

Diseño de un Controlador Adaptable y su Aplicación para el Control de una Planta Termoelectrica

Roberto Galindo del Valle*. Enrique Quintero Mármol Márquez**

*Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, (e-mail: roberto.galindo@ieee.org)

**Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Mor.,
(e-mail: eqm@cenidet.edu.mx)

Abstract: En este documento se reporta el diseño de un controlador adaptable de propósito general para ser utilizado como una alternativa viable para el control de sistemas industriales. Aun cuando se controlan lazos individuales, se simula la interacción con el modelo de una planta termoelectrica completa de orden 47. Los resultados obtenidos presentan buenas características de respuesta ante la mayoría de las situaciones probadas. Se describe el proceso de elección del método de control adaptable utilizado, de entre tres métodos básicos y bien conocidos, presentándose dicho controlador y sus cinco modos de operación (uno de los cuales utiliza un método de inicialización del controlador que se considera contribución original). Además, se presentan algunos resultados de simulación. Por otro lado, tanto el ejecutable de la planta, programado con *LabWindows* de *National Instruments*[®], como una versión extendida de este documento pueden descargarse en la dirección: <http://equinterom.xyz/>.

Keywords: Control Adaptable, Termoelectricas, Control de Plantas

1. INTRODUCCIÓN

El control adaptable es un área en la que se ha invertido un considerable esfuerzo de investigación desde principios de 1950; éste ha tenido sus altibajos, de acuerdo con los resultados encontrados, así como con los avances obtenidos en la teoría general de control automático [1].

Si bien en algunas aplicaciones se obtuvieron resultados prometedores, en otras fueron francamente decepcionantes [2]. Finalmente, se encontró que los problemas observados podían ser resueltos al tomar ciertas precauciones prácticas, tales como usar filtros de datos en el estimador o agregar algoritmos de supervisión al controlador [3]-[4]. Después de esto, se han publicado algunas de las características deseables con las que debe contar el supervisor de un controlador adaptable, con el fin de protegerlo de aquellas condiciones de operación para las que el algoritmo no fue diseñado [5].

En el presente documento se describen los primeros resultados obtenidos en un proyecto de diseño de un controlador adaptable. Los objetivos de este trabajo son, por un lado, evaluar el desempeño de este tipo de control en ambientes industriales y, por el otro, observar el comportamiento de las distintas soluciones propuestas en la literatura a los problemas mencionados líneas arriba, además de experimentar con algunas nuevas formas de solucionarlos.

La Fig. 1.1 muestra el esquema de la planta termoelectrica (PTE) considerada, el modelo es de orden 47, y representa una planta de 600 MW operada con combustóleo. En este trabajo la idea es simplemente reemplazar los controles PID

por controladores adaptables. Para una descripción de las ecuaciones del sistema físico consultar [6] y [7].

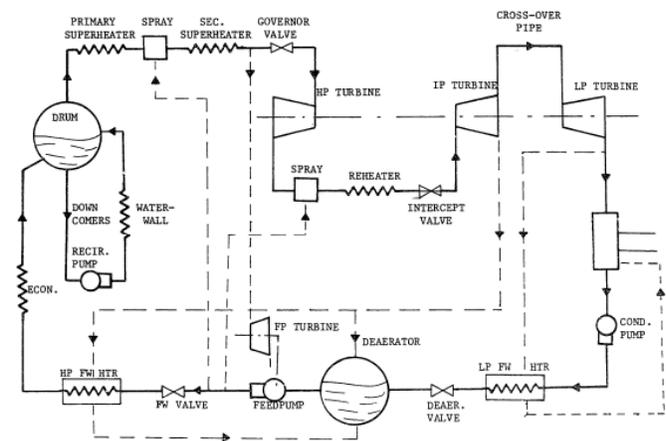


Fig. 1.1. Esquema de la Planta Termoelectrica (PTE).

De acuerdo con lo anterior, este artículo se encuentra organizado de forma que en la siguiente sección se describe la forma en que se eligió el método de control adaptable a usar. Después, se describe el controlador diseñado. A continuación, se presenta la aplicación de dicho controlador en tres lazos de la planta termoelectrica presentada arriba. Posteriormente, se muestran algunas de las pruebas realizadas para verificar el desempeño del controlador, así como los resultados encontrados y, finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado.

2. ELECCIÓN DEL MÉTODO DE CONTROL

Para elegir el método de control adaptable a utilizar se consideraron principalmente tres métodos básicos y bien conocidos: el regulador auto-sintonizable de varianza mínima (*MV-STR*, por sus siglas en inglés), el controlador predictivo generalizado (*GPC*) y el regulador auto-sintonizable por colocación o asignación de polos (*PP-STR*). Por cuestión de espacio, se omite la descripción detallada de estos métodos. El lector interesado puede consultar [1], [3], [8]-[14].

El *MV-STR*, en su versión original, es un método directo muy sencillo de implementar. Sin embargo, requiere del mejor conocimiento posible del orden y retardo del sistema para ofrecer una regulación óptima. Además, está restringido a utilizarse en sistemas de fase mínima, debido a que produce la cancelación de los ceros del proceso.

El *GPC*, que involucra conceptos de sistemas estocásticos, "es capaz de realizar el control de sistemas con parámetros y tiempo muerto variables, así como de sistemas de fase no mínima e inestables y de sistemas cuyo modelo cambia instantáneamente de orden, siempre y cuando exista la suficiente riqueza en las señales para permitir una buena estimación paramétrica" [14]. En general, *puede* requerir de un considerable número de operaciones para determinar la señal de control.

Por otro lado, existen varios enfoques del método *PP-STR*, pero todos ellos producen la colocación de los polos de lazo cerrado en ubicaciones pre-especificadas, de acuerdo con la naturaleza física del sistema y las características deseadas de la respuesta transitoria. También, pueden realizar el control de plantas de fase no mínima y funcionar adecuadamente aún si el retardo del sistema es subestimado, pero fallan cuando existe una sobreparametrización en el modelo usado para aproximar el sistema. Además, la calidad de la regulación ofrecida por este método es inferior a la del *MV-STR*.

Con base en lo anterior, **se eligió el método *PP-STR***, considerado en [3] y [9], por considerarse que es el que más se ajusta a los requerimientos de la aplicación deseada, debido a que proporciona *el mejor compromiso* entre necesidad de conocimiento *a priori*, sencillez del algoritmo de control, rango de aplicación y tiempo de cómputo.

En la siguiente sección se describe el controlador diseñado.

3. CONTROLADOR ADAPTABLE POR COLOCACIÓN DE POLOS

El controlador adaptable por colocación de polos (*CACP*) diseñado cuenta con tres componentes (identificador, controlador y supervisor) y cinco modos de operación, descritos en los párrafos siguientes.

3.1. Componentes del *CACP*

3.1.1. Identificador

Su función es proporcionar al controlador un modelo actualizado del sistema. A su vez, el Identificador se compone de tres elementos: (i) filtros de datos, (ii) estimador y (iii) selector de modelo, que se describen a continuación.

3.1.1.1. Filtros de datos

Los filtros de datos son implementados en tiempo discreto, con una característica pasa-banda, y su objetivo es restringir el contenido de frecuencia de las señales que llegan al estimador [2] y [3].

3.1.1.2. Estimador

El estimador se encarga de actualizar periódicamente los parámetros del modelo usado. Para ello, se supone que el comportamiento del sistema puede aproximarse con un modelo de la forma:

$$(1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{NA} q^{-NA}) \cdot y(t) = (b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{NB} q^{-NB}) \cdot u(t - NK) \dots (3.1)$$

o bien:

$$A^*(q^{-1}) \cdot y(t) = B^*(q^{-1}) \cdot u(t - NK) \dots (3.1^*)$$

donde *NA* y *NB* son el número de parámetros de los polinomios *A* y *B*, respectivamente; mientras que *NK* es el retardo o tiempo muerto supuesto.

Además, el estimador utiliza el método recursivo de mínimos cuadrados (*RLS*, por sus siglas en inglés) con factor de olvido, definido por las expresiones:

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \mathbf{P}(t) \varphi(t-1) \varepsilon(t)$$

$$\mathbf{P}(t) = \frac{1}{\lambda} \left(\mathbf{P}(t-1) - \frac{\mathbf{P}(t-1) \cdot \varphi(t-1) \cdot \varphi^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1)}{\lambda + \varphi^T(t-1) \cdot \mathbf{P}(t-1) \cdot \varphi(t-1)} \right) \dots (3.2)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t-1) \hat{\theta}(t-1)$$

donde $\varepsilon(t)$ representa el error de estimación o de predicción al tiempo *t*; θ es el vector de parámetros del modelo, φ es el vector regresor, \mathbf{P} es la matriz de covarianzas de los estimados y λ es el factor de olvido -que en lo que sigue será llamado solamente *lambda*- [3].

3.1.1.3. Selector de modelo

El algoritmo selector es una propuesta de este trabajo y se utiliza en el *modo 1* de operación del *CACP* (descrito párrafos adelante), siendo su objetivo principal evitar que el usuario necesite conocer *a priori* el orden y retardo del sistema.

Este método se basa en la realización de un experimento transitorio, durante el cual se actualizan recursivamente treinta y tres modelos de la forma (3.1), eligiéndose el que minimiza el siguiente criterio numérico:

favorecer la identificación del sistema. Después del *periodo de selección*, el controlador pasa automáticamente a modo 2 (STR).

3.2.2. Modo 2: Autosintonización (STR)

En este modo de operación, un CLG es rediseñado cada instante de muestreo, utilizando para ello un modelo recién actualizado por el identificador del CACP. La señal de control se determina utilizando la expresión (3.5).

3.2.3. Modo 3: CLG con parámetros fijos (CLG)

En este modo de operación, los parámetros del CLG son mantenidos fijos y la identificación del sistema es suspendida. La señal de control se determina utilizando (3.5).

3.2.4. Modo 4: PID con sintonización fija (PID)

El usuario puede solicitar este modo de operación en cualquier momento. Durante este modo de operación la señal de control es determinada utilizando la expresión (3.4) cada instante de muestreo.

3.2.5. Modo 5: Manual (Man)

El usuario puede solicitar este modo en cualquier momento. Durante este modo de operación la señal de control es mantenida constante, a menos de que el operador solicite un cambio en su magnitud.

4. APLICACIÓN DEL CACP A TRES LAZOS DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA

La PTE considerada en este trabajo tiene una capacidad de 600 MW, su modelo fue desarrollado en [6] y descrito ampliamente en [7].

4.1. Sistemas de control considerados

Para evaluar su desempeño, el CACP fue utilizado para *reemplazar* los controladores originales (con estructura PID) en los sistemas de control de: velocidad de la turbo bomba del sistema de alimentación de agua (TB), la presión de vapor (PV) y la temperatura en el sobre calentador (TSC).

4.2. Programa de simulación

La aplicación del CACP fue simulada en el ambiente de desarrollo LabWindows®. En el programa de simulación, las ecuaciones de la PTE se integraron con el método de Runge Kutta de 4° orden, con un paso de integración (dt) igual a 0.1 s, como en la referencia original.

En el programa desarrollado, el CACP tiene la apariencia mostrada en la Fig. 3.2 (a) y sus parámetros son modificados en el llamado *Panel de Programación del CACP*, mostrado en la Fig. 3.2 (b).

Una vez concluida la sustitución de los controladores PI por CACPs, se efectuó el conjunto de pruebas que se describen en los siguientes párrafos. Por motivos de espacio, se

presentan solamente algunos resultados. Puede encontrarse información adicional a este respecto en [18].

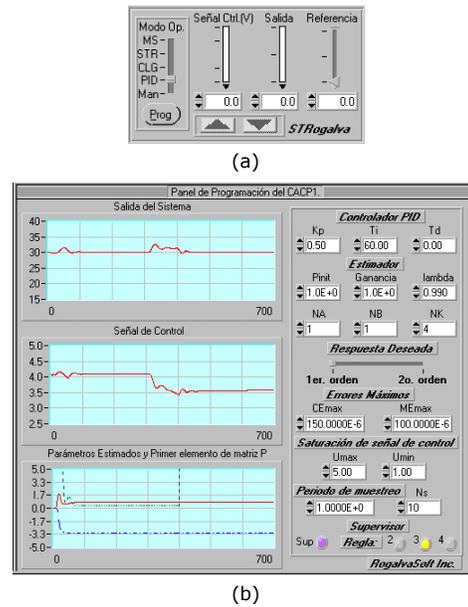


Fig. 3.2. (a) Apariencia del CACP en el programa de simulación. (b) Panel de programación del CACP.

- i. Prueba de modelos de primer y segundo orden para *aproximar con el estimador* cada sistema controlado. De los resultados obtenidos, *se decidió dar preferencia a la utilización de modelos de primer orden*, dado que los de segundo orden produjeron una señal de control más variante.
- ii. Prueba de la habilidad del CLG para cumplir las especificaciones de tiempo de respuesta del sistema. Habiéndose probado la colocación de uno o dos polos dominantes en la función de transferencia de lazo cerrado, los mejores resultados se obtuvieron al solicitar respuestas de primer orden (un polo dominante). Además, se encontró que la respuesta más rápida, sin cambios bruscos en la señal de control, se obtiene al ubicar el polo dominante en $-1/15$ para el sistema de TB, en $-1/30$ para el de PV y en $-1/40$ para el de TSC, lo cual se asocia con tiempos de respuesta de 50s, 200 s y 200s, respectivamente. La Fig. 3.3 presenta la respuesta de los tres sistemas ante escalones descendentes y ascendentes en la señal de referencia. Puede observarse que los tiempos de respuesta se cumplen aproximadamente bien en los tres casos.

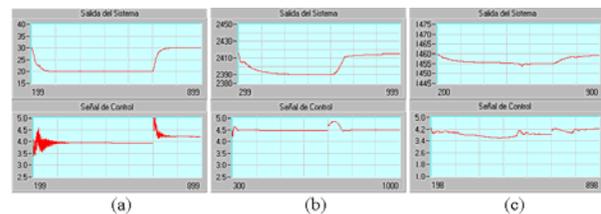


Fig. 3.3. Respuesta del CACP a cambios de la referencia en escalón, en los sistemas de: (a) TB, (b) PV y (c) TSC.

- iii. A continuación, se realizaron pruebas variando los parámetros de los filtros de datos del estimador, para observar la manera en que afectan el desempeño del CACP. Se encontró que *las frecuencias de corte inferior y superior pueden situarse en un intervalo de entre una o dos unidades del mismo orden de magnitud que la frecuencia central, hasta una década antes y después de la misma*, dependiendo de la complejidad del sistema controlado y suponiendo que la riqueza de las señales usadas en la estimación paramétrica es la adecuada.

Las pruebas anteriores se realizaron para adecuar los parámetros de cada CACP a su sistema correspondiente. Las últimas tres pruebas sirvieron para evaluar el desempeño de cada CACP y serán presentadas en la siguiente sección.

5. PRUEBAS DE EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL CACP.

Para evaluar su desempeño se efectuaron tres conjuntos de pruebas a cada uno de los CACP implementados: (i) de regulación, (ii) de operación en modo 1 MS y (iii) de operación con $NB > NA$. Aquí sólo se presentan los resultados de la primera prueba de regulación, la descripción detallada de las restantes puede encontrarse en [18].

5.1. Pruebas de Regulación

Para verificar el comportamiento de los tres sistemas controlados por CACP, ante situaciones de perturbación, se comparó el desempeño de dichos sistemas con el que se obtiene al usar controladores convencionales de estructura PID. La sintonización de cada uno de estos controladores fue determinada refinando en forma heurística la originalmente propuesta por Usoro, siendo las ganancias: $K_{p1}=0.6$ y $T_{i1}=48$, para el controlador del sistema TB; $K_{p2}=20$ y $T_{i2}=60$ para el de PV y $K_{p3}=10$, $T_{i3}=50$, para el de TSC.

A manera de perturbación, se simularon en forma separada dos situaciones de emergencia (propuestas por Usoro en [6]):

- (i) Decremento en rampa de la potencia generada por la planta del 100% al 77.5% de capacidad a una razón de 15% por minuto.
- (ii) Decremento en rampa de la potencia generada por la planta del 77.5% al 50% de capacidad a una razón de 15% por minuto.

Para comparar el desempeño de los controladores, se utilizó el siguiente criterio numérico:

$$J = JE + JU \quad \dots (5.1)$$

$$JE = \sum_{k=1}^N \left| \frac{y_{ref} - y(kT)}{y_{ref}} \right|, \quad JU = \sum_{k=1}^N \left(\frac{u(kT)}{u_{m\acute{a}x}} \right)$$

donde:

y_{ref} es la señal de referencia (que permanece constante, durante la perturbación),

y es la salida del sistema considerado,

u es la señal de control,

$u_{m\acute{a}x}$ es el valor máximo de ésta (definido por el usuario) y

N es la duración del periodo de prueba (en muestreos).

5.1.1. Resultados de la prueba de regulación.

En esta primera prueba de regulación, en general, se obtuvo una respuesta considerablemente mejor en los sistemas con CACP.

La Fig. 5.1. muestra la respuesta de los sistemas usando controladores PID. La Fig. 5.2 presenta la respuesta usando CACP.

Todas las simulaciones realizadas durante esta primera prueba iniciaron con la planta operando en estado estable al 100% de capacidad. En la TABLA 5.1 se presenta un resumen de los valores numéricos de J obtenidos por cada controlador.

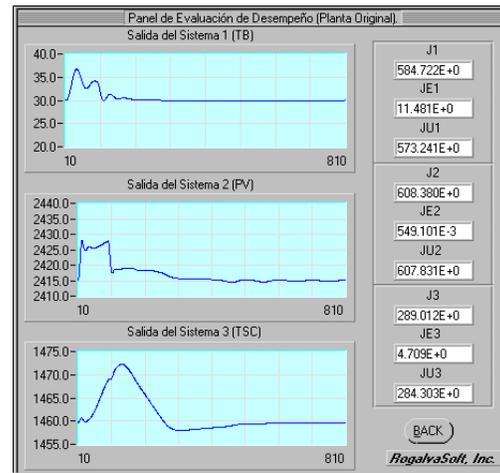


Fig. 5.1. Resultados de la primera prueba de regulación con los controladores PID convencionales.

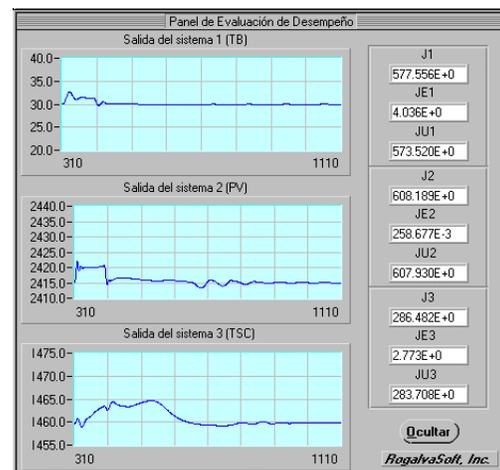


Fig. 5.2. Resultados de la primera prueba de regulación con los CACP.

TABLA 5.1. COMPARACIÓN DE LOS CRITERIOS DE DESEMPEÑO

CRITERIO	PID	CACP
J _{TB}	584.7	577.6
J _{PV}	608.4	608.2
J _{TSC}	289.0	286.5

En la planta original, con controladores *PID* convencionales, el decremento en rampa de la potencia generada (la perturbación para los tres sistemas de interés) inicia en $t = 10$ s. En la planta con *CACP*, la perturbación inicia en $t = 310$ s, después de un periodo de adaptación inicial de 60 muestreos y operando los *CACP* en modo 2 (STR).

Para los fines de la comparación se ha denominado con el número 1 a las cantidades asociadas al sistema de control de TB, con el 2 a las del sistema de PV y con el 3 a las del sistema de TSC.

En la Fig. 5.2 puede observarse que los valores de J y JE en cada sistema son menores que los correspondientes a la Fig. 5.1, lo cual indica un comportamiento mejorado con respecto a aquella situación. Esto puede verificarse igualmente en la TABLA 5.1.

6. CONCLUSIONES

En este documento se ha descrito el diseño de un controlador adaptable por colocación de polos (*CACP*) que se basa en el enfoque presentado en [3] y [9]. Se han descrito sus cinco modos de operación y su aplicación a tres lazos de control de una PTE. Además, se han presentado las pruebas realizadas para evaluar su desempeño y los resultados obtenidos.

Dichos resultados parecen sostener que el *CACP* es una alternativa viable para el control de sistemas industriales, puesto que presenta buenas características de respuesta ante la mayoría de las situaciones probadas.

Sin embargo, el *CACP* también demuestra considerable dependencia respecto al estimador utilizado y requiere de un algoritmo supervisor más complejo, el trabajo restante implica cuestiones teóricas y de implementación práctica.

Como pudiera ser de utilidad para la comunidad del Control, tanto el ejecutable de la planta, como una versión extendida de este documento, pueden descargarse en la dirección: <http://equinterom.xyz/>. Además, la descripción detallada de todo el trabajo realizado se encuentra en [18].

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), así como a la Secretaría de Educación Pública (SEP) su valioso apoyo económico para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Aström, K.J., "Theory and Applications of Adaptive Control- A Survey", *Automatica*, Vol. 19, No. 5, 1983, pp. 471-486.
- [2] Wittenmark, B., K.J. Aström, "Practical Issues in the Implementation of Self-tuning Control", *Automatica*, Vol. 20, No. 5, 1984, pp. 595-605.
- [3] Aström, K.J., B. Wittenmark, *Adaptive Control*, 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1995.
- [4] Isermann, R., K.H. Lachmann: "Parameter-adaptive control with configurations Aids and Supervision functions", *Automatica*, Vol. 21, No. 6, 1985, pp. 625-638.
- [5] Hägglund, T., K.J. Aström, "Supervision of Adaptive Control Algorithms", *Automatica*, Vol. 36, 2000, pp. 1171-1180.
- [6] Usoro, P.B., Modeling and Simulation of a Drum Boiler-Turbine Power Plant Under Emergency State Control, M.Sc. Thesis, MIT, 1977, U.S.A.
- [7] Lizardi Rodríguez, R., "Simulación y control de una planta termoeléctrica utilizando interfaces gráficas", Tesis de Maestría, *cenidet*, Marzo de 1998.
- [8] Aström, K.J., B. Wittenmark, "On Self Tuning Regulators", *Automatica*, Vol. 9, 1973, pp. 185-199.
- [9] Aström, K.J., B. Wittenmark, "Self-tuning controllers based on pole-zero placement", *IEE Proc.*, Vol. 127, Pt. D, No.3, May, 1980, pp. 120-130.
- [10] Wellstead, P.J., J.M. Edmunds, D. Prager, P. Zanker, "Self-tuning pole/zero assignment regulators", *Int. J. Control*, Vol. 30, No. 11, 1979, pp. 1-26.
- [11] Wellstead, P.J., P. Zanker, "Servo self-tuners", *Int. J. Control*, Vol. 30, No. 11, 1979, pp. 27-36.
- [12] Allidina A.Y., F.M. Hughes, "Generalized self-tuning controller with pole assignment", *IEE Proc.*, Vol. 127, Pt.D, No.1, January, 1980, pp. 13-18.
- [13] Allidina A.Y., F.M. Hughes, "Self-tuning controller with integral action", *Opt. Ctrl. App. & Methods*, Vol. 3, 1982, pp. 355-362.
- [14] Clarke, D.W., C. Mohtadi, P.S. Tuffs, "Generalized Predictive Control - Part I. The Basic Algorithm", *Automatica*, Vol. 23, No. 2, 1987, pp. 137-148.
- [15] Stephanopoulos, George., *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., U.S.A., 1984.
- [16] Chen, Chi-T., *Analog & Digital Control System Design*, Saunders College Publishing, U.S.A., 1993.
- [17] Ibrahim,A.S., B.W. Hogg, M.M. Sharaf, "Self-tuning Automatic Voltage Regulators for a Synchronous generator", *IEE Proceedings*, Vol. 136, Pt. D, No. 5, September 1989, pp. 252-260
- [18] Galindo del Valle, Roberto. "Regulación de una Planta Termoeléctrica por Medio de Controladores Adaptables". Tesis Maestría. CENIDET. 2001