

# Diseño e Implementación de un sistema de control de velocidad y voltaje para la Unidad 4 de Generación de la Central Termoeléctrica Guangopolo

A.G. Asipuela González, C.F. Paredes Espinoza  
Ingeniería Electrónica, Automatización y Control  
Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE  
Campus Sangolquí, Ecuador  
agasipuela@espe.edu.ec, cfparedes@espe.edu.ec

**Resumen**—La central termoeléctrica Guangopolo cuenta con una potencia instalada de 31,2 MW, distribuidas en 6 unidades de generación marca Mitsubishi MAN de funcionalidades similares y 1.8 MW suministrados por la unidad Wartsila. Actualmente la unidad 4 de generación suministra 5.0 MW de la potencia total. Debido a la demanda de energía existente, las unidades de generación siempre deben estar disponibles para la producción de la misma, además que deben estar preparadas para cualquier evento no planeado que se pueda presentar. Los eventos no planeados que se pueden presentar entre otros, son fallas en el sistema nacional interconectado que activarían las protecciones de la central, este evento en las condiciones actuales causaría la desconexión total de las unidades y de los sistemas auxiliares. Por esta razón el desarrollo de este proyecto plantea un sistema de control de velocidad y voltaje que reaccionen frente a dichas fallas de manera adecuada, conservando una mínima potencia necesaria para mantener energizados los sistemas auxiliares de la central termoeléctrica. En este proyecto se presenta el diseño de los sistemas de control anteriormente mencionados en base a la identificación de la planta y la obtención de parámetros para su respectiva regulación, además mediante simulación obtener resultados previos a la implementación de los controladores en la unidad. Al finalizar con la implementación se realizarán pruebas del comportamiento de los nuevos sistemas de control con el fin de exponer los resultados obtenidos a lo largo del proyecto y que este se pueda extender a las demás unidades de generación de la central termoeléctrica Guangopolo.

**Palabras Claves**—Regulador de Velocidad, Regulador de Voltaje, Control PID, Identificación de Sistemas.

## I. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica en una central termoeléctrica se la realiza en diferentes procesos y subprocesos, las variables de proceso en el presente proyecto a controlar son la velocidad y el voltaje del lazo de potencia activa y potencia reactiva respectivamente. En la figura No. 1 se puede observar el diagrama de funcionamiento de una central termoeléctrica.

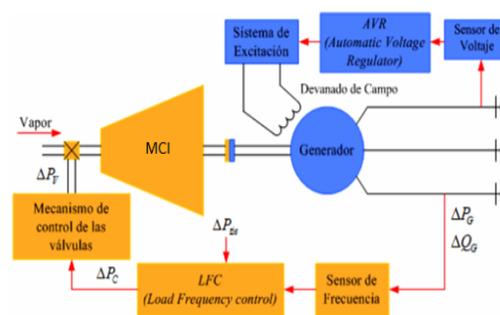


Figura 1. Sistema de control de un generador [Imagen de propiedad Fumagalli L]

Para realizar el diseño de los parámetros de los controladores, se realiza la identificación de la planta a controlar, por esta razón se obtienen los datos de entrada y salida de las plantas como un método de identificación recursiva. Para el lazo de control de velocidad la planta es el motor de combustión interna que es la máquina motriz del generador, y para el lazo de control de voltaje la excitatriz.

En base a este análisis inicial se propuso determinar los parámetros de los controladores PID mediante los criterios de control, por ejemplo el criterio de Ziegler Nichols. A través de herramientas de software se procede a la simulación el cual permite observar una aproximación del comportamiento que los sistemas de control presentan para su posterior implementación.

Seguidamente, con la instalación se procede a realizar pruebas de funcionamiento y operabilidad, además como parte importante se obtienen los resultados de las plantas con los

controladores para su respectivo análisis. Con los datos de los resultados obtenidos se procede a realizar la evaluación y ajustes necesarios en los parámetros del controlador, de tal manera de alcanzar los parámetros deseados y garantizar el correcto funcionamiento del sistema de generación.

## II. MARCO TEÓRICO

Esta sección describe brevemente los principales conceptos referentes al control de velocidad y voltaje.

### A. Sistema de Control de Velocidad [5]

El sistema de control de velocidad también es denominado como el control de potencia activa, debido a que este controla una entrada de energía para una unidad motriz a fin de obtener una determinada potencia. El controlador recibe la señal de velocidad y de potencia y ajusta la entrada de energía de tal manera que dicha entrada esté de acuerdo con el valor deseado de potencia.

Para entender mejor el comportamiento del controlador se realizó el siguiente diagrama de bloques de un sistema de control de velocidad, que se muestra en la Figura No. 2.;

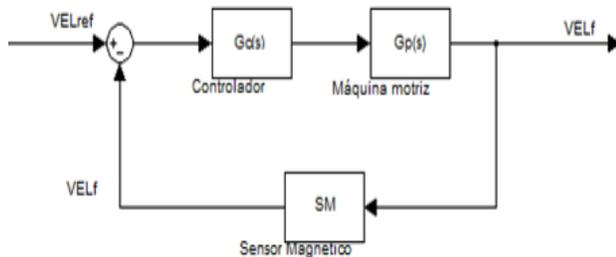


Figura 2. Diagrama de bloques del sistema de control de velocidad.

Donde;

VELref: valor de referencia

Gc(s): controlador aplicado

Gp(s): planta (máquina motriz)

SM: sensor magnético de velocidad

El controlador compara la señal de salida con el valor requerido de velocidad, si la salida permanece constante la inyección de combustible permanece constante, procedimiento que realiza el gobernador para el control de la velocidad, es decir, abre o cierra las cremalleras de acuerdo al valor requerido. De la misma manera si existe un aumento en la carga el controlador abrirá las cremalleras para aumentar el

suministro de combustible y mantener la velocidad en la referencia (la velocidad decae por el aumento de carga), además se realiza una compensación, lo que quiere decir que antes de llegar a la referencia se disminuye el suministro de combustible para que la velocidad no sobrepase el valor deseado, de igual manera si existe una disminución de la carga la velocidad tiende a aumentar por lo que se debe disminuir el suministro de combustible.

### B. Sistema de Control de Voltaje [2]

El sistema de control de voltaje interviene en el sistema de excitación de la unidad de generación. Un sistema de excitación tiene como función suministrar y ajustar automáticamente la corriente de campo con el fin de mantener la tensión de salida estable, es decir, con un mínimo de variaciones.

El regulador automático de voltaje (A.V.R) es el encargado de controlar la tensión del estator del generador. Procesa y amplifica las señales de entrada de control a un nivel y forma apropiada para el controlador. En este se encuentra la realimentación y compensación, compara la señal de entrada con un valor de voltaje deseado y lo lleva a la referencia disminuyendo el error que existe entre ellos. Cuando se encuentra en sincronismo con otros generadores en un sistema de potencia este controla el voltaje y la frecuencia. El lazo de control se lo puede observar en la Figura No. 3.

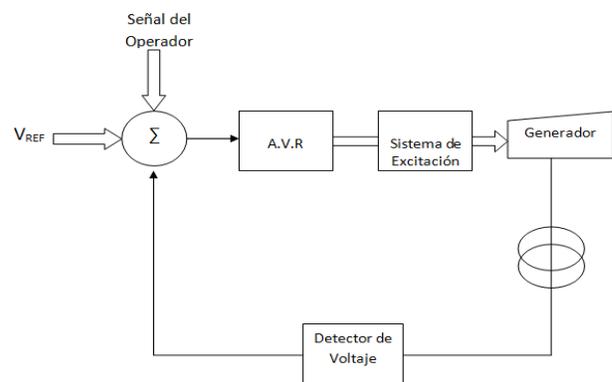


Figura 3. Diagrama del sistema de control de voltaje la unidad No. 4.

El regulador de voltaje está encargado de controlar la tensión del sistema de excitación en el caso de que existan variaciones en la barra de generación, de tal manera si los niveles de tensión se reducen el control aumenta los reactivos, esto quiere decir que la corriente de campo también debe aumentar, en el caso de que la tensión aumente su nivel los reactivos deben disminuir y por tanto también la corriente de campo.

### III. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente proyecto es de carácter investigativo experimental aplicando diferentes métodos como la observación y el análisis de documentos y datos.

En esta sección se describe el trabajo realizado para la identificación de las plantas como parte de la metodología utilizada.

#### A. Identificación

El diseño de un sistema de control adecuado para la unidad 4 de generación de la C.T. Guangopolo requiere de un proceso de identificación, en el que se propone realizar los siguientes pasos con el fin de obtener un modelo apropiado para los propósitos de la presente proyecto [4].

- Obtención de datos de entrada y salida
- Tratamiento previo de los datos obtenidos
- Elección de la estructura del modelo
- Obtención de los parámetros del modelo
- Validación del modelo

La obtención de datos de entrada y salida se lo realiza mediante el software de Intouch en un periodo de tiempo igual al número de muestras obtenidas para evitar pérdidas de datos, la elección de la estructura del modelo, es un modelo ARX, que es un modelo paramétrico que se utiliza para la identificación de plantas en lazo cerrado, offline, y que se lo realiza mediante el software de Matlab.

Una vez que se han identificado los sistemas se realiza el diseño del controlador PID, consiste en una combinación de las tres acciones de control; proporcional, integral y derivativa, en la que la acción proporcional agrega una ganancia proporcional al error mejorando la estabilidad del proceso, la acción integral agrega una ganancia integral la cual disminuye el error a cero y la acción derivativa agrega una constante de tiempo derivativo que hace más rápida la acción de control, la unión de los tres tipos control forman el controlador PID, el cual une las ventajas de cada acción y elimina las desventajas que tiene cuando se aplican estas acciones solas. Entonces el controlador PID se define por:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

De donde se obtiene la siguiente función de transferencia;

$$G_c(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

Una vez obtenida la función de transferencia del controlador se requiere un método para el ajuste de estos parámetros, para los dos casos se utilizará el método de sintonización de Ziegler – Nichols, segundo método de oscilación.

#### B. Simulación de sistemas

El software de simulación tanto para el sistema de control de voltaje como para el de velocidad, es Simulink de Matlab.

Simulink es una interfaz de matlab, con un ambiente de diagramas de bloques para simulación multidominio y diseño basado en modelos. El entorno gráfico que proporciona al usuario facilita el diseño, análisis y simulación de sistemas tanto de control, entre otros [3].

Una vez terminado el diseño se realizó la simulación, en la cual los diagramas de control simulados para el sistema de control de velocidad y voltaje se observan en la Figura No. 4 y Figuras No.5 respectivamente.

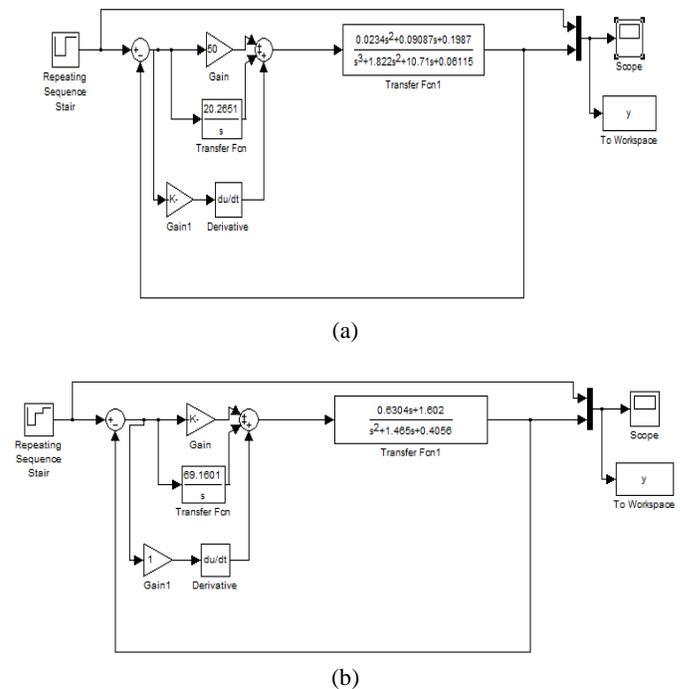


Figura 4. Regulador de velocidad, de la unidad 4 de generación en simulink (a) Velocidad (b) Potencia Activa.

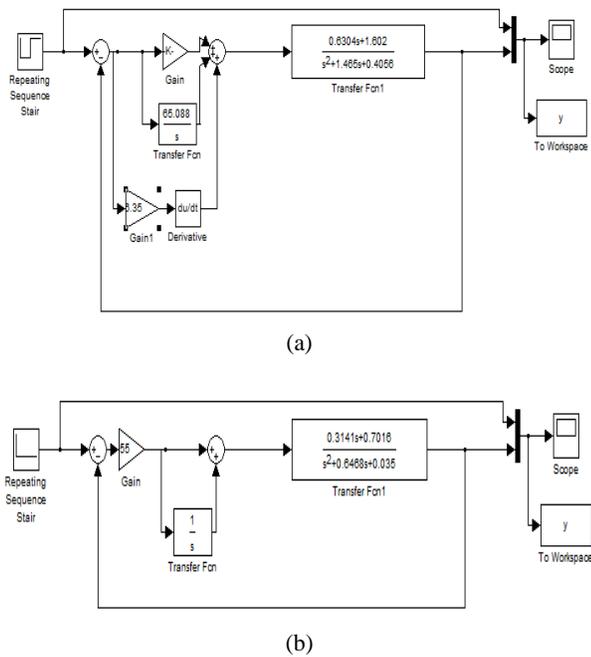


Figura 5. Regulador de Voltaje, de la unidad 4 de generación en simulink (a) Voltaje (b) Potencia Reactiva.

IV. IMPLEMENTACIÓN

Como parte de la ingeniería en control una de las etapas es la implementación, con los valores obtenidos en el diseño y consideraciones obtenidas mediante el análisis del sistema de generación, se establecen y ajustan los parámetros en un controlador electrónico.

Mediante el estudio del conexionado de los sistemas anteriores de control, y cumpliendo con las normativas y consideraciones de las normas eléctricas IEC, JIS se procede a realizar el diseño a través de planos para el nuevo sistema de control de velocidad y voltaje, y finalmente se procede a realizar el conexionado de los nuevos controladores, actuadores y sensores.

A continuación se detallan las especificaciones de los controladores en las siguientes tablas y la respectiva figura que ilustra la instalación realizada.

La tarjeta electrónica 2301D de la marca Woodward es utilizada para realizar el control de velocidad y de potencia activa cuyas características se observan en la Tabla No. 1.

Dispositivo:	Controlador Digital de Velocidad y de Compartición de Carga
Marca:	Woodward
Model	2301D

Number:	
Puertos de Comunicación :	RS232, RS-422, conector de 9-pines , 1200 a 38400
Señales de entrada y salida:	1 Sensor de carga 1 Controlador para el actuador 1 Sensor de velocidad - MPU 1 Salida análoga configurable 2 Entradas análogas configurables 8 Entradas discretas (switch, 3 entradas son configurables) 4 Salidas discretas configurables (para relé)
Software:	Servlink Server Watch Window Standard 1.6

Tabla 1. Especificaciones generales de la tarjeta electrónica Woodward 2301D [6].



Figura 6. Regulador de Velocidad y Potencia, Woodward 2301D.

El controlador de voltaje es un equipo de la marca Basler Electric, modelo DECS – 200, el cual cumple las características que se observan en la Tabla No. 2.

Dispositivo:	Sistema de control digital de excitación
Marca:	Basler Electric
Model Number:	DECS – 200
Estilo:	102 – 2C
Número de serie:	H01234641
Puertos de Comunicación:	RS232 RS485
Señales de entrada y salida:	Entradas de detección AC Entradas auxiliares DC Salidas de campo AC, DC Salidas de Relé
Software:	Basler Electric BESTCOMS software versión 1.03.02

Tabla 2. Características generales del dispositivo Basler Electric [1].



Figura 7. Regulador de Voltaje, DECS200.

## V. RESULTADOS

En esta sección se describen los resultados obtenidos del funcionamiento de los sistemas de control implementados en relación a la simulación.

### A. Sistema de Control de Velocidad

El regulador de velocidad implementado se ha acoplado al funcionamiento de una manera adecuada a lo largo de las pruebas que se han realizado en la C.T. Guangopolo en un periodo de alrededor de 2 meses con cambios evolutivos de acuerdo al desarrollo de este proyecto, garantizando el correcto funcionamiento a largo plazo en la UG4, en la Figura 8 se representa el comportamiento del sistema.

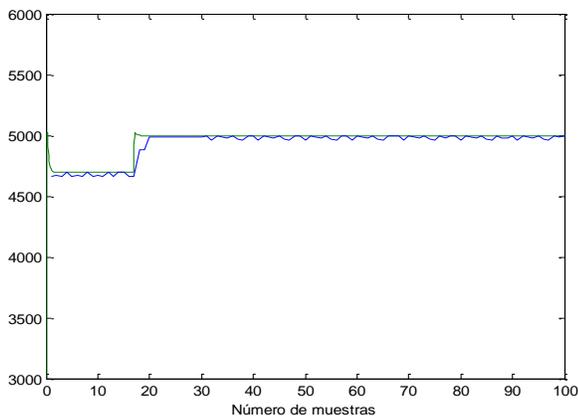


Figura 8. Regulador de velocidad y carga, implementado, señal simulada (verde), señal real (azul).

La UG4 de la CT. Guangopolo así como las demás unidades de generación presentaban oscilaciones de velocidad y carga hasta llegar a su referencia, sin embargo en la UG4 con el regulador instalado se ha conseguido mejoras significativas

en el control tanto de las oscilaciones presentadas como del tiempo de respuesta y picos máximos.

### B. Sistema de Control de Voltaje

El regulador de tensión instalado ha permitido que la variación de generación de voltaje disminuya de manera notable como se ilustra en la Figura 9, presentando estabilidad en las mediciones analógicas y digitales del sistema, ya que la variación presentada es mínima, permitiendo de esta manera que la producción de energía sea de mayor calidad y oportuna de acuerdo a la demanda. Además el sistema tiene una respuesta adecuada frente a fallas que se puedan presentar con reacciones oportunas evitando el daño de la unidad generadora y alargando la vida útil de la misma.

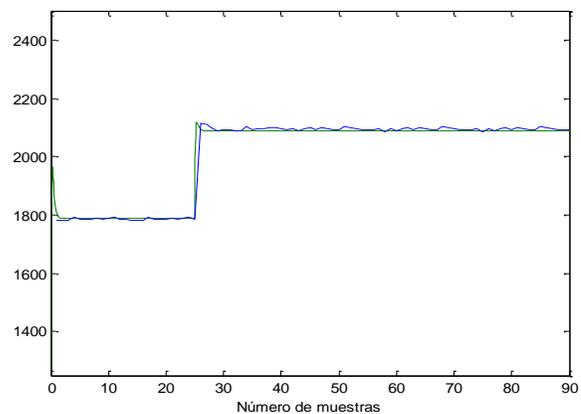


Figura 9. Regulador de Voltaje, implementado, señal simulada (verde), señal real (azul).

El control del sistema de voltaje ha mejorado de manera aceptable en la unidad generadora, presentando un rendimiento estable en la sincronización y presentando estabilidad en las mediciones de voltajes, corrientes y potencia reactiva del generador.

## VI. CONCLUSIONES

La generación de energía eléctrica en el Ecuador es un servicio de mucha importancia para el desarrollo del país, ya que es la base para el funcionamiento de grandes, medianas y pequeñas industrias y empresas, así también como de los hogares de cada ciudad, es por ello que se debe garantizar el correcto funcionamiento de las centrales generadoras para satisfacer la demanda de energía en cada época del año.

Un sistema de generación eléctrica necesita de adecuados sistemas de control que reaccionen correctamente frente a fallas o eventos no planeados que se presenten en cualquier momento, de tal manera que se prevengan daños en los

equipos a corto o a largo plazo y evitar la indisponibilidad de los grupos de generación.

Un sistema de control de velocidad se refiere a la optimización y regulación de la velocidad a la que opera una máquina motriz que impulsa a un generador, además de mantener la carga del mismo en un mínimo de oscilaciones manipulando la señal de ingreso de combustible para satisfacer de esta manera la demanda de energía requerida.

Un sistema de control de voltaje regula al máximo las variaciones que se puedan presentar en la tensión producida por un generador, manteniendo los valores de referencia en el sistema de excitación.

El sistema de control de velocidad consta de un control primario y uno secundario, el cual corresponde al control de la velocidad y potencia respectivamente, debido a que se encuentra en el lazo de control de la potencia activa, en el que interviene el controlador, el actuador y la máquina motriz.

El regulador de voltaje, la excitatriz y el generador forman parte del segundo lazo de control de un grupo de generación eléctrica en el que se controla la tensión de generación por medio de la tensión de campo, así como también la potencia reactiva.

Los programas técnicos como matlab, simulink, intouch, son de gran ayuda a la hora de realizar identificación de sistemas, modelamientos y simulaciones de sistemas de control, ya que aportan con entornos gráficos amigables al usuario, además de una gran proximidad al comportamiento de sistemas reales, sin embargo, es importante tomar en cuenta las limitaciones que estos poseen y saber aprovecharlos de la mejor manera.

## REFERENCIAS

- [1] Basler Electric, B. (2011). *Instruction Manual for Digital Excitatio Control System DECS - 200*. Highland Illinois 62249, USA.
- [2] BOLAÑOS MENA, R. (2012). Análisis de estabilidad transitoria del sistema de potencia de un generador contra barra infinita utilizando un regulador automático de tensión BASLER DECS - 200. *Proyecto Eléctro IE - 0502*, (págs. 20 - 44). Universidad de Costa Rica.
- [3] GILJÓN. (2006). Simulación de sistemas de control continuos con Matlab y SIMULINK. *Ingeniería de sistemas y automática*,
- [4] Guillén, M. E. (2002). *Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua*. Madrid, España: Universidad de Alcalá de Henares.
- [5] Industriales, E. I. (2011). Centrales Eléctricas, el alternador. *Departamento de ingeniería eléctrica, electrónica y control, UNED LÓPEZ GUILLÉN M*, (págs. 1 - 33).
- [6] Woodward. (2003). *Governing Fundamentals and Power Managment*. Colorado, USA: Manual 26260.