

DISEÑO INDUSTRIAL MECATRONICO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA (EE)

Ibar F. Anderson / ibar.federico.anderson@gmail.com

Instituto de Investigaciones en Historia, Teoría y Praxis de la Arquitectura (HITEPAC),
Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Resumen

Teniendo en cuenta la importancia de la Eficiencia Energética (EE), en especial la referida a la energía eléctrica monofásica, de consumo domiciliario y comercial. El problema del impacto ambiental (huella de carbono) que se está generando, significa una oportunidad para el desarrollo de productos más eficientes en el consumo de la energía eléctrica (objetivo final). En clara orientación con esta línea ética de Diseño Industrial, se trabajó con una metodología propia del Posgrado Ecodesing de la FBA-UNLP, centrada en la quinta etapa del análisis del ciclo de vida (ACV): uso eficiente de la energía eléctrica. La finalidad fue desarrollar un ejemplo, en este caso un turbo ventilador de 220 (voltios), 50 (Hz) de corriente alterna (AC); para ser utilizado en equipos de aire acondicionado y otros sistemas de refrigeración: forzados de aire, etcétera. El resultado principal que se obtuvo fue la reducción de un 52% de la potencia activa (W). Como conclusión final podemos decir que se produjo un ahorro del 58% consumo de la energía eléctrica activa (kWh).

Palabras clave: Diseño industrial, mecatrónica, eficiencia energética, energía eléctrica, máquina sincrónica

1. Introducción

Según el *World Energy Outlook 2017* publicado por la Agencia Internacional de la Energía (AIE) se evidencian algunas tendencias en el sistema energético mundial, en donde los motores eléctricos representarán un tercio del aumento de la demanda de energía eléctrica. Este aumento significa que millones de hogares agregarán electrodomésticos y sistemas de refrigeración. Recientemente la Agencia publicó un muy completo estudio sobre la situación del uso de aire acondicionado en el mundo, donde se detalla que el uso de aires acondicionados y ventiladores eléctricos para mantenerse fresco representa casi el 20% del total de la electricidad utilizada en los edificios de todo el mundo en la actualidad.

En la República Argentina, informes anuales de CAMMESA; 2007/16 indican que en ese período hubo un aumento del 45% en el consumo eléctrico en todos los sectores, lo que significa un problema en la generación y transmisión. Por lo cual, se tornan una necesidad todas las medidas que se puedan tomar en sentido de la Eficiencia Energética (EE); lo que por otro lado significa una oportunidad para el diseño y desarrollo de productos industriales más eficientes en el consumo de la energía eléctrica. En clara orientación con la línea ética de reducción de la huella de carbono.

La huella de carbono se conoce como gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto. Tal impacto ambiental es medido llevando a cabo un inventario de emisiones de GEI o un análisis de ciclo de vida (ACV), en inglés: Life Cycle Assessment (LCA). Siguiendo normativas como la adoptada en español UNE-EN ISO 14040, a partir de la norma internacional ISO 14044.

Toda la información ha sido obtenida del Curso de Posgrado de Ecodesign, a cargo del Ing. Guillermo Canale *et al.*, Dependiente de la Secretaría de Posgrado, Facultad de Bellas Artes, Universidad Nacional de La Plata, República Argentina. El Ecodesign es una herramienta metodológica para el Diseño Industrial de productos.

1.2. Novedad tecnológica e hipótesis en Diseño Industrial

La novedad para construir esta tecnología menos costosa (económicamente) y menos compleja (electrónicamente) consiste en utilizar otras tecnologías previamente existentes en el mercado y recombinarlas de un modo nuevo (novedoso, original) de modo tal que se respete la definición de novedad de la Ley de patentes de inventos y modelos de utilidad. Dicha ley en la República Argentina sostiene: “d) Habrá actividad inventiva cuando el proceso creativo o sus resultados no se deduzcan del estado de la técnica en forma evidente para una persona normalmente versada en la materia técnica correspondiente.” (Ley 24481, Artículo 4°, Inc. D).

En efecto, la novedad radica en que la abundante bibliografía de electrotecnia y máquinas eléctricas, dice que los denominados circuitos de control de la velocidad de motores eléctricos de inducción a-sincrónicos (o asíncronos) de corriente alterna (AC) de media y baja potencia, se realizan por dispositivos electrónicos de materiales semiconductores. Desde una potencia nominal de 300 (W) hasta 5000 (W), los motores de inducción (a-síncronos) que pueden ser controlados corresponden a los del tipo desarrollado en la patente n° 381.968 de Nikola Tesla, en el año: 1 de mayo de 1888.

La hipótesis que guía a este trabajo se fundamenta en que dichos circuitos electrónicos de control de potencia por materiales semiconductores bidireccionales (Triac) pueden ser aplicados a los motores a-sincrónicos, sino también a los motores síncronos (o síncronos) de tipo PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) o motores síncronos de imanes permanentes; ya sean de imanes de ferrite de 4000 (Gauss) o de tierras raras de neodimio ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) de gran intensidad de campo magnético: entre 12 y 14 mil Gauss (1,2-1,4 Tesla).

Esta es la principal novedad en que fundamenta la hipótesis de desarrollo tecnológico.

1.3. Grado de relevancia tecnológica

El Ministerio de Energía de la Nación en la República Argentina, posee una Subsecretaría de Ahorro y Eficiencia Energética (EE) creada por el Decreto Presidencial 231/15, lo cual indica la relevancia política y estratégica que para el país, posee la EE, para reducir el consumo de energía eléctrica. Traducido en políticas para la utilización inteligente y responsable de la energía en diversas áreas como: educación, sectores productivos, edificación y sector público, transporte, etcétera.

La importancia política y estratégica nacional se manifiesta en un portal de EE en la web del gobierno. En donde se encuentra la etiqueta de EE, Norma IRAM 62480:2017, con consejos útiles tanto para el uso responsable (ahorro o reducción del consumo) de la energía y el uso eficiente (optimizar el empleo de la energía, utilizando la misma o menos energía). Dicho de otra manera, la EE significa producir igual o más con menos energía.

Con un apartado especial con una guía de EE para motores eléctricos, lo que ahorra dinero e incrementa competitividad.

Con un claro objetivo de incorporar la EE en la educación formal en los tres niveles obligatorios (escuela primaria, secundaria y terciaria). Promover convenios y acuerdos con universidades, cámaras empresarias, organizaciones de la sociedad civil y todas aquellas instituciones cuyo objetivo sea mejorar la EE.

1.4. Grado de pertinencia tecnológica

Medimos la pertinencia de la innovación tecnológica en el nivel local a partir del catálogo para el Concurso Nacional de innovación tecnológica: INNOVAR. Dependiente del exMinisterio de Ciencia y Tecnología de la Nación (MINCYT).

En el año 2017 el proyecto fue seleccionado para la Expo Tecnópolis 2017 del MINCYT y quedó registrado en el catálogo digital y también en soporte papel. Aunque no se explicitan planos y otra información del diseño del proyecto, solo las fotos del producto y una breve descripción, lo que garantiza –acorde a la Ley:

Artículo 5° - La divulgación de una invención no afectará su novedad, cuando dentro de un (1) año previo a la fecha de presentación de la solicitud de patente o, en su caso, de la prioridad reconocida, el inventor o sus causahabientes hayan dado a conocer la invención por cualquier medio de comunicación o la hayan exhibido en una exposición nacional o internacional. Al presentarse la solicitud correspondiente deberá incluirse la documentación comprobatoria en las condiciones que establezca el reglamento de esta ley. (Ley 24481, Artículo 5°).

1.5. Presentación del producto de la innovación tecnológica. Catálogo INNOVAR 2017, exMinisterio de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (MINCYT) de la Nación:

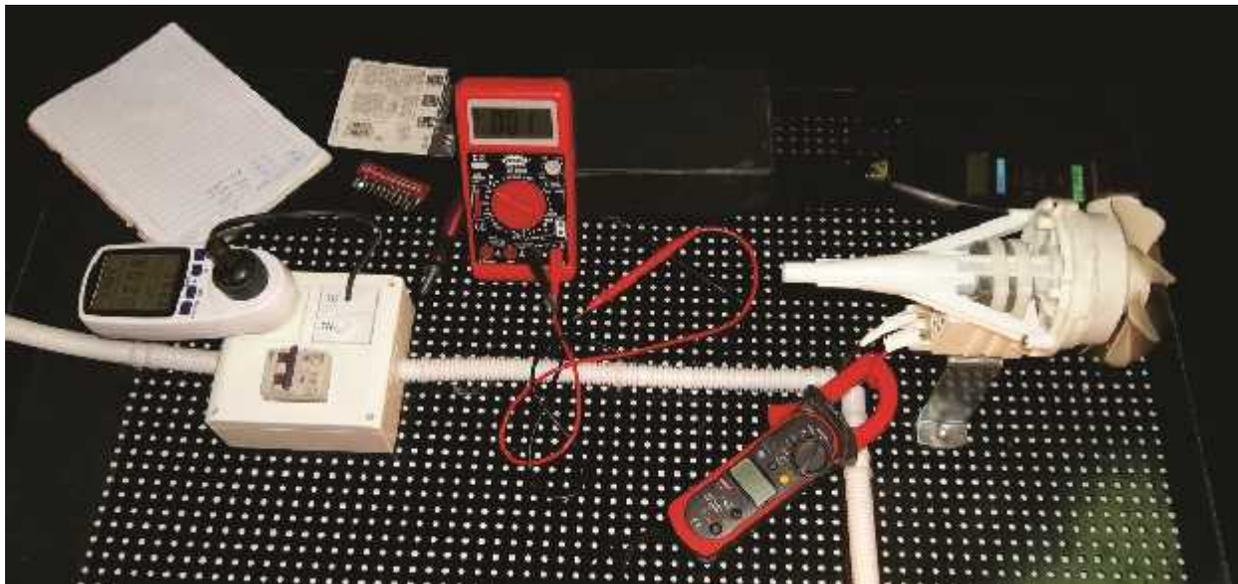


Figura 1: Foto del prototipo del año, se observa el banco de pruebas, con foto-tacómetro laser, power-meter o medidor de consumo de energía eléctrica (kWh), vatímetro medidor de potencia activa (W), pinza amperimétrica (AC) y voltímetro de corriente alterna (AC). Elaboración propia.

2. Metodología de desarrollo del producto

Siguiendo una metodología de Diseño Industrial combinado con Mecatrónica, las etapas fueron bien diferenciadas fueron cinco:

- 1) La idea generadora (concepto proveniente de las Ciencia Física: electricidad y magnetismo).
- 2) El dibujo y/o diseño del circuito mecatrónico: eléctrico, electrónico y mecánico.
- 3) La simulación electrónica computarizada, para el que se utilizaron dos software distintos: Proteus/ISIS y NI/Multisim.
- 4) Fabricación del 1° prototipo (año 2017).
- 5) Fabricación del 2° prototipo, mejorado (año 2018).

Las actividades llevadas a cabo para la construcción del primer prototipo fueron: adoptar un motor sincrónico de tipo PMSM de 30 watts de potencia nominal (con rotor de imanes permanentes de ferrite) obtenido a partir del estator de una electrobomba de lavarropas y acoplarlo a las paletas de un rotor de un motor a-sincrónico de espiras de sombra (o espira de fragger) de microondas. Que se controla mecatrónicamente con un control de potencia de disparo por Triac BT137, capaz de controlar hasta 300 (W) de potencia. Lo que trabajó como atenuador de onda de tensión (Voltios) e intensidad de la corriente (Amperios). Con una adaptación tal cual el siguiente dibujo de circuito lo muestra:

Específicamente, para el desarrollo del segundo prototipo se debió adaptar un motor sincrónico de tipo PMSM (con rotor de imanes permanentes de ferrite), obtenido a partir del estator de una electrobomba de lavavajillas de 65 (watts) de potencia nominal y acoplarlo a las paletas del mismo rotor de un motor a-sincrónico de espiras de sombra (o espira de fragger) de microondas.

Controlándolo con la misma electrónica de potencia de disparo por Triac BT137. Tal cual la bibliografía típica –que es abundante- de control de motores de corriente eléctrica alterna (AC) lo describe. En este trabajo se utilizó un autor específico en control de motores de corriente alterna, tal cual se detalla a continuación.

En efecto, el control de onda completa por Triac, según Harper, G. en su Capítulo 6: “Control electrónico de corriente alterna”, de su libro *El ABC de las máquinas eléctricas III. Instalación y control de motores de corriente alterna*, detalla el circuito típico utilizado en estos casos. Lo que permite controlar la onda de la corriente alterna (AC): en tensión (voltaje) e intensidad (amperaje) de la corriente.

Existen muchas variantes típicas, análogas al diseño propuesto en este trabajo, para el diseño de estos circuitos que eléctricos/electrónicos que controlan una carga (indistintamente un motor de inducción a-sincrónico o una luz), desde 300 (W) hasta 5000 (W); reconocidos como dimmer. Rango suficiente de potencia para su utilización en electrodomésticos domiciliarios y/o comerciales (no industriales).

Antes de construir el prototipo se realizó la simulación en Proteus Design Suite 8 CAD, un software de automatización de diseño electrónico, desarrollado por Labcenter Electronics Ltd., que consta de los dos programas principales: Ares e Isis, y el módulo VSM. El Programa ISIS, Intelligent Schematic Input System (o Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente) permite diseñar el plano eléctrico/electrónico del circuito que se desea realizar con componentes muy variados como se muestra a continuación (Figura 2). Siguiendo algunas especificaciones generales para el diseño de este tipo de circuito eléctrico / electrónico.

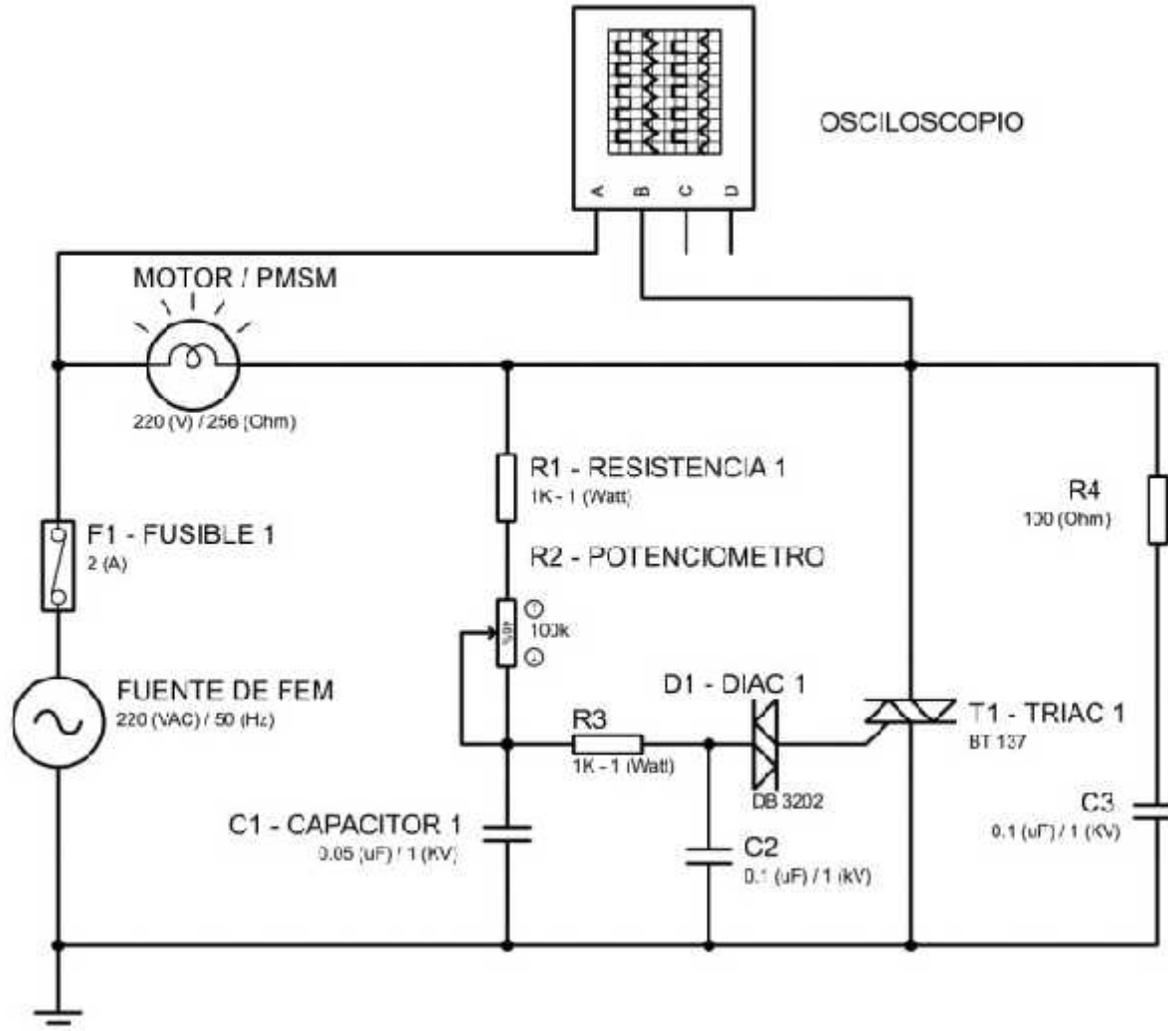


Figura 2. Dibujo de un circuito electrónico R-L-C de control de potencia del motor AC sincrónico de tipo PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) o motor síncrono de imanes permanentes, con una de impedancia de 256 (Ω), simulado con el Proteus Design Suite 8 CAD. El control se efectúa por un resistor variable mecánico (potenciómetro), dado que al variar la resistencia se puede controlar el ángulo de conducción. Se observa la fuente de fem (fuerza electro-motriz) de 220 (VAC), 50 (Hz), el Diac conectado al Triac BT 137 y el osciloscopio electrónico. Elaboración propia.

A continuación (figura 3), se ilustra la simulación lograda para ser visualizada en el osciloscopio electrónico Agilent XSC 3 [24] del software NI Multisim 14.0 que presenta una mejor representación visual de la onda completa y recortada (disparo del Triac) para el mismo circuito eléctrico/electrónico anteriormente simulado en el Proteus Design Suite 8 CAD.



Figura 3: A mayor potencia activa (imagen de la izquierda) el motor utiliza el total de la onda sinusoidal de la tensión (V_{rms}) e intensidad de la corriente (I_{rms}). Pero en el motor síncrono (o sincrónico), cuando la onda sinusoidal es recortada por el disparo del Triac (imagen de la derecha); desciende el consumo de energía activa (kWh) por reducción de la potencia promedio o media activa (P_{med}) medida en vatios (Watts). Simulación del circuito conectado al osciloscopio Agilent XSC 3, del software NI Multisim 14.0. Elaboración propia.

Por fórmula, la potencia media activa (P_{med}), en un circuito general de corriente alterna (CA) es igual al producto de la tensión eficaz (V_{rms}), por la intensidad eficaz de la corriente eléctrica (I_{rms}), multiplicado por el factor de potencia o coseno de ϕ :

Según dicha fórmula de potencia activa:

$$P_{med} = 1/2 V I \cos [\phi] = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos [\phi]$$
 (Sears y Zemansky, 2009:1076).

Luego, considerando la estabilidad de la frecuencia (medida en Herzios) de la corriente alterna (AC) en la República Argentina que es de 50 (Hz); lo que asegura un giro constante a 3000 RPM (revoluciones por minutos) del eje del motor. Si el par de juego de polos de la máquina síncrona es equivalente a dos (2) polos (norte-sur) en el estator. Siendo $p = 2$, la cantidad de polos utilizados en el Dis. del prototipo, según la fórmula:

El rotor y el estator siempre tienen el mismo número de polos (...), el número de polos determina la velocidad síncrona del motor:

$$n_s = 120 * f / p$$

Donde:

n_s = velocidad del motor (r/min)

f = frecuencia de la fuente (Hz)

p = número de polos (Wildi, 2007:379).

Cálculo que arroja: $n_s = 120 * 50$ (Hz) / 2 = 3000 (r/min), o 3000 (RPM). Las 3000 (r/min, o revoluciones/minutos) o 3000 (RPM), son consecuencia de la frecuencia (Hertz) de la corriente alterna (AC). Efectivamente, el prototipo de la Eco-turbina no pierde RPM cuando se baja la potencia activa (cuando se reduce el consumo de energía eléctrica activa de la red), esto se logra: manteniendo no-constante el control escalar voltios/hertz (V/Hz), típico de los variadores de frecuencia (VDF) o drivers. No sucede lo mismo con el torque, dado que este desciende hasta el límite mínimo, sin que afecte la capacidad de las aspas del rotor de realizar trabajo mecánico con el fluido aire (aunque el torque se vea disminuido por la reducción de potencia activa).

Tal como se muestra a continuación en las siguientes tablas:

Voltaje (V_{rms})	Frecuencia (Hz)
220	50
70	16

Voltaje (V_{rms})	Frecuencia (Hz)
-----------------------	-----------------

220	50
70	50

Tabla 1: La tabla de arriba muestra relación voltios/frecuencia (V/Hz) en un driver o variador de frecuencia (VDF). La tabla de abajo muestra la relación voltios/frecuencia (V/Hz) en un control de tensión por disparo de Triac BT137. Elaboración propia

Los motores de tipo PMSM, como el utilizado aquí, proporcionan rotación a una velocidad fija en sincronía con la frecuencia de la fuente de alimentación independientemente de la fluctuación de la carga –mayor o menor- que produce par resistente. La tensión (Volts) e intensidad (Amperios) de la corriente desciende cuando actúa el TRIAC y de todos modos, el motor funciona a una velocidad de sincronismo: 3000 (RPM). Con la frecuencia de la red: 50 (Hz). En cualquier par de torsión hasta el límite de funcionamiento del motor.

Esta es la clave del principio de funcionamiento y del ahorro del 59% del consumo de energía activa (kWh), por reducción de la potencia activa (kW). Lo que según una análisis del ciclo de vida (ACV), conforme a las normas internacionales ISO 14040 e 14044, según la D4S (diseño para la sostenibilidad) se centra en la quinta etapa del ciclo de vida: uso de la energía (eficiente).



Figura 4: La foto de la izquierda muestra la potencia máxima del motor registrada por el vatímetro (TRUE RMS). Con 0.88 (Amperios RMS) * 220 (Voltios RMS) * 0.13 (coseno de ϕ) = 25.1 (Watts), potencia activa en vatios. Girando a 3000 (RPM), velocidad de sincronicidad de la corriente alterna (AC).

La foto de la derecha muestra la potencia mínima del motor registrada por el vatímetro (TRUE RMS) con control de potencia encendido (economiza energía). Con 0.21 (Amperios RMS) * 77 (Voltios RMS) * 0.74 (coseno de ϕ) = 12 (Watts), potencia activa en vatios. Girando a 3000 (RPM), velocidad de sincronicidad de la corriente alterna. Elaboración propia.

3. Resultados y debate

Inicialmente, se han tenido problemas con la utilización de los dos softwares de simulación eléctrica/electrónica: Proteus Design Suite 8 CAD y NI/Multisim 14.0,

El primer software estaba bien adaptado para la simulación eléctrica y electrónica pero todos los motores disponibles en el paquete informático eran para corriente continua (DC) y como no se disponía de un motor de corriente alterna; la carga (load) se simuló con un circuito inductivo puro, cuya impedancia sea equivalente en ohmios a un circuito R-L.

En el caso del segundo software, NI Multisim 14.0, si bien existen varios tipos de motores de corriente alterna (AC) disponibles en el paquete de motores de corriente alterna; no existe una máquina sincrónica de imanes permanentes monofásica. La única máquina sincrónica de imanes permanentes (synchronous machine permanent magnets) es trifásica (no monofásica). Como tal no resulta de utilidad a este trabajo. Por lo que el mismo diseño de circuito electrónico/electromecánico de la figura 2 se utilizó para observar el comportamiento de la onda senoidal, con el disparo del Triac. Como se observa en las figuras 3 (a) y (b).

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad del esfuerzo de torsión (también llamado: par motor) es la magnitud física: Newtons.metros (abreviado: N.m).

El par motor es el momento de una fuerza que se ejerce sobre el eje de transmisión de potencia (rotor). Por fórmula de potencia de rotación, sabemos que:

Según la fórmula: " $P = \tau \cdot \omega$ " (Tipler y Mosca, 2006:265]

Donde:

P , es la potencia (medida en Watts).

τ , es el par motor (medida en N.m)

ω , es la velocidad angular (mediada en rad/s).

Si en ambas situaciones (potencia máxima y mínima), la velocidad angular ω (representada por omega), o velocidad de rotación medida en radianes/segundos (rad/s) es la misma: 314.159 (rad/s). Equivalente a las 3000 (RPM) obtenidas por la frecuencia de la corriente alterna de 50 (Hz).

Despejando el par motor (tau): $\tau = P/\omega$

Para el primer caso, que el motor trabaje a máxima potencia: 25.1 (W), los cálculos de la fórmula nos arrojan un par motor (torque) de: 25.1 (W)/314.159 (rad/s)= 0.08 (N.m).

Para el segundo caso, que el motor trabaje a mínima potencia: 12 (W), los cálculos de la fórmula nos arrojan un par motor (torque) de: 12 (W)/314.159 (rad/s)=0.04 (N.m).

Evidentemente, aunque el par motor electromecánico (torque) se vea disminuido a la mitad, por la reducción de un 52.2% de la potencia activa (medida en vatios). En los motores sincrónicos, aunque la torsión mecánica descienda hasta el límite mínimo, no afecta la capacidad de las aspas del rotor de realizar trabajo mecánico con el fluido aire a 3000 (RPM), medido por el fototacómetro laser. Siempre que el par resistente no supere al par motor.

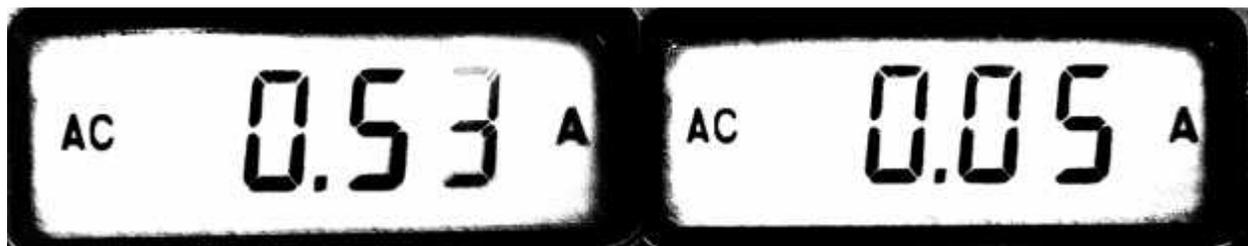


Figura 5: En la imagen de la izquierda, la pinza amperimétrica (True RMS) indica un consumo de 0.53 (Amperios) y en la foto de abajo evidencia 0.05 (Amperios), lo cual significa una reducción de un 90% de la intensidad de la corriente eléctrica. Elaboración propia.

5. Información sobre el patentamiento/registro de la innovación o desarrollo

El producto de Diseño Industrial aquí presentado, no está patentado en la República Argentina. Pero se puede patentar como invento y/o modelo de utilidad según corresponda, bajo la Ley de Patentes y Modelos de Utilidad N° 24.481. Decreto 260/96 del texto ordenado de la Ley N°

24.481, modificada por su similar N° 24.572 (T.O. 1996) y su Reglamentación. Según la ley de la República Argentina.

El prototipo no ha recibido financiamiento para su etapa de investigación y desarrollo (I+D), ni para su patentamiento. Por lo cual se desea mostrarlo a la comunidad académica, científica y tecnológica para que puedan continuar desarrollándolo a partir de esta línea teórica de Investigación & Desarrollo (I+D).

6. Conclusiones

Se ha podido verificar que el prototipo reduce un 59% el consumo de energía eléctrica, medida en kWh (kilo-Watts-hora), que es el modo en que las empresas distribuidoras de electricidad facturan el consumo de energía.

Según la Norma IRAM 62480:2017 se obtuvo una Eficiencia energética (EE) Tipo: A. Con un consumo de energía inferior a 55% del valor nominal; lo que representa 15 kWh/mes. Valor que se calcula durante una (1) hora por día a máxima potencia (25 vatios para el prototipo).

Recordando que desde el principio, el objetivo ha consistido en aproximarnos de un modo más simple (tecnológicamente) y económico a los variadores de frecuencia (VDF) o drivers, que son una tecnología que reduce el consumo de la energía eléctrica, manteniendo constante la relación tensión/frecuencia (volts/hertz) con una electrónica compleja y costosa (como los transistores bipolares de puerta aislada, IGBTs utilizados en la mayoría de circuitos inversores o drivers).

Para construir esta tecnología menos costosa (económicamente) y menos compleja (electrónicamente), se analizó la existencia previamente y probada en el mercado de otras aplicaciones tecnológicas similares, que puedan ser adaptadas y ensambladas a otras tecnologías también existentes. Adicionalmente que este ensamble pueda ser realizado de modo barato y funcional.

Lo que se podría resumir como: hibridación de tecnologías existentes y recombinadas de un nuevo modo novedoso o innovador.

Aquí hemos resuelto el problema de un modo más sencillo, aunque limitado, también más económico; manteniendo no-constante la relación (V/Hz) con un Triac BT 137. Un control de potencia originalmente diseñado para su utilización en motores de inducción monofásicos a-sincrónicos de 220 (V), 50 (Hz) de corriente alterna (AC). Lo que al ser aplicado a motores sincrónicos de tipo PMSM, aunque han reducido el par motor (torque), esto no afectó la capacidad de realizar trabajo mecánico con el fluido aire (lo cual no ha sido verificado en bombas de agua).

7. Referencias

Canale, G. *Ciclo de Vida de Productos . Aportes para su uso en Diseño Industrial*. Buenos Aires: INTI, 2013. Recuperado de: <https://proyectaryproducir.com.ar/wp-content/uploads/2015/09/ACV%20Libro%20A4%20Rev%20b%2016-12-13.pdf>

Canale, G. *Et al.* "Aportes de ACV simplificado al diseño para la sustentabilidad. Casos de aplicación industrial", en *V Conferencia Internacional sobre Análisis de Ciclo de Vida – CILCA 2013* Mendoza: UTN, 2013. Recuperado de: https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/CILCA%20013%20en%20castellano%20FINAL%20001-2013.pdf

Harper, G. "Capítulo 6: Control electrónico de motores eléctricos". En *El ABC de las máquinas eléctricas III. Instalación y control de motores de corriente alterna*. México: Grupo Noriega Editores, 2006, pp. 355-370.

INNOVAR. ExMinisterio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCYT) de la Nación. República Argentina. Buenos Aires: INNOVAR MINCYT, 2017, pp. 204 (ID: 21351). Recuperado de: https://mia.gob.ar/uploads/innovate/catalogo_innovar_2017.pdf

Ley 24481, República Argentina. Ministerio de Justicia y Derechos Humanos de la Nación. Presidencia de la Nación. InfoLEG: Información Legislativa. Recuperado de: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/25000-29999/27289/norma.htm>

Nikola Tesla, "Electro-magnetic motor", US 381968A, 12-oct-1887. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US381968A/en?q=tesla+381968>

Sears; Zemansky. "31: Corriente alterna", *Física Universitaria con Física Moderna, Volumen 2*, México: Pearson Educación, 2009, pp. 1061-1091. Recuperado de: https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2_ed_12%28Sears-Zemansky%29.pdf

Tipler, P. A.; Mosca, G. *Física para la ciencia y la tecnología. 5ta. Edición*. Barcelona: Editorial REVERTÉ, 2006. Recuperado de: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Fisica_Tipler_mosca_vol.1_5o_edicion_e.pdf

Wildi, T. "17: motores síncronos", en *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*, México: Pearson Educación, 2007, p. 377-398. Recuperado de: https://www.academia.edu/31911167/Maquinas_Electricas_y_Sistemas_de_Potencia