

Diseño de un regulador de corriente eléctrica para las bobinas modulares del Stellarator SCR-1

Design of switched power supply for the SCR-1 Stellarator

Jaime Mora¹, Iván Vargas², José Asenjo³

Mora, J; Vargas, V, Asenjo, J. Diseño de un regulador de corriente eléctrica para las bobinas modulares del Stellarator SCR-1. *Tecnología en Marcha*. Número Especial Movilidad Estudiantil 4. Pág 21-29.

DOI: 10.18845/tm.v30i5.3220

1 Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica. Correo electrónico: jaime.plasma.tec@gmail.com

2 Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

3 Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Palabras clave

Confinamiento magnético; *stellarator*; regulador de corriente; circuito de potencia.

Resumen

El *stellarator* de Costa Rica 1, llamado SCR-1, es un dispositivo de confinamiento magnético de plasmas de alta temperatura, diseñado, construido y en fase de implementación en el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Durante su operación el plasma será confinado por el campo magnético ($\sim 43,8$ mT) de 12 bobinas modulares, con seis vueltas de cable de cobre AWG#4 por bobina, y alimentadas por un banco industrial de baterías (150 A-h, 120 V), que debe suministrar en forma constante 767,8 A por un periodo de 4 s a 10 s. El cambio de la resistencia eléctrica por el calentamiento óhmico en el cable conductor de las bobinas planteó la necesidad de diseñar, construir e implementar un regulador de corriente eléctrica que suministrara en forma constante 767,8 A por el periodo de tiempo indicado. Este artículo presenta el diseño de un circuito de potencia eficiente y de bajo costo, para regular la corriente eléctrica en las bobinas modulares del SCR-1, así como el diseño de un control digital PID con algoritmo de velocidad, que permite disminuir la magnitud de los armónicos para no generar errores en el campo magnético del *stellarator*.

Keywords

Magnetic confinement; *stellarator*; current regulator; power electronics.

Abstract

The *stellarator* of Costa Rica 1 (SCR-1) is a magnetic confinement device for high temperature plasma, designed, built and in implementation in the Costa Rica Institute of Technology. During operation, the plasma will be confined by the magnetic field ($\sim 43,8$ mT) of 12 coils with six loops of copper wire AWG #4, and fed by a battery bank (150 Ah, 120 V) that should provide a constant current of 767,8 A for a period of 4 s to 10 s. The change of electric resistance made by the ohmic heating in the wire required to design, build and implement a current regulator that would supply a constant current of 767,8 A during the indicated period. This article presents the design of an electric circuit, powerful and low-cost, to regulate the electric current in the modular coils of the SCR-1. Additionally, it describes the design of the digital control of the electric circuit PID, with a velocity algorithm that decreases the magnitude of the harmonics to avoid issues within the magnetic field of the *stellarator*.

Introducción

El SCR-1 es un *stellarator* modular pequeño para confinamiento magnético de plasmas diseñado, construido en Costa Rica y en fase de implementación en el Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El *stellarator* SCR-1 es un dispositivo de periodo $m=2$ con una razón de aspecto de 4,4; su configuración magnética es de baja cizalla, con valores de transformada rotacional en el centro y en el borde del plasma de 0,32 y 0,28. El plasma será almacenado en una cámara de aluminio 6061-T6 con forma toroidal, especialmente manufacturada para condiciones de vacío. El radio mayor del dispositivo es $R = 238$ mm y el plasma tendrá un radio menor de 54,11 mm, con un volumen de 13,76 l (0,01 m³). El plasma será confinado en este volumen por un campo magnético en el eje de 43,8 mT, generado por 12 bobinas modulares con 6 vueltas de cable AWG#4 por bobina,

que llevarán una corriente de 76,8 A por vuelta, suministrando una corriente total por bobina de 4,6 kA. Las bobinas serán alimentadas por un banco industrial de baterías (150 A-h, 120 V). La longitud típica de un pulso de plasma será entre 4 s y 10 s. El plasma del SCR-1 será calentado por resonancia ciclotrónica electrónica con el segundo armónico a 2,45 GHz, con una densidad de corte de $7,45 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$. Para lo anterior se utilizarán dos magnetrones con una potencia máxima de salida de 2 kW y 3 kW. Para diagnosticar el plasma se contará con una sonda de Langmuir, un espectrómetro óptico y un interferómetro heterodino de microondas de 28 GHz (Vargas et al., 2015).

El *stellarator* de Costa Rica 1 (SCR-1, llamado así), fue diseñado por investigadores del Laboratorio de Plasmas para Energía de Fusión y Aplicaciones, del Tecnológico de Costa Rica, con el fin de destinarlo a investigación como futura fuente de energía. Stellarator es un nombre en inglés derivado de *stellar* + *generator*, que en español significa generador estelar, pues reproduce en la tierra los procesos mediante los cuales las estrellas generan su energía (Boozer, 1998).

La investigación en fusión nuclear que se realiza mediante estos dispositivos tiene por objetivo la búsqueda de una nueva fuente de energía renovable que utiliza por combustible el hidrógeno, el elemento más abundante del universo, y que no utiliza materiales radiactivos como los reactores de fisión nuclear convencionales. Mediante el uso de dispositivos de confinamiento magnético, se ha logrado confinar un plasma en la Tierra, a más 100 millones de grados Celsius (aproximadamente 10 veces la temperatura del centro del Sol), permitiendo con ello el inicio de procesos nucleares controlados entre los isótopos del hidrógeno llamados deuterio y tritio. Los estudios indican que con un solo gramo de combustible hidrógeno en estos dispositivos se produciría 26 000 kWh, y se convertiría esta tecnología en la mejor opción a futuro para abastecer la demanda energética de la humanidad (J. Ongena & G. Van Oost, 2006).

El *stellarator* de Costa Rica 1 (SCR-1) constituye el primer dispositivo en su tipo en Latinoamérica y uno de los 9 dispositivos *stellarator* que existen en el mundo. Ha sido diseñado, construido e implementado cien por ciento en Costa Rica.

Una de las principales necesidades que ha originado la puesta en funcionamiento del *stellarator* SCR-1 es controlar la corriente eléctrica que circulará por las bobinas modulares, la cual debe ser constante, con un valor de 767,8 A. Se sabe que existe un calentamiento de las bobinas en los cables de cobre y que esto llevará a que su resistencia cambie y, por tanto, también la corriente eléctrica que esté en circulación. Sin una corriente constante, el confinamiento del plasma no será óptimo; de ahí la necesidad de diseñar e implementar un control automático, para que regule esta corriente adecuadamente.

En el *stellarator* Wendelstein WX-7, de tipo modular helias, actualmente en construcción en el Instituto Max Planck, en Alemania, se utiliza un sistema para regular la corriente con 12 tiristores, en el que cada uno va conectado a una línea del bobinado secundario de los dos posibles transformadores que tendrá la fuente. Estos tiristores, en conjunto, rectifican la corriente y suplirán de energía las bobinas principales del *stellarator* (Rummel, 2003).

Por otro lado, el *stellarator* TJ-II, ubicado en el CIEMAT, España, representa un caso muy complejo, pues es de tipo HELIAC, por lo que utiliza varios juegos de bobinas para crear el campo magnético, de modo que la regulación de corriente requiere un sistema para cada una de estas bobinas. Para ello se emplean *tristores*, que usan una única frecuencia para conmutar. También para controlar la corriente utilizan un generador para enviar los picos de corriente adecuados (Perez, 1995).

Este artículo presenta la solución para el control de la corriente eléctrica en el caso particular del *stellarator* de tipo modular llamado SCR-1.

Circuito de potencia

Convertidor Buck

El convertidor Buck es el convertidor DC-DC más básico, conocido también como convertidor reductor. Como su nombre lo indica, disminuye la tensión de entrada. Teóricamente podría entregar a la salida la misma tensión de entrada, pero por ser un dispositivo con pérdidas siempre será menor la tensión de salida que la de entrada. En la figura 1 se observa la topología básica de un convertidor Buck, mediante la utilización de interruptores.

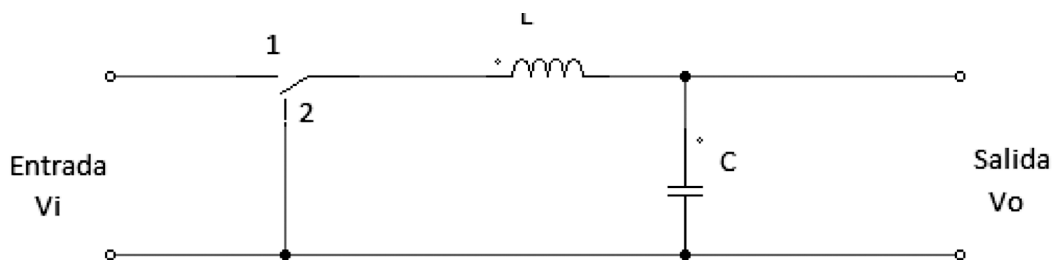


Figura 1. Convertidor Buck representado mediante interruptores.

La siguiente ecuación de estados describe el comportamiento del convertidor Buck:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{i_{salida}}{C} \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} V_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde i_{salida} : corriente de salida, L: inductancia, V_i : tensión de entrada del convertidor, C: capacitancia.

De igual forma, las ecuaciones para calcular el valor del inductor y del capacitor son las siguientes:

$$L = \frac{V_{salida}(V_i - V_{salida})}{(I_2 - I_1) f V_i} \quad (2)$$

donde L: inductancia, V_{salida} : tensión de salida del convertidor Buck, V_i : tensión de entrada del convertidor Buck, $I_2 - I_1$: rizado de la corriente, f: frecuencia de corte.

$$C = \frac{\Delta I}{8 \Delta V_C f} \quad (3)$$

donde C: capacitancia, ΔI : rizado de la corriente, ΔV_C : tensión de salida del capacitor, f: frecuencia de corte.

Diseño del convertidor

Para el diseño del regulador de corriente requerido, se utilizó el concepto del convertidor Buck. En la figura 2 se puede observar el circuito obtenido, el cual cuenta con 9 IGBT, 9 resistencias R2 con un valor de 0,1 Ohm, 9 resistencias R1 con un valor de 0,3 Ohm, 9 capacitores de 0,1 microfaradios, 9 diodos y 9 bobinas L de 315 microhenrios.

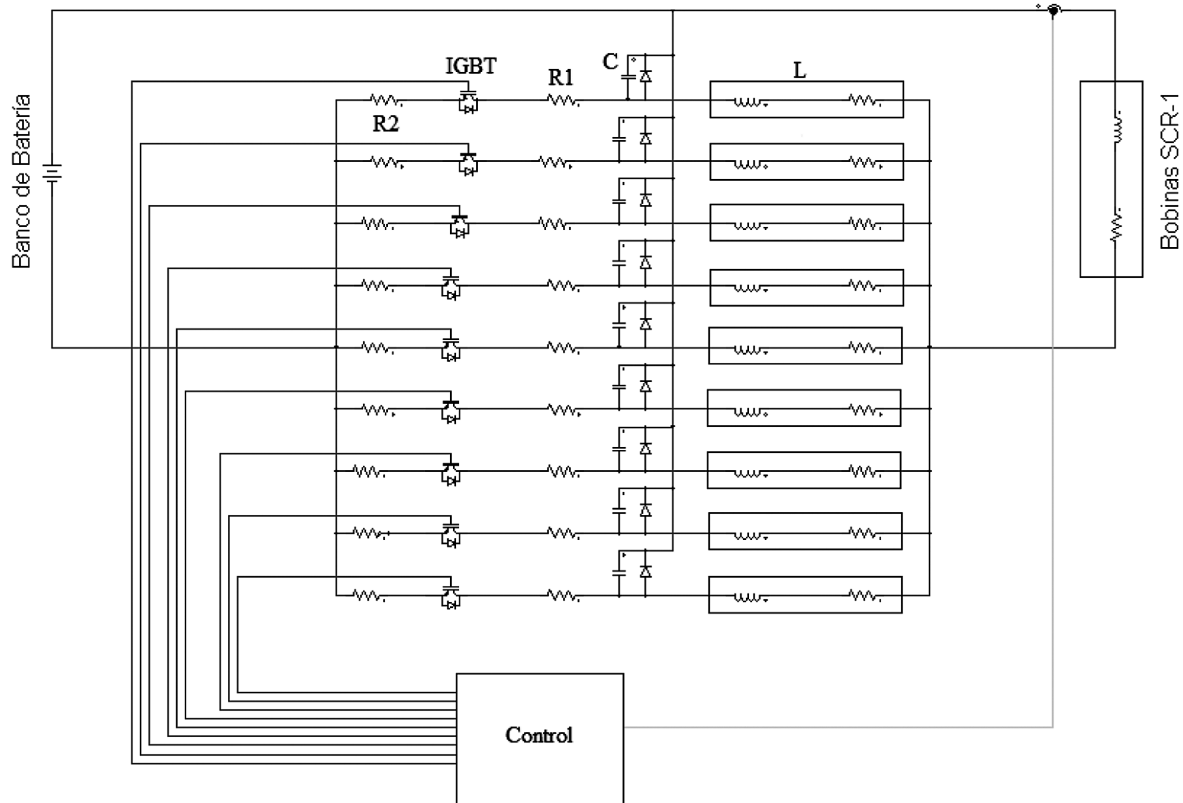


Figura 2. Circuito de potencia para el regulador de corriente de las bobinas del SCR-1, obtenido con el software PSIM.

Para este circuito se utilizaron 9 convertidores Buck paralelos, con el fin de reducir la potencia que cada componente debía soportar, lo que redujo los costos de construcción. Además del costo menor, existía una razón técnica para utilizar más de un IGBT: disminuir la magnitud de los armónicos. En este caso, se utilizaron 3 frecuencias que no son múltiplos entre sí; se seleccionaron 27 kHz, 23 kHz y 19 kHz. Como se observa, dos de ellos son números primos, con lo cual se asegura que no son múltiplos entre sí. La tercera frecuencia se escogió con una diferencia de 4 kHz respecto de la última, para evitar que, en el espectro, estén muy cerca y puedan llegar a combinarse. Esto se observa en la figura 3, donde todos los IGBT están trabajando a 27 kHz y la magnitud de los armónicos y de la frecuencia fundamental es de 2,6 como máximo (gráfica 3A). En la gráfica 3B se observa el resultado de 3 IGBT trabajando a 19 kHz, 3 IGBT trabajando a 23 kHz y 3 IGBT trabajando a 27 kHz, donde la magnitud máxima perteneciente a la frecuencias fundamentales es de 1,2. La necesidad de disminuir los armónicos en la corriente de salida se debe al efecto que estos pueden provocar en el plasma, por lo que es mejor mantener diversas frecuencias en la salida que magnitudes altas.

Control

PID

El controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es uno de los preferidos en el ámbito, debido a los profusos estudios a que ha sido sometido y a la simplicidad de su uso. Funciona mediante un mecanismo de realimentación que calcula el error entre un valor deseado y un valor medido, y aplica una corrección para ajustar la planta a lo requerido (Kuo, 1996).

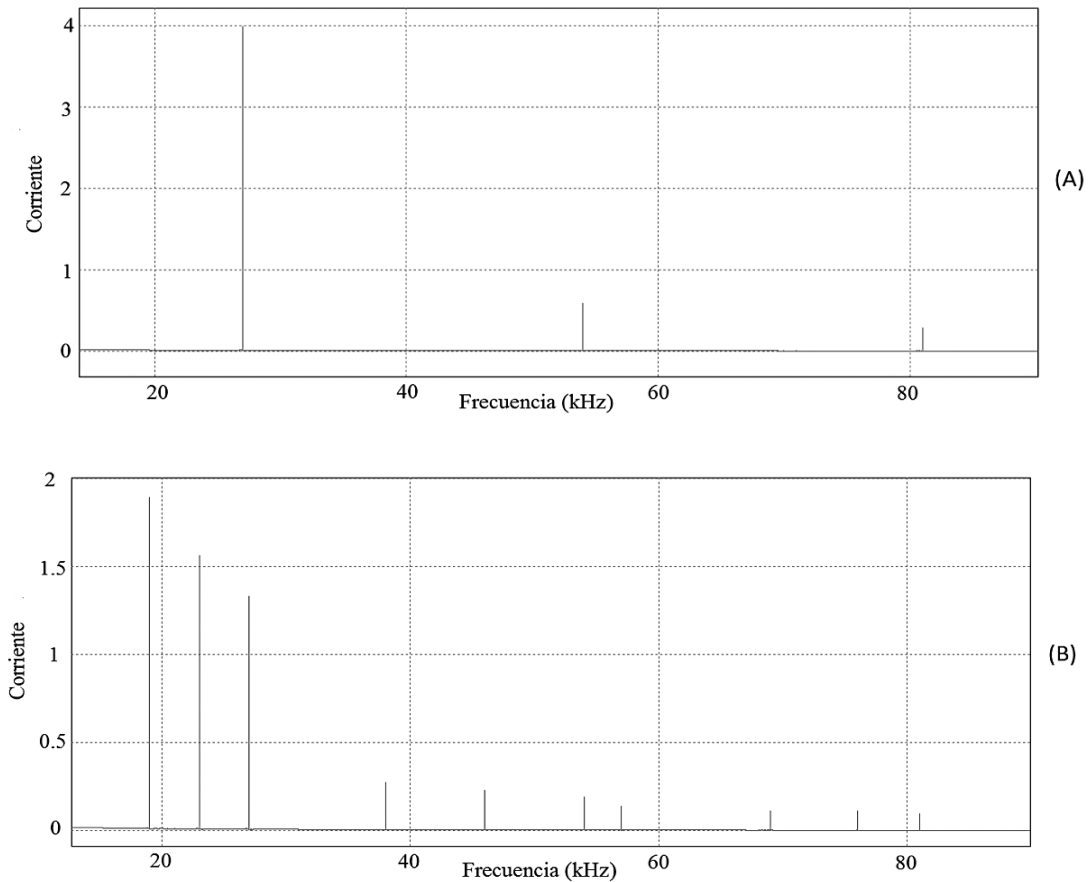


Figura 3. A) frecuencias fundamentales y armónicos presentes en la corriente de salida del regulador diseñado, trabajando a 27 kHz. B) Frecuencias fundamentales y armónicos presentes en la corriente de salida del regulador diseñado, trabajando a 3 frecuencias diferentes: 19 kHz, 23 kHz y 27 kHz.

El cálculo de un control PID tiene tres parámetros: uno proporcional, uno integral y uno derivativo, de ahí la sigla que le da nombre. Cada una de estas partes cumple una función específica: el proporcional se encarga de actuar en el error determinando la reacción de él; el integral realiza una corrección del error en el tiempo; es decir, acumula los errores anteriores para que en un punto lleguen a ser cero; por último, se tiene el derivativo, que predice los valores futuros del error. La ecuación que describe un PID (Kuo, 1996) se muestra a continuación:

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

donde

K_p : constante proporcional

K_i : constante integral

K_D : constante derivativa

PID algoritmo de velocidad

El algoritmo de velocidad del PID es una variante del PID ya descrito. Este algoritmo agrega un término extra a la ecuación, cuya función es, una vez que el error sea cero, mantener esa condición. La analogía más común es cuando se maneja un carro: si se quiere acelerar, se pisa el acelerador; si se quiere disminuir la velocidad, se retira el pie del acelerador, y si se quiere

mantener la velocidad del vehículo, se deja el pie sobre el acelerador en un mismo nivel; en la ecuación 5, se representa la aplicación de este algoritmo (Bennett, 2011).

$$m(n) = K_p \left(\left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_D}{T_s} \right) e(n) - \left(1 + 2 \frac{T_D}{T_s} \right) e(n-1) + \frac{T_D}{T_s} e(n-2) + m(n-1) \right) \quad (5)$$

donde

T_s : periodo T_D : constante derivativa T_i : constante integral K_p : constante proporcional
 $m(n-1)$: estado anterior.

Filtro FIR

Un filtro Respuesta Finita al Impulso (FIR, por sus siglas en inglés) es un filtro digital cuya respuesta a una señal de impulso en su entrada dará a su salida un número finito de términos no nulos (Martínez Gómez, Serrano, Villa, & Gómez, 2009-2010). Para su implementación, se utiliza la ecuación 6

$$FIR_n = \sum_{k=0}^{N-1} b_k x(n-k) \quad (6) \quad \text{donde } N: \text{orden del filtro, que debe coincidir con el número de términos no nulos } y, \text{ a su vez, con la cantidad de coeficientes } b_k.$$

Sintonización del control

Utilizando el método de Ziegler-Nicolson (Shahroshi & Zomorodi) mediante la herramienta Matlab, se obtienen los siguientes valores:

$$K_p = 2,4410 \quad T_i = 0,0016 \quad T_D = 4,0652 * 10^{-4} \quad T_s = 0,001$$

Al aplicar las ecuaciones para el algoritmo de velocidad, se tiene lo siguiente:

$$m(n) = K_1 e(n) - K_2 e(n-1) + e(n-2) + R \quad (7)$$

$$K_1 = K_p \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_D}{T_s} \right) \quad (8) \quad K_2 = K_p \left(1 + 2 \frac{T_D}{T_s} \right) \quad (9) \quad K_3 = K_p \frac{T_D}{T_s} \quad (10)$$

R: *set point*

Por lo tanto, los valores calculados de K_1 , K_2 y K_3 son

$$K_1 = 4,9345 \quad K_2 = 4,4256 \quad K_3 = 0,4065$$

El término R depende de las unidades con que se trabaje; para efectos de la simulación, se utiliza el valor de 5,9. Para comprobar su funcionamiento, se empleó el *software* PSIM, el cual permite integrar el circuito de potencia y el control del sistema mediante bloques y el lenguaje C++. Se obtuvo de corriente de salida la que se muestra en la figura 4.

Para este caso, el sobreimpulso máximo no interesa, pues los experimentos en el *stellarator* solo se realizarán en estado estacionario. Lo único que se debe cuidar es que no sea mayor a 1000 amperios para no dañar los circuitos. El rizado no debe superar el 5% (Botija, 2014); el rizado mostrado es de 12 amperios; de esta forma, no se supera ese porcentaje y se cumple con la especificación.

Para el cálculo del filtro, se usó un código creado por el Instituto de Plasmas y Fusão Nuclear, del Instituto Superior Técnico, en Lisboa, Portugal (Fernandez, 2014). Los datos que se deben proporcionar al código son la frecuencia de trabajo, que es 1 kHz, y la cantidad de términos deseados, en este caso 28. Los coeficientes del filtro FIR son:

{ -1195, -451, -426, -307, -82, 249, 678, 1183, 1733, 2286, 2798, 3228, 3540, 3701, 3701, 3540, 3228, 2798, 2286, 1733, 1183, 678, 249, -82, -307, -426, -451, -1195}

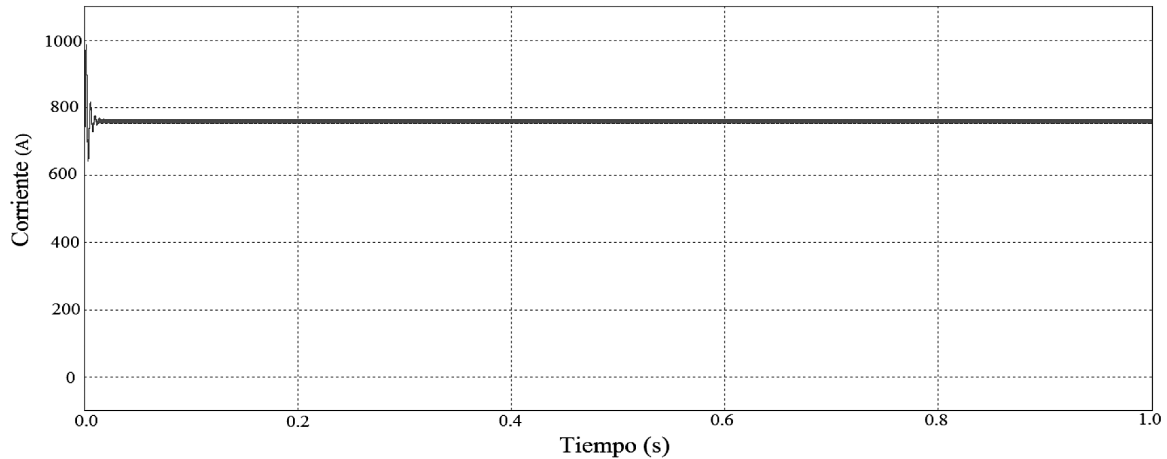


Figura 4. Corriente de salida del regulador mediante el algoritmo de velocidad.

Conclusión

Con este trabajo se logró diseñar un circuito de potencia eficiente y de bajo costo para regular la corriente de las bobinas modulares del SCR-1. De igual forma se implementó un control PID con algoritmo de velocidad, el cual está pensado para disminuir la magnitud de los armónicos; esto no hubiese sido posible sin la introducción del algoritmo de velocidad utilizado, ya que facilita la implementación en un sistema digital.

Referencias

- Bennett, S. (2011). *Real-Time Computer Control* (2nd ed.). India: Pearson Education.
- Boozer, A. H. (1998). What is a stellarator? *Physics of Plasmas*, 5(5), 1647. <http://doi.org/10.1063/1.872833>
- Ongena, J. & Van Oost, G. (2006). Energy for future centuries: Prospects for fusion power as a future energy source. *Transactions of Fusion Science and Technology*, 49(i), 3–15.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático* (7.ª ed.). México: Prentice Hall Hispanoamerica.
- Li, J. (2009). *Current-mode control: Modeling and its digital application*. (Doctoral disertation on Philosophy Electrical Engineering, Virginia). Recuperado de http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04192009-152740/unrestricted/Disseration_JianLi_revision_new.pdf [Consulta 14 de octubre de 2014]
- Martínez, M.; Gómez, L.; Serrano, A.; Villa, J., & Gómez, J. (2009-2010). Universidad de Valencia OpenCourseWare. Recuperado de http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/filtros-digitales/tema_3._diseno_de_filtros_fir.pdf [Consulta 10 de octubre de 2014]
- Perez, A. L.-M. (1995). Power supply for the Spanish stellarator TJ-11, design, construction and tests. *Proceedings of the 16th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering*.
- Rashid, M. H. (1993). *Electrónica de potencia* (2.ª ed.). México: Prentice Hall Hispanoamericana.
- Rummel, T. (2003). Power supplies for the WENDELSTEIN 7-X stellarator. *Fusion Engineering and Design*, 1115-1118.
- Sánchez, K. (2013). Control de corriente en bobinas del reactor de plasma SCR-1, mediante módulo FPGA, desarrollado en el Laboratorio de Física de Plasma del Instituto Tecnológico de Costa Rica (Tesis de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.

- Shahrokhi, M. & Zomorodi, A. (s.f.). *Comparison of PID Controller Tuning Methods*. Sharif University of Technology.
- Tay, R. A. (19 de octubre de 2012). Ziegler-Nichols método 1. Recuperado de <http://es.slideshare.net/taysuu/ziegler-nichols-metodo-1> [Consulta 24 de octubre de 2014]
- Vargas, V. I.; Mora, J.; Asenjo, J.; Zamora, E.; Otárola, C.; Barillas, L., ... & Piedras, C. (2015). Constructing a small modular stellarator in Latin America [Conference Series]. *Journal of Physics*, 591, 012016. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/591/1/012016>
- Zimnik, M. (1 de noviembre de 2007). Power Guru. Obtenido de *Multiphase Buck Converters*. Recuperado de <http://www.powerguru.org/multiphase-buck-converters/> [Consulta 2 de octubre de 2014]