientemente exacto y de complejidad mínima que sea capaz de reproducir el sistema y predecir el futuro usando los datos que fueron obtenidos en el pasado.

Usando el método N4SID fueron encontrados los modelos en espacio de estados utilizando un *toolbox* del algoritmo implementado en Matlab (Ljung 1999 [2]). La herramienta IDENT permite estimar los modelos proporcionando facilidades de manipulación de las propiedades del método como la orden del sistema y la covariancia, entre otras. Además proporciona la opción de escoger de forma manual entre dos métodos complementares (MOESP y CVA) que influyen directamente en la calidad del modelo estimado N4SID. Esta propiedad es llamada N4WEIGHT es quien controla las matrices W (pesos) que son usadas por la SVD en un paso intermedio del algoritmo. La orden es seleccionada a través de un gráfico que representa los valores singulares de las matrices de Hankel frente a la respuesta impulso para diferentes ordenes. Con este modelo son obtenidas las cuatro matrices que representan el sistema en espacio de estado (**A, B, C, D**) y con éste pueden ser encontradas las salidas futuras en cualquier instante de tiempo. Teniendo el sistema expresado en espacio de estado podemos prever su comportamiento y realizar un control que maximice su eficiencia.

La selección de modelos tiene como objetivo principal comparar varios modelos alternativos con la idea de elegir el más adecuado. Existen diferentes criterios que persiguen seleccionar el modelo más próximo al proceso generador de datos, dos de ellos fueron introducidos por Akaike en la década de los 70's [9] y están implementados en diversos *toolbox* de Matlab, por ejemplo. Estos dos criterios de Akaike son AIC (*Akaike Information Criterion*) y FPE (*Final Prediction Error*). Ambos criterios proveen, para los modelos estimados, una medida de calidad del mismo cuando las simulaciones del modelo han sido realizadas con diferentes parámetros.

6. Obtención de datos

Los ensayos fueron realizados el día 16 de Marzo de 2004 en el sistema de refrigeración y aire acondicionado descrito por Carvajal [3] y contienen 8818 datos. Este conjunto de datos está dividido en dos partes, los primeros 5000 datos para simulación y los siguientes 3500 para validación.

El sistema funcionó durante un periodo continuo de tiempo de 44.190 segundos y las muestras fueron leídas cada 5 segundos, durante este periodo el sistema de refrigeración estaba almacenando energía en el banco de hielo con un grado de sobrecalentamiento de -7°C . la velocidad del compresor fue estabilizada rápidamente en 4.323 rpm a los 1.252 segundos y los demás subsistemas se encontraban trabajando de manera normal y aproximadamente constante.

Cuando el sistema fue encendido, la válvula de expansión se encontraba cerrada, la velocidad del compresor a 0 rpm, la temperatura de los demás componentes en 25°C y la carga térmica del evaporador igual a 0.

El valor de M_0 que corresponde al valor de la posición de la válvula de expansión fue medido usando una resistencia en un puente de *Wheatstone*, con lectura en voltios en la placa de adquisición de datos (variación máxima de 1 voltio). Los testes no alcanzaron los extremos de abertura de la válvula debido a que las bajas temperaturas y las condiciones de los sistemas no las exigen.

Tabla 1: Entradas y salidas de cada elemento del subsistema de refrigeración modelado

	Entradas	Salidas
Válvula de expansión	Temperatura de salida condensador (T2) Presión de salida condensador (P2) Posición de la abertura válvula (M0)	Temperatura de entrada evaporador (T3) Presión de entrada evaporador (T3)
Evaporador	Temperatura de salida válvula (T3) Presión de salida válvula (P3)	Temperatura de entrada compresor (T4) Presión de entrada compresor (P4)
Caja negra: Válvula de expansión y evaporador	Temperatura de salida condensador (T2) Presión de salida condensador (P2) Posición de abertura válvula (M0)	Temperatura de entrada compresor (T4) Presión de entrada compresor (P4)

7. Modelado y simulación multivariada del sistema de refrigeración

El modelado está hecho, en este caso, apenas para la “caja negra” válvula-evaporador, debido a que el interés de modelar y controlar la válvula es mantener constante las salidas del evaporador ($T4, P4$), es decir, la entrada al compresor con el fin de evitar daños y de mantener estable el sistema. Las salidas del evaporador son controladas por la posición de la abertura de la válvula ($T0$) quien directamente controlando y manteniendo constantes la temperatura y la presión de entrada de la misma ($T2, P2$) garantiza la temperatura de sobrecalentamiento en la salida del evaporador.

El modelado en espacio de estado envuelve tres tipos de variables que están presentes en el modelado de los sistemas dinámicos: de entrada, de salida y de estado. En el caso del sistema de refrigeración y aire acondicionado esas variables son las temperaturas y las presiones de entrada y de salida de cada uno de los elementos que están siendo modelados como la válvula y el evaporador (caja negra). Fueran seleccionadas las variables de entrada y de salida de cada elemento y usados los datos reales de éstas obtenidos en pruebas realizadas en la mesa de ensayos por Carvajal [3]. Ver (Tabla 1).

El método usado para hacer el modelado es la implementación del algoritmo N4SID llamada IDENT en Matlab. El método permite encontrar el modelo en espacio de estados partiendo sólo de las entradas y las salidas obtenidas en pruebas reales sin previo conocimiento de los otros parámetros intrínsecos del sistema.

De esta manera es simulado el sistema bajo diferentes condiciones como muestreo y pesos (usados en un paso intermedio del algoritmo para calcular SVD). Las opciones de muestreo son 1 y 5 (Resultado 1 y 2 respectivamente) y las opciones de peso son AUTO, MOESP y CVA, calculando para cada una de estas simulaciones un modelo en espacio de estado y un resultado gráfico que permite observar la proximidad con el comportamiento real del sistema.

Usando los criterios FPE y AIC de Akaike se puede tener una idea general de cual modelo es mejor entre los estimados. Siendo que el objetivo principal no sea compararlos y sí encontrar un buen modelo que sea capaz de describir el sistema de forma que pueda ser usado para un posterior control, a fin de optimizarlo y de obtener mayor economía de energía.

Antes de conseguir obtener los 8 modelos finales, fueron realizados un sin número de combinaciones y opciones que permitieron encontrar la mejor forma de utilización del algoritmo implementado. En cada uno de estos ensayos se observaron y corrigieron los errores y las respectivas gráficas de modo que se mejorara cada vez más el modelo final. Esto fue posible haciendo pequeños cambios en sus parámetros individuales acercando cada vez más el modelo encontrado al modelo real.

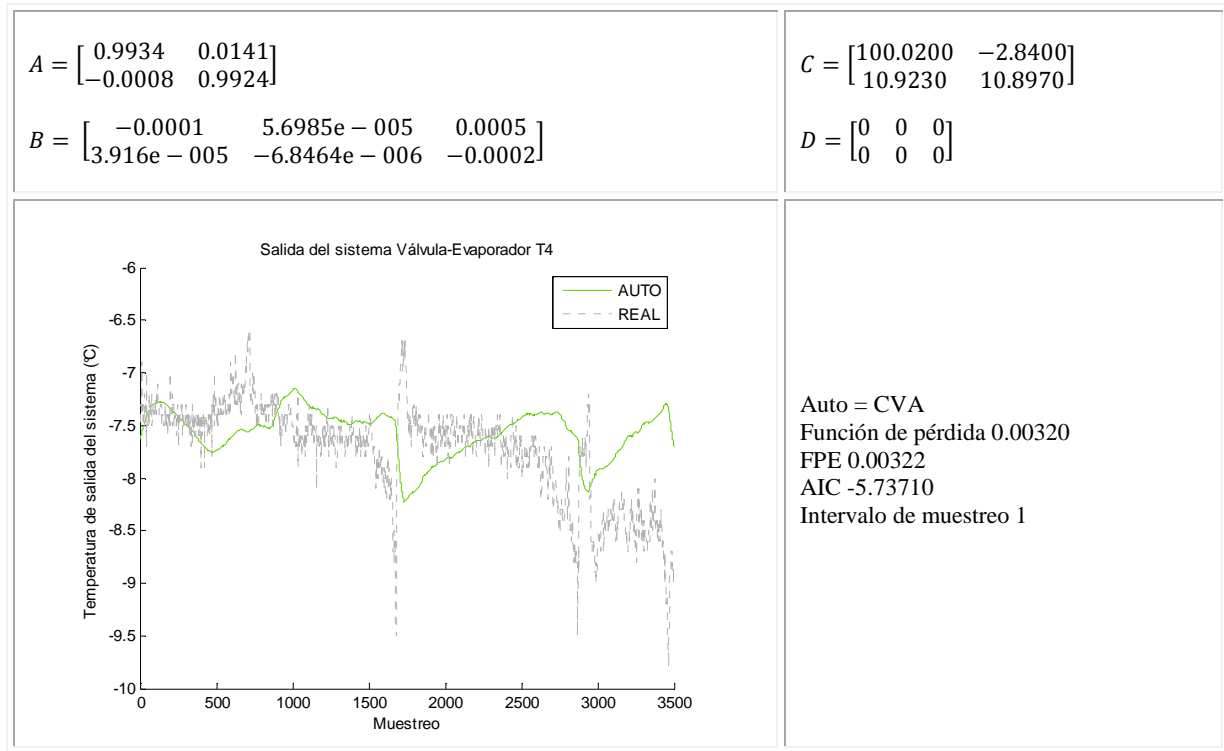


Figura 3: Modelo 1. Modo Auto con selección de CVA.

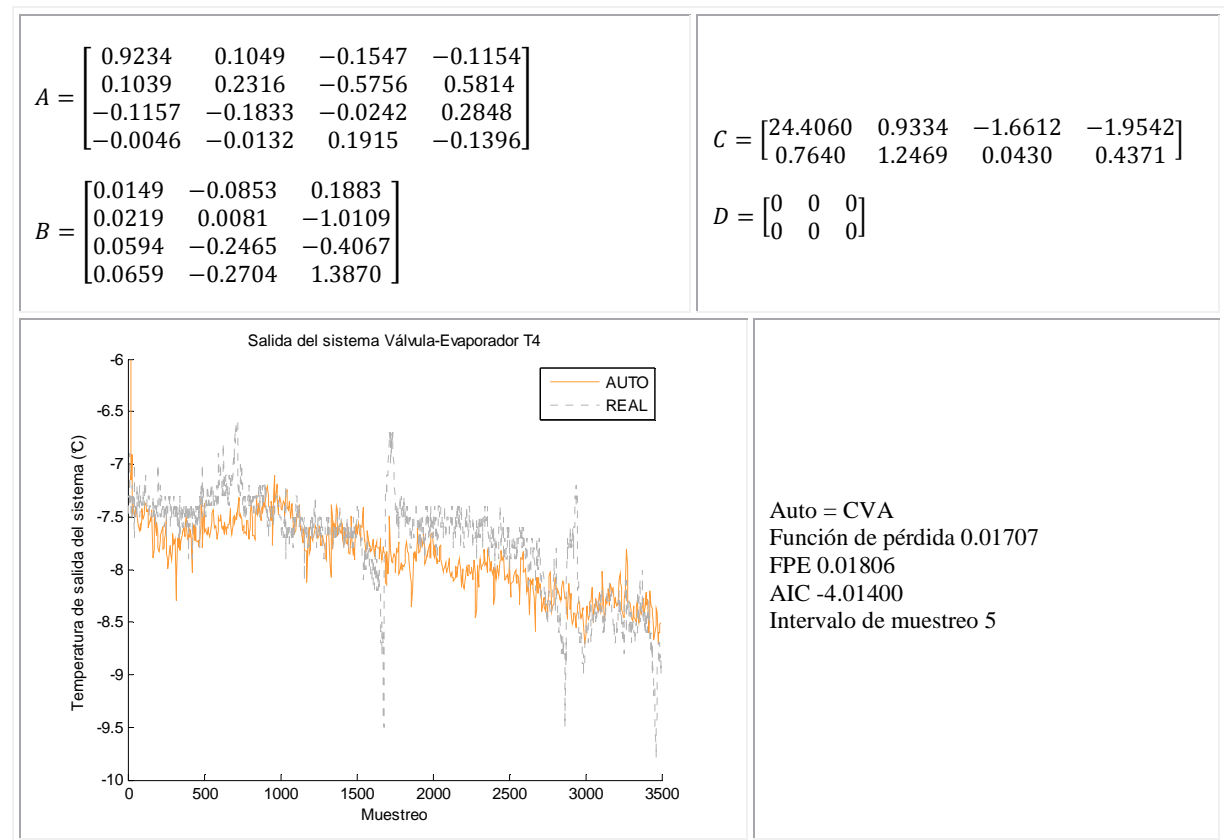


Figura 4: Modelo 2. Modo Auto con selección de CVA.

8. Validación

Para responder a la pregunta de si son suficientemente buenos los modelos estimados y cual de ellos es el más adecuado, aunque en la realidad sea difícil responderla con certeza absoluta, es necesario valerse de herramientas como la estimación de la calidad, el cálculo de errores de validación y la comparación entre la familia de modelos, entre otros. Pero la verdadera respuesta está ligada a un determinado contexto para los cuales esos valores encontrados estén dentro de los límites de los objetivos. En la práctica es recomendable usar diferentes herramientas e intentar validar un modelo considerando un conjunto de indicadores en lugar de un solo indicador [10].

La finalidad de modelar la caja negra válvula- evaporador es simular su comportamiento y obtener un sistema de ecuaciones en espacio de estado que represente su comportamiento. Con la simulación se desea saber si el modelo reproduce a lo largo del tiempo los datos observados, por lo tanto los modelos están validados dentro de los parámetros de simulación y no de predicción usando datos medidos que pertenecen a un conjunto de datos mayor que fue dividido en dos partes de 5000 y 3500 datos para simulación y validación respectivamente.

Cuando se analizan cada una de las matrices (**A**, **B**, **C** e **D**) de los modelos obtenidos y se comparan, es normal encontrar grandes diferencias numéricas entre ellas, aparentando ser modelos totalmente diferentes. Para tener la certeza de que existe tal diferencia entre los modelos estimados, son calculados los parámetros de Markov, de tal manera que si los parámetros entre un modelo y otro son iguales, un modelo es una transformación de similitud de otro modelo.

También son estimados y comparados los criterios de Akaike con el fin de obtener una medida de calidad entre los modelos y saber de alguna manera cual es el modelo más representativo del sistema. El error de validación indica que tan bueno es el modelo al aplicarlo a una parte de los datos que no fueron utilizados en el procedimiento de identificación, motivo por el cual es calculado en este caso.

Los parámetros de Markov son productos entre las matrices de la cuádrupla de un modelo, siendo los términos considerados aquí: **CB**, **CAB** y **CA²B**, además de la matriz **D** que para todas las estimaciones en este trabajo son cero. Tales parámetros para cada modelo son presentados en la (Tabla 2). En el caso de que exista una relación de similitud entre los modelos comparados, cualquier de ellos puede representar adecuadamente los conjuntos de datos de entradas y salidas del sistema. La comparación de los parámetros de Markov entre los modelos da una visión más clara de la relación entre ellos, en este caso, no existe ninguna transformación de similitud y por tanto, no representan de la misma forma los conjuntos de datos de entradas y salidas del sistema.

Por otro lado, una comparación directa fue hecha usando los criterios de Akaike. El FPE es obtenido como resultado de la estimación de los modelos y el AIC calculado de forma manual con el fin de comparar los modelos y seleccionar uno de ellos que sea quien represente mejor la caja negra válvula- evaporador en el sistema de refrigeración y aire acondicionado.

Tabla 2: Parámetros de Markov para cada modelo estimado con CVA

	Parámetros de los modelos estimados con CVA																	
	CB			CAB			CA ² B											
Modelo 1	[-0.0110	0.0057	0.0566]	[-0.0109	0.0057	0.0558]	[-0.0108	0.0056	0.0551]	[-0.0007	0.0005	0.0030]						
Modelo 2	[0.1583	-1.1374	1.6195]	[-0.0292	-0.1085	-0.3826]	[-0.0403	0.0484	-0.1026]	[0.0702	-0.1838	-0.5278]	[0.0142	-0.0411	0.9189]	[-0.0044	0.0268	-0.3114]

Tabla 3: Criterios de Akaike para cada uno de los modelos

	CRITÉRIOS DE AKAIKE	
MODELOS CVA	FPE	AIC
Modelo 1	0.0032	-5.7371
Modelo 2	0.0181	-4.0140

Tabla 4: Errores de validación

ERROS DE VALIDAÇÃO (%)	
MODELOS CVA	
Modelo 1	7.2296
Modelo 2	7.0805

De acuerdo con los criterios de Akaike en donde el menor valor corresponde al “mejor modelo”, que en este caso es el modelo 1, quien tiene un muestreo de $k = 1,2,3, \dots$. En la (Tabla 3) se puede observar que existe una coherencia en los dos criterios, pues los menores valores corresponden al mismo modelo, dejando mayor certeza de cuál es el modelo más representativo.

El error de validación es usado como otra herramienta para medir la calidad de la identificación y conocer que tan próximo está del comportamiento real un modelo y está definido por la siguiente expresión:

$$e = \frac{1}{l} \sum_{c=1}^l \left[\sqrt{\frac{\sum_{k=1}^s ((y_k)_c - (y_k^s)_c)^2}{\sum_{k=1}^s (y_k^s)_c}} \right] 100\%$$

donde $(y_k)_c$ denota la centésima salida en el instante de tiempo k del conjunto de datos de validación. La $(y_k^s)_c$ es la centésima salida, también en el instante k , pero del mismo conjunto de datos simulados [11]. Los valores de los errores de validación son presentados en la (Tabla 4).

Según los valores obtenidos con el error de validación (Tabla 4), el mejor modelo es el que tiene el menor porcentaje de error, que en este caso sería el modelo 2 y corresponde al modelo con muestreo de $k = 5,10,15, \dots$, con pesos CVA y sin horizonte establecido. Cuando es comparado este resultado con los obtenidos usando los criterios de Akaike se observa que no corresponde el mismo modelo como el mejor. Gráficamente se puede observar que realmente el comportamiento más parecido al real es el modelo 2, pero el modelo 1 presenta mayor estabilidad en el sistema, lo que permitiría un mejor control del grado de sobrecalentamiento y por tanto, una mejor economía de energía a través de optimización del sistema de refrigeración y aire acondicionado.

El error en este caso es aceptable debido a que los datos reales presentan ruido y una tendencia indeseada para el sistema en la temperatura de sobrecalentamiento. Aunque este ruido podría ser disminuido haciendo un tratamiento mayor de datos y un análisis profundo de cada uno de los parámetros usados en el modelado, los cuales influyen enormemente en el resultado obtenido. Es claro que se ignoran algunos de los parámetros importantes para fines del presente trabajo como la covarianza, los horizontes y las perturbaciones. Por otro lado, el objetivo no es presentar el mejor modelo, pero sí presentar los diferentes resultados estimados y una comparación entre ellos, además de verificar que este tipo de modelado en espacio de estados también puede ser aplicado a sistemas reales.

9. Conclusiones

Los dos resultados diferentes que aquí se presentan muestran claramente que la tendencia de la simulación es similar a la de los datos reales, aunque en el primer resultado la tendencia es mucho más estable que en el segundo. Siendo que la línea de tendencia esté más separada de la línea real a lo largo del tiempo, la estabilidad en la temperatura de sobrecalentamiento es mayor, manteniéndose alrededor de 7.5°C (grado de sobrecalentamiento deseado 7°C). Con el fin de probar este análisis, se usaron los dos criterios de Akaike, AIC y FPE, los cuales permiten verificar que el primer resultado representa mejor el sistema modelado, correspondiendo a los dos valores menores de estos criterios. Además de encontrar por medio de otros dos métodos, como los parámetros de Markov y el error de validación, resultados que comprueben o permitan analizar la representatividad de los modelos encontrados. Las demás simulaciones están hechas para diferentes condiciones de muestreo y pesos, consiguiendo también hacer predicciones de pasos al frente desde 1 hasta 20 pasos. Con los resultados obtenidos se concluye que usando el algoritmo N4SID es obtenido un modelo en espacio de estados que representa adecuadamente el sistema de refrigeración y aire acondicionado modelado.

Los métodos para la identificación de subespacios conforman una rápida alternativa para simular y predecir sistemas dinámicos reales desde el conocimiento de pocos parámetros con un costo computacional bajo. En la identificación de sistemas MIMO (múltiples entradas – múltiples salidas) son requeridos cálculos numéricos complejos que pueden ser minimizados usando algoritmos que permitan un modelado multivariado implementados en herramientas como Matlab. Así son obtenidos desde entradas y salidas pasadas los modelos en espacio de estado y hecha la validación del modelo usando también datos pasados en un mejor tiempo y con mayor exactitud.

10. Referencias Bibliográficas

- [1] R2007B, M., "System Identification Toolbox 7.1, IDENT", Agost 15, 2007.
- [2] Ljung, L., *System Identification: Theory for the User*, PTR, P.-H. Editor, Segunda (ed.). Upper Saddle River, NJ, 1999.
- [3] Carvajal, F. A., "Implementação de uma bancada de ensaios para análise de estratégias de controle de sistemas de refrigeração e ar condicionado", Tese Doutorado, FEM, UNICAMP, SP - Brasil, 2004.
- [4] Barreto, G., "Modelagem Computacional Distribuída e Paralela de Sistemas e de Series Temporais Multivariáveis no Espaço de Estado", Tese Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), UNICAMP, SP - Brasil, 2002.
- [5] Overschee, P. V., De Moor B., "N4SID: Subspace Algorithms for the Identification of Combined Deterministic-Stochastic Systems", *Automatica (Special Issue on Statistical Signal Processing and Control)*, vol. 30, pp. 75-93, 1994.
- [6] Verhaegen, M., "Identification of the deterministic part of MIMO state models given in innovations form from input-output data", *Automatica (Special Issue on Statistical Signal Processing and Control)*, vol. 30, pp. 61-74, 1994.
- [7] Larimore, W. E., "Canonical variate analysis in identification", in *Canonical variate analysis in identification, filtering and adaptive control*, Honolulu - Hawaii, USA, pp. 596-604, 1990.
- [8] Overschee, P. V., De Moor, B., "A unifying theorem for three subspace system identification algorithms", in *Submitted for publication to SYSID'94*, Belgium, 1993.

- [9] Akaike, H., "A new look at the statistical model identification", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. AC-19 1974.
- [10] Aguirre, L. A., *Introdução à Identificação de Sistemas (Técnicas Lineares e Não Lineares Aplicadas a Sistemas Reais)*, UFMG, E. Editor. Belo Horizonte-MG, Brasil, 2000.
- [11] Giraldo, D. C., "Métodos de Subespaços para Identificação de Sistemas: Propostas de Alterações, Implementações e Avaliações", Tese Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC), UNICAMP, Campinas, SP-Brasil, 2008.

