

Control remoto automático de desviación de energía

Ganador segundo lugar Premio a la Investigación y Desarrollo 2011 - Asocodis - CNO - CAC

***Por: J.M. Ramírez-Scarpetta IEEE Member, S. Ospina, M.L. Orozco-Gutiérrez y D. Martínez-Torres**

Resumen:

En los centros de control de energía, los operadores no siempre pueden garantizar el despacho de energía. Este artículo presenta un sistema de control para la desviación de la energía; la ley de control de energía es lineal y varía en el tiempo con retroceso en el horizonte de control, el cual permite la convergencia del error de la energía a cero en un tiempo infinito; esto considera las limitaciones operacionales de las plantas de generación hidráulica, incluyendo el mecanismo de amortiguación de la respuesta transitoria que evita cambios innecesarios de actuadores mecánicos. La ley de control es fácil de implementar con baja carga computacional y es compatible con los sistemas convencionales de SCADA para sistemas de potencia. La implementación del control ha reducido la desviación de energía en un 55 por ciento.

Palabras Claves del Paper: Control automático, administración de energía, desviación de energía, despacho.

I. Introducción

La desregulación del sector de la electricidad requiere que las empresas de generación cumplan con requisitos estrictos para lograr el despacho de energía. Hoy en día, los sistemas SCADA usados en el smart grid, permiten la adquisición de datos y teleoperación de las plantas de energía desde los centros de control de energía. Sin embargo, la enorme cantidad de operación, cambios en las cuotas de generación por eventos en las unidades de generación o redespachos, además de diferentes eventos en el área de control, no permite a los operadores monitorear constantemente la energía de cada planta, para cumplir con el despacho diario. Por lo tanto, un control automático de la desviación de la energía en cada planta en el área de control es necesario. El despacho debe ser realizado hora a hora, en el horizonte de las 24 horas. [1] La ley de control es del tipo tiempo finito, la cual nos lleva a una dependencia explícita del tiempo de la acción de control. Este artículo presenta una solución a este problema, implementado satisfactoriamente en el Centro de

Supervisión y Maniobras (CSM) de la empresa EPSA. [2] La siguiente sección presenta la descripción del sistema y el problema de control. La arquitectura general de la solución se presenta en la sección II; la sección III presenta los principales problemas de implementación del control de la desviación de la energía; la sección IV describe la implementación de la solución y en la sección V muestra los resultados experimentales del sistema de control propuesta. Finalmente, se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

II. Descripción del sistema y problema de control.

La operación del sistema colombiano de potencia es centralizado en el Centro Nacional de Despacho (CND), el cual está integrado por varios centros de control locales [3]. Esta integración se realiza usando enlaces de comunicación desde cada centro de control con el CND; en el caso del CSM de EPSA, este tiene un enlace de comunicación principal en fibra óptica y un respaldo por microondas. El CSM tiene un centro de control para monitorear y controlar el sistema de potencia. Este tiene una estación maestra y un sistema de comunicaciones (a través de la línea de poder, microonda y fibra óptica) con unidades terminales remotas en las plantas de generación y las subestaciones de transformación. Hay una medida de potencia cada 4 s en cada generador en las centrales eléctricas y la energía cada 3 min en las fronteras comerciales de cada central. El SCADA tiene funciones para programar la entrega cada hora, rampas para los cambios en la generación y control local carga-frecuencia que aseguran una buena respuesta de control de potencia. Las mediciones se almacenan en una base de datos operacional. El CND realiza el despacho económico y envía al CSM la programación (hora a hora) de cada planta (o cadena de plantas) para las próximas 24 horas. Cada planta puede ser controlada directamente por el CND en control automático de generación (AGC), con el fin de mantener la frecuencia eléctrica y el intercambio de potencia en la red con utilidad. Si se presentan eventos de la aplicación del programa, el CND realiza redespacho sobre las 24 horas, como se observa en la Fig. 1.



Figura 1. Relación funcional entre el CND, CSM y las plantas de generación.

Así, el CSM por el programa SCADA busca cumplir con el programa de generación y redespacho. Si una planta de generación se desvía del despacho programado fuera de la banda de tolerancia del 5 por ciento, la desviación que se genera es penalizada económicamente [4]. Hay tres maneras por las cuales una planta puede desviarse, sin ser penalizado: La autorización por el CND debido a cambios inesperados en la demanda o la pérdida o de cualquier otra unidad de generación, cuando el programa de generación cambia de cero a cualquier valor y viceversa y los cambios mayores a 230 MW en el programa de generación. Entre otras, la compañía encontró como causas de las desviaciones de energía, la restricción de las variaciones de potencia en la rampa y los errores humanos de los operadores, debido principalmente por la necesidad de atender emergencias. Además, la regulación eléctrica nacional requiere que todas las unidades de generación ejecuten la regulación de frecuencia primaria, lo que es un servicio en línea que cambia automáticamente la potencia suministrada por la unidad generadora de cambios de frecuencia en el sistema [1]. Por lo tanto, incluso si el centro de control envía la potencia de referencia para la planta de energía requerida para satisfacer la energía programada, esta potencia no es necesariamente satisfecha por la unidad de generación debido a su respuesta a la regulación de frecuencia primaria. De lo anterior, el problema de control es minimizar el error de energía (energía que se genera, menos energía programada) al final de cada periodo (una hora), manteniendo un error máximo del 5%, el cálculo de los valores de las nuevas potencias de cada una de las unidades generadoras, respetando las limitaciones operacionales de cada una de las unidades generadoras (límites de potencia máxima y mínima, pendiente de energía para la carga y descarga, etc.), su respuesta dinámica a los cambios en la potencia (retrasos en los tiempos de comunicación, la dinámica de la turbina y el gobernador), sin interferir en la frecuencia primaria de regulación. El control debe ser integrado en el SCADA e interactuar con los diferentes modos de operación de las plantas (AGC, despacho sin penalización, etc.)

III. Diseño conceptual

A. Especificaciones funcionales del control de desviación de energía.

Para resolver este problema, hay tres funciones básicas para controlar las desviaciones de la energía:

- Manejo del despacho diario de las plantas del CSM.
- Control de energía cada hora, para cada planta.
- Control de potencia de cada unidad generadora.

La siguiente tabla muestra estas funciones en términos de su alcance, la principal variable obtenida por cada función, su horizonte temporal y el periodo de muestreo utilizado para la función. El Sistema de control de desviación de la Energía EDCS, realiza las funciones a través de tres elementos básicos:

- El algoritmo de control de energía, programado en lenguaje C y vinculado al SCADA existente.
- Software que enlaza el SCADA y el algoritmo de control.
- Interfaces Hombre-Máquina, uno para la supervisión general de todas las plantas del CSM y una interfaz de control para cada planta.

Function	Scope	Variable	Horizon	Sampling Period
Management of Energy Dispatch	EPSA	Energy Dispatch in each hour (Ed)	Diary	Hour
Energy Control	Plant	Power desired Pri	Hour	3 Minutes
Power Control	Unit	Power generated Pi	Seconds	4 seconds

Figura 2. Descripción general del programa.

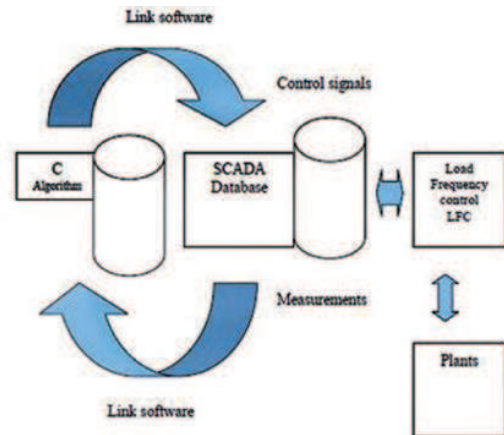


Tabla 1. Niveles funcionales para el control de desviación de energía.

B. Especificaciones funcionales del HMI

Los EDCS tienen 2 HMI: monitoreo y control, Ver FIG. 3. El algoritmo en lenguaje C recopila y envía datos a las interfaces de control y monitoreo y genera reportes. El (SCHEDULE) y el Control de la Frecuencia de Carga LFC ya están implementados en el SCADA; el SCHEDULE recibe las referencias de potencia desde el algoritmo en lenguaje C y los envía al LFC en una estructura de control en cascada. El operador se comunica con los CDE a través de la HMI de control.

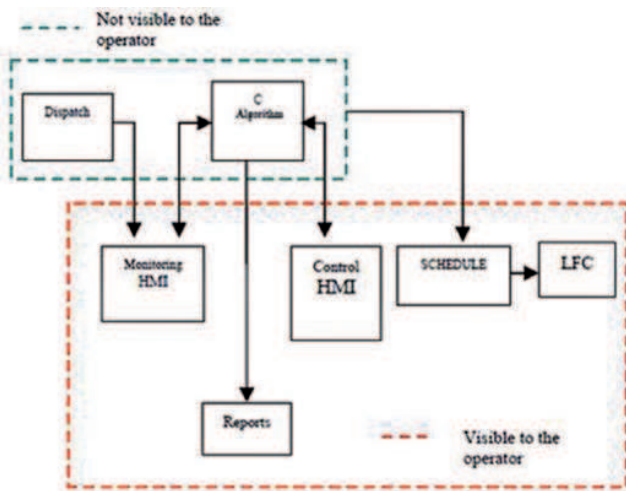


Figura 3. Interfaz Humano Máquina.

C. Control de Energía

La fig. 4 muestra el diagrama de bloques del sistema de control de energía

Hay dos niveles jerárquicos: un control interno para cada unidad de generación implementado a través de la LFC y un control de energía externa el cual recibe la energía medida por los contadores de energía en la frontera comercial de la planta; P1, P2 y P3 son los generadores de potencia en cada unidad y PR1, PR2 y PR3 son las referencias de potencia para el LFC generada por el controlador de energía. Los contadores de energía transmiten datos cada 180s, lo cual impone la frecuencia de muestreo para el control de la energía; el controlador de energía es un optimizador de planeación y no un regulador. El controlador de la energía tiene una sola entrada: la energía programada para la planta en el período (horas), y las múltiples salidas: las referencias de potencia para cada unidad generadora de la planta. Dependiendo de la ubicación del medidor de energía en el sistema de potencia, no necesariamente la energía de los medidores es la integral

de la suma de las potencias de las unidades en la planta. El control de frecuencia de carga, los límites de las referencias de potencia en la magnitud y la tasa de cambio, garantizan un buen seguimiento de la potencia de la señal de referencia; este utiliza una estructura de controlador de Smith[5], con un modelo de unidad dinámica el cual respeta su respuesta a la regulación de frecuencia primaria; de esta manera, el controlador de la energía no interfiere con la regulación de frecuencia primaria e impone los límites de potencia máxima y mínima y los límites de porcentajes autorizados (V_m) en cada unidad de generación.

La Fig. 5 muestra la estructura del controlador de desviación de energía.

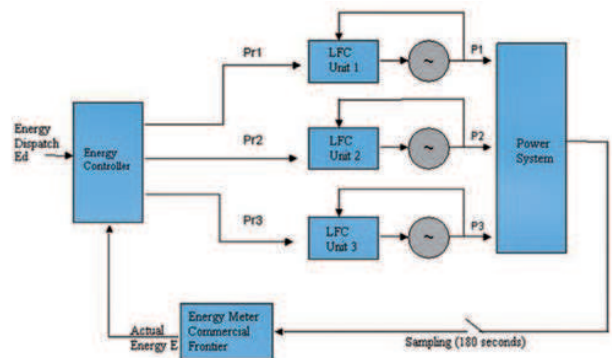


Figura 4. Diagrama general de bloques del sistema de control.

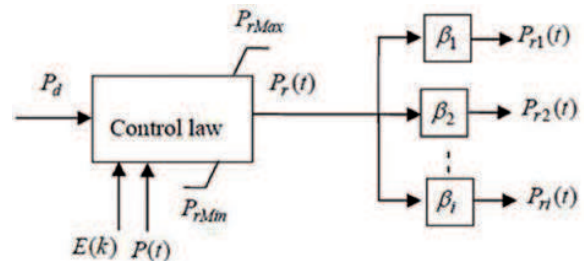


Figura 5. Diagrama de bloques del controlador de desviación de energía.

La ley de control es el planificador que calcula la potencia de referencia $P_r(t)$ para la planta, para corregir el error de desviación de energía al final de cada periodo, a partir de la medida de energía $E(k)$ cada 3 minutos y desde la medida de potencia instantánea generada en la planta; P_d es la referencia de potencia de la planta, la cual corresponde a la energía despachada. La ley de control calcula la potencia de referencia la cual tiene valores mínimos y máximos. La potencia de referencia $P_{ri}(t)$ para enviar a cada unidad vía LFC, tiene una escala de: $P_{ri}(t) = \beta_i P_r(t)$ donde β_i son los factores de participación de cada unidad de la planta.

En el k-esimo subperiodo, el tiempo transcurrido desde el inicio del periodo de despacho es: $t = kS_p$ donde S_p es el periodo de muestra (3 minutos). La potencia promedio

generada por la planta es para corregir el erro de energía: se requiere para implementar una nueva referencia $P_r(k, H)$ de kS_p hasta el final del horizonte H . equiparando las dos energías: $(P_d - P(k))kS_p$, la ley de control se obtiene de la potencia constante con el horizonte de control de pasos H :

$$P_r(k, H) = \begin{cases} P_d + \frac{k}{H}(P_d - \bar{P}(k)), & \text{if } P_{rMin} < P_d + \frac{k}{H}(P_d - \bar{P}(k)) < P_{rMax} \\ P_{rMax}, & \text{if } P_d + \frac{k}{H}(P_d - \bar{P}(k)) \geq P_{rMax} \\ P_{rMin}, & \text{if } P_d + \frac{k}{H}(P_d - \bar{P}(k)) \leq P_{rMin} \end{cases} \quad (1)$$

$k \in [1, N-1]$

La Fig. 6. Ilustra esta ley de control.

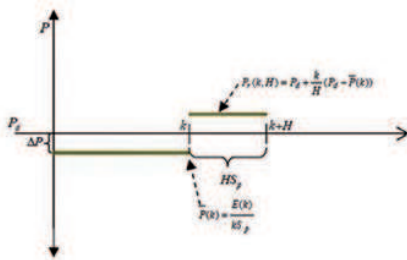


Figura 6. Ley de control de potencia constante con un horizonte de control de H pasos.

Con esta estrategia, $P_r(k, H)$ es aplicado en el subperiodo K , en la próxima muestra de energía $K+1$, la potencia de referencia, $P_r(k+1, H)$ será recalculada y aplicada, y así sucesivamente hasta el último subintervalo $N-1$, el cual corresponde a la estrategia de control con retroceso de horizonte [5]. El cálculo de (1) no tiene en cuenta la restricción de límite V_m impuesto por el LFC y su dinámica de lazo cerrado. Teniendo en cuenta que la señal de $P_r(k, H)$ se aplica hasta que la corrección real de la energía en la planta: $\int (P(t)-P_d) dt$ igual para el error de energía $(P_d - P(k))kS_p$, ajustada por términos de corrección que consideran la energía requerida por la referencia $P_r(t, H)$ para buscar el equilibrio $P_r(t, H)=P_d$; esta energía es aproximada al área triangular $(P(t)-P_d)2/2V_m$ de una trayectoria de rampa de la potencia $P(t)$, así:

$$P_r(t) = \begin{cases} P_r(k, H), & \text{if } \frac{k}{H}|P_d - \bar{P}(k)| > \int_{kS_p}^{kS_p+T} |P_d - P(t)| dt + (P(t) - P_d)^2 / 2V_m \\ P_d, & \text{when } \frac{k}{H}|P_d - \bar{P}(k)| \leq \int_{kS_p}^{kS_p+T} |P_d - P(t)| dt + (P(t) - P_d)^2 / 2V_m \end{cases} \quad (2)$$

Este control no considera los errores generados por los flujos de potencia; no se mide más allá de los buses de la planta ni la energía correspondiente a la zona entre la rampa y la respuesta real de las unidades durante la búsqueda del equilibrio de referencia P_d ; sin embargo, por el principio de retroceso de horizonte, el error más pequeño en un subintervalo será corregido en el próximo subintervalo.

Un aspecto importante en la solución es evitar una variación excesiva de potencia de referencia a fin de preservar los actuadores hidráulicos del gobernador. Un gran control del horizonte H suaviza la acción de control, pero la corrección de la desviación de la energía es más lenta. Otras acciones fueron consideradas para amortiguar la acción de control, como para gestionar los cambios de periodo; incluye una zona muerta y mantiene la potencia de referencia para forzar la convergencia hacia el valor estacionario P_d a través del algoritmo definido en la ecuación (2) [2].

IV. Descripción de la solución

La ley de control propuesta y explicada previamente fue implementada en un lenguaje de programación en C, el cual corre en tiempo real y es integrado con el SCADA existente en la compañía. En este artículo solamente se describe el control de desviación de energía para la planta de Salvajina; esta es una hidroeléctrica ubicada en el Valle del Cauca (Colombia), y tiene 3 unidades iguales de generación [6]. La solución fue implementada en dos etapas: simulación e implementación. En la simulación, para los modelos de LFC y la ley de control se desarrolló un software. En la implementación, el programa en C fue implementado en un servidor y está corriendo en tiempo real.

A. Simulación

Antes de la implementación, la ley de control propuesta no lineal y variable en el tiempo, fue simulada en tiempo real con el modelo de circuito cerrado de LFC y de la planta. Varios eventos fueron simulados, como cambios de manual a automático, los cambios de los niveles de generación de energía, etc. La Fig. 7 muestra los resultados de la simulación de los cambios en la potencia de referencia en la unidad 1, de acuerdo con el despacho. A las 2 pm la mediana de referencia de energía P_d cambia de 85 MW a 80 MW. La unidad llega a los niveles de potencia en 21 minutos con un rendimiento adecuado. La desviación de la energía se presenta en la Fig. 8, que es menor al límite permitido del 5%.

B. Implementación

La Fig. 9 muestra las salidas y las entradas del programa en C. Los datos de entrada y salida se muestran en el panel de monitoreo HMI que se presenta en la Fig. 10. Todas las plantas monitoreadas por el CSM se presentan. El operador puede ver la energía programada para las 24 horas, la energía promedio, la desviación y la referencia $P_r(k, H)$ para el k -ésimo sub-periodo. En las plantas de Salvajina y Calima se añade el botón "CONTROL", que abre el control HMI. El control HMI permite cambiar los parámetros de control como el horizonte de control, los límites de

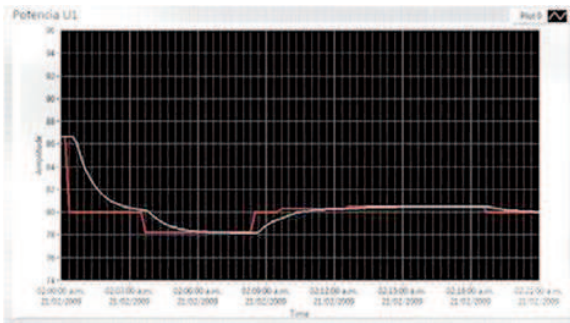


Figura 7. Resultados de la simulación para cambios en la potencia de referencia (la línea roja es la potencia de referencia y la línea blanca es la potencia de la unidad 1)

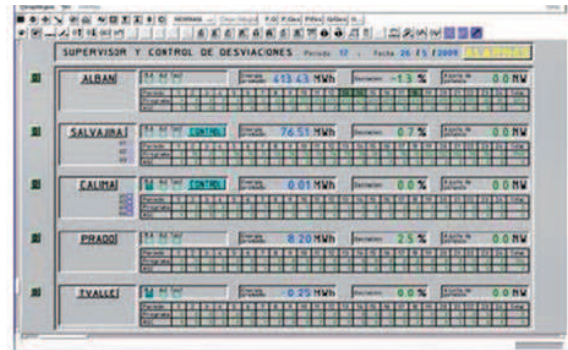


Figura 10. Monitoreo HMI



Figura 8. Resultados de la simulación, desviación de energía para cambios en la potencia de referencia.



Figura 11. Control HMI

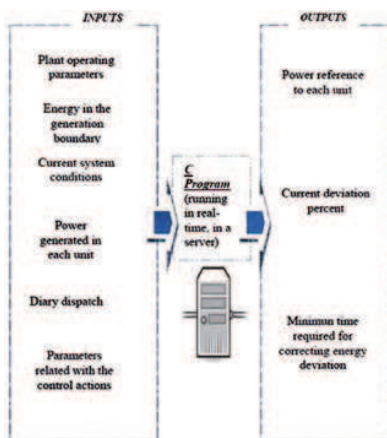


Figura 9. Entradas y salidas del programa en C.

la unidad, los parámetros de LFC y prioridades de la unidad [1]. Además, se muestra la energía actual y la evolución temporal de la desviación de la energía.

V. Resultados experimentales

Las Figs.12 y 13 muestran el funcionamiento real de la solución. A las 11 a.m. la energía programada cambia de 83.3MW a 91 MW en cada unidad. Empezando el período la potencia es constante y la desviación de la energía inicial es de -9,4 por ciento (no se muestra en esta figura), después de 3 minutos, los EDCS producen

cambios en las referencias de potencia; las señales de salida de LFC son los pulsos mostrados en la figura. 12.

Ver Figura 11 y12

Después de 25 minutos las unidades alcanzaron los 95MW deseados, y la desviación de la energía es del -1,9 por ciento, inferior a la permitida del 5 por ciento.

VI. Conclusiones

En este trabajo, el sistema de control de desviación de la energía se ha desarrollado con base en una estrategia de control del retroceso. La ley de control de energía es linealmente variante en el tiempo, lo que permite la convergencia del error de energía a cero en un tiempo finito; esto considera las limitaciones operacionales de una planta de energía hidráulica que incluye un mecanismo de amortiguación de la respuesta transitoria, la cual evita cambios innecesarios de actuadores mecánicos.

La ley de control es fácil de implementar con baja carga computacional; el controlador se ha integrado con el actual sistema SCADA; la preservación de las protecciones contenidas en esta aplicación, se logra con la gestión de eventos en caso de falla de comunicaciones. Para el monitoreo y control se desarrollaron dos HMI, lo que

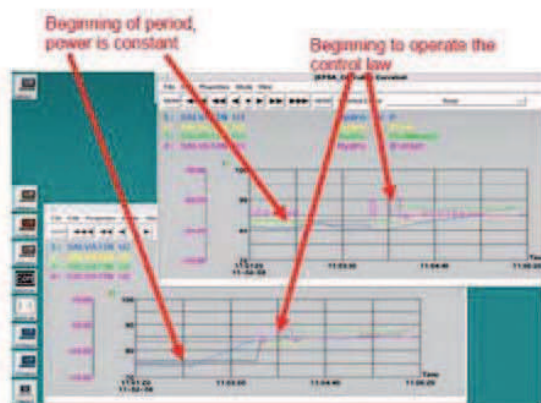


Figura 11. Control HMI

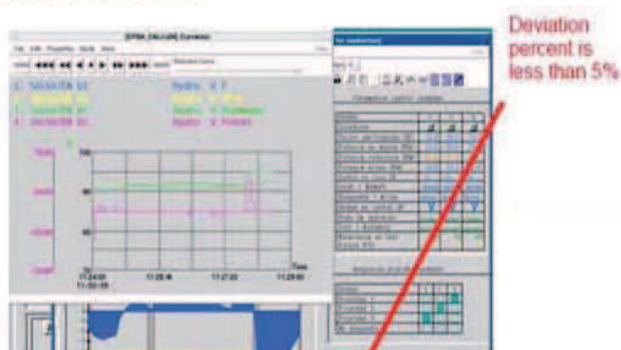



Figura 12. Respuesta experimental para un cambio en la programación de la energía (empezando el periodo)

permite ajustar el controlador y supervisar el desempeño general de la planta.

El porcentaje de desviación de energía en 2009 fue de 0.051 por ciento; en 2010 después de la implementación del sistema de control de energía, este porcentaje decreció a 0.028 por ciento.

La solución implementada se puede aplicar a otras plantas; en la actualidad los autores están desarrollando un controlador para coordinar la generación de plantas en cascada, teniendo en cuenta los nuevos grados de libertad y otras restricciones de control. 

Referencias

- [1] A.J. Wood and B.F. Wollenberg, (2nd ed.) Power Generation, Operation, and Control, New York: Wiley, 1996, p. 29.
- [2] J.M. Ramírez, M.L. Orozco and D. Martínez, "Automatic energy

2. deviation control from the CSM of EPSA," Universidad del Valle, Cali,
3. Colombia, Tech. Rep. EIEE 001, Jul. 2009.
- [3] Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG, Resolución 80 de 1999.
- [4] Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG, Resolución 112 de 1998, p7.
- [5] G. C. Goodwin, S.F. Graebe and M.E. Salgado, Control System Design, 9 edition, New Jersey: Prentice Hall, 2001, p. 189.
- [6] EPSA, Centrales de Generación, 2009 [Online]. Available: <http://www.epsa.com.co/>.

J. M. Ramírez-Scarpetta IEEE Member, S. Ospina, M.L. Orozco-Gutiérrez and D. Martínez-Torres
 Universidad del Valle- Empresa de Energía del Pacífico
 EPSA E.S.P Santiago de Cali, Colombia
sospina@epsa.com.co