

A mechatronic method, to achieve savings in single-phase active energy, higher than that obtained with the "Fan Law".

Un método mecatrónico, para lograr un ahorro en energía activa monofásica en motores eléctricos, superior a la obtenida con "Ley de los Ventiladores".

Ibar Federico Anderson ^{1,*} 

Citación: Anderson I.F.; Un método mecatrónico, para lograr un ahorro en energía activa monofásica en motores eléctricos, superior a la obtenida con "Ley de los Ventiladores". I + T + C Investigación, Tecnología y Ciencia. Vol 1. Num. 16. 2022.

Nota del editor: Sello editorial Unicomfauca se mantiene neutral con respecto a los reclamos derivados de los resultados de este artículo.



Derechos de autor: © 2022 por los autores. Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY NC SA) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES)

¹Investigador Categoría 3, Secretaría de Ciencia y Técnica, Departamento de Diseño Industrial, Universidad Nacional de La Plata; ianderson@empleados.fba.unlp.edu.ar.

Resumen: Es un método mecatrónico, para lograr un ahorro en energía activa monofásica, superior a la obtenida con "Ley de los Ventiladores" en las máquinas eléctricas aplicadas a ventilación. Los métodos cuantitativos de análisis se basaron en técnicas de electrotecnia, practicadas con el instrumental de laboratorio correspondiente sobre los materiales de trabajo (tres prototipos de máquinas eléctricas). Los resultados encontrados a partir de la experimentación de los prototipos en el banco de pruebas se plasmaron en tablas que recogen los datos de fórmulas, valores y unidades físicas. La discusión realiza un completo estudio comparativo; principalmente entre potencia (watts), consumo de energía activa (kwh) y velocidad de giro (RPM). Como conclusión se obtuvo un impacto directo sobre el consumo de energía eléctrica activa monofásica medida en kilowatts-hora (kwh); dado que el motor sincrónico tipo PMSM para realizar trabajo mecánico que se traducen en velocidad sobre los álabes del rodete y transferirlo como velocidad del fluido aire, trabaja al 100% de su velocidad máxima de 3000 (RPM) con solo 6,3 (Watts), esto es 25,2% de la potencia activa que el motor asíncrono de inducción monofásico o motor de polos sombreados que requirió 25 (Watts) para girar a 1690 (RPM). Esto se traduce como una potencia activa 75% inferior (en Watts) con un 44% de superioridad en velocidad, lo que se resume en menor consumo de energía activa monofásica (kWh). También sucede lo mismo si se compara el motor universal AC, para mantener una velocidad a 3000 (RPM), como el motor sincrónico tipo PMSM consumirá 64,8 (Watts), es decir un 90,3% mas potencia activa que la requerida para igualar la misma velocidad del motor sincrónico. Todos con el mismo diámetro de los álabes del rodete y a iguales condiciones de temperatura y presión atmosférica del aire.

Palabras clave: Mecatrónica, ahorro energía activa, AC monofásica, kWh. motores ventiladores, Ley Ventiladores.

Abstract: It is a mechatronic method, to achieve savings in single-phase active energy, higher than that obtained with the "Fan Law" in electrical machines applied to ventilation. The quantitative methods of analysis were based on electrical engineering techniques, practiced with the corresponding laboratory instruments on the work materials (three prototypes of electrical machines). The results found from the experimentation of the prototypes in the test bench were reflected in tables that collect the data of formulas, values and physical units. The discussion makes a complete comparative study; mainly between power (watts), active energy consumption (kwh) and rotational speed (RPM). As a conclusion, a direct impact was obtained on the consumption of single-phase active electrical energy measured in kilowatt-hours (kwh); Since the PMSM type synchronous motor to carry out mechanical work that translates into speed on the impeller blades and transfer it as speed of the air fluid, works at 100% of its maximum speed of 3000 (RPM) with only 6.3 (Watts) , this is 25.2% of the active power than the single phase asynchronous induction motor or shaded pole motor that required 25 (Watts) to rotate at 1690 (RPM). This translates as a 75% lower active power (in Watts) with a 44% superiority in speed,

which is summarized in lower consumption of single-phase active energy (kWh). The same thing also happens if the universal AC motor is compared, to maintain a speed at 3000 (RPM), as the PMSM-type synchronous motor will consume 64.8 (Watts), that is, 90.3% more active power than that required for match the same speed of the synchronous motor. All with the same diameter of the impeller blades and at the same conditions of temperature and atmospheric air pressure.

Keywords: Mechatronics, active energy saving, single-phase AC, kWh. fan motors, Fans Law.

1. Introducción

El objetivo de este trabajo es demostrar el desarrollo de un método mecatrónico innovador para lograr una eficiencia energética y un ahorro en energía activa (kwh) monofásica en las máquinas eléctricas destinadas a ventilación y refrigeración, superior a la obtenida con la denominada "Ley de los Ventiladores" si se aplica en motores sincrónicos tipo PMSM un tipo de diseño de circuito RL (hipótesis) que en su conjunto opera como un sistema-motor RLC de alta eficiencia energética; realizando un estudio comparativo con otra variedad de motores eléctricos de corriente alterna (AC). El estudio comparativo se realizó entre: (1) un tipo de motor síncrono de imán permanente (Permanent Magnet Synchronous Motors); (2) un motor asíncrono de inducción monofásico o motor de polos sombreados (Shaded-pole motor), también conocido como un motor en cortocircuito (espira de fragger) o un pequeño motor de inducción de tipo "jaula de ardilla" (Squirrel-Cage Induction Motor) y; (3) un motor de devanado en serie (Serie-Wound Motor), también denominado motor universal con rotor bobinado (con carbones) en AC. Los métodos cuantitativos se basaron en fórmulas físicas de electricidad y magnetismo aplicadas a partir de diversas técnicas de electrotecnia y practicadas con el instrumental de laboratorio correspondiente y los materiales de trabajo (tres prototipos de máquinas eléctricas). Los resultados encontrados a partir de la experimentación de los prototipos en el banco de pruebas se plasmaron en seis (6) tablas que recogen e ilustran los datos con sus: (a) denominación, (b) fórmula, (c) valores y (d) unidades físicas. La discusión hizo referencia al Marco Teórico, bibliográfico, exponiendo la novedad científica e innovación tecnológica, realizando un estudio comparativo entre potencia (watts), consumo de energía activa (kwh) y velocidad de giro (RPM) de los álabes del rodete de la motor del ventilador centrífugo.

2. Materiales, métodos y Marco Teórico

En términos generales, esta innovación mecatrónica requería tener en cuenta los principios físicos clásicos y las leyes fundamentales de la electricidad y el magnetismo como el comportamiento de la ley de Ohm en corriente alterna, la ley de Faraday-Lenz y otras leyes de corriente alterna conocidas (Resnick et al., 2007; Sears y Zemansky, 2009; Tipler y Mosca, 2006; y Serway y Jewett, 2008), por citar algunos ejemplos que representan conceptos clásicos sobre los fundamentos teóricos y físicos de los motores que explican su funcionamiento electromagnético; además, teniendo en mente una bibliografía sobre máquinas eléctricas de corriente alterna publicada en español (Fitzgerald et al., 1975; 2003; Chapman, 1987; Vargas-Machuca Saldariaga, 1990; Harper, 2006; Wildi, 2007; Aller, 2008; Fraile Mora, 2008; Mohan et al., 2009 y Contreras Villamizar y Sánchez Rodríguez, 2010) y otro material bibliográfico en inglés (CanMOST; NEMA; Best Practices on Motors; Thompson, 1895; EASA, 2003; Wildi, 2007; US Department of Energy; and IEEE, 2016). Se procedió a analizar la bibliografía a la luz de la patente de invento del motor de inducción de dos fases de 1885 que se le atribuye al ingeniero eléctrico italiano Galileo Ferraris y a la patente nº 381968 de 1888 del ingeniero eléctrico serbio Nikola Tesla (Tesla, 1887: US381968A). Asimismo, atento a la nueva y extensa bibliografía específica sobre el abordaje de los problemas ambientales y

la denominada “huella de carbono” y la eficiencia energética (EE), el estudio se ha centrado en una revisión bibliográfica específica sobre ecodiseño y EE en sistemas de refrigeración y ventilación; teniendo en cuenta un par de trabajos personales en español e inglés (Anderson, 2019a; 2019b; 2019c; 2022a; 2022b; 2022c y 2022d) y otros más generales y de varios autores (Tesla, 1887; Zitron, 2007; Instituto Tecnológico de Canarias, 2008; Soler y Palau, 2009; Canale, 2010a; 2010b; 2013a; 2013b; 2014; 2015; Subsecretaría de Ahorro y Eficiencia Energética, 2017). Para la metodología de simulación computacional se ha utilizado software NI Multisim (<https://www.ni.com>).

Es un objetivo de este trabajo demostrar el desarrollo de un método innovador para obtener una eficiencia energética, o ahorro en energía activa (kwh) monofásica, superior a la que se obtiene con la denominada “Ley de los Ventiladores” especificada en la Norma UNE 100-230-95 y determinadas según las normas internacionales ISO 5801-96(E) y ED 13348-1998; en motores sincrónicos tipo PMSM sin necesidad del uso de Variadores de Frecuencia (VDF). Realizando un breve estudio comparativo con otra variedad de máquinas eléctricas de corriente alterna (AC), especificadas según el NEMA.

(a) Motor de polos sombreados, un tipo de motor de inducción monofásico asincrónico AC.

El motor de polos sombreados o motor en cortocircuito (espira de fragger) es un tipo de motor asincrónico de inducción monofásico de CA, también lo podemos describir como un pequeño motor de inducción de tipo “jaula de ardilla” (Squirrel-Cage Induction Motor) en el que el devanado auxiliar se compone de un anillo o barra de cobre que rodea una parte de cada poste. Cuando se aplica alimentación de CA monofásica al devanado del estator, debido al sombreado proporcionado a los polos, se genera un campo magnético giratorio. Este devanado auxiliar de una sola vuelta se denomina bobina de sombreado. Las corrientes inducidas en esta bobina por el campo magnético crean una segunda fase eléctrica al retrasar la fase de cambio de flujo magnético para ese polo (un polo sombreado) suficiente para proporcionar un campo magnético giratorio de dos fases. La dirección de rotación es del lado no sombreado al lado sombreado (anillo) del poste. Dado que el ángulo de fase entre las secciones sombreadas y no sombreadas es pequeño, los motores de polos sombreados producen solo un pequeño par de arranque en relación con el par a máxima velocidad.

Requieren alteraciones en el estator, como polos sombreados (Shaded-pole), para proporcionar un par de arranque. Un motor de inducción monofásico requiere un circuito de arranque separado para proporcionar un campo giratorio al motor. Los devanados de funcionamiento normal dentro de un motor monofásico de este tipo pueden hacer que el rotor gire en cualquier dirección, por lo que el circuito de arranque determina la dirección de operación.

Estos motores asíncronos monofásicos, en los cuales el estator tiene un devanado monofásico y el rotor es de jaula de ardilla. Son motores de pequeña potencia y en ellos, en virtud del Teorema de Leblanc, el campo magnético es igual a la suma de dos campos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos. Efectivamente, el teorema de Leblanc dice que un devanado recorrido por una corriente alterna monofásica crea un campo magnético pulsante, el cual equivale a dos campos magnéticos giratorios iguales que rotan en sentidos opuestos que se anulan. Un motor jaula de ardilla (como el pequeño motor de polos sombreados), cuyo estator posea un único devanado por el que circula una corriente alterna monofásica no podrá, según el teorema de Leblanc, arrancar por sí mismo. Como estos motores monofásicos no arrancan por sí solos, por lo cual se debe disponer algún medio auxiliar para el arranque (que es la denominada “espira de Frager”).

Debido a que su par de arranque es bajo, son los más adecuados para impulsar ventiladores u otras cargas que se inician fácilmente. Por encima 250 (Watts) de potencia no son comunes y para motores más grandes, otros diseños ofrecen mejores características. Una desventaja principal es su baja eficiencia energética. La baja eficiencia es tolerable en relación con el costo reducido del motor y el método de arranque en comparación con otros diseños de motores de CA.



Figura 1. (a) Motor de polos sombreados, un tipo de motor de inducción monofásico asíncrono AC, detenido, utilizado en el experimento, con álabes de 10,5 (mm) utilizado en el experimento; (b) el mismo motor funcionando a 1690 (RPM) a máxima potencia de 25 (Watts). Fuente: elaboración propia.

(b) *Motor devanado en serie (Serie-Wound Motor) o motor asíncrono universal AC.*

El motor universal es un tipo de motor eléctrico que puede funcionar con alimentación de CA o CC y utiliza un electroimán como su estator para crear su campo magnético. Es

un motor de bobinado en serie (Serie-Wound) conmutado donde las bobinas de campo del estator están conectadas en serie con los devanados del rotor a través de un conmutador. A menudo se lo conoce como un motor en serie de CA. El motor universal es muy similar a un motor de serie de CC en construcción, pero se modifica ligeramente para permitir que el motor funcione correctamente con alimentación de CA. Este tipo de motor eléctrico puede funcionar bien con CA porque la corriente tanto en las bobinas de campo como en la armadura (y los campos magnéticos resultantes) se alternarán (polaridad inversa) de forma sincrónica con el suministro. Por lo tanto, la fuerza mecánica resultante ocurrirá en una dirección constante de rotación, independiente de la dirección del voltaje aplicado, pero determinada por el conmutador y la polaridad de las bobinas de campo.

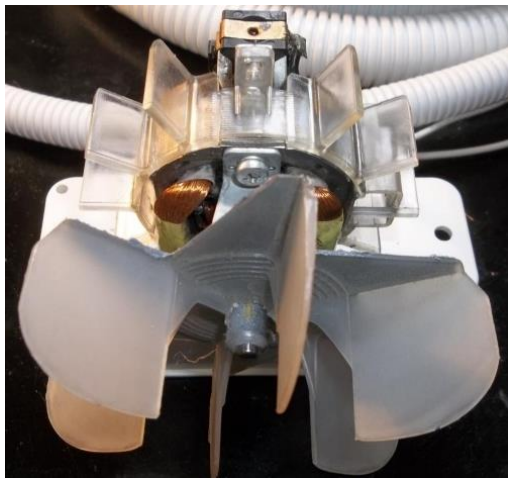
Los motores universales tienen un alto par de arranque, pueden funcionar a alta velocidad y son livianos y compactos. Se utilizan comúnmente en herramientas y equipos eléctricos portátiles, así como en muchos electrodomésticos. También son relativamente fáciles de controlar, ya sea electromecánicamente usando bobinas con tomas, o electrónicamente. Sin embargo, el conmutador tiene escobillas que se desgastan, por lo que se usan con mucha menos frecuencia para equipos que están en uso continuo. Además, en parte debido al conmutador, los motores universales suelen ser muy ruidosos, tanto acústica como electromagnéticamente.

Tiene menor potencia en corriente alterna que en continua, debido a que en alterna el par es pulsatorio. Además, la corriente está limitada por la impedancia, formada por el inductor y la resistencia del bobinado. Por lo tanto habrá una caída de tensión debido a reactancia cuando funcione con corriente alterna, lo que se traducirá en una disminución del par.

Mayor chispeo en las escobillas cuando funciona en corriente alterna, debido a que las bobinas del inducido están atravesadas por un flujo alterno cuando se ponen en cortocircuito por las escobillas, lo que obliga a poner un devanado compensador en los motores medianos para contrarrestar la fuerza electromotriz inducida por ese motivo.

Son motores de gran velocidad para cargas livianas. El par de arranque también es muy grande. Los motores en serie de fracciones de caballo se emplean para propulsar ventiladores, perforadoras eléctricas y otros aparatos pequeños.

El motor de rotor bobinado tiene un rotor constituido, en vez de por una jaula, por una serie de conductores bobinados sobre él en una serie de ranuras situadas sobre su superficie. De esta forma se tiene un bobinado en el interior del campo magnético del estator, del mismo número de polos, y en movimiento. Este rotor es mucho más complicado de fabricar y mantener que el de jaula de ardilla, pero permite el acceso al mismo desde el exterior a través de unos anillos que son los que cortocircuitan los bobinados. Esto tiene ventajas, normalmente es como la posibilidad de utilizar un reostato de arranque que permite modificar la velocidad y el par de arranque, así como el reducir la corriente de arranque.



(a)



(B)

Figura 2. (a) Se observa el motor devanado en serie (Serie-Wound Motor) o motor asíncrono universal de AC detenido con álabes de 10,5 (mm), utilizado en el experimento; (b) el mismo motor funcionando a 4654 (RPM) a máxima potencia de 242 (Watts). Fuente: elaboración propia.

(c) *Motor sincrónico de imán permanente (Synchronous Motor-Permanent Magnet).*

No es objetivo de este trabajo describir la estructura y principio de funcionamiento del motor sincrónico, pero se puede obtener de cualquier bibliografía sobre máquinas síncronas; es una máquina reversible ya que se puede utilizar como generador de corriente alterna o como motor síncrono.

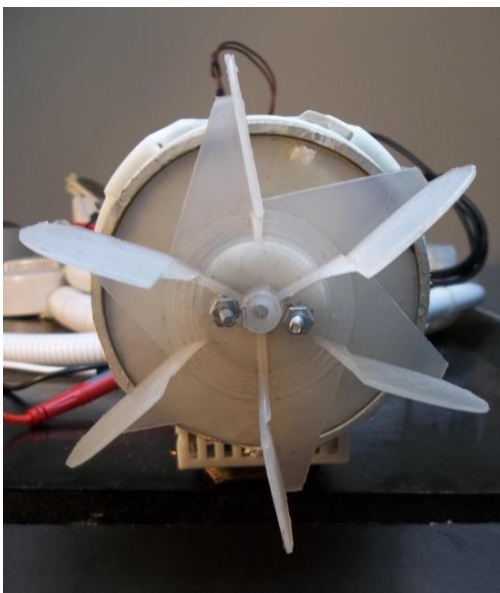
En la actualidad, dentro de la familia de los motores síncronos debemos distinguir que existen tres tipos de motores síncronos: (1) motores de reluctancia (Reluctance motors), (2) motores de histéresis (Hysteresis motors) y (3) motores de imanes permanentes (Permanent-Magnet Motors). Particularmente nos interesa el motor tipo PMSM/IPM (Permanent Magnet Synchronous Motor/Interior Permanent Magnet) o motor síncrono de imanes permanentes (de ferrite o neodimio) o con imanes permanentes en el interior del rotor.

Un motor síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Motor: PMSM) utiliza imanes permanentes incrustados en el rotor de acero para crear un campo magnético constante. El estator lleva bobinados conectados a un suministro de CA para producir un campo magnético giratorio (como en un motor asíncrono). A velocidad síncrona, los polos del rotor se bloquean en el campo magnético giratorio. Los motores síncronos de imanes permanentes son similares a los motores de CC sin escobillas. Los imanes de neodimio son los imanes más utilizados en estos motores. Aunque en los últimos años, debido a la rápida fluctuación en los precios de los imanes de neodimio (Nd₂Fe₁₄B) de 14000 (Gauss), muchas investigaciones han estado buscando una alternativa en los imanes de ferrita de 4000 (Gauss). Debido a las características inherentes de los imanes de ferrita actualmente disponibles, el diseño del circuito magnético de estas máquinas necesita poder concentrar el flujo magnético, una de las estrategias más comunes es el uso de rotores de tipo radiales. Actualmente, las

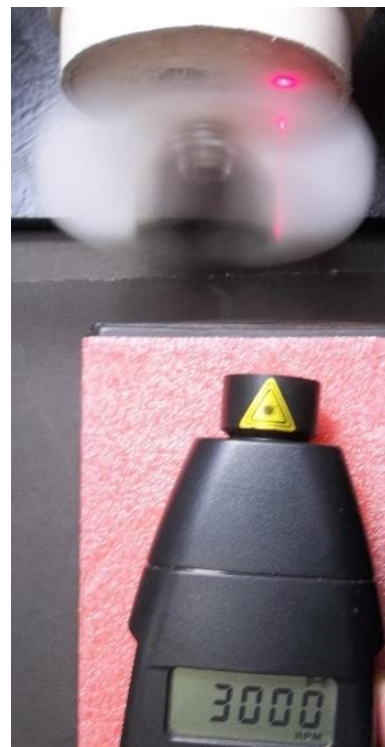
nuevas máquinas que utilizan imanes de ferrita tienen menor densidad de potencia y densidad de par, en comparación con las máquinas que utilizan imanes de neodimio (pero son menos costosas). Un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM) utiliza imanes permanentes incrustados en el rotor de acero para crear un campo magnético constante. El estator lleva bobinados conectados a un suministro de CA para producir un campo magnético giratorio (como en un motor asíncrono). A velocidad síncrona, los polos del rotor se bloquean en el campo magnético giratorio.

La mayoría de los PMSM requieren una unidad de frecuencia variable (VDF) para comenzar. Sin embargo, algunos incorporan una "jaula de ardilla" en el rotor para el arranque; estos se conocen como PMSM de arranque en línea o de arranque automático. Por lo general, se usan como reemplazos de mayor eficiencia para los motores de inducción (debido a la falta de deslizamiento), pero deben especificarse cuidadosamente para la aplicación para garantizar que se alcance la velocidad síncrona y que el sistema pueda soportar la ondulación del par durante comenzando.

Los motores síncronos de imanes permanentes se controlan principalmente mediante "control de par directo" (direct torque control) y "control orientado de campo" (field oriented control). Sin embargo, estos métodos adolecen de un par relativamente alto y ondas de flujo del estator, adicionalmente requieren el uso de variadores de frecuencia (VDF) que requieren una electrónica compleja y costosa. El uso de VDF asociado a los motores PMSM hace mucho más complejo y costoso el proceso de uso de este tipo de motores (considerando si son de imanes de neodimio). Los costos se incrementan y se vuelven menos competitivos frente a otro tipo de tecnologías. No es objetivo de este paper especificar en qué consiste un VDF, solo citarlo para tenerlo en cuenta, que con este trabajo se ha logrado eliminarlo. Reduciendo costos y aumentando la competitividad.



(a)



(B)

Figura 3. (a) Motor sincrónico tipo PMSM detenido con los álabes de 10,5 (mm) utilizado en el experimento; (b) el mismo girando a 3000 (RPM) a máxima potencia de 6,3 (Watts). Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Tabla 1. Los datos del motor de polos sombreados (Shaded-pole motor) o motor en cortocircuito (espira de fragger) calculados por fórmulas y datos extraídos por instrumental de laboratorio (con el sistema de eficiencia energética "apagado") se detallan a continuación en la siguiente tabla con sus respectivas fórmulas, valores y unidades físicas. Fuente: elaboración propia.

Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$	25	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$	224	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$	0,13	(A) : Amperios
Factor de potencia (coseno de fi)	$\cos \phi$	0,86	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = \text{Sen } \phi \cdot \frac{P}{\cos \phi}$	14,93	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = V \cdot I$	29,12	(VA) : Voltiamperios
Impedancia total RL	$Z_{RL} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$	1,479	(k Ω) = kilohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	1479,2	(Ω)
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	879,6	(m Ω) : miliohmios
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314,159	(Rad/S) : Radianes/Segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hertz
Inductancia	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	2,81	(H) : miliHenrios
Defasaje entre la tensión total (V_T) y la corriente total (I_T)	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	0,03408 (°) 5,947 (Rad)	(°) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	1690	(RPM) : Revoluciones por minuto

Tabla 2. Los datos del motor de polos sombreados (Shaded-pole motor) o motor en cortocircuito (espira de fragger) calculados por fórmulas y datos extraídos por instrumental de laboratorio (con el sistema de eficiencia energética "encendido") se detallan a continuación en la siguiente tabla con sus respectivas fórmulas, valores y unidades físicas. Fuente: elaboración propia.

Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$	4	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$	128	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$	0,149	(A) : Amperios
Factor de potencia (coseno de fi)	$\cos \phi$	0,21	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = \text{Sen } \phi \cdot \frac{P}{\cos \phi}$	18,64	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	19,072	(VA) : Voltiamperios

Impedancia total RL	$Z_{RL} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$	859	(Ω) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	180,1	(Ω)
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	838,8	(m Ω) : miliohmios
Reactancia capacitiva	$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	1,06	(k Ω) : Kiloohmios
Impedancia LC total	$Z_{LC} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	1,06	(k Ω) : kiloohmios
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314,159	(Rad/S) : Radianes/Segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hertz
Inductancia	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	2,67	(mH) : milihenrios
Capacitancia	$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c}$	3	(μ F) : Microfaradios
Defasaje entre la tensión total (V_T) y la corriente total (I_T)	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	90 ($^\circ$) 1,57 (Rad)	($^\circ$) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	582	(RPM) : Revoluciones por minuto
Frecuencia de resonancia	$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$	1,77	(kHz) : kilohertz

Tabla 3. Los datos del motor devanado en serie (Serie-Wound Motor) o motor asíncrono universal calculados por fórmulas y datos extraídos por instrumental de laboratorio (con el sistema de eficiencia energética "apagado") se detallan a continuación en la siguiente tabla con sus respectivas fórmulas, valores y unidades físicas. Fuente: elaboración propia.

Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$	242	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$	225	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$	1,1	(A) : Amperios
Factor de potencia (coseno de fi)	$\cos \phi$	0,98	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = \text{Sen } \phi \cdot \frac{P}{\cos \phi}$	51,8	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = V \cdot I$	247,5	(VA) : Voltiamperios
Impedancia total RL	$Z_{RL} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$	200	(Ω) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	200	(Ω)
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	713,99	(m Ω) : miliohmios
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314,159	(Rad/S) : Radianes/Segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hertz
Inductancia	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	2,27	(mH) : miliHenrios
Defasaje entre la tensión total (V_T) y la corriente total (I_T)	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	0,20454 ($^\circ$) 0,00357 (Rad)	($^\circ$) : Grados (Rad) : Radianes

Velocidad de los álabes del rodete	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	4654	(RPM) : Revoluciones por minuto
------------------------------------	------------------------------	------	---------------------------------

Tabla 4. Los datos del motor devanado en serie (Serie-Wound Motor) o motor asíncrono universal calculados por fórmulas y datos extraídos por instrumental de laboratorio (con el sistema de eficiencia energética “encendido”) se detallan a continuación en la siguiente tabla con sus respectivas fórmulas, valores y unidades físicas. Fuente: elaboración propia.

Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$	25	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$	91	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$	0,42	(A) : Amperios
Factor de potencia (coseno de fi)	$\cos \phi$	0,67	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = \text{Sen } \phi \cdot \frac{P}{\cos \phi}$	28,91	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	38,22	(VA) : Voltiamperios
Impedancia total RL	$Z_{RL} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$	216,66	(Ω) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	141,72	(Ω)
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	163,86	(Ω) : Ohmios
Reactancia capacitiva	$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	1,06	(k Ω) : Kilohmios
Impedancia LC total	$Z_{LC} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	193,78	(Ω)
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314,159	(Rad/S) : Radianes/Segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hertz
Inductancia	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	0,5216	(H) : Henrios
Capacitancia	$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}$	3	(μ F) : Microfaradios
Defasaje entre la tensión total (V_T) y la corriente total (I_T)	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	90 (°) 1,5708 (Rad)	(°) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	2103	(RPM) : Revoluciones por minuto
Frecuencia de resonancia	$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$	127,23	(Hz) : Hertz

Tabla 5. Los datos del motor sincrónico de tipo PMSM/IPM calculados por fórmulas y datos extraídos por instrumental de laboratorio (con el sistema de eficiencia energética “apagado”) se detallan a continuación en la siguiente tabla con sus respectivas fórmulas, valores y unidades físicas. Fuente: elaboración propia.

Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$	17,7	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$	220	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$	0,456	(A) : Amperios

Factor de potencia (coseno de fi)	$\text{Cos } \emptyset$	0,17	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = X_L \cdot I_{\text{RMS}}^2$	98,73	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = V \cdot I$	100,32	(VA) : Voltiamperios
Impedancia total RL	$Z_{\text{RL}} = \frac{V_{\text{RMS}}}{I_{\text{RMS}}}$	482,4	(Ω) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{\text{RMS}}^2}$	85,12	(Ω)
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	474,83	(Ω)
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314,159	(Rad/S) : Radianes/Segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hertz
Inductancia	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	1,51	(H) : Henrios
Defasaje entre la tensión total (V_T) y la corriente total (I_T)	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	79,82 ($^\circ$) 1,39 (Rad)	($^\circ$) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	3000	(RPM) : Revoluciones por minuto

Tabla 6. Valores del motor sincrónico tipo PMSM/IPM calculados por fórmula y otros datos obtenidos por instrumental de laboratorio se detallan a continuación en la siguiente tabla (con el sistema de eficiencia energética "encendido") con sus respectivas fórmulas, valores y unidades físicas. Fuente: elaboración propia.

Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \text{Cos } \emptyset$	6,3	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{pico}}}{\sqrt{2}}$	110	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{\text{RMS}} = \frac{I_{\text{pico}}}{\sqrt{2}}$	0,106	(A) : Amperios
Factor de potencia (coseno de fi)	$\text{Cos } \emptyset$	0,8	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = \text{Sen } \emptyset \cdot \frac{P}{\text{Cos } \emptyset}$	4,725	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	7,875	(VA) : Voltiamperios
Impedancia total RL	$Z_{\text{RL}} = \frac{V_{\text{RMS}}}{I_{\text{RMS}}}$	482,4	(Ω) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{\text{RMS}}^2}$	85,12	(Ω)
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	474,83	(Ω)
Reactancia capacitiva	$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	1,061	(k Ω) : Kilohmio
Impedancia LC total	$Z_{\text{LC}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	857,97	(Ω)
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314,159	(Rad/S) : Radianes/Segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hertz
Inductancia	$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$	1,51	(H) : Henrios
Capacitancia	$C = \frac{1}{\omega \cdot X_c}$	3	(μF) : Microfaradios

Defasaje entre la tensión total (V_T) y la corriente total (I_T)	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	90 (°) 1,5708 (Rad)	(°) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$	3000	(RPM) : Revoluciones por minuto
Frecuencia de resonancia	$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$	74,77	(Hz) : Hertz

4. Discusión

El diseño consiste en un circuitos del tipo inductivo-capacitivo.

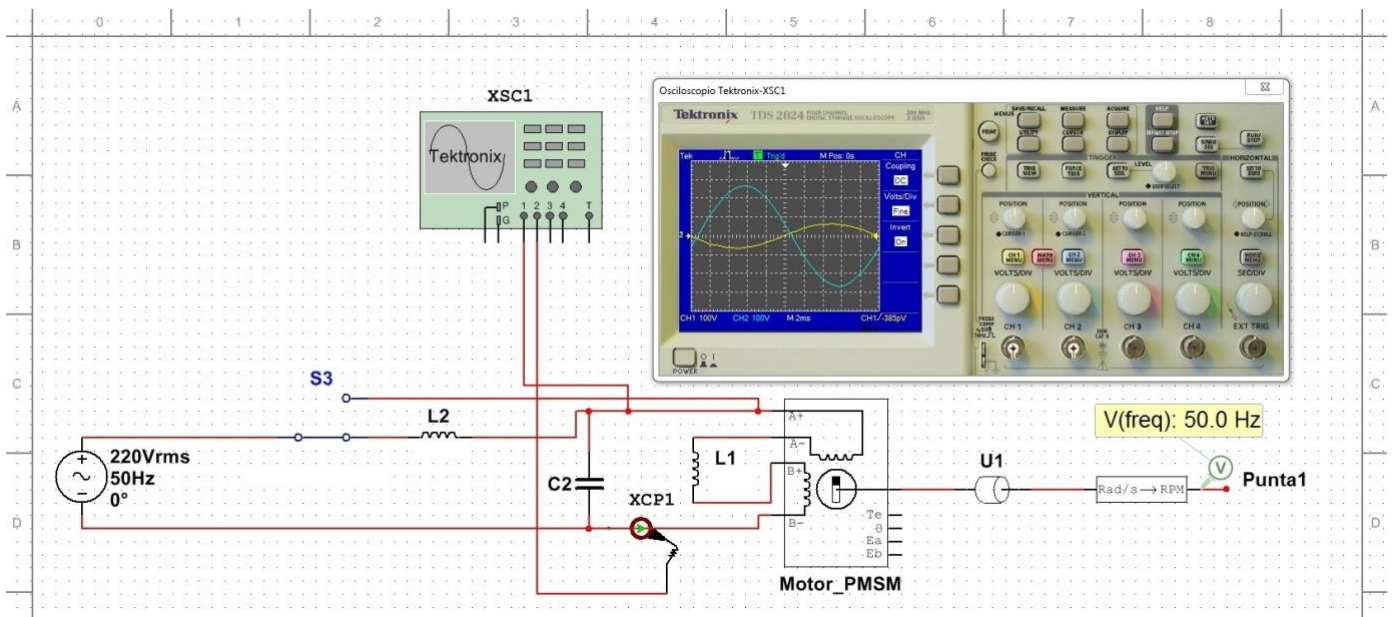


Figura 4. Diseño del circuito LC simulado por software de computadora NI Multisim 14.0, el circuito se enciende y apaga a través del interruptor SPDT (S3), alimentado por una fuente de fem de corriente alterna monofásica de 220 (VAC) y 50 (Hz). Consta de una reactancia capacitiva (C2) y una reactancia inductiva (L2), que se encargan de procesar la expresión binomial de la impedancia. La reactancia capacitiva se obtiene a partir de un condensador de 3 (μ F) conectado en paralelo a las dos fases, y cuya función es la corrección del factor de potencia (\cos de ϕ). La inductancia de 1,5 (Henry) está conectada en serie a una de las fases de la fuente de fem y cuya función es limitar el paso de corriente o intensidad (Amperios) para que disminuya el consumo de energía activa monofásica. Aunque el motor síncrono de tipo PMSM se simula con un motor paso a paso bipolar (que requeriría un controlador de medio paso de dos fases), todavía se comporta de manera análoga a un motor síncrono de tipo PMSM si está alimentado por una corriente eléctrica AC monofásica. Tiene una resistencia interna (L1) dado que es una bobina, por lo que todo el sistema se comporta como un circuito RCL (filtrando simultáneamente los armónicos de corriente y tensión). El sistema está conectado a una carga (U1) que representa los álabes del impulsor y hay un convertidor de (Rad/s) a (RPM) en la Punta (1) que muestra la velocidad (o frecuencia) en Hertz. Fuente: elaboración propia.

El osciloscopio muestra el cambio de fase entre el voltaje total y la corriente total del circuito LC. Es un circuito inductivo con un desfase de $79,82^\circ$ (con el circuito de eficiencia energética "apagado"), la tensión está adelantada a la corriente. Cuando el circuito de eficiencia energética está "encendido", el cambio de fase entre el voltaje y la corriente es de 90° y el voltaje (Voltios) continúa adelantada a la corriente (Amperios). Se observa claramente como el voltaje 220 (V) y la corriente 0.45 (A) disminuyen de intensidad a 110 (V) y 0.10 (A). Lo importante es lo que sucede en ambos casos -circuito conector SPDT "apagado" o "encendido"- en la sonda (Punto 1) que registra el detalle de

la punta del analizador, convirtiendo radianes sobre segundos a revoluciones por minuto (Rad/s a RPM) y éstos en frecuencia (Hertz), del trabajo mecánico que realiza el rotor sobre las palas radiales centrífugas (carga). Se observa que gira siempre a 3000 (RPM) lo que equivale a 50 (Hz), producto de la frecuencia del motor síncrono. Independientemente de si el interruptor SPDT está "apagado" o "encendido" en el modo de eficiencia energética (EE); ya que en ambos casos, la frecuencia de la corriente alterna es siempre de 50 (Hertz). Por esta razón, el motor, aunque disminuya su par, no disminuye su velocidad.

Según la "Ley de afinidad de los ventiladores" especificada en la Norma UNE 100-230-95, la potencia absorbida por un ventilador con motor asíncrono varía con el cubo de su velocidad.

Testeando una de las leyes de la afinidad de los ventiladores, con el diámetro de impulsor (álabes) constante, la potencia eléctrica absorbida por el motor del soplador es proporcional al cubo de la velocidad del eje, de acuerdo a la ecuación:

$$P_1/P_2 = (N_1/N_2)^3, \quad (1)$$

Siendo "P" potencia (en Watts) y "N" velocidad (en RPMs).

Esto quiere decir que para una pequeña variación de velocidad de giro, la potencia se modifica considerablemente. Esto tiene grandes implicaciones desde el punto de vista de la eficiencia energética (EE).

Para todas las comparaciones que se presentan a continuación se ha tenido en cuenta que la densidad del fluido aire no varía en ningún caso (es siempre la misma): aproximadamente 1,204 kg/m³ (0,0752 lb/cu ft), según la atmósfera estándar internacional (ISA), a 101,325 kPa (abs) y 15 °C (59 °F).

5. Conclusiones

Esta sección incluye las conclusiones del manuscrito

-Primera conclusión: Si el motor de polos sombreados (Shaded-pole motor), o motor en cortocircuito (espira de fragger) que es un tipo de motor asíncrono de inducción monofásico de CA sin escobillas (sin carbones) y con rotor "jaula de ardilla"; de los que se utilizan normalmente en los equipos de refrigeración o ventilación y trabaja con una velocidad máxima de 1690 (RPM) debido al deslizamiento del rotor, con el 100% de su potencia activa máxima de 25 (Watts) a su máxima capacidad de trabajo. Por su diseño y configuración electromecánica están imposibilitados de superar el límite de las 3000 (RPM). En cambio, el motor síncrono de tipo PMSM/IPM diseñado para este proyecto (con el sistema de eficiencia energética "encendido") trabaja al 100% de su velocidad máxima de 3000 (RPM) con solo el 25,2% de la misma potencia activa, utilizando solo 6,3 (Watts). Esto se resume en una capacidad 44% superior para realizar trabajo mecánico (RPM) sobre los álabes del rodete y transferirlo como velocidad del fluido aire, con una potencia activa 75% inferior (en Watts), lo que se traduce en menor consumo de energía activa monofásica (kWh).

Considerando que la "Ley de afinidad de los ventiladores", aplica para los motores asíncronos y no aplica para los motores síncronos, como el utilizado en el proyecto; la ventaja de eficiencia energética (EE) es notablemente superior (e imposible de comparar dado que no existe una Norma que establezca dichos parámetros de comparación). Pero, si aplicamos la denominada "Ley de afinidad de los ventiladores", especificada en la Norma UNE 100-230-95, el modo en que se afectan las variables de potencia (Watts) y velocidad (RPM), determinadas según las normas internacionales ISO 5801-96(E) y ED 13348-1998 por fórmula de la ecuación (1), siendo "P" potencia (en Watts) y "N" velocidad (en RPM) con el diámetro de impulsor (álabes) constante. Hipotéticamente hablando (y aclaramos que solo hipotéticamente) el motor asíncrono, para lograr los imposible 3000 (RPM) de alcanzar por el deslizamiento propio del rotor, debería

requerir: 139,8 (Watts); esto es 559% más potencia activa (lo cual evidencia la desventaja energética de este tipo de motores que son los que se utilizan actualmente en refrigeración, pero son mas baratos).

Es obvio la eficiencia energética alcanzada al utilizar un motor síncrono tipo PMSM modificado con un circuito de eficiencia energética RL en un ventilador, frente a los convencionales motores utilizados en los equipos de refrigeración de polos sombreados. Estos motores en cortocircuito o motores asíncronos de inducción monofásicos de CA sin escobillas con rotor "jaula de ardilla, menos eficientes, solo son justificados en ventilación y refrigeración porque son mas baratos.

- *Segunda conclusión:* Si el motor devanado en serie (Serie-Wound Motor) o motor asíncrono universal AC con escobillas (carbones) y rotor bobinado, que no es de lo que se utilizan normalmente en los equipos de ventilación o refrigeración; pero si en otros electrodomésticos y máquinas herramientas que requieran alto torque y altas velocidades de trabajo por un período de tiempo relativamente corto (como una multiprocesadora de alimentos o un taladro de mano, etcétera). Por su diseño y configuración electromecánica si están posibilitados de superar el límite de las 3000 (RPM). En el caso del motor analizado alcanza las 4654 (RPM) con el 100% de su potencia activa máxima de 242 (Watts) a su máxima capacidad de trabajo. Si a dicho motor le aplicamos la "Ley de afinidad de los ventiladores" donde la potencia absorbida por un ventilador con motor asíncrono varía con el cubo de su velocidad. Por fórmula, testeando una de las leyes de la afinidad de los ventiladores, con el diámetro de impulsor (álabes) constante, la potencia eléctrica absorbida por el motor del soplador es proporcional al cubo de la velocidad del eje, tal como se describe en la ecuación (1). Siendo "P" potencia (Watts) y "N" velocidad (RPM), reemplazamos y calculamos la fórmula:

$$P_1 = \left(\frac{3000 \text{ (RPM)}}{4654 \text{ (RPM)}} \right)^3 = (0,6447)^3 * 242 \text{ (W)} = 64,8 \text{ (W)}, \quad (2)$$

Por lo que si tal motor asíncrono universal AC con escobillas y rotor bobinado, debe descender su velocidad a 3000 (RPM), para igualar la velocidad del motor síncrono y compara potencia; consumirá 64,8 (Watts), es decir un 90,3% más potencia activa que la requerida para igualar la misma velocidad del motor síncrono tipo PMSM que trabaja a 6,3 (Watts).

- *Conclusión final:* El motor síncrono tipo PMSM con el acople de un diseño de circuito mecatrónico RL para realizar trabajo mecánico que se traducen en velocidad sobre los álabes del rodete y transferirlo como velocidad del fluido aire, trabaja al 100% de su velocidad máxima de 3000 (RPM) con solo 6,3 (Watts), esto es 25,2% de la potencia activa que la requerida por el motor asíncrono de inducción monofásico o motor de polos sombreados que necesitó 25 (Watts) para girar a 1690 (RPM). Esto se traduce como una potencia activa 75% inferior (en Watts) con un 44% de superioridad en velocidad, lo que se resume en menor consumo de energía activa monofásica (kWh). También sucede lo mismo si se compara el motor universal AC con carbones y rotor bobinado, para mantener una velocidad a 3000 (RPM); dado que el motor síncrono tipo PMSM consumirá 64,8 (Watts), es decir un 90,3% mas potencia activa que la requerida para igualar la misma velocidad del motor síncrono. Todos con el mismo diámetro de los álabes del rodete y a iguales condiciones de temperatura y presión atmosférica del aire.

Fondos: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Al Director Mg. D.I. Federico del Giorgio Solfa, Departamento de Diseño Industrial, Secretaría de Ciencia y Técnica (SCyT), FBA-Universidad Nacional de La Plata (UNLP), República Argentina. Por incluirme en el Proyecto B374, acreditado en la SCyT-FBA-UNLP.

Conflictos de interés: Declare conflictos de intereses o declare "Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses".

Referencias

- Aller, J. M. (2008). Máquinas eléctricas rotativas. Caracas: Editorial Universidad Simón Bolívar. [En línea]. Recuperado de: <http://prof.usb.ve/jaller/Maquinas1.pdf>
- Anderson, I. F. "Mejoras de eficiencia energética (EE) en los motores monofásicos sincrónicos de 220 (VAC)/50 (Hz), tipo PMSM". Rev. UIS Ing., vol. 18, Issue 4, pp. 57-70, 2019. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2019005> [En línea]. Recuperado de: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/9300/9869>
- Anderson, I. F. "Eco-turbina. Turbo ventilador eléctrico 220 (VAC)-50 (Hz), de bajo consumo: eficiente energéticamente". Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social, vol. 1, Issue 1, pp. 1-28, 2019. Doi: <https://doi.org/10.24215/26838559e001> [En línea]. Recuperado de: <https://revistas.unlp.edu.ar/IDTS/article/view/6270/7812>
- Anderson, I. F. "Diseño industrial mecatrónico y eficiencia energética (EE)". IX Jornadas de Investigación en Disciplinas Artísticas y Proyectuales (JIDAP), FBA-UNLP, La Plata, Argentina, 2019, pp. 1-10. [En línea]. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/80838/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anderson, I. F. "1º Premio Nacional INNOVAR 2021 de la Agencia Nacional I+D+I – MINCYT Nación: extractor de aire centrífugo, para ambientes contaminados con SARS-CoV-2, de alta eficiencia energética". X Jornadas de Investigación en Disciplinas Artísticas y Proyectuales (JIDAP), FBA-UNLP, La Plata, Argentina, 2022, pp. 1-11. [En línea]. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/148463/Documento_completo.-ANDERSON.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anderson, I. F. (2022). "Energy Efficient Centrifugal Air Extractor for Environments Contaminated With Sars-Cov-2 (Coronavirus). How to Build a Motor That Saves Electricity". Preprints, pp. 1-31. DOI: <https://doi.org/10.31219/osf.io/gepbc>. [En línea]. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/145958>
- Anderson, I. F. (2022). "Hertzian Motor: An Innovative Method to Obtain an Energy Efficiency of 90%, in Savings in Single-Phase Active Energy (Kwh), If The "Fan Law" Is Applied To PMSM-Type Synchronous Motors Without The Need to Apply The Use of Variable Frequency Drives (VFD)". Preprints, pp. 1-58. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints202212.0319.v1> [En línea]. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/147431>
- Anderson, I. F. (2022). "Diseño industrial y electromecánico de un extractor de aire centrífugo de alta eficiencia energética para ambientes con Covid-19". Investigación Aplicada e Innovación I+i: TECSUP; vol. 16, pp. 44-57. Recuperado de: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/147583/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- "Best Practices on Motors, Pumps and Fans" U.S. Department of Energy. <http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/motors.html>
- [35] Canale, G. (2010). Manual de diseño para la sustentabilidad. Buenos Aires: Diseño Librería Técnica CP67. [En línea]. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.cp67.com/reader/manual-de-diseno-para-la-sustentabilidad?location=1>
- Canale, G. (2010). "S.O.S. Diseño sustentable. Sustentabilidad, Economía y Diseño". En 5º Foro de Ética y Sustentabilidad. Diseño Sustentable. Buenos Aires: 2009. Publicado en el Boletín N° 158 del INTI. [En línea]. Disponible en: https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/INTI%20bol158-1%20SOS%20Dise%C3%B1o%20Sustentable.pdf
- Canale, G. (2013). "Ciclo de Vida de Productos. Aportes para su uso en Diseño Industrial". Buenos Aires: INTI. [En línea]. Recuperado de: <https://proyectaryproducir.com.ar/wp-content/uploads/2015/09/ACV%20Libro%20A4%20Rev%20b%2016-12-13.pdf>
- Canale, G. (2013). "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: Universidad Tecnológica Nacional. [En línea]. Disponible en:

https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/CILCA%202013%20en%20castellano%20FINAL%2001-2013.pdf

13. Canale, G. (2014). Materialoteca. Perfil ambiental de materiales (solamente la Introducción). [En línea]. Disponible en:

https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/Extracto%20de%20Introducci%C3%B3n%20-%20Materialoteca.pdf

14. Canale, G. (Editor). (2015). Manual de materiales para la sustentabilidad. Buenos Aires: Librería Técnica CP67. [En línea]. Recuperado de: <https://bibliotecadigital.cp67.com/reader/materialoteca?location=178>

15. "CanMOST - The Canadian Motor Selection Tool," Natural Resources Canada. <http://oee.nrcan.gc.ca/industrial/equipment/software/intro.cfm?attr=24>

16. Chapman, S. J. (1987). Máquinas eléctricas (5ª Edición). México: Mc Graw Hill. [En línea]. Recuperado de: https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf

17. Contreras Villamizar, E. F.; Sánchez Rodríguez, R. (2010). Diseño y construcción de un banco de prácticas en motores eléctricos, como apoyo a la asignatura diseño de máquinas II. Colombia: Universidad Industrial de Santander. [En línea]. Recuperado de: <https://docplayer.es/7240795-Diseno-y-construccion-de-un-banco-de-practicas-en-motores-electricos-como-apoyo-a-la-asignatura-diseno-de-maquinas-ii.html>

18. Fitzgerald, A. E.; Kingsley, Ch.; Umans, S. D. (2003). Máquinas eléctricas (6ª Edición). México: Mc Graw Hill. [En línea]. Recuperado de: https://www.academia.edu/17314182/maquinas_electricas

19. Fitzgerald, A. E.; Kingsley, Ch.; Kusko, A. (1975). Teoría y análisis de las máquinas eléctricas. Barcelona: Editorial Hispano Europea. [En línea]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/185915953/teoria-y-analisis-de-las-maquinas-electricas-fitzgerald-kingsley-kusko>

20. Fraile Mora, J. (2008). Máquinas eléctricas (6ª Edición). Madrid: Mc Graw Hill. [En línea]. Recuperado de: https://www.academia.edu/42010234/Maquinas_electricas_6a_ed_Fraile_Mora_Jesus

21. Harper, G. (2006). El ABC de las máquinas eléctricas II. Motores de corriente alterna. México: Grupo Noriega Editores. [En línea]. Recuperado de:

https://www.academia.edu/15986437/EL_ABC_DE_LAS_MAQUINAS_ELECTRICAS_VOL_2_MOTORES_DE_CORRIENTE_ALTERNA

22. Harper, G. (2006). El ABC de las máquinas eléctricas III. Instalación y control de motores de corriente alterna. México: Grupo Noriega Editores. [En línea]. Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/388385650/El-ABC-de-La-Maquinas-Electricas-Instalacion-y-Control-de-Motores-de-Corriente-Alterna-Enrique-Harper-pdf>

23. Institute of Electrical and Electronics Engineers, "IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity", 2016. [En línea]. Recuperado de: <https://www.ieee.org/index.html>

24. Instituto Tecnológico de Canarias. (2008). Energías renovables y eficiencia energética. Canarias. ITC, S. A. [En línea]. Recuperado de: <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>

25. Mohan, N.; Undeland, T. M.; Robbins, W. (2009). ELECTRÓNICA DE POTENCIA. Convertidores, aplicaciones y diseño (3ª Edición). México: Mc Graw Hill. [En línea]. Recuperado de: <https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/PIES/electronica-de-potencia-mohan-3ra-edicion.pdf>

26. "NEMA Premium Motors," National Electrical Manufacturers Association. <https://www.nema.org/directory/products/nema-premium-motors>

27. Resnick, R; Halliday, D; Krane, K; (2007). Física, Vol. 2 (6ª Edición). México: Grupo Editorial Patria. [En línea]. Recuperado

de: https://www.academia.edu/31428733/F%C3%ADsica_Vol_2_Halliday_Resnick_and_Krane_5th_Edition_Espa%C3%B1ol

28. Sears; Zemansky. (2009). Física Universitaria con Física Moderna, Volumen 2, México: Pearson Educación. [En línea]. Recuperado de: https://www.ucursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2__ed_12%28Sears-Zemansky%29.pdf

29. Serway, R.; Jewett, J. W. (2008). Física para ciencias e ingeniería con física moderna, V. II. (7ª Edición). España: Cengage Learning Editores. [En línea]. Recuperado de: https://www.academia.edu/27915502/Serway_7_Edicion_2_Volumen
30. Soler & Palau (2009). Manual práctico de ventilación. México. Editorial S&P. [En línea]. Recuperado de: <https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/mven/spventilacionc2.pdf>
31. Subsecretaría de ahorro y eficiencia energética (2017). Guía de eficiencia energética para motores eléctricos. Buenos Aires. Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación. [En línea]. Recuperado de: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_de_eficiencia_energetica_para_motores_electricos.pdf
32. Tipler, P. A.; Mosca, G. (2006). Física para la ciencia y la tecnología (5ª Edición). Barcelona: Editorial REVERTÉ. [En línea]. Recuperado de: file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Fisica_Tipler_mosca_vol._1_5o_edicion._e.pdf
33. "The Effect of Repair / Rewinding on Motor Efficiency EASA/AEMT Rewind Study and Good Practice Guide to Maintain Motor Efficiency," EASA 2003. www.easa.com
- [20] "Appliance & Equipment Standards," U.S. Department of Energy. http://www.eere.energy.gov/buildings/appliance_standards/notices_rules.html
34. Vargas-Machuca Saldariaga, F. (1990). Máquinas eléctricas rotativas. Perú: Ediciones Megaprint. [En línea]. Recuperado de: https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28690/maquinas_electricas_rotativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
35. Tesla, N. "Electro-magnetic motor", US 381968A, 12-oct-1887. [En línea]. Recuperado de: <https://patents.google.com/patent/US381968A/en?q=tesla+381968>
36. Thompson, S.P. (1895). Polyphase electric currents and alternate current motors. Londres: E. & F. N. Spon. [En línea]. Recuperado de: <https://archive.org/details/polyphaseelectric00thomuoft/page/88/mode/2up>
37. Wildi, T. (2007). Máquinas eléctricas y sistemas de potencia (6ª Edición). México: Pearson Educación. [En línea]. Recuperado de: <https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/Libro2.pdf>
48. Zittrón (2007). Conferencias sobre ventilación en minas. Lima. Zittrón. [En línea]. Disponible en: <https://fddocuments.ec/document/libro-de-ventilacion.html>[Accedido: 30-marzo-2022].