

Emulación de Cargas en Sistemas Industriales por medio del Control de Accionamientos Eléctricos

D. Changoluisa, G. Jácome, C. Tasiguano, M. Pozo
Departamento de Automatización y Control Industrial, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito – Ecuador

Resumen – En la industria se encuentran varias máquinas comandadas por motores eléctricos como bandas transportadoras, bombas, ventiladores, grúas, etc., las cuales poseen un perfil de carga. Existen varias estrategias de control de motores trifásicos, que permiten manejar estas cargas y son aplicadas a través de un variador de frecuencia o directamente a través de convertidores estáticos de energía. Para probar el correcto funcionamiento y desempeño de estos controladores resulta complicado contar con toda esta maquinaria ya sea por factor económico o de espacio; por lo tanto, gracias al uso de emuladores de carga, no es necesario contar con las máquinas reales para realizar pruebas del conjunto controlador-motor. El presente trabajo indica los conceptos y principio de operación de un emulador de cargas industriales, cuya operación permite emular el comportamiento eléctrico y mecánico de las distintas cargas mediante la adecuada selección de una función que relaciona su torque con su velocidad.

Índices–Accionamientos eléctricos, emulador de cargas industriales, motores trifásicos asíncronos, Matlab.

I. INTRODUCCIÓN

El término emulación hace referencia a la imitación de un sistema o parte de él por otra plataforma o dispositivo, de manera que el sistema imitador se comporte de la misma forma que el sistema original. Para una misma entrada, la salida del sistema imitador deberá ser exactamente la misma del sistema imitado [1]. En consecuencia, la importancia de un sistema de emulación de cargas industriales reside en poder observar el comportamiento del sistema para posteriormente tomar decisiones, realizando una comparación entre las formas de control que se manejan actualmente. Este concepto es totalmente válido y aplicable a diversas tecnologías y ramas de la ingeniería, como por ejemplo el desarrollo y control de máquinas eléctricas, control de procesos, energía, etc.

En el caso de procesos industriales en los cuales aproximadamente un 70% están accionados por máquinas eléctricas, las cuales deben operar acorde a los requerimientos de la carga, la cual es característica de cada mecanismo y está definida por la relación entre el torque y la velocidad, lo cual se conoce como perfil de carga.

Dado el constante progreso de la automatización y la tendencia hacia sistemas y procesos energéticamente sostenibles, la necesidad de controladores más eficientes para las máquinas eléctricas se vuelve muy importante [2]. El

desempeño de una máquina eléctrica y su controlador se recomienda medirse bajo carga, la cual para sistemas industriales de tipo mecánica. En la mayoría de casos, no es posible disponer físicamente de dicha carga, ya sea por falta de recursos, espacio o por la dificultad que representaría implementarla debido a que existen numerosos dispositivos y mecanismos con perfiles de carga muy variados, que desde un punto de vista técnico y económico resultaría poco factible y nada práctico para únicamente realizar pruebas de laboratorio. En el caso de la maquinaria de una industria, sucede algo similar pues resultaría ineficaz y nada rentable el hecho de tener que montar todo un proceso únicamente para comprobar si el controlador de la máquina eléctrica puede manejar y ajustarse a los requerimientos del proceso, no obstante es necesario realizar todas las consideraciones del caso antes de optar por la adquisición de un motor y su respectivo controlador pues se sabe que el conjunto puede llegar a representar aproximadamente el 50% del coste inicial del proceso [3].

Ante la problemática planteada, surge el concepto de emulador de carga como una solución óptima que permite evaluar y tomar medidas correctivas tanto en el proceso como el sistema de control previo a la implementación, emulando eléctricamente la gran variedad de perfiles de carga disponibles en la industria. El modelo propuesto consta de dos máquinas eléctricas acopladas mecánicamente, cada una comandada por un controlador independiente como se observa en la Fig. 1.

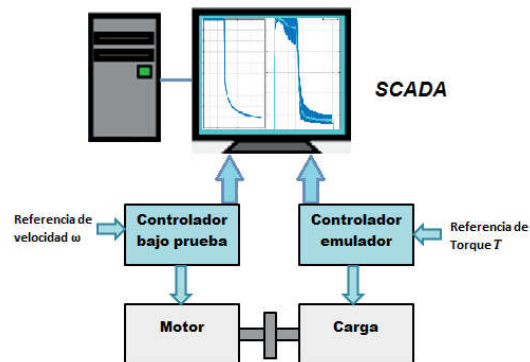


Fig. 1. Esquema general del concepto de emulador de carga [1].

Es importante resaltar que el propósito principal de un emulador de carga es probar el desempeño del controlador más que del tipo de motor que se utilice. Se toma como referencia a un motor asíncrono cuyo uso ha sido ampliamente difundido en los procesos industriales. Bajo este concepto, al controlador que comanda al motor se lo llamará “Controlador bajo prueba” [1] cuyo objetivo será llegar y mantenerse en una referencia de velocidad ajustando el comportamiento del motor al perfil de carga propuesto, mientras que el “Controlador emulador” tendrá como objetivo crear ese perfil de carga en su respectiva máquina nombrada como “Carga”. Para lograr este propósito, el controlador del emulador deberá seguir una referencia de torque y poseer una realimentación de velocidad a fin de ir emulando progresivamente el perfil de carga según el proceso avance.

II. ACCIONAMIENTOS ELÉCTRICOS DE TIPO VECTORIAL.

En la actualidad las exigencias de desempeño y rendimiento de una máquina eléctrica son muy altas y la tendencia se dirige hacia la minimización de pérdidas, optimización del recurso energético y mejora de la calidad de energía. Con el fin de cumplir estos objetivos, es necesario el uso de estrategias de control más avanzadas como las del tipo vectorial. Los controladores vectoriales se basan en la manipulación de variables complejas o fasores con el fin de controlar ya sea de manera directa o indirecta el torque electromagnético generado por el motor. Dentro de las estrategias de control vectorial más difundidas son el control directo de torque DTC y el control por orientación de campo FOC.

A. Controlador por orientación de campo FOC.

El controlador FOC consiste en la descomposición de las corrientes instantáneas del estator, la corriente de flujo y la corriente asociada a la generación del torque. Con este objetivo, se utiliza el modelo dinámico del motor y permite tratarlo de la misma manera que un motor DC de excitación independiente, es decir, se reduce el modelo del motor de inducción a un nuevo modelo referido a dos ejes ortogonales d y q donde la componente de corriente en el eje directo “ d ” regula el flujo del campo magnético y la componente en el eje de cuadratura “ q ” regula el par electromagnético.

Para establecer el cambio de coordenadas estacionarias a rotatorias es necesario conocer con exactitud la posición del flujo magnético del rotor, el cual sirve de referencia para las nuevas corrientes en cuadratura. En la Fig. 2 se indica el esquema de bloques general del control vectorial FOC.

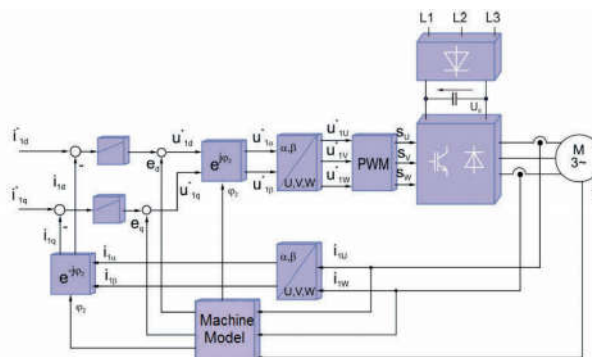


Fig. 2. Esquema general del control vectorial FOC [4].

En el esquema de control de la Fig.2, se puede notar la ausencia de los parámetros como: torque y flujo ya que estas se controlan de manera indirecta a través de las corrientes en el sistema rotatorio d - q .

B. Control directo de torque DTC.

La técnica de control directo de torque se basa en la estimación de los valores instantáneos de torque y flujo de la máquina a través de su modelo matemático.

Las señales de realimentación producidas por el modelo y los controladores de histéresis para el flujo y el torque de dos y tres niveles respectivamente, permiten ajustar el torque electromagnético al de referencia mediante el control de la magnitud y sentido de rotación del vector espacial del flujo magnético del estator, es así que se definen seis zonas de operación que coinciden con la localización de los vectores espaciales de tensión del inversor.

En la ecuación (1) se muestra la influencia que tiene el flujo magnético del estator sobre el torque electromagnético generado por la máquina, así pues, siempre que éste se desplace en el espacio, el ángulo entre el flujo del estator y el flujo del rotor cambiará modificando así el torque.

$$T_e = |\psi_s| |\psi_r| \sin(\gamma) \quad (1)$$

En donde:

ψ_s = Flujo electromagnético del estator.

ψ_r = Flujo electromagnético del rotor.

γ = Ángulo del flujo del rotor con respecto al flujo del estator.

La estrategia de control no utiliza un sistema rotatorio, pero si un cambio de coordenadas hacia un sistema bifásico (α - β) a través del cual se obtienen los valores instantáneos de torque y flujo que ingresan al control a manera de realimentación.

En la Fig. 3 se indica el esquema de bloques general del control vectorial DTC.

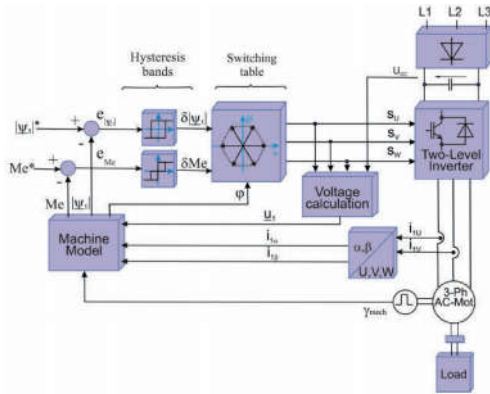


Fig. 3. Esquema general del control vectorial DTC [4].

En el control DTC no existe una modulación como tal debido a la implementación de una tabla de switcheo que permite realizar el control de la electrónica de potencia. Como se observa en la Fig. 3, el bloque nombrado como “Switchingtable” contiene las seis zonas de operación de entre las cuales se escogerá la más adecuada para mantener el error siempre entre los límites determinados por las bandas de histéresis.

III. TIPOS DE CARGAS

Los tipos de cargas existentes en la mayor parte de procesos industriales se pueden clasificar de acuerdo a su perfil de carga característico, el cual es una representación del comportamiento del torque en función de la velocidad del giro del rotor.

A. Torque constante.

Al permanecer el torque constante sin importar los valores que tome la velocidad, la potencia adquirirá una relación lineal con la velocidad, por lo cual su perfil de carga puede expresarse como en (2):

$$T = k \quad (2)$$

Este tipo de cargas se las puede encontrar en máquinas como: montacargas, grúas, elevadores, mezcladores, alimentadores de tornillo, troqueladoras, entre otras. [4]-[5].

El caso de las grúas de tambor, mostrado en la Fig.4, es un buen ejemplo de carga a torque constante en donde el torque requiere ser modificado de acuerdo a la carga colocada en el gancho sin variar la velocidad de elevación.

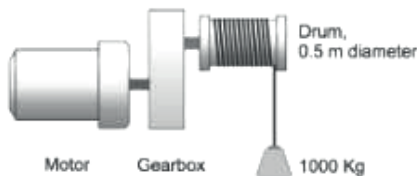


Fig. 4. Grúa de tambor-Carga a torque constante [6].

En la Fig. 5 (a), como ejemplo, se indica el comportamiento de un perfil de carga de torque constante igual a 10Nm para todo el rango de velocidades.

B. Torque variable con la velocidad.

En este tipo de aplicaciones el perfil de carga está representado por (3).

$$T = k\omega \quad (3)$$

A partir de las ecuaciones (2) y (4) se obtiene que, en este tipo de cargas, la potencia es proporcional al cuadrado de la velocidad. Como ejemplos de este perfil de carga, se pueden mencionar los compresores y rodillos[4].

En la Fig. 5 (b) se observa un ejemplo de perfil de carga descrito por la expresión (3).

C. Torque variable con el cuadrado de la velocidad.

En este tipo de carga, el torque varía directamente con la velocidad al cuadrado, mientras que la potencia varía directamente con la velocidad elevada al cubo. Su perfil posee una relación como se muestra en (4).

$$T = k\omega^2 \quad (4)$$

Con esto, significa que a la mitad de la velocidad nominal se tendrá aproximadamente el equivalente a un octavo de la potencia nominal[7]. Como ejemplos de este tipo de cargas se tienen a los ventiladores, sopladoras y bombas [6].

En la Fig. 5 (c), se muestra la gráfica Torque vs Velocidad angular representada por la expresión (4).

D. Torque inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad.

Este tipo de carga es característico de los sistemas de transporte, en donde un alto torque inicial es requerido a fin de vencer la inercia del sistema móvil y conforme la velocidad aumenta el torque descende drásticamente.

Este comportamiento de carga puede ser representado mediante (5).

$$T = \frac{k}{\sqrt{\omega}} \quad (5)$$

En la Fig.5 (d), se ilustra el perfil de considerando la expresión (5). En la gráfica los límites constantes superior e inferior han sido prolongados a fin de observar de mejor manera la característica de este perfil de carga.

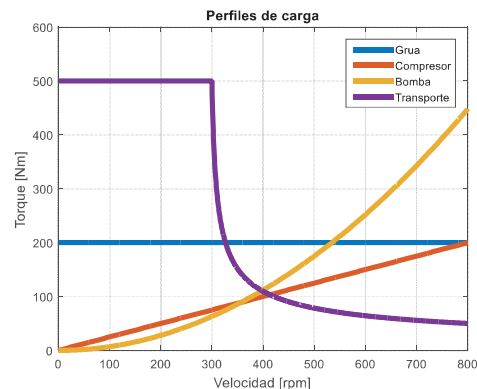


Fig. 5. (a) Perfil de carga de torque constante ej. Grúa. (b) Perfil de carga de torque proporcional a la velocidad ej. Compresor. (c) Perfil de carga de torque proporcional a la velocidad al cuadrado ej. Bomba. (d) Perfil de carga de torque inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad ej. Sistemas de transporte [6].

IV. EMULACIÓN DE CARGA

A fin de ejemplificar el modo de operación de un emulador de carga, en la Fig. 6 se indica el esquema general del emulador de carga, en donde dos máquinas eléctricas con su respectivo controlador son acoplados mecánicamente de manera directa entre sí. Para el desarrollo del emulador se han utilizado dos accionamientos eléctricos con control tipo DTC (control directo de torque)[8, p. 4] y dos motores trifásicos de 200 HP cada uno.

Para el desarrollo inicial del emulador de carga se ha trabajado a nivel de simulación, a través de la herramienta Simulink de Matlab.

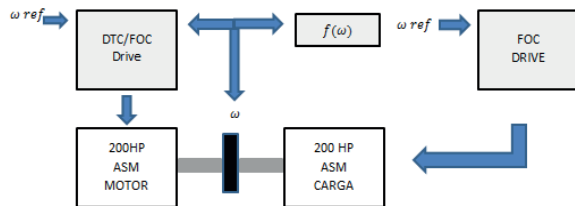


Fig. 6. Esquema de simulación del emulador de carga.

Como se mencionó anteriormente, el requerimiento del emulador de carga es que la carga aplicada al motor bajo prueba tenga un perfil específico, para lo cual se utiliza al motor emulador con referencia de torque como medio para crear dicho perfil.

Cabe indicar que para todas las simulaciones realizadas se ha establecido una referencia de velocidad de 800[rpm]. Además, se han utilizado referencias negativas de torque a fin de conseguir el perfil de carga deseado.

Con el objetivo de realizar una adecuada comparación, en las gráficas torque vs velocidad, al motor se le ha restado el torque de aceleración correspondiente a 4Nm necesario para alcanzar la referencia de velocidad.

A continuación, se muestran los resultados y el desempeño del controlador DTC ante los diferentes perfiles de carga señalados anteriormente.

A. Carga a torque constante.

Para la carga constante se ha fijado una referencia de torque de 200 [Nm] y una referencia de velocidad en 800[rpm] la cual es conseguida progresivamente a través de una rampa a partir de los 0segundos.

Durante todo el intervalo en donde el motor se encuentra acelerando y cubriendo todo su rango de velocidades, el torque de carga se mantiene constante, esto puede ser observado de mejor manera a través de la gráfica Torque vs Velocidad mostrada en la Fig.7.

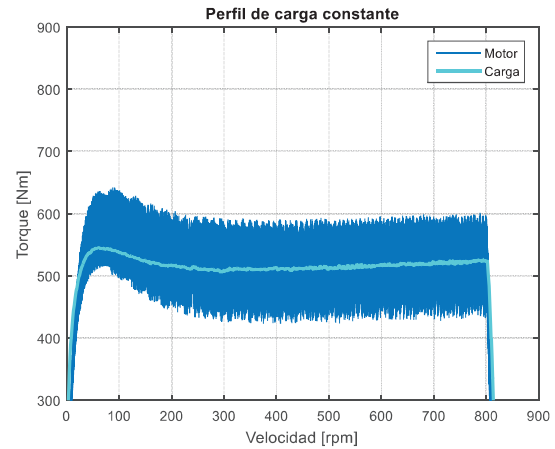


Fig. 7. Carga de torque constante.

El controlador DTC bajo prueba ha modificado el comportamiento del motor a fin de adaptarse al perfil de carga requerido.

B. Carga de torque proporcional a la velocidad.

Para la verificación del seguimiento de este perfil se utiliza el perfil de carga descrito en (3).

Con el control adecuado, se obtiene el perfil de carga requerido como se muestra en la Fig. 8 donde se tiene el Torque electromagnético en función de la Velocidad de giro del motor.

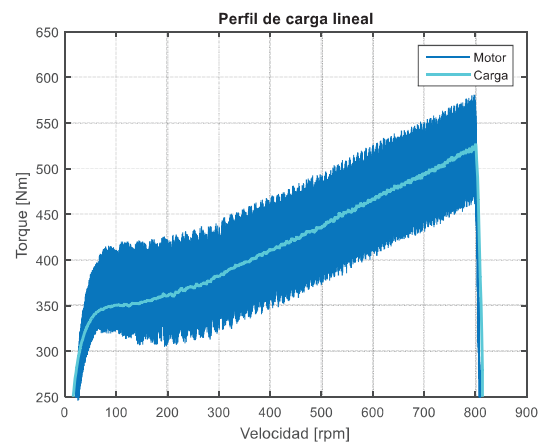


Fig. 8. Carga de torque proporcional a la velocidad.

C. Carga de torque proporcional al cuadrado de la velocidad.

Se ha utilizado un perfil de carga correspondiente a la función (4). El torque electromagnético desarrollado por el motor cambia su comportamiento gracias al sistema de control y en esta aplicación crece de manera proporcional al cuadrado de la velocidad.

En la Fig. 9, se puede visualizar cómo se desarrolla el torque electromagnético conforme la maquina alcanza la velocidad de referencia, además dicho torque en efecto corresponde al torque que la carga requiere.

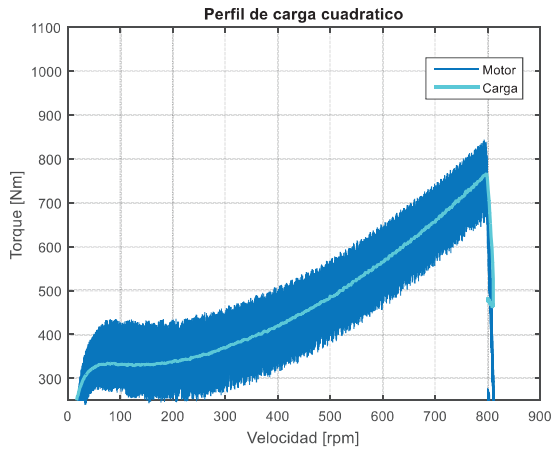


Fig. 9. Perfil de carga de torque proporcional al cuadrado de la velocidad.

D. Torque inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad.

Para esta aplicación el perfil de carga ha sido construido en base a una tabla de datos para representar de mejor manera el comportamiento de sistemas típicos con perfiles de carga inversos como sistemas de transporte. El perfil de carga utilizado corresponde al descrito anteriormente en (5).

En la Fig. 10, se muestra el torque electromagnético desarrollado por el motor en función de la velocidad de giro del rotor en rpm junto con el torque de carga requerido. Como se puede observar, se sigue manteniendo la tendencia impuesta por el perfil de carga.

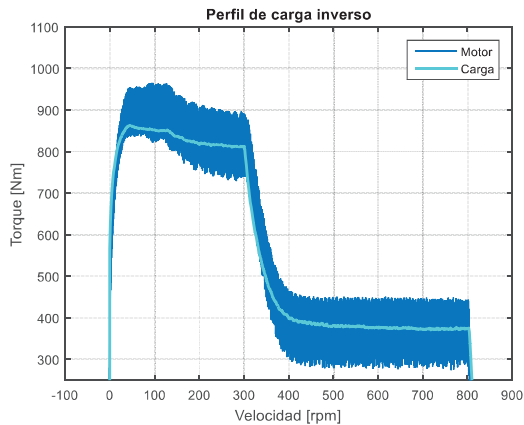


Fig. 10. Perfil de carga de torque proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad.

V. CONCLUSIONES

Con el esquema de emulador de cargas implementado y un adecuado controlador para el emulador, será posible disponer de prácticamente cualquier perfil de carga sin necesidad de haber incurrido en gastos innecesarios.

La implementación de un emulador de cargas de las características mencionadas se convierte en una herramienta

muy útil, ya sea para pruebas de laboratorio destinadas al diseño de controladores o para pruebas previas al montaje de una planta a nivel industrial.

El sistema emulador de carga, permitirá facilitar la selección y desarrollo del controlador más apropiado para una determinada aplicación, con el fin de evitar que esquemas de control muy completos sean subutilizados en cargas que no representan mayores complicaciones en su operación.

El emulador de carga se convierte en un tipo de dispositivo similar a un patrón de referencia, con el cual se realizarán pruebas en el campo de la investigación y desarrollo de controladores, allí resalta la importancia de su diseño e implementación adecuada y robusta para ser un banco de pruebas de gran utilidad.

VI. REFERENCIAS

- [1] K. Kyslan, F. Durovsky, "Dynamic Emulation of Mechanical Loads-An Approach Based on Industrial Drives' Features", *AUTOMATIKA*, vol. 54, pp. 356-363, 2013.
- [2] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, 3rd ed. USA: Springer, 2001.
- [3] I. Kosow, *Control de máquinas eléctricas*. España: Reverté, 2006.
- [4] N. Mohan, *Electric machines and drives*. Wiley, 2012.
- [5] G. Llumiñinga, "Simulación de accionamientos para máquinas de inducción controladas por vector de campo y control de torque directo", Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Abr. 2006.
- [6] "Load requirements - Torque-Speed Characteristics (Motors and Drives)", *what-when-how*.
- [7] "Application considerations and estimated Savings for VFD Drives", *Natural Resources Canada*, 2015.
- [8] *AC4 - DTC Induction 200 HP Motor Drive*. MathWorks.

VII. BIOGRAFÍAS



David. I. Changoluisa nació el 19 de junio de 1993 en Quito. Realizó sus estudios secundarios en el "Colegio técnico experimental de aviación civil COTAC". Actualmente se encuentra cursando el 9no semestre de la carrera de Ingeniería eléctrica y electrónica en la Escuela Politécnica Nacional. (david.changoluisa@epn.edu.ec)



Gustavo Jácome Moreta nació el 28 de marzo de 1993 en la ciudad de Tulcán. Realizó sus estudios secundarios en la "Unidad Educativa hermano La Salle" en donde obtuvo el título de bachiller con mención físico matemático. Actualmente se encuentra cursando el 9no semestre de la carrera de Ingeniería eléctrica y electrónica en la Escuela Politécnica Nacional. (gustavo.jacome@epn.edu.ec)



Cristian Tasiguano Pozo nació el 01 de agosto 1986 en Quito, Ecuador. Realizó sus estudios secundarios en la Unidad Educativa "La Salle". Se graduó de la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 2011. Como becario Senescyt, obtuvo su título de Máster en Ingeniería Mecatrónica y Sistemas Micromecatrónicos en 2014 en la Hochschule Karlsruhe, Alemania y en la Universidad de Oviedo, España. Actualmente se desempeña como Docente Ocasional a Tiempo Completo y Jefe del Laboratorio

de Control Industrial en el Departamento de Automatización y Control Industrial DACI de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional. (cristian.tasiguano@epn.edu.ec)



Marcelo Pozo, nació en Quito-Ecuador. Se graduó en la Escuela Politécnica Nacional como Ingeniero en Electrónica y Control en 1999. Gracias a una beca del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) estudió su Maestría en la Universidad Técnica de Dresden-Alemania obteniendo el título de MSc.E.E en Septiembre del 2002. Entre el 2003 y 2009 se dedicó al trabajo en la industria. A partir de Septiembre del 2009 se desempeña en el cargo

de Profesor Principal a tiempo completo en el Departamento de Automatización y Control Industrial (DACI) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional-Quito, Ecuador. Entre finales del 2010 y principios del 2015 realizó su proyecto de Doctorado en Ingeniería en la Universidad de Siegen, Alemania, especializándose en Electrónica de Potencia y Control Electrónico de Máquinas Eléctricas.

Sus áreas de interés son: Electrónica de Potencia, Control Electrónico Industrial, Control de Máquinas Eléctricas, Calidad y Uso Eficiente de la Energía, Conversión Estática a partir de Fuentes de Energía Alternativas, Regenerativas y Renovables, Sistemas de Transporte y Vehículos Eléctricos. (marcelo.pozo@epn.edu.ec)