

Título del Proyecto de Investigación  
al que corresponde el Reporte Técnico:

Control del factor de potencia de la alimentación trifásica de un motor de inducción con control de velocidad

Tipo de financiamiento

Sin financiamiento

Fecha de Inicio: 05/10/2022  
Fecha de Término: 19/04/2022

Tipo de Reporte

Parcial

Final

Autor (es) del reporte técnico:

Dr. Onofre Amador Morfín Garduño

Dr. Fernando Ornelas Téllez

## **Control del factor de potencia de la alimentación trifásica de un motor de inducción con control de velocidad**

### **Resumen**

El motor de inducción se utiliza mucho en las unidades motrices de procesos industriales, debido a su construcción robusta, buena regulación de velocidad y requerimientos mínimos de mantenimiento. No obstante, el motor de inducción consume potencia reactiva de la red para establecer su campo magnético y en consecuencia, reduce el factor de potencia de la red de suministro. Además, cuando se regula la velocidad del motor de inducción se requiere una etapa de rectificación, en donde se convierte la corriente alterna de la red de suministro a corriente directa, lo que provoca una alta distorsión en corriente en la red de suministro, con su consecuente generación de armónicos en corriente y disminución del factor de potencia. En el presente proyecto se propone un sistema de control de potencia reactiva aplicado a un sistema de rectificación controlada para mejorar el factor de potencia en la red de suministro. El controlador del sistema de rectificación es diseñado y validado en un prototipo de laboratorio. Un controlador de potencia reactiva es sintetizado para controlar la potencia reactiva y el voltaje del bus de CD. La ley de control super-twisting se aplica para proveer robustez en el desempeño del sistema y cancelar las perturbaciones externas originadas por un sistema que controla la velocidad angular de un motor de inducción teniendo como carga un generador de inducción conectado directamente a la red eléctrica. Resultados experimentales validan la robustez del sistema de control de potencia reactiva aplicado al sistema de rectificación controlada.

## **Abstract**

The induction motor is widely used in industrial drives due to its robust construction, good speed regulation, and minimal maintenance requirements. However, the induction motor consumes reactive power from the utility grid to establish its magnetic field and consequently, it reduces the power factor of the utility grid. In addition, when the speed of the induction motor is regulated, a rectification stage is required, where the alternating current of the supply network is converted to direct current, which causes a high current distortion in the supply network, with its consequent generation of harmonics of the current and decreases in power factor. In this project, a reactive power control system applied to a controlled rectification system to improve the power factor in the supply network is proposed. The rectification system controller is designed and validated in a laboratory prototype. A reactive power controller is synthesized to control the reactive power flux and the DC bus voltage. The super-twisting control law is applied to provide robustness in system performance and cancel external disturbances caused by a system that controls the angular speed of an induction motor with an induction generator directly connected to the utility grid as load. Experimental results validate the robustness of the reactive power control system applied to the controlled rectification system.

**Palabras clave:** Rectificador controlado, factor de potencia, control de potencia reactiva, algoritmo super-twisting.

## **Usuarios potenciales**

Alumnos de las carreras de Ingeniería Eléctrica, Sistemas Digitales y Comunicaciones, Ingeniería Mecatrónica. Alumnos de la Maestrías en Ingeniería Eléctrica y en Tecnología.

## **Reconocimientos**

Al Alumno Luis Ari Zavala Rubio de la Maestría en Ingeniería Eléctrica. A las jefaturas del Departamento de Ingeniería Eléctrica y del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica por las facilidades otorgadas para la realización de las pruebas experimentales en el laboratorio.

## **1. Introducción**

La operación de un sistema eléctrico de potencia debe garantizar el nivel de voltaje y el suministro de potencia activa contratados por cada uno de los usuarios del servicio eléctrico del sector industrial, comercial y residencial. No obstante, existe una componente en el flujo de energía conocida con el nombre de potencia reactiva, la cual es necesaria para magnetizar principalmente los motores de inducción. La potencia reactiva se caracteriza por ser oscilante e incrementa los Volt-Ampers de las centrales de generación de energía eléctrica, con el consecuente incremento en la corriente y en la caída de tensión en las líneas de transmisión de la energía, por lo que el flujo de potencia reactiva afecta directamente la regulación de voltaje en los puntos de consumo. Por lo tanto, el usuario debe contar con un sistema que compense el flujo de potencia reactiva en el punto de consumo con la finalidad de mejorar el factor de potencia, y como consecuencia, se optimice la infraestructura de transmisión y distribución de la energía eléctrica al disminuir los niveles de corriente en la central eléctrica de generación. La regulación en la compensación de la potencia reactiva para mejorar el factor de potencia en instalaciones industriales se realiza comúnmente por medio de bancos de capacitores, en donde generalmente se conmutan diversos valores de capacitancia con la activación y desactivación de contactores. Algunas empresas con altos consumos de energía eléctrica optan por instalar motores síncronos sobreexcitados, que operan en condiciones de vacío para entregar potencia reactiva a la red, y, en consecuencia, mejorar el factor de potencia (Tabatabaei, Aghbolaghi, Bizon, & Blaabjerg).

## **2. Planteamiento**

El motor de inducción del tipo jaula de ardilla es el más utilizado en unidades motrices, en la mayoría de las aplicaciones industriales. Tiene la característica de ser la máquina más simple en cuanto a construcción, ya que el devanado del rotor es compacto debido a que está constituido por una jaula con barras de aluminio embebida en laminaciones de acero al silicio y, por lo tanto, los requerimientos de mantenimiento son mínimos (Sen, 2014). Además, el motor de inducción se caracteriza por tener una muy buena regulación de velocidad, por lo que se desempeña muy bien acoplándolo con una banda para transmitir el movimiento a un sistema mecánico o utilizando una caja de engranajes para el acondicionamiento de velocidad. No obstante, el motor de inducción consume potencia

reactiva de la red eléctrica para su magnetización, y en consecuencia, reduce el factor de potencia del sistema de suministro de energía eléctrica. Además, si el motor se desempeña en factores de carga menores al nominal, se reduce su eficiencia y también el factor de potencia de la alimentación trifásica. Por otro lado, cuando se regula la velocidad del motor de inducción, se rectifica la alimentación trifásica para alimentar a un inversor trifásico tipo puente con corriente directa, lo cual provoca la generación de armónicos de corriente en la alimentación trifásica, además de reducir el factor de potencia. Por lo tanto, para efectos de reducir costos en la operación del sistema eléctrico de potencia, reduciendo las pérdidas en las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica y el nivel de generación en las centrales que alimentan estas pérdidas, la compañía de suministro del servicio eléctrico penaliza económicamente en la facturación a las empresas que consumen energía eléctrica con un factor de potencia menor a 0.9. El problema de bajo factor de potencia es un problema que está resuelto por parte de industria. Típicamente utilizan un banco de capacitores con arreglo de contactores que conmutan de acuerdo al valor de capacitancia requerido para corregir un factor de potencia específico. Esta solución de corrección del factor de potencia inevitablemente provoca picos de corriente en la red eléctrica cuando se realizan las conmutaciones en los contactores. Por lo tanto, en el presente proyecto se propone compensar el flujo de potencia reactiva de forma continua para evitar transitorios provocados por los contactores.

## **2.1 Antecedentes**

La compensación de la potencia reactiva para mejorar la regulación de voltaje en diversos puntos de un sistema eléctrico puede también realizarse con sistemas de control robusto implementados en los compensadores estáticos de VAR's y en sistemas flexibles de transmisión en CA (*FACTS*, del inglés, *Flexible AC Transmission Systems*), entre otros dispositivos. Con el uso de los compensadores de potencia reactiva de estado sólido basados en tiristores, la compensación de VAR's es continua en un sistema eléctrico de potencia (Gyugyi).

Algunas investigaciones han evaluado el efecto del rectificador controlado de CA/CD sobre la calidad de la energía de la red eléctrica. En (Santoyo-Anaya, Rodriguez-

Rodriguez, Moreno-Goytia, Venegas-Rebollar, & Salgado-Herrera) se propone un controlador en el sistema trifásico  $abc$  y se utilizan control PI para regular el voltaje del bus de CD y el factor de potencia. No obstante, para demostrar un mejor tiempo de restablecimiento ante una perturbación, hace falta emplear otra técnica de linealización, así mismo el control desarrollado no es aplicable a rectificadores de alta potencia. En (Wai & Yang) se alcanza un valor de distorsión armónica total más bajo de las corrientes del lado de la red mediante un esquema de retroceso del control de potencia directo (del inglés, *Backstepping*) en el sistema  $dq$  considerando las incertidumbres del sistema. Estos controladores dependen de los parámetros y presentan un error sistemático en estado estable, aunque se puede apreciar la falta de dinámica ante perturbaciones más severas en la regulación del voltaje del bus de CD y de la potencia reactiva.

En el presente trabajo se diseña e implementa un sistema de control robusto ante la presencia de perturbaciones externas, aplicado a un sistema de rectificación controlado trifásico para regular la potencia reactiva que se entrega a un sistema eléctrico de potencia, de manera que se contribuya en la corrección del factor de potencia. Con la inclusión de este sistema, se mejora el factor de potencia y en consecuencia la calidad y el uso eficiente de la energía que se consume. Adicionalmente, se plantea un procedimiento para la caracterización de un filtro LCL, con el cual se reduce el contenido armónico en las corrientes.

## **2.2 Marco teórico**

El factor de potencia de la alimentación trifásica en el sector industrial es muy importante debido a la influencia que tiene en el desempeño de la red eléctrica. Además, es importante resaltar que la principal carga en las instalaciones industriales corresponde al motor de inducción jaula de ardilla, el cual se caracteriza por tener una buena regulación de velocidad, y requerir servicio de mantenimiento mínimo, pero reduce el factor de potencia de la instalación eléctrica (Kundur).

## Modelo del sistema de rectificación controlada

El sistema que incluye el rectificador controlado está compuesto por: la alimentación trifásica, un filtro LCL trifásico, un rectificador controlado tipo puente y un capacitor conectado en el bus de enlace de CD, ver Figura 1.

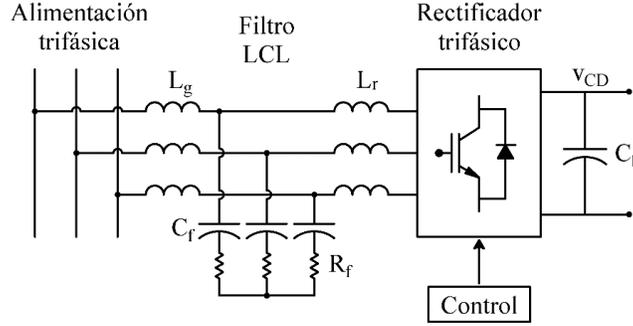


Figura 1. Esquema del sistema de rectificación controlada.

El modelo que incluye el rectificador controlado en el sistema  $abc$  es:

$$\begin{aligned} v_{abci} - v_{abc} &= R_{eq} i_{abc} + L_{eq} \frac{d}{dt} i_{abc} \\ v_{abc}^T i_{abc} &= v_{CD} C \frac{d}{dt} v_{CD} + v_{CD} i_{CD} \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $v_{abc}$  e  $i_{abc}$  son los vectores de voltaje y corriente en la red eléctrica; y  $v_{abci}$  es el vector de voltaje en terminales del inversor;  $R_{eq}$  y  $L_{eq}$  son el equivalente en serie de las resistencias e inductancias de las dos bobinas del filtro LCL, en donde se omite el capacitor para efectos de reducir el orden del modelo.

Es práctica común modelar las interfaces de potencia, que conectan algún sistema de generación o consumo de energía eléctrica con la red eléctrica, en el sistema de coordenadas  $dq$  girando a la frecuencia de la red eléctrica, en donde se referencia la posición del eje  $d$ , respecto a la fase  $a$  de la red eléctrica, ver Figura 2. La matriz de transformación de Park para referenciar las variables eléctricas del sistema trifásico  $abc$  al sistema en cuadratura  $dq0$  se define de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos \left( \theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\text{sen} \theta_s & -\text{sen} \left( \theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & -\text{sen} \left( \theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

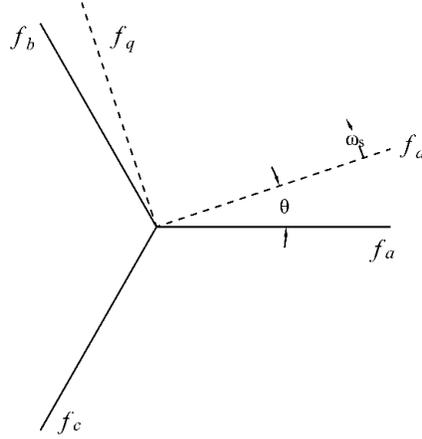


Figura 2. Transformación de Park.

Una vez aplicada la transformación de similitud (2) al sistema (1), se obtiene el modelo del sistema de rectificación controlada en el marco de referencia  $dq$ , como sigue:

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} i_d &= \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_d + \omega_s i_q + \frac{1}{L_{eq}} v_d - \frac{1}{L_{eq}} v_{di} \\
 \frac{d}{dt} i_q &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_q - \omega_s i_d + \frac{1}{L_{eq}} v_q - \frac{1}{L_{eq}} v_{qi} \\
 \frac{d}{dt} v_{DC} &= \frac{3}{2Cv_{CD}} (v_d i_d + v_q i_q) - \frac{1}{C} i_{CD}
 \end{aligned} \tag{3}$$

Al referir el eje  $d$  respecto a la fase  $a$ , el valor del voltaje en el eje  $d$  corresponde al valor máximo de la fase  $a$ , mientras que el voltaje en el eje  $q$  se anula, y por lo tanto, se simplifica el modelo del sistema (3). Es importante resaltar que las señales eléctricas del sistema no tienen frecuencia por la razón de que el sistema  $dq$  gira a la velocidad de la frecuencia de la red eléctrica, por lo que en el sistema (3) no es necesario involucrar el modelo del inversor.

### Diseño del controlador del sistema de rectificación controlada

El modelo del compensador estático de VAR's (3) es de tercer orden, en el que están desacopladas las dos entradas que se pueden controlar  $v_{di}$  y  $v_{qi}$ , por lo tanto, es posible seleccionar dos salidas a controlar. Las variables de salida a controlar seleccionadas en este proyecto son el flujo de potencia reactiva entregada a la red eléctrica y el nivel de voltaje en el bus de CD.

Como primer paso en el proceso de diseño del sistema de control, se define la variable de error de regulación de voltaje como sigue:

$$\varepsilon_1 = v_{ref} - v_{CD} \quad (4)$$

en donde se propone que su dinámica sea estable y que converja en forma exponencial aplicando la técnica de linealización por control a bloques, para obtener:

$$\dot{\varepsilon}_1 = \dot{v}_{ref} - \frac{3}{2Cv_{CD}} v_d i_d + \frac{1}{C} i_{CD} = -k_1 \varepsilon_1 \quad (5)$$

para proponer un control mediante corrientes en el eje  $d$ , se resuelve  $i_d$  en (5) para obtener la corriente de referencia de la siguiente forma:

$$i_{ref} = \frac{2Cv_{CD}}{3v_d} \left( \dot{v}_{ref} + \frac{1}{C} i_{CD} + k_1 \varepsilon_1 \right) \quad (6)$$

Como segundo paso, se define la variable de error en corrientes en el eje  $d$ , como:

$$\varepsilon_2 = i_{ref} - i_d \quad (7)$$

cuya dinámica tiene la siguiente forma:

$$\dot{\varepsilon}_2 = \frac{d}{dt} i_{ref} - \frac{d}{dt} i_d = -\frac{4C_b k_1}{3v_d} \varepsilon_1 - \left( \frac{R_{eq}}{L_{eq}} + \frac{2\omega_s}{3v_d} \right) \varepsilon_2 + \rho_2 + \frac{2C_b}{3L_{eq}v_d} v_{di} \quad (8)$$

donde el termino de perturbación queda definido por:

$$\rho_2 = \frac{2C_b}{3v_d} \left[ k_1 v_{ref} + \frac{2\omega_s}{3v_d} Q_{ref} + \frac{R_{eq}}{L_{eq}} i_{ref} - \frac{2}{3v_d} i_{DC} - \frac{1}{L_{eq}} v_d \right]$$

los términos que incluyen la primera y segunda derivada del voltaje de referencia  $\dot{v}_{ref}$  y  $\ddot{v}_{ref}$  no son incluidos en la perturbación  $\rho_2$ , debido a que se está resolviendo el problema de regulación de voltaje en el bus de CD donde el voltaje de referencia es constante, y por lo tanto son nulos.

Como último paso, se define la tercera variable de estado como el error de regulación en la potencia reactiva:

$$\varepsilon_3 = Q_{ref} - Q_g \quad (9)$$

donde la potencia reactiva se define por.

$$Q_g = -\frac{3}{2} v_d i_q \quad (10)$$

la dinámica de la nueva variable toma la forma:

$$\dot{\varepsilon}_3 = \dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_g = -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \varepsilon_3 + \rho_3 - \frac{3v_d}{2L_{eq}} v_{qi} \quad (11)$$

donde el termino de perturbación es:

$$\rho_3 = \dot{Q}_{ref} + \frac{3}{2} v_d \left( \omega_s \varepsilon_2 + \frac{2R_{eq}}{3v_d L_{eq}} Q_{ref} - \omega_s i_{ref} + \frac{1}{L_{eq}} v_q \right)$$

Uniendo (5), (8) y (11), y substituyendo (7) en (5), se obtiene un sistema equivalente en el sistema  $dq$  al modelo del sistema de rectificación controlada (3), con variables de error de regulación con la siguiente representación:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= \dot{v}_{ref} - \frac{3}{2Cv_{CD}} v_d i_{ref} + \frac{1}{C} i_{CD} = -k_1 \varepsilon_1 - \frac{3v_d}{2Cv_{CD}} \varepsilon_2 \\ \dot{\varepsilon}_2 &= -\frac{4C_b k_1}{3v_d} \varepsilon_1 - \left( \frac{R_{eq}}{L_{eq}} + \frac{2\omega_s}{3v_d} \right) \varepsilon_2 + \rho_2 + \frac{2C_b}{3L_{eq} v_d} v_{di} \\ \dot{\varepsilon}_3 &= -\frac{R_{eq}}{L_{eq}} \varepsilon_3 + \rho_3 - \frac{3v_d}{2L_{eq}} v_{qi} \end{aligned} \quad (12)$$

este sistema equivalente es no lineal y de tercer orden, y se caracteriza por estar desacoplado con respecto a las entradas de control  $v_{di}$  y  $v_{qi}$ . Por lo tanto, para regular la potencia reactiva y el voltaje del bus de CD, se definen las variables de deslizamiento de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} s_d &= \varepsilon_2 \\ s_q &= \varepsilon_3 \end{aligned} \quad (13)$$

estas variables de deslizamiento son el argumento de la ley de control *super-twisting*, que tiene la siguiente representación:

$$\begin{aligned} v_i &= \lambda_i |s_i|^{1/2} \text{sign}(s_i) + v_i \\ \dot{v}_i &= \alpha_i \text{sign}(s_i), \quad i = d, q \end{aligned} \quad (14)$$

al estabilizar y forzar la superficie  $s_q$  hacia cero en tiempo finito con la ley de control, se logra directamente la regulación de la potencia reactiva; por lo que al forzar la superficie  $s_d$  hacia, se logra un movimiento estable y asintótico hacia cero del error de regulación de voltaje del bus de CD, mediante el control de las corrientes en el eje  $d$ .

Las ganancias de control  $\lambda_d$  y  $\alpha_d$  cumplen con las siguientes restricciones:

$$\lambda_d > \frac{3L_{eq}v_d}{C_b}\delta_d, \quad \alpha_d > -\frac{C_b\lambda_d^2\left(\delta_d - \frac{2C_b\lambda_d}{3L_{eq}v_d}\right)}{3L_{eq}v_d\left(2\delta_d - \frac{2C_b\lambda_d}{3L_{eq}v_d}\right)} \quad (15)$$

donde la norma de la perturbación en el eje  $d$  se define como  $|\rho_2| = \delta_d|s_d|^{1/2}$ , para  $\delta_d > 0$ .

Mientras que las ganancias de control  $\lambda_q$  y  $\alpha_q$  cumplen con las siguientes restricciones:

$$\lambda_q > -\frac{4\delta_q L_{eq}}{3v_d}, \quad \alpha_q > \frac{\lambda_q^2 3v_d\left(\delta_q + \frac{3\lambda_q v_d}{2L_{eq}}\right)}{4L_{eq}\left(2\delta_q + \frac{3\lambda_q v_d}{2L_{eq}}\right)} \quad (16)$$

donde  $|\rho_3| = \delta_q|s_q|^{1/2}$ , para  $\delta_q > 0$ . Estas desigualdades en los ejes  $d$  y  $q$ , que definen las ganancias de la ley de control super-twisting, son definidas en (Morfin, y otros, 2018) siguiendo el análisis de estabilidad de un sistema en lazo cerrado con el algoritmo super-twisting establecido en (Dávila, Moreno, & Fridman, 2009), cuando la entrada de control tiene coeficiente unitario. Por lo que en las desigualdades propuestas (15) y (16) se incluyeron los coeficientes de  $v_{di}$  y  $v_{qi}$  definidos en el sistema (12).

### Caracterización del filtro LCL

El filtro LCL mostrado en la Fig. 1, se utiliza como interfaz en la interconexión de la red eléctrica y del sistema de rectificación controlada. El filtro LCL se caracteriza por agregar dinámica al sistema de rectificación que se interconecta con la red eléctrica, además de reducir la distorsión armónica en las corrientes producidas por la operación del rectificador, en donde los IGBT's conmutan a alta frecuencia.

Los valores de los parámetros del filtro LCL se establecen de acuerdo con el flujo de potencia activa nominal en el sistema, el voltaje entre líneas de la red eléctrica y la frecuencia de conmutación de los IGBT's. Para determinar el valor de la inductancia del filtro LCL, lado del inversor, se considera al voltaje de la red eléctrica como un cortocircuito para altas frecuencias y se utiliza la siguiente función de transferencia de primer orden a la frecuencia de conmutación (Liserre, Blaabjerg, & Hansen, 2005):

$$\frac{i_g(h_{sw})}{v_i(h_{sw})} = \frac{1}{\omega_{sw} L} \quad (17)$$

donde  $i_g(h_{sw})$  es el armónico de la corriente de salida del inversor y  $v_i(h_{sw})$  es el armónico del voltaje del inversor, ambas señales a la frecuencia de conmutación ( $\omega_{sw}$ ). Se propone un nivel de atenuación de corriente en la función de transferencia (17) y se resuelve para la inductancia lado del inversor,  $L$ . Es importante tomar en cuenta que la inductancia total del filtro LCL no debe exceder el valor de 0.1 p.u, y con esto, limitar la caída de voltaje durante la operación (Liserre, Blaabjerg, & Hansen, 2005).

Para definir el valor de la inductancia del lado de la red se considera la configuración del filtro LCL sin la resistencia, y se aplica la siguiente expresión en su cálculo (Reznik, Godoy, Al-Durra, & Muyeen, 2014):

$$L_g = \frac{\sqrt{1/k_a^2 + 1}}{C_f \omega_{sw}^2} \quad (18)$$

donde  $k_a$  es la relación entre la corriente inyectada a la red eléctrica  $i_g(h_{sw})$  y la corriente generada por el inversor  $i_i(h_{sw})$ , es decir, la atenuación en corrientes a la frecuencia de conmutación, cuyo valor puede seleccionarse en un 20% (Liserre, Blaabjerg, & Hansen, 2005). Para definir el valor del capacitor  $C_f$ , se necesita calcular la impedancia base  $Z_b$  y la capacitancia base  $C_b$  las cuales se definen por:

$$Z_b = \frac{V_{LL}^2}{P_b}, \quad C_b = \frac{1}{\omega_g Z_b} \quad (19)$$

donde  $V_{LL}$  es el voltaje de línea a línea de la red eléctrica,  $P_b$  es la potencia activa nominal del sistema y  $\omega_g$  es la frecuencia de la red eléctrica. Un valor inicial del capacitor  $C_f$  se aproxima considerando un 5% de variación del factor de potencia mediante la siguiente relación  $C_f = 0.05 C_b$ . Posteriormente, el valor de  $C_f$  se ajusta para definir el valor de la frecuencia de resonancia, la cual se calcula mediante la siguiente expresión (Reznik, Godoy, Al-Durra, & Muyeen, 2014):

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L + L_g}{LL_g C_f}} \quad (20)$$

Se recomienda que la frecuencia de resonancia  $\omega_{res}$  esté ubicada cerca de la parte media del rango de frecuencias, el cual tienen como límite inferior el valor de 10 veces la frecuencia de la red eléctrica  $\omega_g$  y como límite superior la frecuencia de conmutación  $\omega_{sw}$  de los IGBT's (Liserre, Blaabjerg, & Hansen, 2005). Mediante un análisis en frecuencia con el diagrama de Bode se proponen varios valores de capacitancia  $C_f$  cercanos al valor inicial, y se verifica el efecto de resonancia para cada valor, utilizando la siguiente función de transferencia del filtro LCL:

$$\frac{I_g(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s^3 L L_g C_f + s(L + L_g)} \quad (21)$$

mediante el análisis en frecuencia de (21) y graficando la respuesta en el diagrama de Bode, se selecciona el valor de capacitancia que presenta el sobre impulso a la frecuencia de resonancia que este más cercano, del lado izquierdo, al valor medio del rango de frecuencias definido anteriormente.

Finalmente, un valor inicial de la resistencia  $R_f$ , utilizada para amortiguar las corrientes a la frecuencia de resonancia, se calcula como una tercera parte de la impedancia del capacitor mediante la siguiente relación (Reznik, Godoy, Al-Durra, & Muyeen, 2014):

$$R_f = \frac{1}{3\omega_{res} C_f} \quad (22)$$

posteriormente, el valor inicial de la resistencia  $R_f$  se ajusta mediante un análisis paramétrico aplicado al filtro LCL completo utilizando la siguiente función de transferencia:

$$\frac{I_g(s)}{V_i(s)} = \frac{sR_f C_f + 1}{s^3 L L_g C_f + s^2(L + L_g)R_f C_f + s(L + L_g)} \quad (23)$$

del análisis de frecuencia en (23) graficado en el diagrama de Bode, se selecciona el valor de resistencia que presenta la mejor respuesta donde se presenta una mejor amortiguación de la ganancia y que no presente sobre impulso.

## Modelo del motor de inducción

El motor de inducción del tipo jaula de ardilla es el motor eléctrico más ampliamente utilizado en unidades motrices de la industria. El motor de inducción se caracteriza por tener una construcción simple y robusta, sus requerimientos de mantenimiento son mínimos, y cuenta con una muy buena regulación de velocidad, no obstante, su modelo es muy complejo y representa un reto controlar en lazo cerrado al motor de inducción [1]. El modelo del motor de inducción es complejo en el sistema trifásico  $abc$  debido a la variación periódica de las inductancias mutuas por el movimiento relativo entre el devanado del estator y el devanado del rotor. Para efectos de simplificar el modelo del motor de inducción se aplica la transformación de Clarke para referir las variables eléctricas del sistema trifásico  $abc$  al marco de referencia  $\alpha\beta 0$ . En este nuevo sistema, los ejes  $\alpha\beta$  se fijan en el devanado del estator y el eje  $\alpha$  se alinea con el eje de la fase- $a$ , además, el eje-0 se suprime debido a que el neutro del devanado del estator no se conecta a un sistema de tierras. El modelo del motor de inducción jaula de ardilla expresado en el sistema de coordenadas  $\alpha\beta$  tiene la siguiente representación:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_m &= K_T \lambda_r^T \mathbf{M} \mathbf{i}_s - \frac{1}{T_m} \omega_m - \frac{1}{J_m} T_L \\ \frac{d}{dt} \lambda_r &= \mathbf{A}_{11} \lambda_r - \gamma \mathbf{i}_s \\ \frac{d}{dt} \mathbf{i}_s &= \mathbf{A}_{21} \lambda_r + \frac{L_m}{T_r} \mathbf{i}_s + \frac{1}{\sigma L_s} \mathbf{v}_s \end{aligned} \quad (24)$$

donde el vector de encadenamientos de flujo del rotor, el vector de corrientes del estator, y el vector de voltajes del estator en el sistema de coordenadas  $\alpha\beta$  son:

$$\lambda_r = [\lambda_{\alpha r} \quad \lambda_{\beta r}]^T, \quad \mathbf{i}_s = [i_{\alpha s} \quad i_{\beta s}]^T, \quad \mathbf{v}_s = [v_{\alpha s} \quad v_{\beta s}]^T,$$

El par de la carga es una entrada mecánica, la cual es modelada como una perturbación externa al sistema. Mientras que las matrices de parámetros son:

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_r} & -\frac{P}{2}\omega_m \\ \frac{P}{2}\omega_m & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{T_r} & \frac{P}{2}\delta\omega_m \\ -\frac{P}{2}\delta\omega_m & \frac{\delta}{T_r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$$

además, las constantes de parámetros se definen como sigue:

$$K_T = \frac{3PL_m}{4J_m L_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r},$$

$$\delta = \frac{1 - \sigma}{\sigma L_m}, \quad \gamma = \frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1 - \sigma}{\sigma T_r},$$

con los siguientes parámetros del modelo

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}, \quad T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad T_m = \frac{J_m}{B_m}, \quad L_m = \frac{3}{2}L_{mag},$$

$$L_s = L_{ls} + L_m, \quad L_r = L_{lr} + L_m,$$

donde  $L_{mag}$  es la inductancia de magnetización;  $L_{ls}$  es la inductancia de dispersión del estator y  $L_{lr}$  es la inductancia de dispersión del rotor referida al devanado del estator, estos valores de inductancia son por fase. Las relaciones para definir las inductancias del modelo  $L_s$ ,  $L_r$  y  $L_m$  a partir de las inductancias del circuito equivalente  $L_{mag}$ ,  $L_{ls}$  y  $L_{lr}$  son establecidas en [1].

### Sistema de control de velocidad del motor de inducción

La síntesis del sistema de control de velocidad del motor de inducción inicia al aplicar la técnica de linealización al modelo del motor de inducción para obtener una representación equivalente en la forma canónica controlable a través de la definición de variables de error. Como primer paso en el diseño del sistema de control, el vector de las variables de error de seguimiento se define como:

$$\mathbf{\varepsilon}_1 = \begin{bmatrix} \varepsilon_\omega \\ \varepsilon_\phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{ref} - \omega_m \\ \varphi_{ref} - \varphi_r \end{bmatrix} \quad (25)$$

donde  $\omega_r$  y  $\varphi_{ref}$  son las referencias de las variables de salida, y  $\varphi_r$  corresponde al módulo al cuadrado de los flujos del rotor en  $\alpha\beta$ , cuya definición es:

$$\varphi_r = |\lambda_r|^2 = \lambda_r^T \lambda_r = \lambda_{\alpha r}^2 + \lambda_{\beta r}^2 \quad (26)$$

Substituyendo el modelo del motor de inducción (24) en la dinámica del vector de variables de error de seguimiento (25), se obtiene:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_{ref} + \frac{1}{T_m} \omega_m \\ \dot{\phi}_{ref} + \frac{2}{T_r} \phi_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_T \boldsymbol{\lambda}_r^T \mathbf{M} \\ 2 \frac{L_m}{T_r} \boldsymbol{\lambda}_r^T \end{bmatrix} \mathbf{i}_s + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_m} T_L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

El segundo vector de variables de error se define como la derivada del vector de variables de error de seguimiento  $\boldsymbol{\varepsilon}_1$ , de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_2 = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 \quad (28)$$

Cuya dinámica de  $\boldsymbol{\varepsilon}_2$  resulta:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = \mathbf{F}_2 - \mathbf{B}_2 \mathbf{v}_s \quad (29)$$

donde

$$\mathbf{B}_2(\boldsymbol{\lambda}_r) = \frac{1}{\sigma L_s} \begin{bmatrix} K_T \boldsymbol{\lambda}_r^T \mathbf{M} \\ 2 \frac{L_m}{T_r} \boldsymbol{\lambda}_r^T \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} \ddot{\omega}_{ref} + \frac{1}{T_m} \dot{\omega}_{ref} + \frac{1}{J_m} \dot{T}_L \\ \ddot{\phi}_{ref} \end{bmatrix} + \phi_r \begin{bmatrix} -\frac{P}{2} K_T \delta \omega_m \\ \frac{4L_m \delta}{T_r^2} + \frac{2}{T_r} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{K_T}{T_r} (1 - \delta T_r) \boldsymbol{\lambda}_r^T \mathbf{M} + \frac{P}{2} K_T \omega_m \boldsymbol{\lambda}_r^T \\ 2 \frac{L_m}{T_r} \left( 1 + \gamma + \frac{P}{2} \omega_m - \frac{1}{T_r} \right) \boldsymbol{\lambda}_r^T + \frac{2L_m^2}{T_r^2} \mathbf{i}_s^T \end{bmatrix} \mathbf{i}_s$$

Uniendo las ecuaciones (28) y (29) e involucrando una ecuación estable del modelo del motor de inducción (24), como dinámica cero, se obtiene la representación en forma canónica controlable que es equivalente al modelo del motor de inducción (24), cuya representación es:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 &= \boldsymbol{\varepsilon}_2 \\ \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 &= \mathbf{F}_1 - \mathbf{B}_2(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{v}_s \\ \dot{\lambda}_{\alpha r} &= -\frac{1}{T_r} \lambda_{\alpha r} - \frac{P}{2} \omega_m \lambda_{\beta r} + \frac{L_m}{T_r} i_{\alpha s} \end{aligned} \quad (30)$$

Para establecer un sistema robusto de control de velocidad del motor de inducción se define el siguiente sistema:

$$\mathbf{s} = \mathbf{C}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_1 + \boldsymbol{\varepsilon}_2 \quad (31)$$

con la matriz diagonal de los nuevos eigen-valores del vector de variables de error siguiente:

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{12} \end{bmatrix}$$

La dinámica del nuevo sistema es:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{C}_1 \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 + \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_2 = \mathbf{C}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \mathbf{F}_1 - \mathbf{B}_2(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{v}_s \quad (32)$$

Es importante resaltar, que el sistema de orden reducido (32) esta acoplado respecto al vector de las entradas de control, por lo que se propone un nuevo sistemas como:

$$\mathbf{s}^* = \mathbf{B}_2^{-1}(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{s} \quad (33)$$

cuya dinámica es

$$\dot{\mathbf{s}}^* = \mathbf{F}_2 - \mathbf{v}_s \quad (34)$$

donde

$$\mathbf{F}_2 = \dot{\mathbf{B}}_2^{-1}(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{B}_2(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{s}^* + \mathbf{B}_2^{-1}(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{C} \boldsymbol{\varepsilon}_2 + \mathbf{B}_2^{-1}(\boldsymbol{\lambda}_r) \mathbf{F}_1$$

El Sistema (34) esta desacoplado respecto al vector de las entradas de control, y en consecuencia, un ley de control de primer orden puede ser aplicada para dirigir el sistema (33) y su derivada (34) hacia cero en forma simultánea.

Aplicando la ley de control super-twisting en el sistema de orden reducido (34) se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{s}}^* &= \mathbf{F}_2^* - \boldsymbol{\lambda} |\mathbf{s}^*|^{1/2} \text{sign}(\mathbf{s}^*) + \mathbf{u} \\ \dot{\mathbf{u}} &= -\boldsymbol{\sigma} \text{sign}(\mathbf{s}^*) \end{aligned} \quad (35)$$

en donde  $\boldsymbol{\lambda}$  y  $\boldsymbol{\sigma}$  son matrices diagonales cuyas componentes corresponden a las ganancias del controlador super-twisting, las cuales se seleccionan con valores suficientemente grandes para garantizar que la variable y su primer derivada se desvanezcan a cero en tiempo finito. A partir de (33), el Sistema (31) también se desvanece hacia cero en tiempo finite y por lo tanto se obtiene el siguiente movimiento asintótico del vector de variables de error de seguimiento en la siguiente forma:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1 = -\mathbf{C}_1 \boldsymbol{\varepsilon}_1 \quad (36)$$

al establecerse el movimiento del sistema en (36) se cumple el objetivo de control, que consiste en regular la velocidad del motor de inducción.

### 3. Objetivos

Objetivo general:

Diseñar e implementar en forma experimental un sistema de control en cascada para regular el factor de potencia de la alimentación trifásica y para controlar la velocidad de un motor de inducción jaula de ardilla.

Objetivos específicos:

- a) Definir el modelo que involucra el sistema de rectificación controlada.
- b) Diseñar el sistema de control que regula el factor de potencia de la alimentación trifásica y regula el voltaje del bus de enlace en CD.
- c) Caracterizar el filtro-LCL que conecta la alimentación trifásica con el rectificador controlado.
- d) Implementar en forma experimental el controlador del factor de potencia y del voltaje de bus de CD.
- e) Diseñar el controlador de velocidad del motor de inducción.
- f) Implementar en forma experimental el controlador de velocidad.
- g) Integración del sistema de control en cascada de ambos sistemas.

### 4. Metodología

La metodología utilizada en el presente proyecto consiste en los siguientes pasos:

- 1) Establecer el modelo de cada uno de los dos sistemas en el marco de referencia trifásico  $abc$ .
- 2) Aplicar la transformación de Park para referir el modelo del sistema de rectificación controlada en el marco de referencia  $dq0$ .
- 3) Aplicar la transformación de Clarke para referir el modelo del motor de inducción al marco de referencia  $\alpha\beta0$ .

- 4) A partir del modelo se diseña el sistema de control para posteriormente programarlo en Simulink/Matlab.
- 5) Se diseñan y programan los observadores de estado necesarios para estimar las variables no medibles o para evitar su cálculo, cuando aplique.
- 6) Se integra el equipo correspondiente a cada sistema y se realizan pruebas en lazo abierto, para validar las señales de los sensores, corroborar la operación de la modulación de ancho de pulso que acondiciona el nivel de voltaje correspondiente a la entrada de control y sintonizar en forma experimental los observadores estado.
- 7) Se realiza la prueba de validación y robustez de cada uno de los dos sistemas de control en lazo cerrado, primero en forma separada y finalmente en forma conjunta.

## **5. Instituciones participantes**

Dr. Riemann Ruiz Cruz – Laboratorio de Investigación en Diseño Optimo, Dispositivos y Materiales Avanzados (OPTIMA), Depto. de Matemáticas y Física, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), Tlaquepaque, Jalisco.

Dr. Fernando Ornelas Téllez – Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.

Dr. Carlos Castañeda Hernández – Centro Universitario de los Lagos de la Universidad Autónoma de Guadalajara (U de G), Lagos de Moreno; Jalisco.

Dr. Reymundo Ramírez Betancour – División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco.

Dr. Fredy Alberto Valenzuela – División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Cunduacán, Tabasco.

## 6. Resultados

El sistema de rectificación controlada propuesto regula con robustez la potencia reactiva que se entrega a un sistema eléctrico de potencia, para efectos de corregir el factor de potencia, y regula en forma robusta el nivel de voltaje del bus de CD. Básicamente está constituido por un rectificador trifásico tipo puente, un filtro LCL conectado entre la alimentación trifásica y el inversor, un banco de capacitores conectado en el bus de CD, como se muestra en la Figura 3. La implementación del sistema de rectificación controlada se realiza con el hardware descrito anteriormente y con el kit DS1103 de dSPACE compuesto por una tarjeta de control y adquisición de datos, una interfaz de entradas/salidas y el software ControlDesk utilizado para visualizar las señales y sintonizar las ganancias del controlador, ver Figura 4. El programa base del sistema de control se configura en MATLAB/Simulink, con un tiempo de muestreo (paso de solución) de  $150 \mu\text{s}$ , y se compila en la tarjeta de control dSPACE DS1103, las entradas de control se acondicionan con la técnica de modulación de ancho de pulso en el espacio vectorial (SVPWM) para generar los pulsos que activan los IGBT's del rectificador.

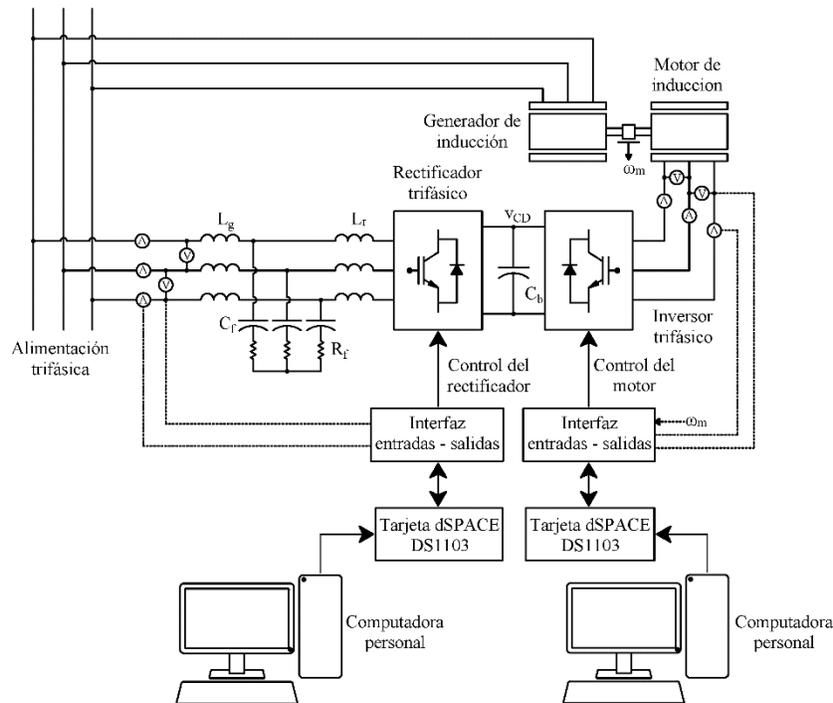


Figura 3. Esquema del sistema de rectificación controlada.

El voltaje del sistema de alimentación trifásico es de 220 V de línea a línea, la potencia nominal del sistema es de 1.5 kW, el voltaje del bus de CD es de 255 V, el banco de capacitores es de 4200  $\mu\text{F}$ , el motor de inducción es de 3/4 hp. Se sensan dos voltajes de línea a línea y las corrientes en las tres fases de la red eléctrica, además de sensar el voltaje del bus de CD y la corriente en CD entre el rectificador trifásico y el inversor trifásico, utilizados en el sistema de control.

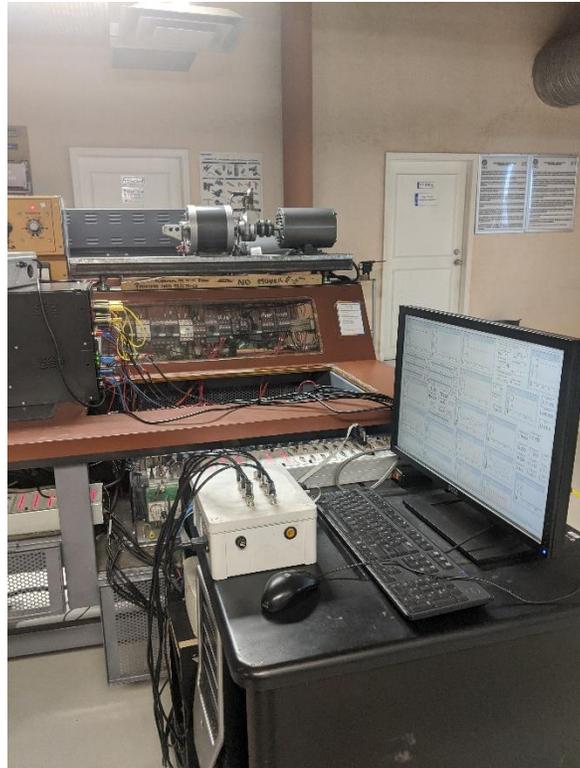


Figura 4. Prototipo experimental.

En la Figura 5 a) se muestra el desempeño robusto de la regulación de voltaje del bus de CD del sistema de rectificación controlada en donde el voltaje de referencia varía de 255 V a 270 V en pasos de 5 V, para posteriormente reducirlo en pasos de 5 V hasta 245 V. En cuanto a la regulación de la potencia reactiva, esta se varió a partir de -300 VAR's en pasos de 50 VAR's hasta 150 VAR's pasando de factor de potencia en adelanto a factor de potencia en atraso, en la Figura 5 b) se muestra la robustez en la regulación de la potencia reactiva.

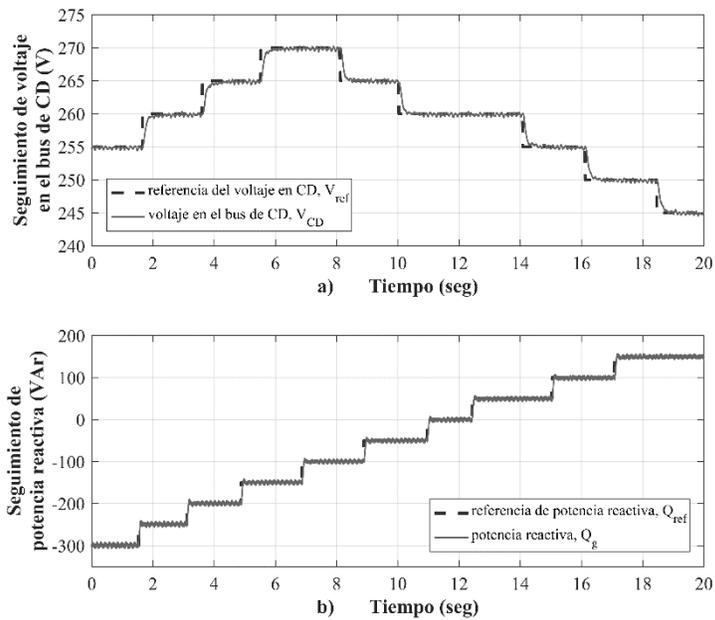


Figura 5. Seguimiento de voltaje del bus de CD y la potencia reactiva.

La robustez del sistema de control se corrobora al variar el flujo de potencia activa que alimenta, mediante un inversor conectado al bus de CD, a un motor de inducción con control de velocidad que impulsa a un generador de inducción que se conecta directamente con la red eléctrica. El motor de inducción jaula de ardilla es de la marca Baldor M3112 de 3/4 hp, el cual se acopla mecánicamente con un generador de inducción, marca LabVolt 8231-03, utilizado para establecer los cambios del par de carga del motor. A través del seguimiento de un tren de pulsos arriba de la velocidad de sincronismo se presentan cambios súbitos en la velocidad de deslizamiento del motor y, en consecuencia, se presentan también cambios súbitos en el par de la carga y en el flujo de potencia activa. En la Figura 6 se muestra el desempeño del sistema de rectificación controlada con un flujo de potencia activa hacia un motor de inducción. En la Figura 6 a) se presenta la regulación de voltaje en el bus de CD en 255 V ante los cambios de velocidad, y la Figura 6 b) corresponde a la regulación de potencia reactiva entregada a la red eléctrica de 300 VAR's. Las perturbaciones presentes en las gráficas son debido al seguimiento de velocidad de un motor de inducción acoplado a un generador de inducción conectado directamente a la red eléctrica. Con el seguimiento del tren de pulsos que varía de 1820 a 1900 r.p.m. por parte del motor se originan cambios súbitos en la velocidad de deslizamiento y, en consecuencia,

se presentan cambios súbitos en el par de carga y en el flujo de potencia activa, ver Figura 7.

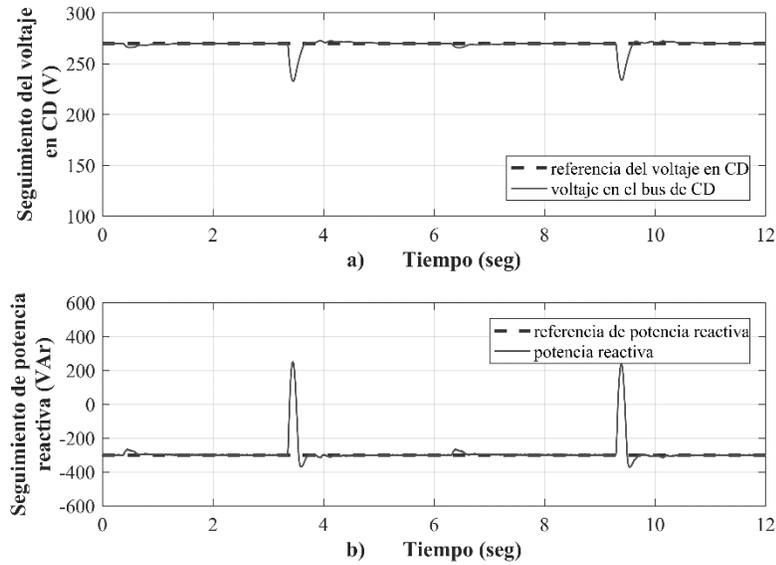


Figura 6. Desempeño del sistema de rectificación controlada.

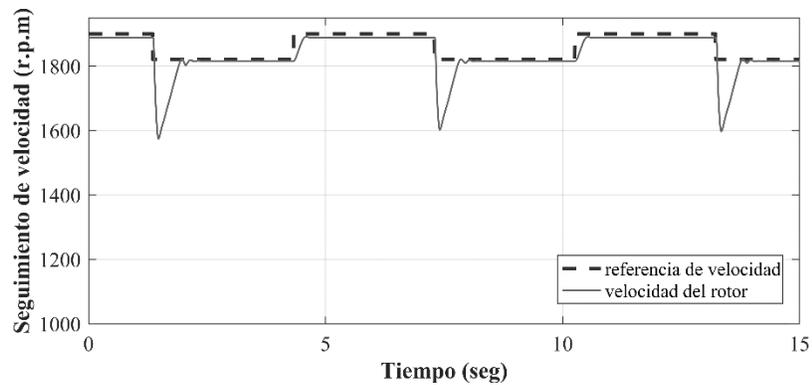


Figura 7. Seguimiento de velocidad del motor de inducción.

En la Figura 8 se muestra el factor de potencia en adelanto del sistema de rectificación controlada en donde la corriente tiene un adelanto de  $64.67^\circ$  respecto al voltaje, ambos de la fase *b*, estableciendo un factor de potencia de 0.46 en adelanto, como consecuencia de los 300 VAr's que se entregan a la red eléctrica y del flujo de potencia activa que alimenta al motor de inducción.

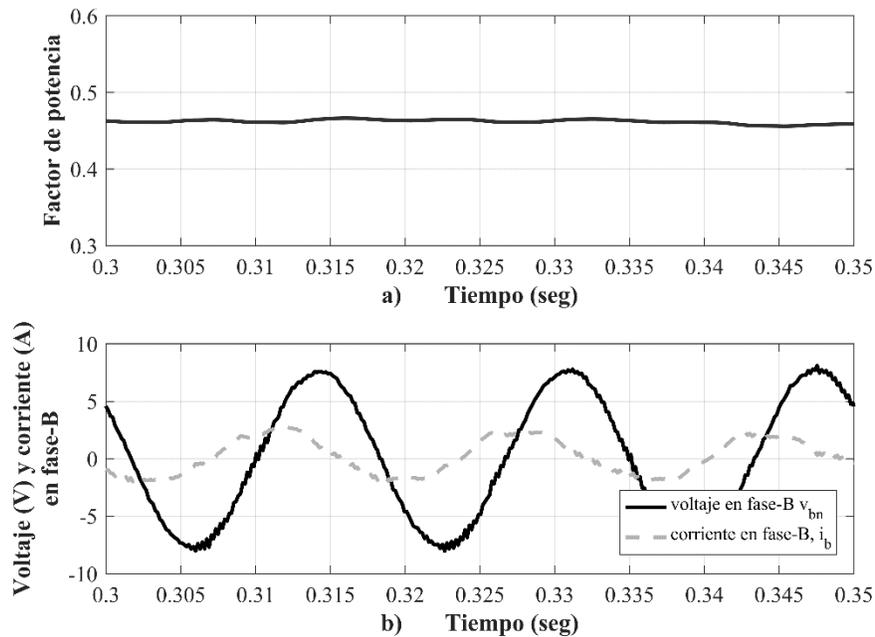


Figura 8. Validación del sistema de rectificación controlada.

En la Figura 9 se muestran las acciones de control  $v_d$  y  $v_q$  del sistema de rectificación controlada. La ley de control *super-twisting* en el eje  $d$ ,  $v_d$ , con un valor de 150 V fuerza a que se desvanezca la superficie de deslizamiento  $s_2$  a cero en tiempo finito cuando se presenta una perturbación, ver Figura 9 b), logrando un movimiento asintótico hacia cero del error de voltaje del bus de CD, como se muestra en la Figura 9 a). Por otro lado, la acción de control en el eje  $q$ ,  $v_q$ , aplicando el algoritmo *super-twisting*, con un valor de 10 V, fuerza directamente el movimiento hacia cero de la superficie  $s_3$ , como se muestra en la Figura 9 c); logrando con esto, la regulación de la potencia reactiva en 300 VAr's que se entrega a la red eléctrica.

En la Figura 10 se muestran las corrientes en las líneas y los voltajes de línea a línea  $v_{ab}$  y  $v_{cb}$ , en la red eléctrica, variables que son sensadas para la operación del sistema de control.

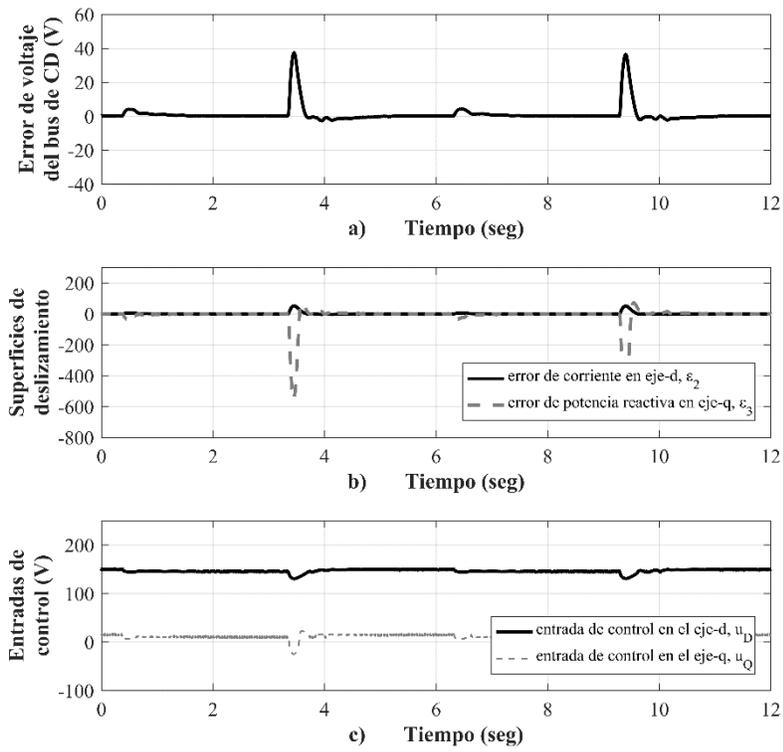


Figura 9. Desempeño del controlador.

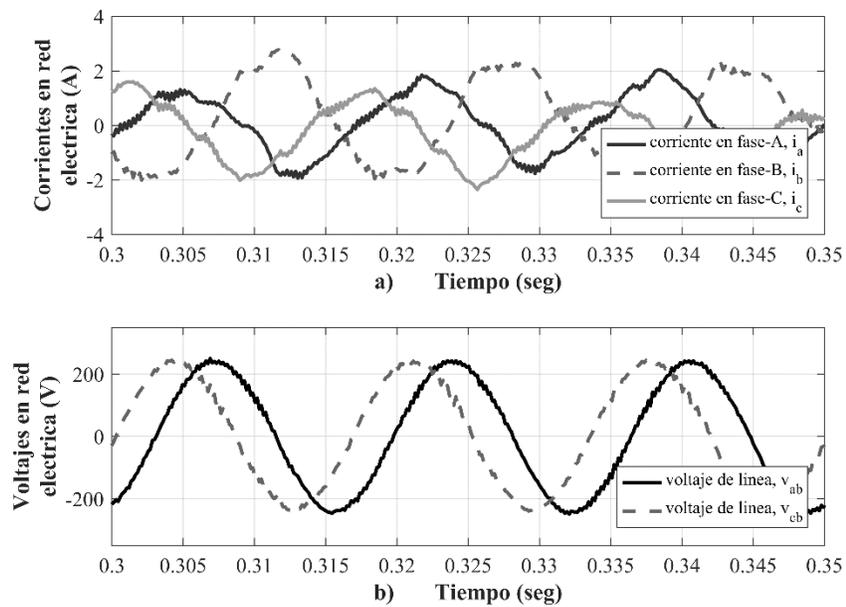


Figura 10. Corrientes y voltajes en la red eléctrica.

## **7. Productos generados**

Tesis de maestría en Ingeniería Eléctrica, cuyo título es: “Diseño del sistema de control de un compensador estático de potencia reactiva para la red eléctrica”. La Tesis fue elaborada por el alumno Luis Ari Zavala Rubio, con matrícula 182957, quien se graduó el 23 de febrero de 2021.

Se sometió artículo en la revista ISA Transactions de Elsevier cuyo título es: “Robust cascade controller for the power factor of the three-phase supply and the induction motor velocity”. El artículo se encuentra en la tercer etapa de revisión.

Elaboración de reporte técnico cuyo título es: “Diseño del controlador de potencia reactiva aplicado a un sistema de rectificación trifásico controlado”, elaborado en noviembre de 2020.

## **8. Conclusiones**

En este proyecto se diseñó e implementó experimentalmente en forma satisfactoria el sistema de rectificación controlada, que tiene como objetivo regular en forma robusta el flujo de potencia reactiva que se entrega a un sistema eléctrico de potencia y el voltaje del bus de CD. Con la regulación del flujo de potencia reactiva entregado a la red de suministro de energía eléctrica se contribuye a la mejora del factor de potencia. Los resultados experimentales corroboran la efectividad y robustez del sistema de control propuesto al variar el flujo de potencia activa que alimenta, mediante un inversor conectado al bus de CD, a un motor de inducción con control de velocidad que impulsa a un generador de inducción que se conecta directamente con la red eléctrica. A través del seguimiento de un tren de pulsos arriba de la velocidad de sincronismo se presentan cambios súbitos en la velocidad de deslizamiento del motor y, en consecuencia, se presentan también cambios súbitos en el par de la carga y en el flujo de potencia activa tanto en el motor como en el generador, por lo que la operación del motor representa una perturbación externa del controlador de potencia reactiva del sistema de rectificación controlada. Adicionalmente, se plantea un procedimiento de caracterización de los parámetros de un filtro LCL, para reducir el contenido de armónicos en las corrientes. En dicho proceso se ajustan los valores

del capacitor y de la resistencia de amortiguamiento mediante un análisis paramétrico con barrido en frecuencia en un diagrama de Bode, con el objetivo de lograr una respuesta suave y sin sobre impulso. Mediante resultados experimentales se muestra el desempeño robusto del sistema de rectificación controlada, variando el valor de referencia del voltaje de bus, variando el valor de referencia de la potencia reactiva y finalmente, ante la presencia de cambios súbitos en el flujo de potencia activa en el motor de inducción, como perturbación externa al sistema.

## **9. Contribución e impacto del proyecto**

El presente proyecto propone regular en forma continua el flujo de potencia reactiva entregado a la red eléctrica para mejorar el factor de potencia, además de regular la velocidad de un motor de inducción. Típicamente la operación de un motor de inducción reduce el factor de potencia del sistema trifásico de alimentación de energía eléctrica, mientras que en esta propuesta se inyecta potencia reactiva al sistema para efectos de mejorar el factor de potencia, siendo esta característica la principal contribución del trabajo. Las bases de esta propuesta pueden ser aplicadas en un compensador estático de Var's (STATCOM) en donde la regulación del factor de potencia y el suministro de potencia reactiva se realiza en forma continua y suave sin presentar picos de corriente, como en el caso de los compensadores de potencia reactiva que utilizan contactores con un banco de capacitores.

Además, el presente proyecto propone una representación simplificada del modelo del motor de inducción en espacio de estados, además de definir de una manera formal los parámetros del modelo y relacionarlos con los parámetros que se obtienen en las pruebas estándar de identificación de parámetros, las cuales son: la prueba en vacío y la prueba a rotor bloqueado. Con el modelo y los parámetros bien definidos, se cuenta con un sistema fiable para la aplicación de diversas técnicas de control robusto, no lineal, las cuales pueden validarse experimentalmente con la infraestructura que se tiene en el laboratorio.

## 10. Impacto económico, social y/o ambiental en la región

El presente proyecto propone regular en forma continua el flujo de potencia reactiva del sistema hacia la red eléctrica y simultáneamente regular la velocidad de un motor de inducción. Y con esto contribuir a la mejora del factor de potencia de la instalación industrial y evitar penalizaciones en la facturación por parte de la compañía de suministro por bajo factor de potencia y contribuir a la percepción de bonificaciones en la facturación por factor de potencia arriba del valor de 0.9.

Además, el presente proyecto propone controlar en lazo cerrado la velocidad de un motor de inducción. Resulta muy relevante el control de velocidad del motor cuando el sistema mecánico tiene un impulsor, como es el caso de los compresores, las bombas centrífugas y los ventiladores, equipos de grandes capacidades muy utilizados a nivel industrial y en el sistema de bombeo de agua potable. En estos equipos, el consumo de potencia está relacionado con la velocidad del motor elevada al cubo, por lo que, al reducir la velocidad a un nivel que el sistema requiere, la reducción de consumo de energía es muy significativa, y se refleja en la facturación del servicio eléctrico. Por lo que esquemas de control de velocidad aplicados a los sistemas mencionados hacen un uso eficiente de la energía eléctrica, lo cual repercute en la cuestión ambiental, porque se reducen los niveles de generación eléctrica y en consecuencia se reduce la quema de combustibles fósiles en las grandes centrales termoeléctricas.

## 11. Referencias

- Morfin, O., Ruiz-Cruz, R., Valenzuela, F., Ornelas-Tellez, F., & Miranda, U. (2018). State-feedback linearization using a robust differentiator combined with SOSM super-twisting for controlling the induction motor velocity. *IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*. Ixtapa, Zihuatanejo, Mexico.
- Dávila, A., Moreno, J., & Fridman, L. (2009). *Optimal Lyapunov function selection for reaching time estimation of super twisting algorithm*. Shanghai: IEEE Conference on Decision and Control.
- Gyugyi, L. (s.f.). Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators. *Proceedings of the IEEE*, (págs. 483 - 494).
- Kundur, P. (s.f.). *Power System Stability and Control*. Toronto: McGraw-Hill.
- Liserre, M., Blaabjerg, F., & Hansen, S. (2005). Design and control of an LCL-Filter-Based. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1281-1291.

- Morfin, O., Valenzuela, F., Ramirez Betancour, R., Castañeda, C., Ruiz-Cruz, R., & Valderrabano-Gonzalez, A. (2018). Real-Time SOSM Super-Twisting Combined With Block Control for Regulating Induction Motor Velocity. *IEEE Access*, 6, 25898 - 25907.
- Reznik, A., Godoy, S., Al-Durra, A., & Mueeen, S. (2014). LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1225 - 1232.
- Santoyo-Anaya, M., Rodriguez-Rodriguez, J., Moreno-Goytia, E., Venegas-Rebollar, V., & Salgado-Herrera, N. (s.f.). Current-Sensorless VSC-PFC Rectifier Control With Enhance Response to Dynamics and Sag Conditions Using a Single PI Loop. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 3160-6415.
- Sen, P. (2014). *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley and Sons.
- Tabatabaei, M., Aghbolaghi, J., Bizon, N., & Blaabjerg, F. (s.f.). *Reactive power Control in AC Power Systems: Fundamentals and Current Issues*. Springer.
- Utkin, V., Guldner, J., & Shi, J. (199). *Sliding mode control in electromechanical systems*. Taylor & Francis.
- Wai, R., & Yang, Y. (s.f.). Design of Backstepping Direct Power Control for Three-Phase PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 3160 - 3173.

## 12. Anexos

### 12.1 Roles de Colaboración

Roles	Definición de los roles	Nombre de él(la) investigador(a)	Figura	Grado de contribución	Actividades logradas durante el proyecto	Tiempo promedio semanal dedicado al proyecto
Descripción de la propuesta del proyecto	Análisis de factibilidad del proyecto	Onofre Morfín Fernando Ornelas	Redactores del protocolo	Principal De apoyo	Escritura del protocolo del proyecto	1 hr
Diseño del controlador del factor de potencia	Síntesis del sistema de control del factor de potencia	Onofre Morfín Fernando Ornelas	Análisis del sistema en lazo cerrado	Principal De apoyo	Validación en simulación del controlador del factor de potencia	1 hr
Validación experimental del controlador del factor de potencia	Preparación y desarrollo de experimentos	Onofre Morfín Luis Ari Zavala	Realización de pruebas	Principal De apoyo	Validación del controlador del factor de potencia	1 hr
Validación experimental del controlador de velocidad del motor de inducción	Preparación y desarrollo de experimentos	Onofre Morfín Luis Ari Zavala	Realización de pruebas	Principal De apoyo	Validación del controlador de velocidad del motor de inducción	1 hr
Escritura de artículo científico	Escritura de artículo sometido en la revista ISA Transactions de Elsevier	Onofre Morfín Fernando Ornelas	Redactores de artículo	Principal De apoyo	Artículo en segunda etapa de revisión	1 hr
Preparación del Informe Técnico Final	Preparar la redacción del Informe Técnico Final	Onofre Morfín Fernando Ornelas	Edición Informe Técnico	Principal De apoyo	Informe Técnico elaborado	1 hr

### 12.1.1 Estudiantes participantes en el proyecto

<b>Nombre de estudiante(s)</b>	<b>Matrícula</b>	<b>Tiempo promedio semanal (en horas) dedicado al proyecto</b>	<b>Actividades logradas en la ejecución del proyecto</b>
Luis Ari Zavala Rubio	182957	2 hrs	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Validación experimental del controlador del factor de potencia.</li><li>2. Edición de resultados publicados en artículo.</li><li>3. Realización de dibujos del artículo.</li></ol>

### 12.2 Evidencias: Acta de Examen de Grado y artículo en revisión en la revista ISA Transactions

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CIUDAD JUAREZ  
INSTITUTO DE INGENIERIA Y TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRICA  
ACTA DE EXAMEN DE GRADO**

En Ciudad Juárez, Chihuahua, siendo las 12:00 horas del día 23 de febrero del año 2021, se presentó de manera virtual:

**Luis Ari Zavala Rubio**

con número de matrícula **182979** de nacionalidad **mexicana**, mediante la plataforma MS TEAMS a fin de sustentar el examen de grado de **Maestría en Ingeniería Eléctrica**, con el trabajo de tesis titulado:

**“Diseño del sistema de control de un compensador estático de potencia reactiva para la red eléctrica”**

**Dirigido por:**

**Dr. Onofre Amador Morfín Garduño**

Habiendo interrogado al alumno y concluida la réplica, el Sínode se reunió a debatir entre sí, reservada y libremente resolviendo declararlo: Aprobado por unanimidad de votos.

A continuación, el presidente del Sínode hizo saber al alumno el resultado del examen y se le tomó protesta. Dándose por terminado el acto a las 14:00 horas, asentándose el presente fallo en el libro de actas para exámenes de grado No 88 a las 88 fojas del libro 4, con la firma de las autoridades correspondientes que lo certifican.



Dr. Manuel Iván Castellanos  
García  
**Presidente**



Dr. Abimael Jiménez Pérez

**Vocal 1**

Por el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación



Mtro. Ismael Canales Valdiviezo  
**Jefe de Departamento de Ingeniería Eléctrica y  
Computación**



Dr. Juan de Dios Cota Ruiz  
**Secretario**



Dr. Fernando Ornelas Téllez

**Vocal 2**



Dra. Amanda Carrillo Castillo  
**Coordinadora de la Maestría en  
Ingeniería Eléctrica**

“Por una vida científica,  
Por una ciencia vital”



MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA  
DPTO. DE ING. ELÉCTRICA  
Y COMPUTACIÓN

## Segunda revisión de artículo.

em.isatrans.0.7766c5.f86e7977@editorialmanager.com en nombre de ISA Transactions <em@editorialmanager.com>

Me: 17/11/2021 09:44 AM

Para: Onofre Amador Morfin Garduño

ISA Transactions

Title: Robust cascade controller for the power factor of the three-phase supply and the

induction motor velocity

Authors: Onofre Amador Morfin; Riemann Ruiz-Cruz; Fredy Alberto Valenzuela; Reymundo Ramírez-Betancour; Carlos Eduardo Castañeda; Fernando Omelas-Tellez

Dear Onofre Amador Morfin,

The PDF for your submission, "Robust cascade controller for the power factor of the three-phase supply and the

induction motor velocity" has now been built and is ready for your approval. Please view the submission before approving it, to be certain that it is free of any errors. If you have already approved the PDF of your submission, this e-mail can be ignored.

To approve the PDF please login to the Editorial Manager as an Author:

<https://www.editorialmanager.com/isatrans/>

Your username is: Onofre Amador Morfin

Then click on the folder 'Submissions Waiting for Author's Approval' to view and approve the PDF of your submission. You may need to click on 'Action Links' to expand your Action Links menu.

You will also need to confirm that you have read and agree with the Elsevier Ethics in Publishing statement before the submission process can be completed. Once all of the above steps are done, you will receive an e-mail confirming receipt of your submission from the Editorial Office. For further information or if you have trouble completing these steps please go to: [http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a\\_id/88/p/7923](http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/88/p/7923).

Please note that you are required to ensure everything appears appropriately in PDF and no change can be made after approving a submission. If you have any trouble with the generated PDF or completing these steps please go to: [http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a\\_id/88/p/7923](http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/88/p/7923).

Your submission will be given a reference number once an Editor has been assigned to handle it.

Thank you for your time and patience.

Kind regards,

Editorial Office

ISA Transactions

## Primera revisión de artículo.

### RV: Submission Confirmation for ISATRANS-D-21-00173R1

De: em.isatrans.38ee.7465d7.373b2475@editorialmanager.com <em.isatrans.38ee.7465d7.373b2475@editorialmanager.com> en nombre de Qing-Guo WANG <em@editorialmanager.com>

Enviado: sábado, 3 de julio de 2021 04:57 p. m.

Para: Onofre Amador Morfin Garduño <omorfin@uacj.mx>

Asunto: Submission Confirmation for ISATRANS-D-21-00173R1

Ms. Ref. No.: ISATRANS-D-21-00173R1

Title: Robust cascade controller for the power factor of the three-phase supply and the

induction motor velocity

ISA Transactions

Dear Onofre Amador Morfin,

This message is to acknowledge that we have received your revised manuscript for reconsideration for publication in ISA Transactions.

You may check the status of your manuscript by logging into the Editorial Manager as an author at <https://www.editorialmanager.com/isatrans/>.

Thank you for submitting your work to ISA Transactions.

Kind regards,

Editorial Manager

ISA Transactions

\*\*\*\*\*