

Implementación de un controlador PI digital en un Controlador Electrónico de Carga con estrategia de regulación mixta para regular la frecuencia en una Micro-central Hidroeléctrica.

Castillo Guillermo¹ Ortega Leonardo²

Escuela Politécnica Nacional

¹*guillermo.castillom@epn.edu.ec*

²*leonardo.ortega@epn.edu.ec*

Resumen— En el presente trabajo se realiza la regulación de frecuencia en una Micro-central Hidroeléctrica (MCH) a través de un Controlador Electrónico de Carga, el cual permite mantener la frecuencia de la señal generada en un valor constante de 60 Hz. El sistema utilizado se basa en el método de regulación por carga auxiliar implementado a través de una estrategia de regulación mixta. El hardware consta de sensores de frecuencia, voltaje y corriente, así como de los actuadores y elementos de protección y maniobra necesarios para realizar la regulación de frecuencia y protección de la MCH ante posibles fallas. El software de control se implementó en una topología modular a través de dos microcontroladores. Un microcontrolador es el encargado de monitorear del estado de la MCH, mientras que el otro se encarga de la regulación de frecuencia a través de un controlador PI digital diseñado a partir de los modelos matemáticos obtenidos y validados en base a los datos experimentales de la planta. La implementación práctica del sistema y la realización de pruebas y validación de resultados se realizó en la MCH Quillán, ubicada en el cantón Pillaro, provincia de Tungurahua, cuya potencia de generación es de 1600 vatios.

Palabras clave— Micro-central hidroeléctrica, regulación, frecuencia, controlador PI digital, CEC.

I. INTRODUCCIÓN

Las micro-centrales hidroeléctricas (MCH) generalmente cuentan con diversos dispositivos de regulación y control adecuados al tipo de tecnología empleada y funcionamiento previsto de la MCH. Los parámetros a los que se debe prestar mayor atención en cuanto a su regulación son el voltaje y la frecuencia, ya que la desviación de estas variables de sus valores nominales puede producir daños permanentes, y alteración o reducción de la vida útil de los equipos conectados a este tipo de sistemas de generación. [1]

En cuanto a la frecuencia, su regulación está relacionada directamente a la velocidad del grupo turbina-generador, conociéndose tres métodos distintos de regulación cuya implementación obedece principalmente a la potencia de generación de la MCH y a la disponibilidad del recurso hídrico; la regulación por caudal, la regulación por carga auxiliar o carga balasto, y regulación mixta.

El método presentado en este trabajo es la regulación de velocidad por carga auxiliar, el cual consiste en lograr que el

generador “vea” conectada la misma carga todo el tiempo a sus terminales de generación para mantener constante la velocidad del grupo turbina-generador.

Este método supone durante todo momento un caudal de agua invariable, y actúa mediante la desviación de la potencia que no es consumida por la carga del usuario en un grupo de resistencias, llamado carga lastre, balasto o auxiliar. De esta manera, se consigue que en el estado estable de operación no se produzcan variaciones de velocidad en el grupo turbina-generador, lo cual se traduce en un valor de frecuencia constante [2]. En la Fig. 1 se muestra el esquema de este método.

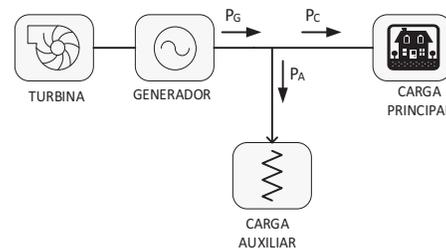


Fig. 1 Esquema de regulación de velocidad por carga auxiliar.

II. REGULACIÓN MIXTA

Existen dos técnicas que se puede emplear para regular la potencia consumida por la carga auxiliar: la regulación continua o analógica, y la regulación escalonada [1][3]. En el presente trabajo se propone una técnica de regulación mixta, que consiste en utilizar en un inicio la regulación continua de carga para la conexión de un porcentaje de la carga auxiliar (RL3), de manera que la carga auxiliar consuma la potencia que no es utilizada por el usuario, tal como se muestra en la Fig. 2. A medida que la potencia sobre la carga auxiliar RL3 aumenta, y alcanza un valor igual a la potencia de una de las cargas controladas por regulación escalonada (RL1, RL2), se conecta la primera carga escalonada para que la potencia consumida se transfiera a la misma. Esta estrategia de regulación presenta un equilibrio en el número de cargas que se utiliza en el sistema, a la vez que limita el porcentaje de la carga que es controlado mediante regulación analógica o continua. Por lo tanto, se reducen los armónicos introducidos a la red, se mejora el factor

de potencia, y se utiliza elementos semiconductores de potencia de menor dimensión

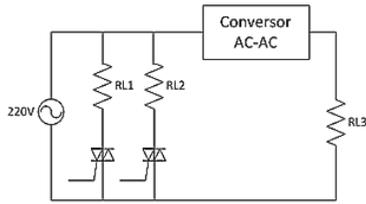


Fig. 2 Topología de regulación mixta de carga complementaria.

Conforme la potencia siga aumentando se utilizará nuevamente la regulación continua, hasta que el valor de la potencia sea suficiente para activar otra carga controlada por regulación escalonada, y así se repite el proceso hasta que todas las cargas escalonadas hayan sido conectadas.

Para realizar la regulación continua de la carga auxiliar se utilizó la técnica de control por ángulo de disparo debido a sus ventajas como robustez, condiciones de disparo simples, control fino de potencia mediante la variación del ángulo de disparo α , y pérdidas internas menores que en configuraciones que usan como elemento de control transistores. [4]

La carga auxiliar utilizada en este proyecto es un banco de 4 resistencias calefactoras de aire, cada una con valores nominales de 220 voltios y 500 vatios de resistencia. Esto representa una potencia total de 2000 vatios, la cual es mayor a la potencia generada por la MCH garantizando de esta manera el correcto funcionamiento del sistema inclusive cuando no exista carga conectada por parte del usuario.

A. Controlador Electrónico de Carga

El Controlador Electrónico de Carga (CEC), es el sistema encargado de controlar la transferencia automática de la potencia de generación que no es utilizada por el usuario final, a un grupo de resistencias balasto o auxiliar, logrando así que la potencia consumida por la carga total (usuario final + carga auxiliar) sea siempre la misma, manteniendo de esta manera constante la velocidad del grupo turbina-generador y por lo tanto, la frecuencia de generación de la MCH. En la Fig. 3 se muestra el diagrama de bloques del CEC de una MCH. Como se puede observar la carga balasto o carga auxiliar está conectada en paralelo a la carga del usuario, tratando de esta forma mantener constante la potencia generada (PG) variando la potencia disipada en la carga balasto (PB), según cambie la potencia utilizada por el usuario (PC). La potencia PB es controlada por la frecuencia de la tensión generada, que depende del valor de PC. [2]

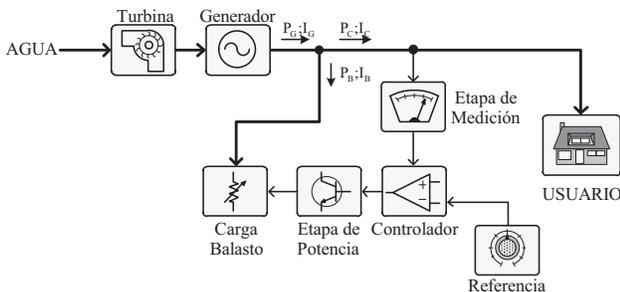


Fig. 3 Diagrama de bloques del CEC de una MCH, tomado de [2]

La frecuencia de la tensión generada es adquirida a través de la etapa de medición y comparada permanentemente con un valor de referencia, de esta forma si la frecuencia generada es mayor que la de referencia, el sistema de regulación deriva más energía a la carga balasto. Igualmente, si la frecuencia generada es menor a la de referencia, el sistema de regulación deriva menos energía a la carga balasto.

Algunas de las principales ventajas de utilizar el CEC frente a otros reguladores de velocidad por caudal son:

- Simplificación del diseño de las turbinas, debido a que no existe la necesidad de regular el caudal.
- Menor costo.
- Operación y mantenimiento sencillos.
- Evita sobrepresiones en la tubería de presión.
- Mayor rapidez en la respuesta a cambios de carga. [2]

III. DISEÑO DEL HARDWARE.

Los principales componentes del CEC, son los elementos de medición, acondicionamiento de señales, y ejecución de las acciones de control. Así tenemos: sensores para medición de voltaje, corriente y frecuencia, controlador, actuador y fuentes de alimentación.

A. Medición de Voltaje

Para medir el voltaje generado por la MCH, se utilizó el integrado AD736, el cual es un convertidor de voltaje RMS a un voltaje dc proporcional al voltaje RMS medido. El circuito utilizado se muestra en la Fig. 4. [5]

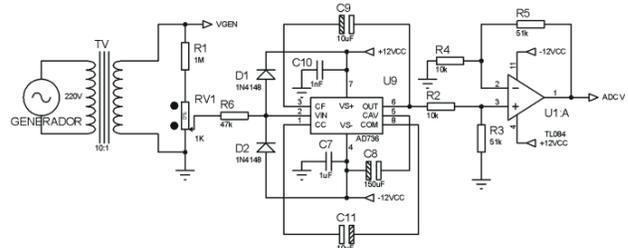


Fig. 4 Circuito de medición del voltaje generado

B. Medición de Corriente

Para medir la corriente generada por la MCH se utilizó un sensor de corriente CR 9559-20 de la marca CR Magnetics, el cual tiene la ventaja de entregar un valor de voltaje dc a la salida del sensor, proporcional al valor RMS de la corriente en la línea. En la Fig. 5 se muestra el sensor utilizado. [6]



Fig. 5 Sensor de corriente CR 9559-20

C. Medición de Frecuencia

El circuito a emplearse para la medición de frecuencia es un detector de cruce por cero, para lo cual se utiliza el amplificador operacional TL084 en configuración de comparador diferencial y el circuito integrado 74LS14 (disparador de Schmitt con salida invertida), cuyas compuertas permiten obtener una señal con mayor inmunidad al ruido, a la vez que consigue que los

cambios de estado lógico de la señal sean mucho más rápidos, logrando así una mayor precisión en la medición de la frecuencia. Se utilizan dos compuertas del integrado para no afectar la lógica de control de la señal. El circuito utilizado se muestra en la Fig. 5.

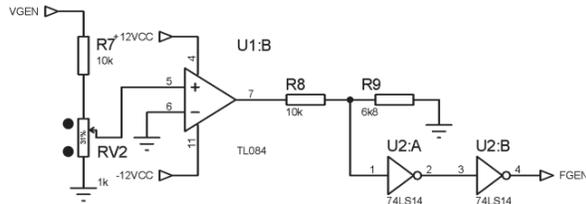


Fig. 6 Circuito de medición de frecuencia del voltaje generado

D. Medición de Potencia Activa en la Carga Usuario

Para tener una medida efectiva de la potencia activa en la carga del usuario, es necesario además de medir el voltaje y la corriente, medir el factor de potencia. Para esto, se utilizó una resistencia shunt conectada en serie con la carga usuario.

La salida de la señal de voltaje obtenida en la resistencia se conecta a un transformador de voltaje con dos objetivos: aislar el circuito de fuerza del circuito de control, y amplificar el voltaje obtenido en la resistencia shunt. La señal obtenida de la salida del transformador se conecta un circuito seguidor de voltaje y posteriormente a un detector de cruce por cero, utilizando la misma configuración utilizada para la medición de frecuencia.

La señal de pulsos a la salida del circuito integrado 74LS14 (correspondientes a la señal de corriente) ingresa al microcontrolador, en el cual se mide el tiempo que transcurre entre el pulso de voltaje y corriente, para calcular el ángulo de desfase y posteriormente el factor de potencia. En la Fig. 7 se muestra el circuito implementado para la medición del factor de potencia.

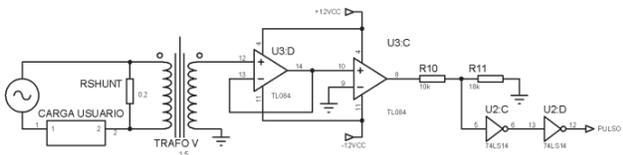


Fig. 7 Circuito de medición de factor potencia.

El transformador de voltaje utilizado es un transformador comercial de relación 1 a 5, y la resistencia shunt utilizada tiene un valor de 66 miliohmios y puede disipar una potencia de hasta 24 W, lo cual cumple con las características de corriente y potencia requeridas por el circuito implementado.

Cabe mencionar que éste método de medición de factor de potencia es válido para señales no distorsionadas. Por ende, tomando en cuenta que la energía generada por este sistema será utilizada para alimentar cargas de tipo resistivo y cargas de tipo residencial que no causan distorsión armónica representativa, el método es confiable.

E. Sistema de Conexión de la Carga Auxiliar para la Regulación de Frecuencia

En el diseño del actuador para la conexión de la carga auxiliar debe tener en cuenta que se utilizará la regulación de velocidad mixta para controlar la frecuencia de generación, la cual utiliza

regulación por pasos discretos de carga, así como regulación continua de carga. Por lo tanto, se utilizará 4 cargas de 500 vatios cada una, asegurando de esta manera que la carga auxiliar sea suficiente para disipar la potencia generada por la MCH. Para la regulación continua de carga se usará el control de fase directo, cuyo circuito se muestra en la Fig. 8. El circuito de disparo implementado para la activación del TRIAC se muestra en la Fig. 9, mientras que el circuito de disparo utilizado para activar los TRIACs de las cargas discretas se muestra en la Fig. 10. [4]

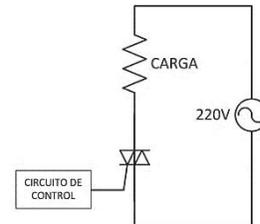


Fig. 8 Circuito de potencia para operación de TRIACs.

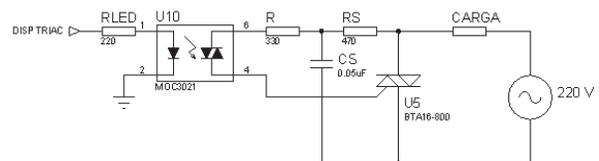


Fig. 9 Circuito de disparo TRIAC para regulación de carga continua.

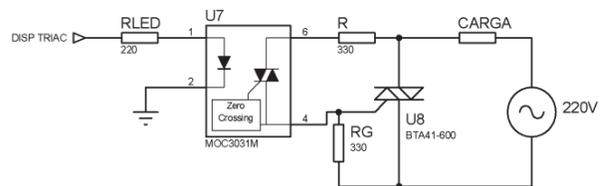


Fig. 10 Circuito de disparo TRIAC para regulación de cargas discretas.

El circuito de la Fig. 10 posee la particularidad de que utiliza un optotriac con detector de cruce por cero, de tal manera que la conexión de la carga se realiza cuando el voltaje instantáneo es cero, eliminando de esta manera el efecto producido por los picos de corriente cuando la conexión no se realiza en el cruce por cero.

F. Elementos de protección y alarma

Los elementos de protección y alarma permiten mantener márgenes de confiabilidad en la red de generación; y de seguridad, tanto para los equipos instalados, como para el operador de la MCH. En el presente proyecto se implementaron los siguientes elementos de protección y alarma, para cuyo funcionamiento se utilizan todas las señales adquiridas a través de los circuitos y elementos de medición presentados en las secciones anteriores.

- Protección de sobre voltaje y bajo voltaje.
- Protección de sobre corriente.
- Protección de sobre frecuencia y baja frecuencia.
- Protección de cortocircuito.
- Luces de señalización.
- Contactores de conexión.

G. Microcontroladores

Debido a los requerimientos de diseño de hardware y software, se optó por utilizar dos microcontroladores: ATMEGA 168 y ATMEGA 164P de ATMEL. Esto con el objetivo de brindar al sistema un diseño modular, que permita tener una mayor flexibilidad al momento de su diseño, implementación y posterior mantenimiento.

El tener un sistema modular como este, permite a los microcontroladores trabajar en forma independiente. Por ejemplo, se podría realizar mejoras en el microcontrolador encargado de la regulación de frecuencia, o incluir un sistema de regulación de voltaje, sin perder las características del sistema brindadas por el microcontrolador encargado de monitorear el estado de la MCH.

El microcontrolador a cargo de las acciones de monitoreo, protección y alarma de la MCH es el ATMEGA164P, para lo cual requiere de las señales de medición de voltaje, corriente y frecuencia que se obtienen a través de los circuitos diseñados en la sección II. El microcontrolador ATMEGA168 es el encargado exclusivamente de la regulación de la frecuencia de la señal del voltaje generado, para lo cual se utiliza un controlador PI digital.

IV. DISEÑO DEL SOFTWARE.

En este apartado se realiza el diseño del software para la adquisición y el procesamiento de los datos necesarios para realizar el control, monitoreo y protección de la MCH. Para esto, uno de los primeros pasos es obtener el modelo de la planta, en base del cual se realizará el diseño del controlador digital para lograr una efectiva regulación del voltaje y la frecuencia de la MCH.

A. Modelación de la planta

Para obtener el modelo de la planta se trabajó con los datos experimentales de la planta, resultado de someter a la misma a variaciones tipo paso de las variables de entrada, y analizar la respuesta obtenida de la planta. Todo esto mientras se registra los datos de entrada y salida de la planta y se los almacena en una base de datos, para luego poder obtener las gráficas de las señales de entrada y la respuesta de la planta.

El primer paso es obtener los datos de entrada y salida de la planta, por lo cual se implementó un HMI utilizando Labview. El HMI permite comunicar al computador con el microcontrolador ATMEGA168 mediante comunicación serial utilizando el protocolo RS-232 para recibir los datos de frecuencia y porcentaje de carga enviados por el microcontrolador.

El modelo obtenido establece la relación entre la frecuencia como variable de salida y el porcentaje de la carga conectada al generador como variable de entrada. En la Fig. 11 se muestra las gráficas correspondientes al Porcentaje de Carga Auxiliar (Variable de entrada) y la Frecuencia (Variable de salida) en función del tiempo.

De los resultados obtenidos se observó que la respuesta de la planta corresponde al comportamiento de un sistema de primer orden, con la particularidad de que tiene ganancia negativa; pues al realizar una variación de valor positivo en la entrada, el valor en la salida del sistema decrece, mientras que

al realizar una variación de valor negativo en la entrada, el valor de la respuesta del sistema incrementa.

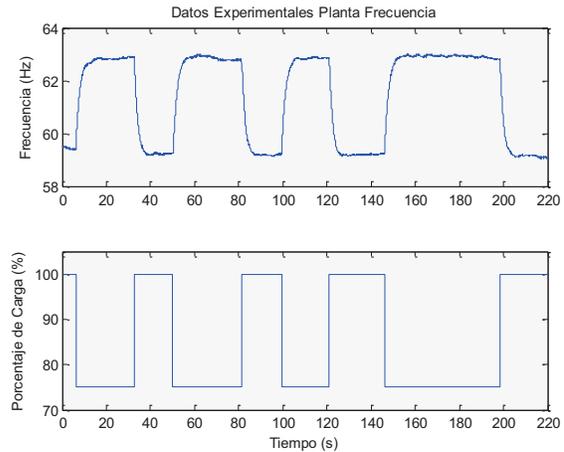


Fig. 11 Datos experimentales de entrada y salida de la planta frecuencia.

Por lo tanto, se obtuvo el modelo de la planta considerando la ecuación (1), correspondiente a la función de transferencia de un sistema de primer orden:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

Dónde:

K= Ganancia del proceso o ganancia de estado estacionario.

τ = Constante de tiempo del proceso.

La ganancia se define matemáticamente mediante la ecuación (2):

$$K = \frac{\Delta O}{\Delta I} = \frac{\text{Variación en la variable de salida}}{\text{Variación en la variable de entrada}} \quad (2)$$

La constante de tiempo τ se interpreta como el tiempo que tarda el proceso en alcanzar el 63.2% de la variación total en la variable de salida. Este parámetro tiene relación directa con la velocidad de respuesta del proceso. [7]

Por lo tanto, analizando la Fig. 12, donde se muestra a detalle la respuesta del sistema ante una entrada tipo paso, se obtiene el modelo de la planta, el mismo que se presenta en la ecuación (3).

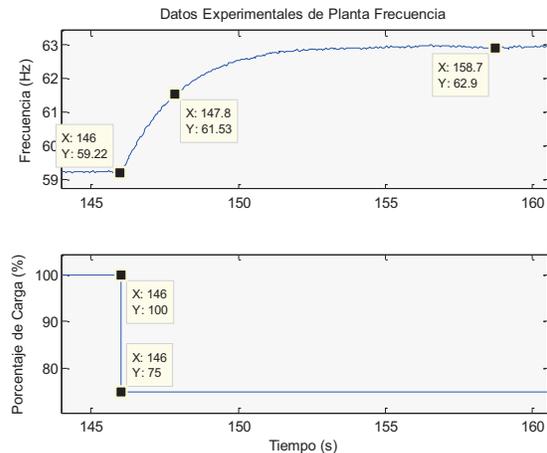


Fig. 12 Respuesta de la planta frecuencia ante una entrada paso.

$$G_1(s) = \frac{-0,147}{1,8 s + 1} \quad (3)$$

Este proceso se repite varias veces hasta obtener 6 modelos que permitan validar los datos utilizados y los resultados obtenidos, tanto para variaciones positivas como negativas de la variable de entrada. De todos los modelos obtenidos se extrae la media aritmética de la ganancia y de la constante de tiempo para obtener una única función de transferencia que represente al modelo de la planta, en base al cual se diseñará el controlador digital para mantener la frecuencia de generación constante. Este modelo se presenta en la ecuación (4).

$$G(s) = \frac{-0,145}{1,697 s + 1} \quad (4)$$

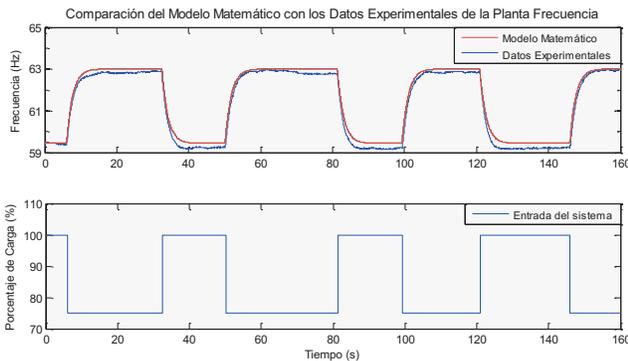


Fig. 13 Comparación entre el modelo matemático y el comportamiento real de la planta frecuencia.

Finalmente, se realiza la validación del modelo obtenido contrastando la respuesta obtenida con el modelo matemático y la respuesta obtenida mediante de los datos experimentales. Esta comparación se realiza en la Fig. 13, el modelo matemático de la planta presenta un error máximo de 0.5%, por lo que se puede concluir que la modelación del sistema es exitosa.

B. Controlador Digital para Regulación de Frecuencia

Para realizar el control de la planta modelada se implementará un controlador PI, ya que permite eliminar el error en estado estacionario, y se ajusta muy bien a los procesos donde la dinámica es esencialmente de primer orden. Además, en el proceso de diseño del controlador PI, se considerará el efecto de la *acción digital de control*, debido a que el controlador se implementará en un microcontrolador.

En la Fig. 14 se observa el diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado en el dominio de la frecuencia, representado a través de la transformada de Laplace, donde el bloque $G_p(s)$ representa la función de transferencia de la planta, el bloque $G_c(s)$ representa la función de transferencia del controlador, y $H(s)$ representa la función de transferencia de la realimentación del sistema. El valor de referencia (set point) se denota como $R(s)$, y la variable de salida como $C(s)$.

Una de las técnicas más convenientes para la implementación de un controlador PID digital, es la obtención del mismo a partir de un controlador análogo existente. Todo lo que se necesita es un diseño satisfactorio del controlador análogo, y la aplicación de uno de los varios métodos posibles de discretización para transformar el controlador análogo en uno digital.

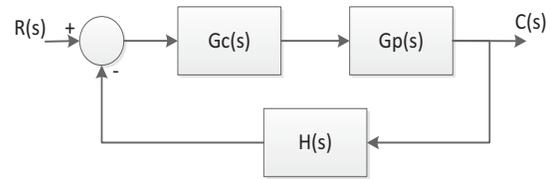


Fig. 14 Sistema en lazo cerrado en el dominio de Laplace

En la Fig. 15 se muestra el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado implementado con un controlador digital. Comparado con el sistema de la Fig. 14, podemos observar como los bloques correspondientes a la función de transferencia del controlador ahora son bloques discretos, y se encuentran dentro del dominio digital del sistema, representada en la figura mediante el área sombreada, que simboliza cualquier dispositivo digital como puede ser un microcontrolador, un DSP o un FPGA.

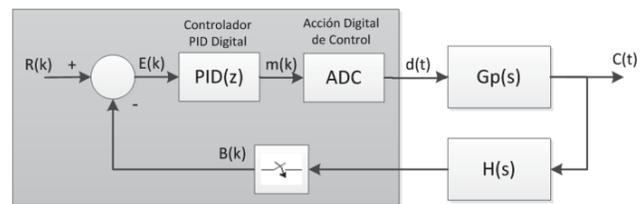


Fig. 15 Diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado con controlador PID digital

La unión entre los dos dominios del tiempo (continuo y discreto) está representada por un muestreador ideal a la entrada del comparador y por el bloque ADC, que representa a la *acción digital de control*, la cual inherentemente implementa la función del interpolador o del retenedor. La salida del muestreador ideal $B(k)$, es comparada con una señal de referencia $R(k)$ para obtener la señal digital de error $E(k)$, la cual ingresa al controlador PID digital, cuya salida digital $m(k)$ ingresa al bloque ADC. Todas estas características implican que estamos tratando en realidad con un sistema dinámico de datos muestreados. [8]

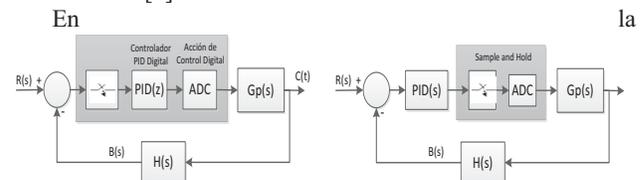


Fig. 16 se muestra el proceso para la transformación del diagrama de bloques al dominio del tiempo continuo. Como se puede observar tanto los bloques del controlador como el de la función de transferencia y la realimentación son funciones de transferencia en el dominio de S . El único elemento discreto es el del interpolador y la acción digital de control, a los cuales se los etiquetará como Sample and Hold, y pueden ser representados como un bloque de retraso debido al tiempo que le toma al microcontrolador la adquisición y procesamiento de datos, y la conversión digital análoga de la respuesta del controlador.

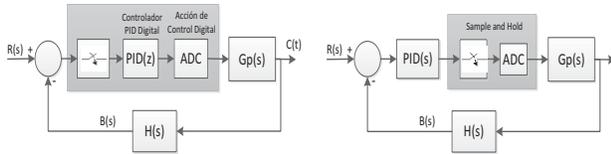


Fig. 16 Procedimiento para definir el equivalente en el tiempo continuo del lazo de control digital, tomado de [8].

En la Fig. 17 se puede apreciar este efecto. En el punto A, cuando el detector de cruce por cero habilita la interrupción del timer, el microcontrolador determina el tiempo transcurrido para un periodo de la señal de voltaje y en base a este valor se ejecuta la acción de control en el punto B para ajustar la frecuencia al valor deseado.

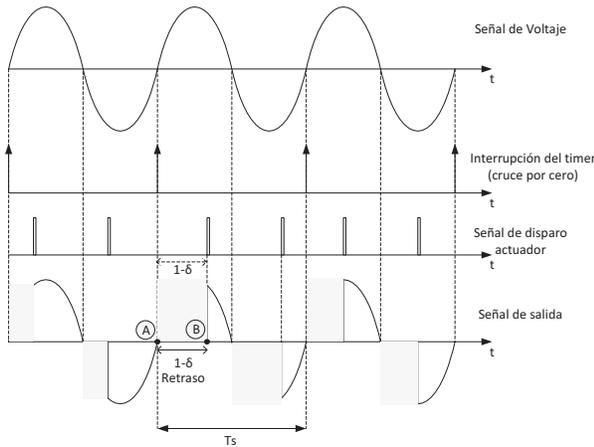


Fig. 17 Retraso en la respuesta del sistema

De este análisis, y de las consideraciones tomadas de [8], en cuanto al ciclo de trabajo y el efecto de la acción digital de control, se utiliza la aproximación de Padé de primer orden para definir la función de transferencia del bloque Sample and Hold, mediante la ecuación (6). [8]

$$e^{s \frac{T_s}{2}} \cong \frac{1 - s \frac{T_s}{4}}{1 + s \frac{T_s}{4}} \quad (6)$$

En la Fig. 18 se muestra el diagrama de bloques equivalente continuo en el tiempo, en base al cual se puede diseñar el controlador PID en el dominio de S.

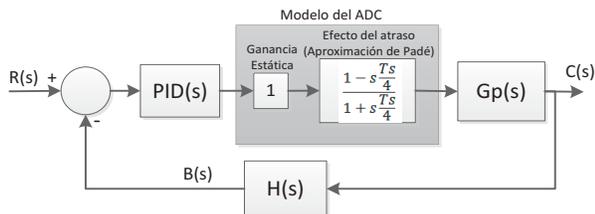


Fig. 18 Equivalente continuo en el tiempo del diagrama de bloques del lazo de control digital, tomado de [8].

Finalmente, considerando todo lo expuesto anteriormente, y la función de transferencia obtenida del modelado de la planta frecuencia, el diagrama de bloques en lazo cerrado queda definido como se muestra en la Fig. 19.

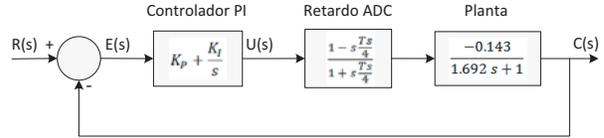


Fig. 19 Diagrama de bloques de la planta frecuencia en lazo cerrado.

El bloque *Retardo ADC* representa el retardo introducido por la *Acción Digital de Control* al sistema. El valor de \$T_s\$ corresponde al tiempo de modulación del actuador, o dicho de otra manera el tiempo en el que se realiza la actualización de la señal de disparo del actuador del sistema.

Para el caso de la planta frecuencia, esta señal se actualiza cada periodo de la señal sinusoidal de voltaje, por lo que \$T_s\$ es equivalente a 16.667 milisegundos. [8]

Por lo tanto, la función de transferencia sobre la cual actuará el controlador es:

$$G(s) = \frac{1 - 0.004167s}{1 + 0.004167s} * \frac{-0.143}{1.692s + 1} \quad (7)$$

Para definir los parámetros de diseño del controlador PI se tomó en consideración la normativa vigente establecida por el CONELEC, de acuerdo a los procedimientos de despacho y operación de generadores para sistemas de respaldo. Estos valores se detallan en la Tabla I. [9]

TABLA I
RANGOS DE FRECUENCIA ADMISIBLES PARA GENERADORES

Condición de operación	Rango frecuencia admisible
Sin la actuación de relés instantáneos de desconexión propios del generador	57.5 - 62 Hz
Para un período máximo de 10 seg	57.5 - 58 Hz; y 61.5 - 62 Hz
Para un período máximo de 20 seg	58 - 59 Hz; y 61 - 61,5 Hz
Sin límite de tiempo	59 y 61 Hz.

Para cumplir con la normativa se establece como parámetros de diseño un Máximo sobrepico (\$M_p\$) de 4% y un tiempo de establecimiento (\$t_s\$) de 200 milisegundos. Utilizando el toolbox de Matlab *PID Tuning* se obtienen las constantes del controlador \$K_p=-236.85\$ y \$K_i=-82.93\$, cuya función de transferencia se presenta en la ecuación (8).

$$C(s) = \frac{-236.85s - 82.93}{s} \quad (8)$$

Utilizando Matlab se realiza la simulación de la respuesta de la planta y el controlador ante una entrada paso, obteniéndose como resultados \$M_p=0\%\$, y \$t_s=0.198\$ segundos; los cuales cumplen satisfactoriamente con las parámetros de diseño, presentando una respuesta muy favorable del sistema.

Finalmente, se procedió a discretizar la función de transferencia del microcontrolador utilizando la transformada de Tustin para obtener la ecuación de diferencias (9) del controlador digital, la cual que me permite implementar el controlador PI en el microcontrolador.

$$U[k] = U[k - 1] - 238.23 * E[k] + 235.46 * E[k - 1] \quad (9)$$

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Como parte final del desarrollo e implementación de este proyecto, se realizaron las pruebas de funcionamiento del CEC y el sistema de control de monitoreo de la MCH, así como el análisis de los resultados obtenidos bajo distintas condiciones

de operación, verificando el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema.



Fig. 20 Parte externa e interna del tablero de control implementado.

En la Fig. 20 se muestra la parte externa e interna del tablero de control implementado, con la distribución de todos los sensores, placas electrónicas, y elementos de protección y maniobra utilizados para su operación.

A. Pruebas de Variación de Carga

Las cargas utilizadas para estas pruebas fueron focos incandescentes y electrodomésticos de uso común como una licuadora, una laptop, un celular y una plancha. En la Tabla II se muestra los datos de placa de las cargas utilizadas.

TABLA II
DATOS DE PLACA DE LAS CARGAS UTILIZADAS DURANTE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Carga	Voltaje [V]	Potencia [W]
Focos incandescentes	210-230	100
Celular	100-240	5
Laptop	100-240	120
Licuadora	120	600
Plancha	110	1000

Los resultados obtenidos durante estas pruebas corresponden al monitoreo de la MCH durante las variaciones de carga, tanto de las variables a controlar, así como de la respuesta de los controladores implementados a través de las variables manipuladas, como lo son el porcentaje del voltaje de campo y el porcentaje de la carga auxiliar.

B. Respuesta del Controlador de Frecuencia

Para la validación de los datos de frecuencia medidos por los sensores se utilizó el osciloscopio TEKTRONIX TDS2022C, el cual posee un certificado trazable de calibración. Esto garantiza que los sensores utilizados en este proyecto se encuentren calibrados con un patrón certificado.

Se realizó la conexión y desconexión de las cargas descritas para observar la respuesta del sistema ante estos eventos. Se observó que mientras mayor es la potencia consumida por la carga conectada, mayor es la desviación de la frecuencia respecto de su valor de referencia. En la Fig. 21, Fig. 22 y Fig. 23 se muestra los resultados obtenidos ante la conexión y desconexión de distintos tipos de carga.

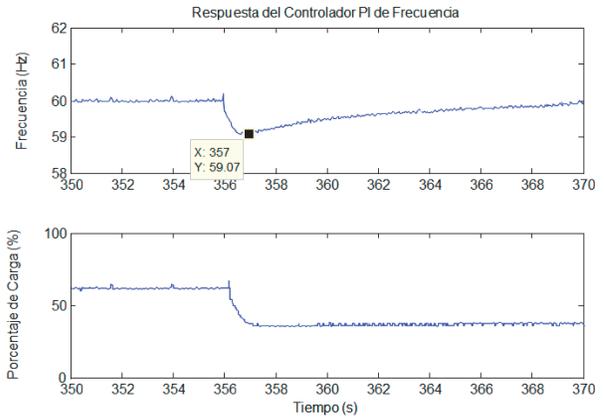


Fig. 21 Respuesta del controlador ante la conexión de la licuadora

Finalmente, en la Fig. 24 se muestra los resultados globales obtenidos durante todo el tiempo de la prueba de funcionamiento del controlador de frecuencia, la cual tuvo una duración de 45 minutos.

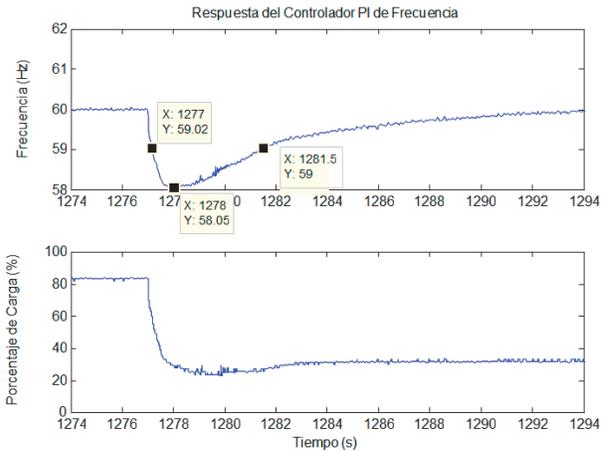


Fig. 22 Respuesta del controlador ante la conexión de la plancha

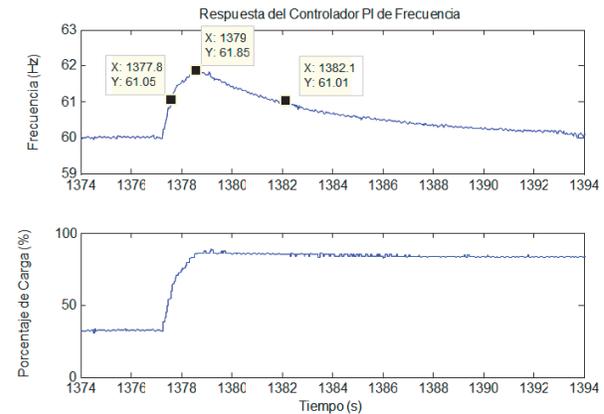


Fig. 23 Respuesta del controlador ante la desconexión de la plancha

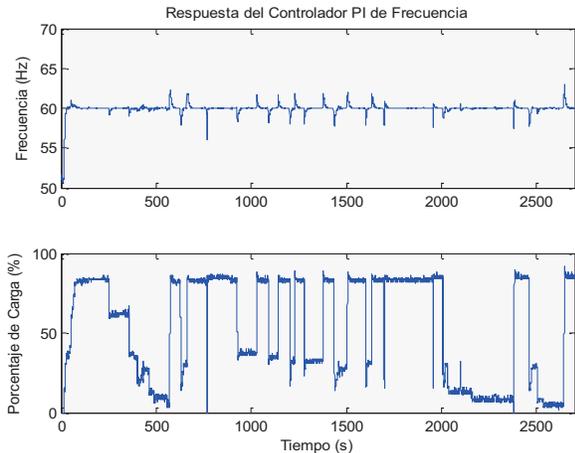


Fig. 24 Resultados totales de la prueba de funcionamiento del controlador PI de frecuencia

De los resultados obtenidos durante la realización de la prueba, se puede concluir que el valor promedio obtenido en la medición de la frecuencia durante el desarrollo de la prueba es de 59.964 hertzios, lo cual equivale a un error medio del 0.06% con respecto al valor nominal de 60 hertzios.

También se observó que en la conexión de cargas cuya potencia es menor a 100 vatios no se registró una variación significativa en la frecuencia, mientras que para cargas cuya potencia es mucho mayor, como es el caso de la plancha (1000W), existió una variación de frecuencia de 2 hertzios, lo cual equivale al 3.3% del valor nominal de la frecuencia. Cabe recalcar que este valor se encuentra dentro del rango de operación de sistemas de respaldo y operación aislada, conforme a lo expuesto en la normativa del CONELEC respecto a los Procedimientos de Despacho y Operación.

Mediante las pruebas realizadas se verificó que el controlador de frecuencia cumple a cabalidad con su función y que los resultados obtenidos son satisfactorios, ya que el error promedio obtenido es bajo, y la variación máxima de frecuencia ante la conexión y desconexión de las cargas utilizadas no excede los límites de frecuencia permitidos para este tipo de sistemas de generación.

V. CONCLUSIONES

Al realizar la regulación de frecuencia de un generador sincrónico en un sistema de generación aislado, se debe procurar utilizar técnicas de control y convertidores de potencia que introduzcan la menor cantidad de perturbaciones al sistema, ya que debido a que es un sistema aislado no presenta la robustez del sistema interconectado o barra infinita, por lo que los efectos producidos por las conmutaciones de la carga son mucho más notorios en este tipo de sistemas, y por ende afectan en mayor medida a la distorsión armónica y estabilidad del voltaje generado.

A pesar de que el sistema de regulación de frecuencia por carga auxiliar supone un caudal de operación de la MCH constante, el sistema responde efectivamente ante condiciones externas adversas, manteniendo la frecuencia constante ante variaciones de caudal.

El CEC diseñado e implementado en la MCH responde adecuadamente ante las variaciones de frecuencia producidas por la conexión o desconexión de la carga conectada al generador, obteniéndose durante todas las pruebas de funcionamiento un error promedio en la frecuencia de 0.06% respecto al valor nominal (60 hertzios).

El regulador de frecuencia implementado cumple con los límites establecidos en la normativa vigente del CONELEC para este tipo de sistemas, registrándose variaciones de frecuencia máximo de 3.33% del valor nominal.

Las pruebas realizadas de la respuesta del sistema ante posibles evento de falla, como falla de sobre y bajo voltaje, falla de sobre y baja corriente, falla de sobre corriente de la carga auxiliar y de la carga usuario, demostraron que el sistema funciona correctamente activando las protecciones y alarmas visuales correspondientes a cada tipo de falla, logrando así proteger a la carga del usuario de cualquier daño que pudiera producirse por estos eventos.

REFERENCIAS

- [1] Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú., Manual de Mini y Microcentrales Hidráulicas, Lima-Perú: ITDG, 1995, pp. 30-58.
- [2] G. Fernández, J. Kairiyama, F. Botterón and V. Kurtz, "Control de Carga Balasto por Períodos de Conducción, Aplicado a la Regulación de Frecuencia de la Tensión Generada en Micro y Pico Centrales Hidroeléctricas," *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 14, pp. 5-11, 2010.
- [3] J. Portegijs, "The "Humming Bird" Electronic Load Controller / Induction Generator Controller," 2000, Diciembre 6.
- [4] M. H. Rashid, Power Electronics, Canada: Academic Press, 2001, pp. 27-50.
- [5] Analog Devices, "AD736 - True RMS-to-DC Converter," [Online]. Available: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD736.pdf>. [Accessed 12 02 2015].
- [6] CR Magnetics, "Sensor de corriente CR 9550-50," [Online]. Available: <http://www.crmagnetics.com/Products/Assets/ProductPDFs/CR9500%20Series.pdf>. [Accessed 18 03 2015].
- [7] C. Smith and A. Corripio, Control Automático de Procesos, México: Limusa, 1991, pp. 91-103.
- [8] S. Buso and P. Mattavelli, Digital Control in Power Electronics, Morgan & Claypool, 2006, pp. 15-28,53-65.
- [9] Consejo Nacional de Electricidad, "Procedimientos de Despacho Y Operación. Regulación No. CONELEC – 006/00," 09 08 2000. [Online]. Available: <http://www.conelec.gob.ec/images/normativa/ProcedimientosDespacho.pdf>. [Accessed 15 03 2014].



Guillermo Castillo, Nació el 07 de julio de 1990, en la provincia de Loja. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, donde obtuvo el grado de Ingeniero en Electrónica y Control. En 2014, se hizo acreedor a una beca para participar en el Taller de Energía Solar Fotovoltaica desarrollado

en el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad de Delft, Holanda. Actualmente se desempeña como docente del Departamento de Automatización y Control Industrial de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional y miembro de la Comisión de Evaluación Interna de la Carrera de Ingeniería en Electrónica y Control.

Áreas de interés: Automatización y Control Industrial, Sistemas de Control, Robótica, Instrumentación, y Energías Renovables



Leonardo Ortega, Nació en Quito el 14 de Diciembre de 1985. Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional, obteniendo el grado de Ingeniero en Electrónica y Control en el año 2010 en la Facultad de Ingeniería Eléctrica. Obtuvo el grado de Master en Ingeniería Eléctrica,

Electrónica y Automática en la Universidad Carlos III de Madrid-España en el año 2013. Actualmente se desempeña como docente a tiempo completo en el Área de Electrónica de Potencia tanto a nivel de pregrado como de postgrado, trabajando también en proyectos de investigación como colaborador y como director.

Áreas de Interés: Electrónica de Potencia, Convertidores estáticos de energía, Energías Renovables Redes Inteligentes.