

Diseño y Construcción de un Control de Corriente para el Equipo de Magnetización de Banco para la Detección de Discontinuidades en Materiales Ferromagnéticos

Carlos Iván Rueda Panchano, Nelson Rafael Flores Muriel, Patricio Chico Hidalgo, M.Sc

Escuela Politécnica Nacional (EPN). Quito - Ecuador

Resumen - En este trabajo se ha diseñado y construido un nuevo tablero de control para un equipo de magnetización de banco para la detección de discontinuidades en materiales ferromagnéticos que permite hacer variar la corriente de salida de esta máquina entre 500 y 2000 amperios, y asimismo, se ha elaborado, un módulo de control de corriente (modo corriente alterna o modo corriente rectificadora de media onda) para tres yugos electromagnéticos. Estos equipos son utilizados para realizar ensayos no destructivos y pertenecen al Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN.

Índices - Partículas magnéticas, PROTEUS, MATLAB, controlador PID, controlador de corriente, convertidor AC/AC.

I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo ha sido preparado de acuerdo a lo solicitado por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos (END) de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Este laboratorio, requería llevar a cabo ciertas mejoras en las máquinas que dispone, por esto se procedió a realizar este proyecto.

Las mejoras alcanzadas en el presente trabajo fueron entonces implementadas sobre las siguientes máquinas: un equipo de magnetización de banco y tres yugos electromagnéticos.

Para lograr este objetivo, se utilizaron dispositivos semiconductores (SCRs) y técnicas de electrónica de potencia y control automático.

El equipo de banco del laboratorio de END cuyo control se sustituyó, es una máquina que consiste básicamente en un transformador elevador de corriente con tres terminales en su secundario y que dependiendo de cómo se conecten estos terminales, entrega un valor de corriente de 1000, 1500, o un máximo de hasta 2000 A. Con el uso cotidiano, esta máquina se fue deteriorando hasta el punto en el que su antiguo tablero de control prácticamente estaba obsoleto.

Para el equipo de banco, el Laboratorio de END solicitó entonces que se implemente un control de corriente que

permita obtener una corriente variable entre 500 y 2000 A, eliminándose de esta forma la limitación de esta máquina que hasta antes de la elaboración de este proyecto, trabajaba con corrientes fijas de 1000, 1500, o 2000 A dependiendo de cómo se conecten los terminales del secundario de su transformador.

Asimismo, en el presente trabajo se desarrolla por solicitud también del laboratorio de END, un módulo de control de corriente para poder alimentar a tres yugos electromagnéticos con corriente rectificadora de media onda o con corriente alterna, con el fin de que de esta forma se puedan detectar con mayor facilidad y efectividad fisuras superficiales y sub-superficiales sobre piezas ferromagnéticas.

Los trabajos que por medio del presente trabajo se han implementado en el equipo de banco y los yugos electromagnéticos permiten extender la capacidad de funcionamiento de estas máquinas y a su vez permiten cumplir normas elaboradas para obtener los mejores resultados con los ensayos no destructivos. Las pruebas de END llevadas a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ensayos no Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN, se realizan no sólo como prácticas de laboratorio sino también como trabajos solicitados tanto por la empresa pública como por la privada.

II. GENERALIDADES

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de nondestructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada [1].

Los ensayos no destructivos abarcan desde inspecciones simples visuales, hasta inspecciones complejas del interior de piezas en las que se utiliza técnicas de radiografía o ultrasonidos. Los tipos de ensayos no destructivos se pueden dividir en dos clasificaciones: ensayos no destructivos convencionales, y ensayos no destructivos no convencionales.

Este trabajo fue realizado gracias al apoyo de la Escuela Politécnica Nacional. Los autores agradecen a la Escuela Politécnica Nacional por el total financiamiento del presente proyecto y por facilitar la fácil accesibilidad a las instalaciones y equipos para el desarrollo de este trabajo. Agradecen también a sus familias y a los ingenieros Patricio Chico, Miguel Villacrés, Carlos Flores e Iván Rueda que estuvieron siempre dispuestos a apoyar con sus valiosos conocimientos en el desarrollo y ejecución del presente trabajo.

C. Rueda, es Ingeniero Eléctrico Junior en AZULEC S.A. (Grupo AZUL), Quito-Ecuador, (e-mail: carlosivanrp@hotmail.com).

N. Flores, es Ingeniero de Proyectos en SEIN S.A., Quito-Ecuador, (e-mail: flores_muriel@hotmail.com).

A. Ensayos No Destructivos Convencionales [2]

Dentro de este grupo se tienen a los END que con mayor frecuencia se utilizan, es decir se incluyen: inspección visual, ensayo por tinta penetrante, ensayo por partículas magnéticas, ensayo por corriente de Eddy, ensayo por radiografía, y ensayo por ultrasonidos. El presente trabajo se enfoca en los métodos de ensayo por partículas magnéticas para la realización de pruebas de detección de fisuras en piezas ferromagnéticas.

B. Ensayos No Destructivos No Convencionales [2]

El segundo grupo de métodos END son aquellos usados solamente para aplicaciones especializadas y consecuentemente limitados en uso. Entre estos métodos se pueden mencionar al ensayo térmico e infrarrojo, técnicas de microondas, holografía, etc.

C. Principios de la Detección de Fisuras con Partículas Magnéticas [2], [3]

El método de partículas magnéticas para la detección de discontinuidades se aprovecha de las propiedades magnéticas de los materiales ferromagnéticos. Cuando a un objeto ferromagnético se le somete a un campo magnético externo, al analizarlo microscópicamente, se notará que sus dominios magnéticos se alinean paralelamente en dirección del flujo de campo externo; o bien, cosa más común, los bordes de los dominios se mueven de tal manera que, aquellos dominios cuya orientación magnética es paralela al campo externo crecen de tamaño a expensas de otros dominios (figura 1) [3], obteniéndose un flujo de campo magnético resultante con la misma dirección del campo externo.

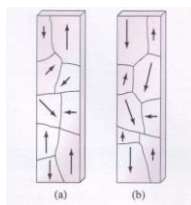


Fig. 1 Orientación de los dominios magnéticos

El efecto de magnetizar piezas ferromagnéticas es que ante pequeñas discontinuidades en la estructura de la misma, se presentan fugas en el flujo de campo, creándose así pequeños dipolos magnéticos que actúan como imanes con polo norte y sur; estos diminutos imanes son capaces de atraer a las denominadas partículas magnéticas cuando son esparcidas sobre la superficie de la pieza, indicando de esta manera la posición exacta de grietas (ver figura 2).

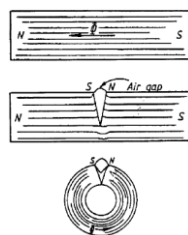


Fig. 2 Principio del método de detección de fisuras por partículas magnéticas [2]

La fuerza del campo de fuga depende de la profundidad y el ancho de las discontinuidades y la relativa fuerza del flujo magnético aplicado. El tamaño y la forma de una indicación, puede aproximarse al tamaño relativo de la discontinuidad. Una grieta en la superficie forma una indicación angosta y tupida, mientras que una discontinuidad sub-superficial en el material, formará una indicación ancha y difusa.

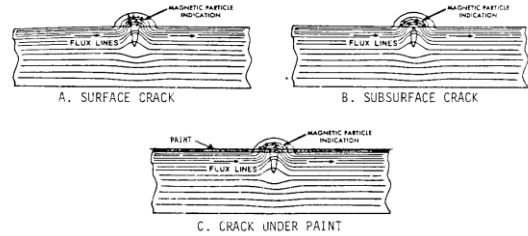


Fig. 3 Indicaciones formadas por diferentes tipos de campos de fuga [4]

III. DISEÑO DEL TABLERO DE CONTROL DEL EQUIPO DE BANCO

El equipo de banco es un transformador que actúa como un elevador de corriente. Esta planta ha sido diseñada para hacer pruebas de detección de fisuras por medio del método de partículas magnéticas en una tesis anterior de ingeniería mecánica [5].

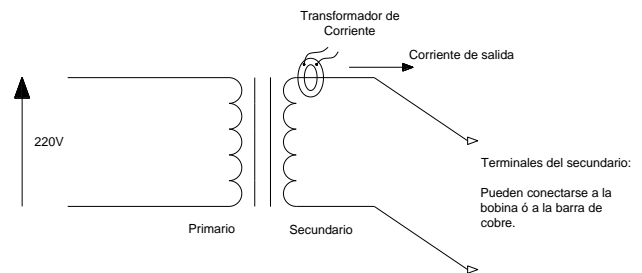


Fig. 4 Esquema del equipo de banco

A la entrada (primario del transformador) se conectan 220 V voltaje fase-fase y a la salida (secundario del transformador) se pueden conectar ya sea una bobina ó una barra de cobre, dependiendo del tipo de pruebas que se deseen hacer. Si se conecta la bobina, entonces se obtiene una corriente fija de 2000 A a la salida. Y, así mismo, si en vez de la bobina se conecta la barra de cobre, se obtiene en el secundario una corriente de salida mayor a 4000 A. El objetivo del presente trabajo es implementar un sistema de control en lazo cerrado para esta planta, para que trabaje en un rango de corriente variable de 500 A a 2000 A, lo cual permitirá escoger el valor preciso de corriente, indicado por normas aplicables, dependiendo del diámetro y longitud de la pieza a ensayarse.

A continuación se explican resumidamente, los diferentes bloques (planta, actuador, controlador, etc.) que intervienen en el lazo de control desarrollado para el equipo de banco.

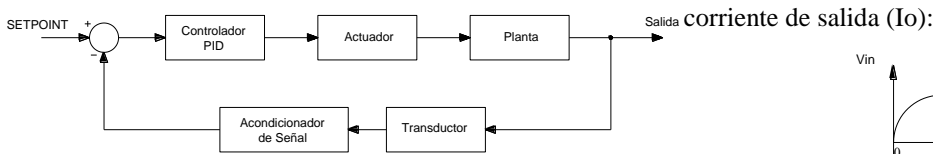


Fig. 5 Lazo de control implementado en el equipo de banco

A. Transductor y acondicionamiento de señal

El transductor del lazo cerrado de control del equipo de banco está compuesto por un transformador de corriente y una resistencia de muy bajo valor (0,1 Ohm). Esta resistencia se conecta en serie entre el transformador de corriente y un amperímetro. El transformador de corriente obtiene un valor proporcional a la corriente en el conductor de salida del equipo de banco (a 2000 A da una corriente de 5 A), es decir mide la corriente que circula a la salida de la máquina, la cual luego a su vez puede ser es monitoreada con un amperímetro como se indica en la figura 6. Al conjunto transformador de corriente, resistencia de 0,1 Ohm, y amperímetro se lo denomina transductor. Cuando circula el máximo valor de corriente de salida del equipo de banco (2000 A), este transductor entrega un voltaje de 500 mV aproximadamente; 500 mV que se encuentran entre los terminales de la resistencia de 0,1 ohm.

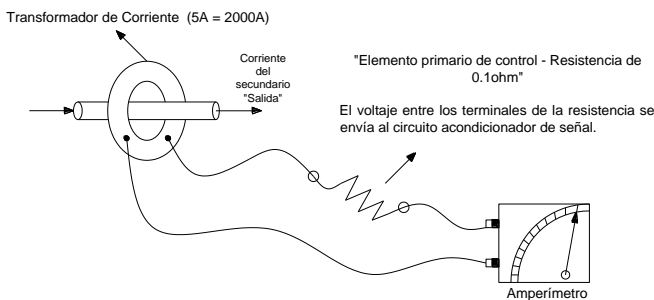


Fig. 6 Transductor del sistema de control para el equipo de banco

El circuito de acondicionamiento de señal convierte esta señal, en un valor de conversión que varía de 0 voltios a 0 amperios hasta 2.5 voltios a 2000 amperios, para así poder trabajar con el conversor A/D de un microcontrolador que actúa como el controlador PID del lazo cerrado de control.

B. Actuador

El actuador para el equipo de banco está conformado por dos SCRs en configuración de convertidor AC/AC bifásico (con carga altamente inductiva) que actúan como elemento final de control para el primario del transformador del equipo de banco.

Estos SCRs se activan por señales de disparo PWM enviadas hacia sus compuertas. El controlador (microcontrolador) envía estas señales a través de los circuitos de disparo. La variable de control para el actuador, es el ángulo de disparo alfa, el cual es el tiempo que transcurre entre cada cruce por cero y el comienzo de las señales de disparo. La figura 7 indica el funcionamiento del actuador sobre el primario de la planta. En esta figura se pueden ver el voltaje de alimentación de la máquina (V_{in}), las señales de disparo, el voltaje de salida (V_o), y la

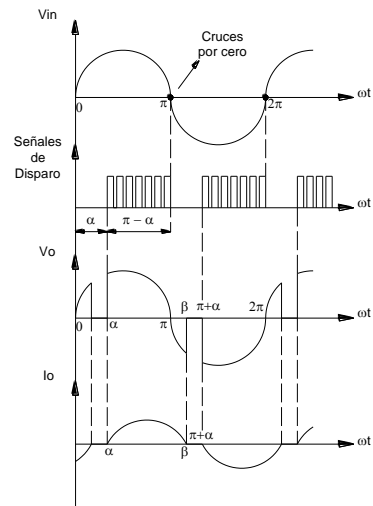


Fig. 7 Funcionamiento del actuador del equipo de banco

C. Función de transferencia de la planta

Experimentalmente, se pudo determinar que en lazo abierto la planta o equipo de banco, presenta respuestas paso similares a las que se obtendrían con un sistema de primer orden. La figura 8 muestra la forma de onda obtenida a la salida de esta planta en lazo abierto con la bobina conectada a la salida (con la barra de cobre se obtiene una forma de onda similar), la cual inmediatamente después de ser obtenida, indicó a los diseñadores que muy probablemente, el equipo de banco es una planta con comportamiento de sistema de primer orden.

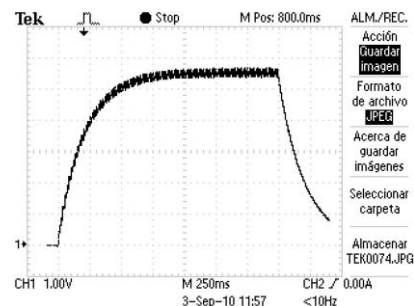


Fig. 8 Respuesta en lazo abierto del Equipo de Banco

Para determinar que el equipo de banco efectivamente se comporta como un sistema de primer orden, se utiliza el método de las tangentes (figura 9) sobre las curvas obtenidas a la salida en lazo abierto ante entradas paso. Como el equipo de banco puede trabajar con la bobina ó la barra de cobre conectada a la salida, se obtuvieron dos curvas de respuesta de salida, sobre las cuales se aplica el método de las tangentes (ver figuras 10 y 11):

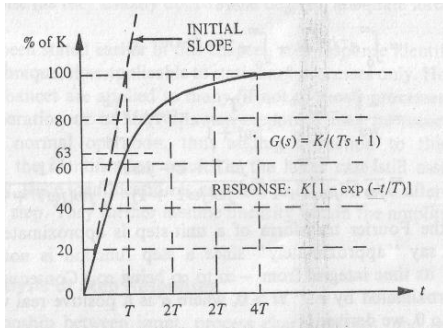


Fig. 9 Respuesta paso de un sistema de primer orden, en la cual se determina la constante de tiempo del sistema por medio del método de las tangentes [6]

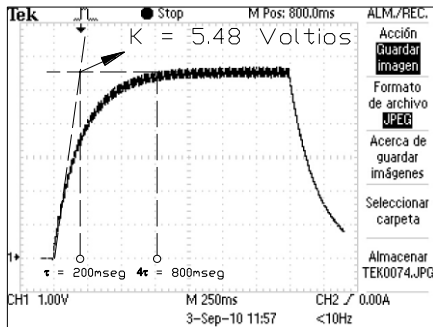


Fig. 10 Deducción de la constante de tiempo y la ganancia de la planta con la barra de cobre conectada a la salida

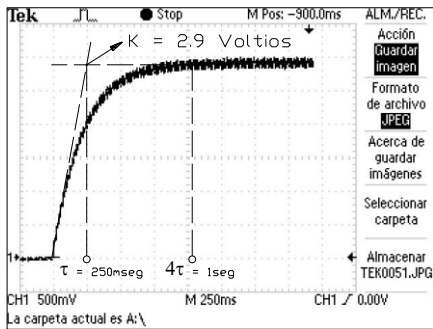


Fig. 11 Deducción de la constante de tiempo y la ganancia de la planta con la bobina conectada a la salida

Entonces, como se puede apreciar en las figuras 10 y 11, el equipo de banco efectivamente se comporta como un sistema de primer orden, porque a cuatro constantes de tiempo se obtiene el estado estacionario del sistema y además, porque al 63% del valor en estado estacionario se obtiene a una constante de tiempo. Esto es, en ambos casos, con bobina ó barra de cobre conectada a la salida.

Para un sistema de primer orden, la función de transferencia “G(s)” tiene la siguiente forma:

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

Donde K y τ son la ganancia y la constante de tiempo del sistema de primer orden respectivamente.

Las funciones de transferencia identificadas para la planta fueron:

$$G(s) = \frac{2.9}{0.25s + 1} \rightarrow \text{Con la bobina} \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{5.48}{0.2s + 1} \rightarrow \text{Con la barra de cobre} \quad (3)$$

Las funciones de transferencia discretizadas obtenidas son las siguientes:

$$G(z) = \frac{0.223}{z - 0.9231} \rightarrow \text{con la bobina} \quad (4)$$

$$G(z) = \frac{0.5215}{z - 0.9048} \rightarrow \text{con la barra de cobre} \quad (5)$$

El muestreo debe ser mucho menor que el tiempo de establecimiento del sistema en lazo abierto [7]; se elige un periodo de muestreo de 20 mseg porque una constante de tiempo para el banco se da aproximadamente a 200 mseg con la bobina y 250 mseg con la barra de cobre, es decir aproximadamente se toman diez muestras antes de llegar al 63% del valor en estado estacionario de la salida del sistema en lazo abierto.

D. Controlador PID para el equipo de banco

Por medio del programa de simulación de circuitos electrónicos PROTEUS, es posible simular un sistema de primer orden. Se trata de un bloque de simulación llamado "OVEN". Este bloque permite simular en PROTEUS un horno con resistencia calefactora, el cual al ser sometido a una entrada paso, presenta una salida (en lazo abierto) similar a la que se obtendría con un sistema de primer orden (63% del valor en estado estacionario a una constante de tiempo).

Con el fin de facilitar el diseño del controlador PID necesario para controlar la corriente de salida del equipo de banco, lo que se realiza entonces, es simular por medio del bloque OVEN de PROTEUS una planta que tenga las mismas características de la planta física real (equipo de banco). Características que como se menciona anteriormente, fueron obtenidas de forma experimental con pruebas realizadas sobre el equipo de banco en lazo abierto y con una entrada paso (ver figuras 10 y 11).

La planta obtenida con el bloque OVEN de PROTEUS permite entonces obtener la respuesta de la figura 12, bastante aproximada a la respuesta real (obtenida con la bobina conectada a la salida del equipo de banco):

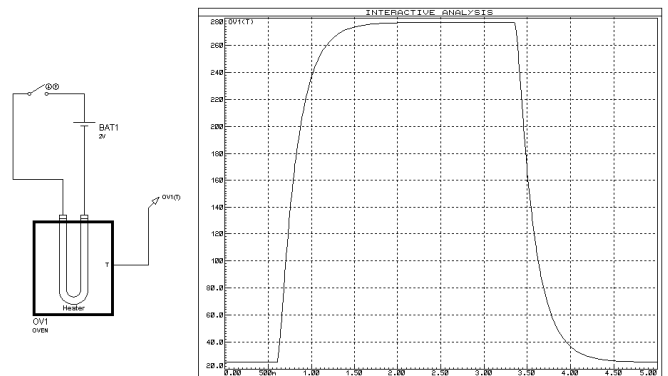


Fig. 12 Respuesta en lazo abierto obtenida en la planta OVEN de PROTEUS

Una vez obtenida una planta con similares características a la planta física real, se procedió a diseñar el circuito de control necesario para controlar a esta planta virtual a diferentes setpoints. Al final, la respuesta obtenida en PROTEUS demuestra que se logra que este circuito de control logre estabilizar la planta OVEN al setpoint deseado. Este método de diseño les permitió a los diseñadores realizar todas las pruebas necesarias en el computador con una planta muy aproximada a la planta real. Cuando finalmente se diseñó el circuito de control y se simuló en PROTEUS con la planta OVEN y se obtuvieron resultados satisfactorios (ver figura 13), se procedió a implementar los circuitos físicamente para controlar al equipo de banco y se realizaron sólo pequeños ajustes para lograr los resultados buscados.

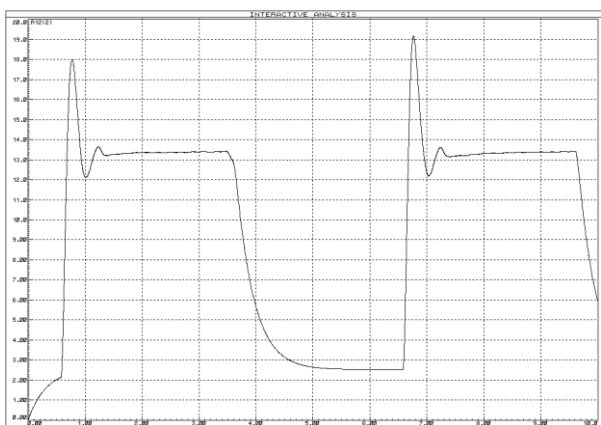


Fig. 13 Respuesta en lazo cerrado obtenida en la planta OVEN de PROTEUS

Las constantes k_p , k_i , y k_d , del controlador PID se determinan con MATLAB gracias a que se logra experimentalmente con el método de las tangentes determinar la función de transferencia del equipo de banco. Al tenerse ya determinada la función de transferencia de la planta, se logra por medio de la aplicación RLTOOL de MATLAB conseguir estas constantes que permiten establecer al controlador PID idóneo para controlar a una planta con una respuesta en lazo abierto como la del equipo de banco, o una planta con una respuesta muy aproximada a la del equipo de banco, es decir a la planta OVEN de PROTEUS.

MATLAB permite trabajar con lugares geométricos de las raíces de muchas maneras, y una de las formas más versátiles de hacerlo es a través de la interfaz gráfica con el usuario RLTOOL. Esta herramienta, permite ingresar la función de transferencia de un controlador y ver la respuesta transitoria de la salida del lazo cerrado de control a una señal paso, además de mostrar el lugar geométrico de las raíces (LGR).

Para determinar la función de transferencia del controlador PID necesario para controlar al equipo de banco se considera que la salida de esta máquina puede ser conectada de dos diferentes formas (bobina ó barra de cobre) lo que provoca dos distintos comportamientos. En otras palabras, se analiza el controlador PID necesario para controlar a las plantas representadas por las ecuaciones (4) y (5).

La función de transferencia de un controlador PID

discreto se puede escribir en la siguiente forma:

$$G_c(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{b_0.z^2 + b_1.z + b_2}{z^2 - z} \quad (6)$$

La ecuación (6) factorizada, es ingresada en el RLTOOL de MATLAB. Luego de esto, se procede a hacer movimiento de ceros (los polos del LGR deben estar dentro del círculo unitario para mantener estabilidad) para determinar al controlador PID idóneo que controle al equipo de banco, considerando que la respuesta del mismo, debe tener un tiempo de establecimiento (t_s) menor a 1 seg, un máximo sobreimpulso (M_p) menor al 30% y un error de posición (E_p) de 0%.

Con RLTOOL, se obtiene entonces el siguiente controlador PID:

$$G_c(z) = \frac{(z - 0.745)(z - 0.0388)}{(z - 1)z} \quad (7)$$

el cual provoca que la planta se comporte de la siguiente forma:

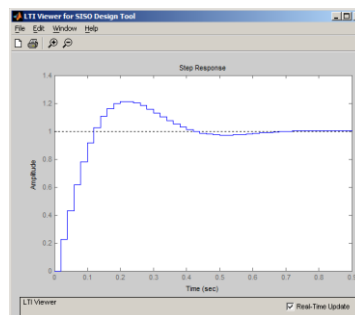


Fig. 14 Respuesta transitoria del equipo de banco con compensador PID (bobina a la salida)

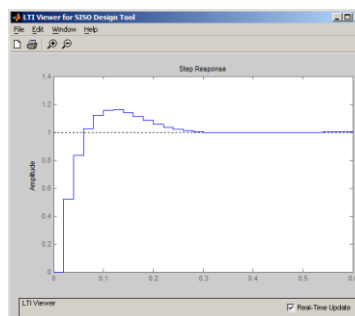


Fig. 15 Respuesta transitoria del equipo de banco con compensador PID (barra de cobre a la salida)

Dado que:

$$b_0 = k_p + \frac{k_d}{T_m} + \frac{k_i T_m}{2} \quad (8)$$

$$b_1 = -k_p - \frac{2.k_d}{T_m} + \frac{k_i T_m}{2} \quad (9)$$

$$b2 = \frac{kd}{Tm} \quad (10)$$

$$Tm = 0.02 \text{ seg} \quad (11)$$

entonces, trabajando con las ecuaciones (6) a (11), se determina que:

$$Kp = 0.8485$$

$$Kd = 0.000578$$

$$Ki = 12.256$$

$$Tm = 0.02 \text{ seg}$$

Nótese que el controlador PID que se obtiene al final (ecuación (7)), es el mismo tanto para funcionamiento con bobina como con barra de cobre ya que satisface las condiciones de diseño (t_s , M_p , y E_p) en ambos casos.

IV. DISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL DE LOS YUGOS

El módulo de control de corriente que se diseña en este proyecto para los tres yugos electromagnéticos del Laboratorio de END, tiene como fin, el poder alimentar a estos yugos (uno de marca Magnaflux y dos diseñados en tesis anteriores), con corriente AC o con corriente rectificada de media onda (HWDC) dependiendo de lo que elija el operador de este módulo. Este equipo trabaja en lazo abierto (sin realimentación) y consiste básicamente en un controlador que a través del control del ángulo alfa de disparo, hace que dos tiristores conectados en inverso paralelo a la línea de alimentación (monofásica), trabajen en dos modos: modo convertidor AC/AC o modo convertidor AC/DC con carga altamente inductiva. De esta manera se controla la forma de onda de voltaje y como consecuencia la de corriente que alimenta a los yugos.

Este módulo trabaja en lazo abierto. La figura 16 ilustra el lazo de control implementado en el módulo de control de corriente para los yugos electromagnéticos:

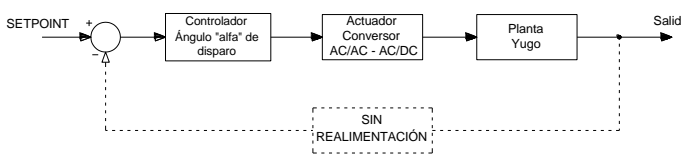


Fig. 16 Lazo de control del módulo para los yugos electromagnéticos

A continuación se explican resumidamente los bloques que componen el lazo de control desarrollado para el módulo de control de los yugos.

A. Actuador del módulo de control de los yugos

Al igual que en el equipo de banco, el control en la corriente de salida (o variable controlada), se realiza cambiando la forma de onda del voltaje de alimentación de la carga (yugo). El actuador consiste en dos tiristores conectados en inverso paralelo, que funcionan como un convertidor AC/AC o un convertidor AC/DC. El controlador selecciona el modo de funcionamiento. La figura 7 indica el funcionamiento de este actuador en modo AC/AC y la figura 17 su funcionamiento en modo AC/DC.

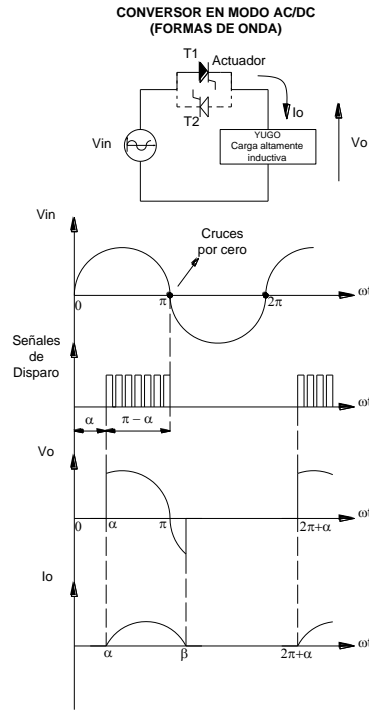


Fig. 17 Funcionamiento del actuador del módulo de control de los yugos

B. Actuador del módulo de control de los yugos

El controlador está sincronizado con la señal de voltaje sinusoidal de la red de alimentación (V_{in}) y detecta, por medio de un circuito detector de semiciclos, los cambios de semiciclo de positivo a negativo y viceversa (ver figura 18). De esta manera, reconoce en qué semiciclo se encuentra V_{in} en cualquier momento. Con esta información, el controlador del módulo de control de corriente, puede hacer trabajar al actuador en el modo AC/DC o AC/AC según se desee.

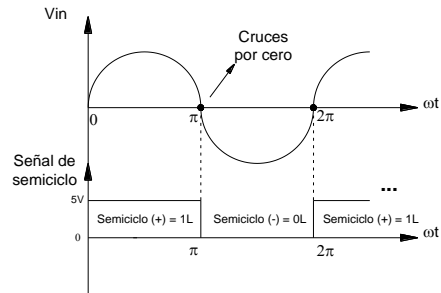


Fig. 18 Forma de onda de la señal de semiciclo

V. PRUEBAS Y RESULTADOS

Las pruebas en los yugos y en el equipo de banco fueron realizadas en el laboratorio de END de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la EPN. Los resultados obtenidos con el nuevo tablero de control para el equipo de banco y el módulo de control para los yugos fueron satisfactorios.

A continuación, se muestran algunas de las formas de onda obtenidas en el equipo de banco y en los yugos electromagnéticos.

A. Formas de onda obtenidas en el primario del equipo de banco (conexión bobina)

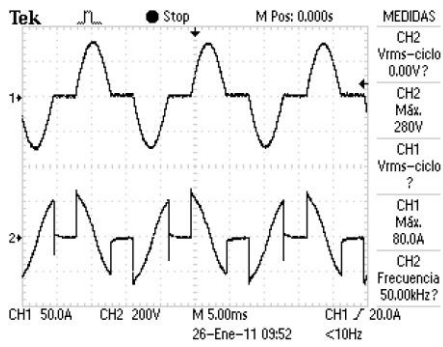


Fig. 19 Formas de onda a 500 A (canal 1 - corriente; canal 2 - voltaje) obtenidas con la bobina conectada a la salida

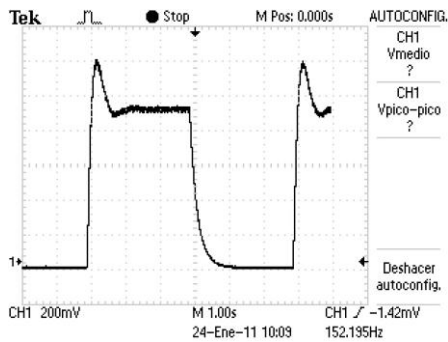


Fig. 20 Respuesta del sistema de control en lazo cerrado a 500 A con la bobina conectada a la salida

B. Formas de onda obtenidas en el primario del equipo de banco (conexión barra de cobre)

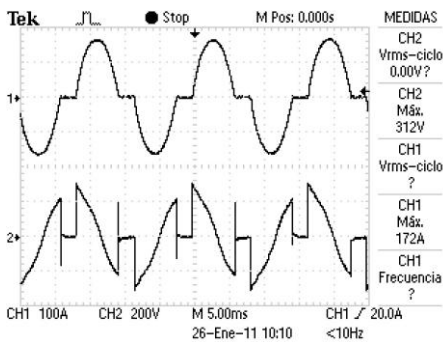


Fig. 21 Formas de onda a 2000 A (canal 1 - corriente; canal 2 - voltaje) obtenidas con la barra de cobre conectada a la salida

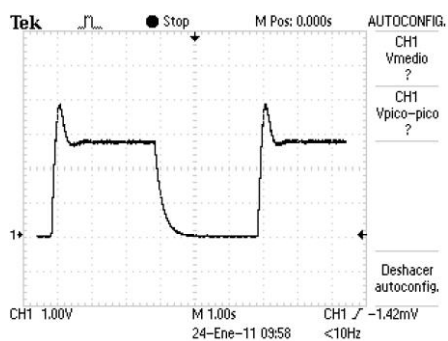


Fig. 22 Respuesta del sistema de control en lazo cerrado a 2000 A con la barra de cobre conectada a la salida

C. Resultados obtenidos con el equipo de banco

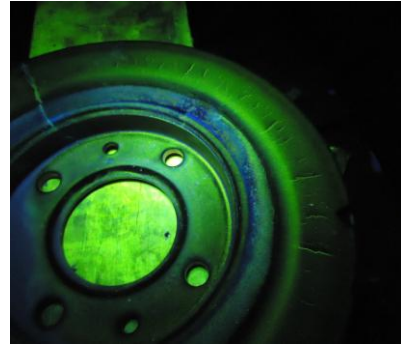


Fig. 23 Fisuras imperceptibles detectadas por medio del equipo de banco por el método de partículas magnéticas húmedas sobre el freno de tambor de un vehículo

D. Formas de onda obtenidas en los yugos electromagnéticos

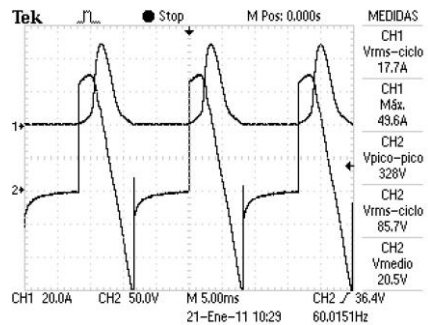


Fig. 24 Formas de onda (canal 1- corriente; canal 2 - voltaje) obtenidas en el yugo gris a media onda y con un ángulo de disparo alfa de 60°

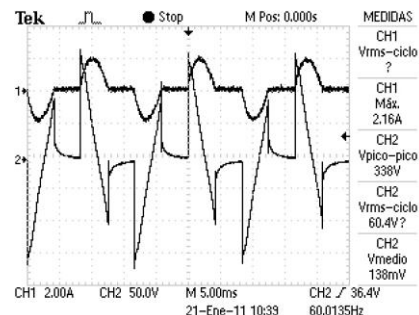


Fig. 25 Formas de onda (canal 1- corriente; canal 2 - voltaje) obtenidas en el yugo gris con voltaje de alterna y un ángulo de disparo alfa de 120°

E. Resultados obtenidos con los yugos electromagnéticos



Fig. 26 Fisuras detectadas por el método de partículas magnéticas secas con corriente rectificad de media onda a 0°



Fig. 33 Módulo de control de corriente para los yugos electromagnéticos

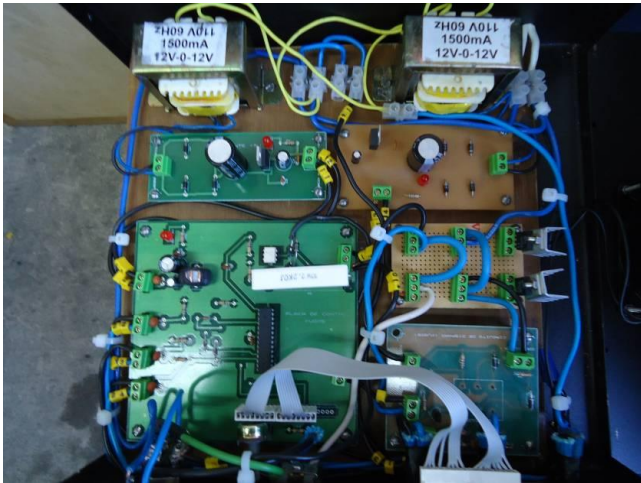


Fig. 34 Interior del módulo de control de corriente para los yugos electromagnéticos

VI. CONCLUSIONES

Un método útil para determinar las constantes k_p , k_i , y k_d del controlador PID necesario para controlar al equipo de banco, consiste en utilizar las herramientas de análisis y diseño de sistemas de control de MATLAB. En el caso del presente proyecto, con la herramienta RLTOOL se pudo determinar la mejor función de transferencia del controlador PID, evitándose el método de ensayo error para determinar las mejores constantes k_p , k_i , y k_d que controlen al equipo de banco.

El análisis de la respuesta transitoria de los sistemas de primer orden en lazo abierto, como es el caso del análisis realizado sobre el equipo de banco, permite determinar parámetros que sirven para identificar la función de transferencia del sistema. Una vez determinada la función de transferencia, con este modelo matemático se pueden hacer con relativa facilidad, análisis y diseños de controladores adecuados para cualquier planta que se comporte como un sistema de primer orden.

Al momento de magnetizar una pieza, si en ésta existe una fisura, se formará sobre esta fisura un dipolo magnético que actúa como un imán con polo norte y sur; en esta situación, las partículas magnéticas serán atraídas hacia dicha fisura y se formará la indicación correspondiente a la fisura en la pieza. Los mejores resultados en la detección de fisuras por el método de partículas magnéticas son obtenidos cuando el campo magnético generado ya sea por los yugos electromagnéticos o por el equipo de banco en modo bobina o barra de cobre, es alineado perpendicularmente con la sección transversal de la fisura.

Gracias al nuevo módulo de control para los yugos electromagnéticos del laboratorio de END diseñado en el presente proyecto, se podrán realizar pruebas de detección de fisuras con partículas magnéticas sobre piezas ferromagnéticas con corriente rectificadas de media onda o con corriente alterna. Al emplear el método de partículas magnéticas para detectar fisuras sobre piezas ferromagnéticas, un factor muy importante es el tipo de corriente que se esté empleando. Los tipos más comunes de corrientes empleadas en estas pruebas son la corriente alterna y la corriente rectificadas de media onda, siendo la primera más efectiva en los casos en que se deseen determinar fisuras superficiales, y la segunda, en los casos en que se deseen detectar fisuras sub-superficiales. Por lo tanto, se ha conseguido que los yugos electromagnéticos para los cuales se realizó el módulo de control de corriente del presente proyecto permitan ahora determinar con mayor efectividad fisuras sub-superficiales o superficiales.

Actualmente el equipo de magnetización de banco y los yugos electromagnéticos pertenecientes al Laboratorio de Ensayos No Destructivos de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, funcionan a plenitud y con nuevas características implementadas por la elaboración del presente proyecto. Para el equipo de magnetización de banco el principal objetivo consistió en obtener una corriente variable entre 500 y 2000 amperios. Gracias al trabajo realizado, el objetivo anteriormente mencionado fue obtenido. Además, fue también logrado el objetivo de poder alimentar a los yugos electromagnéticos con corriente alterna o rectificadas de media onda. Con el cumplimiento de estos dos principales objetivos, se satisfizo las demandas designadas por el Laboratorio de Ensayos No Destructivos a los realizadores de este proyecto.

VII. REFERENCIAS

- [1] Wikipedia homepage (2011), [Online], Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_no_destructivo
- [2] International Atomic Energy Agency, "Liquid Penetrant and Magnetic Particle Testing at Level 2", Vienna, 2000.
- [3] Giancoli D., "Física, Principios con Aplicaciones", Cuarta Edición., Editorial Prentice Hall, México, 1995.
- [4] The American Society for Nondestructive Testing (ASNT), *Level III Study Guide, Magnetic Particle Method*, United States of America, 1980.
- [5] RODRIGUES S.; ZÚÑIGA J., "Diseño y construcción de un equipo de magnetización de banco y su fuente de poder para la detección de discontinuidades en materiales ferromagnéticos por el método de partículas magnetizable", Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1993.
- [6] Graupe Daniel, "Identification of Systems", Segunda Edición, Editorial Krieger Publishing Company, Estados Unidos, 1972.
- [7] García E., "Compilador C CCS y Simulador PROTEUS para microcontroladores PIC", Primera Edición, Editorial Alfaomega-Marcombo, México, 2008.
- [8] Área de Ingeniería Mecánica – Mantenimiento Industrial, *Partículas Magnéticas Práctica VIII*, Universidad de Oviedo.

- [9] General Dynamics, *"Nondestructive Testing Magnetic Particle"*, Segunda Edición, 1977.
- [10] Llogsa homepage (2010), [Online]. Disponible: www.llogsa.com/nueva_web/tutoriales/particulas-magneticas/
- [11] Coughlin R.; Driscoll F., *"Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales"*, Cuarta Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1993.
- [12] Procobre homepage (2010), [Online]. Disponible: http://www.procobre.org/archivos/peru/conductores_electricos.pdf
- [13] PERRASO L., *"Adquisición de datos, supervisión y control PID utilizando controladores lógicos programables"*, Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 1995.
- [14] Motorola, *"Mounting Considerations for Power Semiconductors"*, 1993.
- [15] NTE Electronics Inc, *"NTE5536 Silicon Controlled Rectifier (SCR) 800 V 40 Amp, TO220"*.
- [16] Elliot Sound Products homepage (2010), [Online]. Disponible: <http://sound.westhost.com/heatsinks.htm>
- [17] Muhammad R., *"Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y aplicaciones"*, Segunda Edición, Editorial Prentice Hall, México, 1995.
- [18] Pizziola Antonio, *"Electrónica Industrial, Disparo de SCR Mediante Transformador de Impulsos"*, 1975.
- [19] Muhammad R., *"Power Electronics Handbook"*, Primera Edición, Editorial Academic Press, Estados Unidos, 2001.
- [20] NTE Electronics Inc, *"NTE5586 & NTE5588 Silicon Controlled Rectifier for Phase Control Applications"*.
- [21] STMicroelectronics, *"AN436 Application Note - Triac Control by Pulse Transformer"*, 2004.
- [22] On Semiconductor, *"Thyristor Theory and Design Considerations Handbook"*, 2006.
- [23] Lilen H., *Tiristores y Triacs*, Primera Edición, Editorial Marcombo, Barcelona, 1981.
- [24] Palacios E.; Remiro F.; López L., *"Microcontrolador PIC16F84, Desarrollo de proyectos"*, Segunda Edición, Editorial Alfaomega, Madrid, 2006.
- [25] NEC Corporation, *"Data sheet 2P4M, 2P5M, 2P6M Thyristors"*.
- [26] Wikipedia homepage (2011), [Online]. Disponible: <http://es.wikipedia.org/wiki/Varistor>
- [27] Motorola, *"6- DIP Optoisolators Transistor Output (4N25)"*.
- [28] Malvino A., *"Principios de Electrónica"*, Sexta Edición, Editorial McGraw Hill, España, 1999.

VIII. BIOGRAFÍAS

Carlos Iván Rueda Panchano,



Nació el 26 de Febrero de 1985 en la ciudad de Esmeraldas, Ecuador. Obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2011. Ha aprobado cursos de MATLAB aplicado al Análisis de Señales y Sistemas, Visual Basic (CEC - EPN), LabView, InTouch, Microcontroladores ATMEGA y PIC, AutoCAD, y los niveles necesarios para la obtención del Certificado de Suficiencia de Inglés otorgado por la EPN, así como cinco niveles de inglés en la Comisión Fulbright del Ecuador. También ha realizado prácticas en el Área de Automatización y Control de la Refinería Estatal Esmeraldas, en el Área de Instrumentación y Control de la empresa generadora de energía eléctrica Termoesmeraldas - CELEC EP y en el Área de Instrumentación y Control de la empresa La Llave S.A. Trabajó inicialmente como Asistente de Proyectos y luego como Ingeniero de Proyectos en el Área de Proyectos y Servicios de la empresa SEIN S.A. Actualmente se desempeña como Ingeniero Eléctrico Junior en el departamento de ingeniería (disciplina Instrumentación y Control) de AZULEC S.A. (Grupo AZUL). Sus áreas de interés son: control industrial, diseño de controladores con microprocesadores, electrónica de potencia vinculada con el control de máquinas eléctricas y el manejo eficiente de la energía eléctrica.

Nelson Rafael Flores Muriel,



Nació en Quito el 01 de junio de 1984, y realizó sus estudios secundarios en el Colegio Técnico Salesiano Don Bosco, donde obtuvo el título de Bachiller Técnico Industrial en Electricidad. Obtuvo su título de Ingeniero en Electrónica y Control en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2011. Ha aprobado varios cursos entre los que se destacan la suficiencia de inglés en el Centro de Educación Continua (CEC - EPN), y los cursos dictados en la EPN como LabVIEW 6.1, e Intouch 7.1. Se desempeñó como Ingeniero de Servicios en la empresa FIRMESA S.A. y actualmente labora como Ingeniero de Proyectos en el Área de Proyectos y Servicios de SEIN S.A.

Patricio Chico Hidalgo

Ingeniero en Electrónica y Control, Escuela Politécnica Nacional, 1987 Master of Science in Electrical Engineering, University of Texas at Arlington, USA, 1994

Actualmente trabaja como Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial en la Escuela Politécnica Nacional.

Sus áreas de interés son la Electrónica de Potencia, las conversión estática de energía eléctrica, y los sistemas microprocesados. (patricio.chico@epn.edu.ec)