

LABORATORIO REMOTO PARA EL PROCESO DE LOS CUATRO TANQUES Y SU APLICACIÓN EN DOCENCIA DE CONTROL MULTIVARIABLE

Antonio Alejandro García, Manuel Berenguel, José Luís Guzmán
Dpto. Lenguajes y Computación. Universidad de Almería.
Ctra. Sacramento s/n, Almería 04120
agmira@ual.es, beren@ual.es, joguzman@ual.es

Sebastián Dormido
ETS de Ingeniería Informática
Univ. Nacional de Educación a Distancia.
C/. Juan del Rosal, 16. Madrid-28040.
sdormido@dia.uned.es

Manuel Domínguez
Instituto de Automática y Fabricación.
Campus Universitario de Vegazana, Univ. de León.
240710 León,
diemdg@unileon.es

Resumen

El proceso de los cuatro tanques descrito por Johansson [5] ilustra de forma muy clara e intuitiva las ventajas y limitaciones de rendimiento que poseen las técnicas de control multivariable. En el presente artículo se describe un laboratorio remoto basado en web que permite interactuar y aplicar técnicas de control sobre una maqueta de dicho proceso, facilitando su utilización para docencia e investigación en control automático.

1. Introducción.

En los últimos años multitud de trabajos de investigación tienen como objetivo la mejora del proceso educativo de técnicas de control. Se busca lograr una mayor interactividad del alumno durante el aprendizaje, que le permita poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos. Este aprendizaje activo facilita la comprensión y reflexión sobre los conceptos impartidos, abstrayéndose del fundamento matemático que subyace bajo las técnicas de control.

Para mejorar dicha interactividad, se estudia la utilización de nuevas herramientas docentes basadas en simulaciones locales, maquetas a escala, herramientas interactivas, y laboratorios virtuales o remotos [3],[4],[7],[11]. Estas nuevas herramientas se basan en la utilización de las nuevas tecnologías de Información y Comunicación (TIC), que han permitido la incorporación de nuevos conceptos tales como telecontrol, educación a distancia, o teleoperación.

Estos conceptos resultan ser fundamentales gracias a la reducción de costes en el acondicionamiento de laboratorios, así como a la obtención de una mayor disponibilidad y difusión de los recursos disponibles para el alumnado y personal investigador [1], [9], [10], [2].

Uno de los campos de interés en la Ingeniería de Sistemas y Automática son las técnicas de control multivariable. Existen multitud de procesos industriales, especialmente en la industria aeronáutica y química, cuya estabilidad depende del estado de varias variables y en donde la aplicación de técnicas de control clásicas puede producir resultados poco eficientes [5]. El proceso de los cuatro tanques se presenta como una excelente herramienta para la docencia de este tipo de técnicas de control, ya que muestra de forma clara e intuitiva la importancia de la localización y dirección de los cerros, así como su repercusión sobre la estabilidad del sistema.

Conscientes de esto, el Instituto de Automática y Fabricación de la Universidad de León, en colaboración con la UNED y la Universidad de Almería han desarrollado una maqueta del proceso de los cuatro tanques con el objeto de su utilización con fines docentes y de investigación. En este trabajo se presenta el laboratorio remoto desarrollado sobre esta maqueta, que permite el acceso remoto a la planta, así como la prueba de distintas técnicas de control multivariable. En un primer paso se describirán brevemente los aspectos básicos de modelado, así como los elementos que componen el laboratorio remoto, finalizando con varios ejemplos de control realizados sobre la maqueta de forma remota.

2. Descripción y modelado del proceso.

El proceso de los cuatro tanques es descrito ampliamente por Johansson en [5]. La planta esta formada por cuatro tanques interconectados según el esquema mostrado en la figura 1, siendo el objetivo controlar el nivel de los tanques inferiores mediante la regulación de las tensiones enviadas a las bombas (v_1 y $v_2 \in [0,10]$ V). Las válvulas de tres vías permiten fraccionar el caudal de salida hacia cada una de sus ramas, en función de su posición (γ_1 y $\gamma_2 \in [0,1]$). Dependiendo de los valores de γ_1 y γ_2 , el sistema tendrá un comportamiento de fase mínima o no mínima [5].

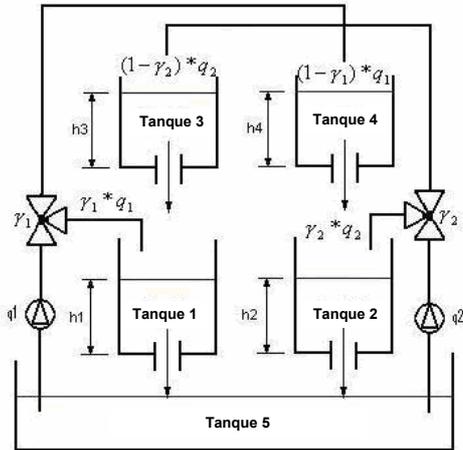


Figura 1. Esquema del proceso de los cuatro tanques.

2.1. Modelo no-lineal del sistema.

El modelo desarrollado en [5] se basa en la ley de Bernoulli y las leyes del balance de masas:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} v_1 \\ \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} v_2 \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} v_2 \\ \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} v_1 \end{aligned} \quad (1)$$

En (1), A_i representa el área de la sección del tanque, a_i el área del orificio de descarga y h_i la altura del líquido del tanque, para $i=1-4$. Por otro

lado, $k_j v_j$ representa el caudal de salida correspondiente a la bomba j , para $j=1-2$. Por último, la constante g representa la aceleración de la gravedad. Este modelo teórico es sencillo e intuitivo, aunque la experiencia ha demostrado sin embargo que se parte de ciertas hipótesis que pueden ser erróneas en una implementación real de este proceso. Por ejemplo, supone un comportamiento lineal de los actuadores del sistema (válvulas de tres vías y bombas).

2.2. Modelo lineal del sistema.

Si se linealiza (1) en torno a un punto de trabajo:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 c_1}{T_1 s + 1} & \frac{(1-\gamma_2) c_1}{(T_3 s + 1)(T_1 s + 1)} \\ \frac{(1-\gamma_1) c_2}{(T_4 s + 1)(T_2 s + 1)} & \frac{\gamma_2 c_2}{T_2 s + 1} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde las constantes de tiempo y ganancias son:

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, i=1, \dots, 4 \quad c_j = \frac{T_j k_j}{A_j}, j=1 \dots 2 \quad (3)$$

3. Laboratorio remoto.

En este apartado se describen los elementos que componen el laboratorio remoto desarrollado.

3.1. Descripción de la planta real.

El laboratorio remoto se basa en una maqueta del proceso de los cuatro tanques, a la que se han añadido tuberías de rebosamiento en cada uno de los tanques superiores. La figura 2 muestra una fotografía de la planta y la tabla 1 los valores de los parámetros descriptivos.



Figura 2. Maqueta del proceso.

Parámetro	A_i	a_i	g
Valor	389.16 cm ²	2.0106 cm ²	981 cm/s ²

Tabla 1. Parámetros generales del proceso.

La maqueta intenta mantener la estructura original, pero está equipada con actuadores e instrumentación industrial con no-linealidades características como zonas muertas, histéresis, ...:

- Bombas *Grundfos* UPE 25-40 con módulos de expansión MC 40/60, regulables mediante una señal analógica.
- Válvulas neumáticas de tres vías *Samson* 3226, de apertura regulable con posicionadores *Samson* tipo 3760.
- Transmisores de presión *Endress & Hauser* PCM 731 como sensores de nivel.
- Electroválvulas todo/nada *SMC*, instaladas en la base de los cuatro tanques principales para permitir la aplicación de perturbaciones.
- Sistema de adquisición *Snap Ultimate I/O* de *Opto 22*, compuesto por un rail sobre el que se monta el procesador y una serie de módulos de entrada/salida analógicos y digitales, a los que se conecta la instrumentación de la planta. Este tipo de sistemas se pueden conectar a cualquier topología de red física (cableada, inalámbrica, PPP) así como integrarse en todo tipo de redes empresariales o industriales sin necesidad de *middleware*, ya que soporta una alta variedad de protocolos como FTP, SMTP, SNMP, OPC, MODBUS/TCP... [12], [13].

La maqueta se ha integrado en la red local Ethernet del laboratorio de Control Automático, Robótica y Visión Artificial de la Universidad de Almería, como un dispositivo más accesible a través de la red, con dirección IP propia.

3.2. Herramienta SCADA remota.

Se ha desarrollado una herramienta SCADA para la monitorización y supervisión de la planta utilizando el entorno de desarrollo LabVIEW 7.1 de *National Instruments*. En la figura 3 se muestra una imagen de la aplicación desarrollada.

Esta herramienta permite la utilización remota del laboratorio, ya que utiliza protocolos basados en Internet como TCP/IP e IEEE1934 para comunicarse e interactuar con el sistema de adquisición instalado en la maqueta. El usuario remoto únicamente necesita el ejecutable de la aplicación, así como el componente *ActiveX* proporcionado por *Opto 22* que contiene la implementación de los métodos de comunicación e interacción con el *Snap Ultimate*.

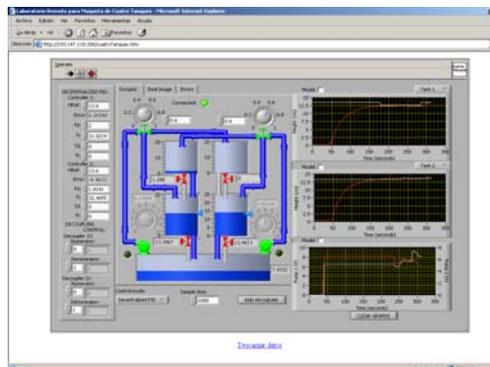


Figura 3. Aplicación SCADA y laboratorio remoto

En el resto de este apartado se comentan los aspectos más destacados del SCADA.

Adquisición y registro de datos: Cada período de muestreo, se produce una lectura remota de los sensores y actuadores y se registra en un archivo de datos, que es ofrecido al usuario una vez finalizado el ensayo. El tiempo de muestreo puede ser modificado a lo largo de la ejecución.

Representación del proceso: Los datos adquiridos del sistema real son presentados gráficamente en la aplicación, con la finalidad de mostrar su valor actual, su evolución y facilitar al usuario su interpretación. La aplicación consta de los siguientes métodos de representación:

- *Sinóptico de la maqueta:* en la parte central de la aplicación (figura 3) se encuentra una representación gráfica de la maqueta, que muestra en cada momento de forma gráfica los niveles en cada tanque y los valores de referencia, así como el estado de las bombas y válvulas.
- *Gráficas de evolución:* en la parte derecha de la aplicación se encuentran tres ejes gráficos que permite al usuario representar la evolución de ciertas variables del proceso. Las dos gráficas superiores muestran la evolución dinámica de los niveles de aquellos tanques seleccionados en el menú desplegable situado sobre cada una de ellas. En el caso de seleccionar los tanques 1 y 2, también se muestra la evolución de sus alturas de referencia. La gráfica inferior muestra la evolución de la señal de actuación de las bombas desde el comienzo del ensayo. Cada bomba tiene su propia escala sobre el eje Y.

6 IV Jornadas de Enseñanza a través de Internet/Web de la Ingeniería de Sistemas y Automática

- *Imagen en tiempo real:* con el fin de aportar realimentación visual del proceso, la aplicación ofrece en tiempo real la imagen de la maqueta tomada a través de una cámara AXIS 2111 instalada en el laboratorio (figura 4).

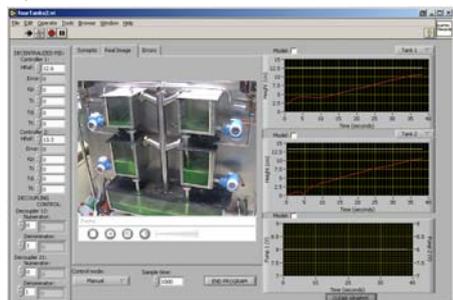


Figura 4. Imagen del sistema remoto.

Interacción con el proceso: durante la ejecución del programa, el usuario puede interactuar con las bombas, válvulas de tres vías y válvulas todo/nada actuando directamente sobre la representación de estos elementos en el sinóptico de la figura 3.

Gestión de alarmas: para conseguir robustez y seguridad, en cada periodo de adquisición, se comprueban las señales de fallo en la instrumentación y el volumen total de líquido que se encuentra en los tanques superiores para evitar daños en las bombas por falta de líquido en el tanque 5, así como que el nivel alcanzado en los tanques superiores no supere el nivel máximo del rebosadero. En cualquiera de estas situaciones, se detienen automáticamente las bombas y se muestra un mensaje de error explicativo.

Control Multivariable: se han implantado las siguientes técnicas de control multivariable: PID desacoplados y control por desacoplo, estando el control predictivo multivariable en proceso de desarrollo. Se selecciona el tipo de control mediante el menú desplegable “Control Mode” y, mientras esté llevándose a cabo el control, no se permite al usuario interactuar con las bombas.

- *Paso de control manual a automático:* se puede llevar de forma manual el sistema al punto de trabajo para el que los controladores han sido diseñados, refrescando las variables internas de los PID para conseguir transferencia sin saltos.
- *PID Desacoplados:* se permite al usuario controlar el nivel de los tanques 1 y 2

mediante dos controladores PID con mecanismo anti-windup, cuyos parámetros son configurables a través de los campos de texto localizados en la pestaña “Control”, situada en la izquierda de la aplicación. Además, es posible configurar una zona muerta para cada controlador.

- *Control por desacoplo:* se necesitan las funciones de transferencia de las matrices de desacoplo, que pueden ser introducidas en la aplicación en tiempo continuo, siguiendo la notación polinomial de *Matlab*. Internamente, la aplicación lleva a cabo su discretización, utilizando el tiempo de muestreo del ensayo.

3.3. Laboratorio remoto basado en Web.

Aunque la herramienta SCADA cubre sobradamente los requerimientos de uso remoto de la maqueta, posee limitaciones de difusión, disponibilidad y sencillez de uso, ya que es necesario que cada usuario remoto obtenga el ejecutable de la aplicación así como las librerías necesarias. Estas limitaciones dificultan la finalidad docente del laboratorio remoto [6], [14].

Ante esto, se ha desarrollado una versión Web del laboratorio remoto. Consiste en un servidor que acepta peticiones http de clientes remotos. Cuando una petición ha sido recibida, el servidor ejecuta de forma local la herramienta SCADA, ofreciendo al cliente una página html que integra una representación exacta de la herramienta SCADA. A través de esta representación, el cliente puede interactuar con el sistema físico, aprovechando toda la funcionalidad que ofrece la herramienta SCADA. Gracias a esto, únicamente es necesario una conexión a Internet y un navegador Web para que un usuario pueda hacer uso del laboratorio remoto. La figura 3 muestra también la página html ofrecida por el servidor y que integra la herramienta SCADA, vista en un navegador Web.

4. Ejercicios sobre el laboratorio remoto.

Se describen a continuación ejemplos de prácticas de modelado y control multivariable realizados con el laboratorio remoto. Estas prácticas han sido utilizadas en la docencia de la asignatura “Control Avanzado de Procesos Químicos” de la titulación de Ingeniero Químico de la Universidad de Almería.

4.1. Obtención del modelo lineal del sistema.

En las bombas instaladas, la relación entre el voltaje de entrada al regulador y el caudal de salida no es lineal, dependiendo del punto de trabajo seleccionado y de la configuración del circuito hidráulico (dada por γ_1 y γ_2). Por tanto, a la hora de linealizar el modelo se deben utilizar los valores de las constantes k_1 y k_2 correspondientes al punto de trabajo y configuración seleccionados. La obtención de dichos valores es un proceso tedioso (su explicación cae fuera del objeto de este artículo) que puede simplificarse mediante el uso de caudalímetros de precisión. La tabla 2 muestra un ejemplo representativo de valores para funcionamiento en fase mínima.

PARÁMETRO	VALOR
$h_1^0; h_2^0; h_3^0; h_4^0$	12.6; 13.8, 0.5, 0.5 [cm]
$v_1^0; v_2^0$	6.5; 6.5 [V]
$\gamma_1; \gamma_2$	0.6; 0.6
$k_1; k_2$	20.908; 19.978 [cm ³ /sV]

Tabla 2. Parámetros del punto de trabajo.

Los elementos del modelo linealizado son:

$$G_{11}(S) = \frac{1}{31.0219s + 1}; G_{22}(S) = \frac{1.1}{32.4655s + 1}$$

$$G_{12}(S) = \frac{0.666666}{(6.1797s + 1)(31.0219s + 1)} \quad (4)$$

$$G_{21}(S) = \frac{0.7396812}{(6.7695s + 1)(32.4655s + 1)}$$

4.2. Control multilazo del nivel de tanques 1 y 2

El método RGA proporciona la matriz de ganancias relativas que se muestra en (5).

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1.81255 & -0.81255 \\ -0.81255 & 1.81255 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Se corrobora lo que dice la intuición en el caso de fase mínima; el mejor emparejamiento es tratar de controlar la altura del tanque 1 con la bomba 1, y la del tanque 2 con la bomba 2. Se diseñan dos controladores PI desacoplados mediante cancelación de polos, suponiendo que el sistema en bucle cerrado es el doble de rápido que en bucle abierto y no hay error en régimen permanente en bucle cerrado. Se ha establecido una zona muerta de 0.05 cm. para ambos

controladores con el fin de reducir el número de actuaciones sobre la bomba. En la figura 5 se muestra la evolución del nivel en los tanques 1 y 2 así como de las señales de control a lo largo del ensayo. En las gráficas de nivel, la línea roja representa el nivel, mientras que la línea azul la referencia. En la figura se puede observar cómo existe acoplamiento en el comportamiento de los controladores, aunque consiguen alcanzar los niveles de referencia tras cambios en la consigna, así como ante una pérdida de caudal en el tanque 2 causada por la apertura temporal de la válvula todo/nada de dicho tanque.

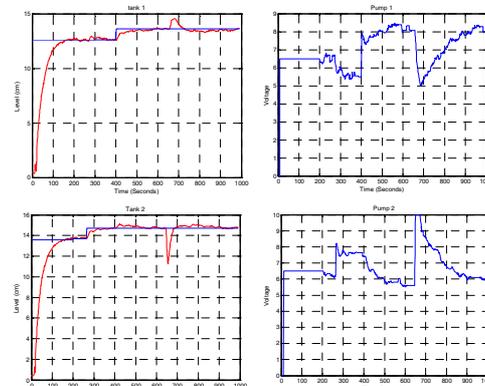


Figura 5. PI Desacoplados.

4.3. Control por desacoplo.

Esta técnica trata de eliminar el efecto de las interacciones [8]. Las funciones de desacoplo utilizadas se muestran en (6), obtenidas a partir del modelo linealizado (4).

$$D_{12} = -\frac{0.6666}{6.1794s + 1}; D_{21} = -\frac{0.6724}{6.7695s + 1} \quad (6)$$

La figura 6 muestra el comportamiento del sistema bajo este tipo de control ante sucesivos cambios en las señales de referencia. Se ha reducido la interacción existente, aunque esta reducción no ha sido homogénea durante todo el ensayo. En el caso concreto de un cambio en la consigna del tanque 1, la interacción en el nivel del tanque 2 se ha reducido considerablemente. Sin embargo, esta técnica de control no está ofreciendo el rendimiento esperado a priori, pues el modelo dado por (1) y (2), realmente no representa de manera fiable el comportamiento del sistema.

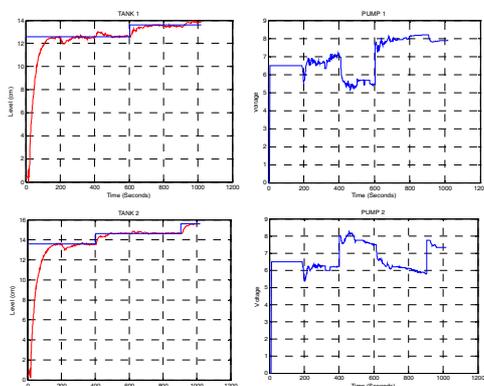


Figura 6. Control por Desacoplo.

5. Conclusiones.

El proceso de los cuatro tanques ilustra de forma muy sencilla e intuitiva las limitaciones de rendimiento que posee el control multivariable. Como consecuencia, hemos desarrollado un laboratorio remoto basado en Web, sobre una maqueta a escala de este proceso, que permite acceder, monitorizar y controlar el sistema de forma remota. Que este proceso posea unas características tan atractivas, se debe en gran medida al modelo presentado para especificar el sistema. Sin embargo, este modelo parte de ciertas suposiciones acerca del comportamiento de los actuadores e incluso de los propios tanques, que pueden no resultar ciertas cuando se lleva a cabo una implementación real del proceso, con instrumentación industrial. Por tanto, es necesario llegar a un modelo de compromiso, que, aún manteniendo las características ventajosas del modelo inicial, represente de manera más o menos fiable, el comportamiento real de la planta.

Los futuros trabajos se van a orientar en las siguientes direcciones:

- Complementar el laboratorio remoto con nuevos elementos de representación interactivos, que faciliten la comprensión de conceptos. Por ejemplo, la representación del lugar de las raíces del proceso.
- Formular un modelo lineal y no lineal del sistema que modele de forma satisfactoria su comportamiento.
- Incluir técnicas de control predictivo multivariable.

Referencias

- [1] S. Dormido, "Control Learning: Present and Future". *Annual Reviews in Control, Wiley*, **28**(1), pp. 115-136, 2004.
- [2] S. Dormido, "The role of interactivity in control learning. Plenary lecture". 15th IFAC Symposium on Advances in Control Education, Oulu 16-18 June 2003, preprints, pp. 11-22.
- [3] S. Dormido, F. Esquembre, "The quadruple-tank process: An interactive tool for control education", *Proco. ECC'03, 2003, Cambridge*.
- [4] J.L. Guzmán, M. Berenguel, S. Dormido, "MIMO-GPCIT. Herramienta interactiva de control predictivo generalizado para sistemas multivariables", *RIAI. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, **1**(1), pp. 57-69, 2004.
- [5] K. H. Johansson, "The quadruple tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero". *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol 8, n° 3, may 2000, pp. 456-465.
- [6] LabVIEW Distance Learning Solution Guide. National Instrument. http://www.ni.com/pdf/academic/us/distance_learning.pdf
- [7] C. Martin, A. Urquia, J. Sanchez, S. Dormido, F. Esquembre, J.L. Guzmán, M. Berenguel, "Interactive Simulation of Object-Oriented Hybrid Models, by Combined Use of Ejs, Matlab/Simulink and Modelica/ Dymola". *Proc. 18th European Simulation Multiconference, 2004*, pp. 210-215. Magdeburg, Germany.
- [8] P. Ollero, E.F. Camacho. *Instrumentación y control de procesos químicos*. Ed. Síntesis, 1997.
- [9] S.E. Poindexter and B.S. Heck, "Using the web in your courses: What can you do? What should you do?" *IEEE Control Systems Magazine*, **19**(1), pp.83-92, 1999.
- [10] R.M. Powell, H. Anderson, Jan van Der Spiegel and D.P. Pope, "using Web-Based Technology in Laboratory Instruction to Reduce Costs". *Computer Applications in Engineering Education*. **10**(4), pp. 204-214, 2002.
- [11] J. Sánchez, F. Morilla, S. Dormido, J. Aranda, P. Ruipérez, "Virtual Control Lab Using Java and Matlab: A Qualitative Approach", *IEEE Control Systems Magazine*, 2002, vol. 22, n° 2, pp 8-20.
- [12] Snap ethernet-based i/o units user's guide. Form 1460-040909-September, 2004.
- [13] Snap ethernet-based i/o units protocols and programming guide. Form 1465-040226- February, 2004. Opto 22.
- [14] J. Travis. *Internet applications in LabVIEW*. 2000, Prentice Hall.