

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

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

Ibar Federico Anderson¹

Material original autorizado para su primera publicación en la revista Ciencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Palermo.

Campo temático: Energía (Eficiencia Energética).

Recepción: 28/8/2023 | Aceptación: 9/11/2023

Resumen

Es un método mecatrónico, para lograr un ahorro en energía activa monofásica, superior a la obtenida con la “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. Los resultados encontrados a partir de la experimentación 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). El motor sincrónico tipo PMSM con el acople de un diseño de circuito mecatrónico RL realiza trabajo mecánico a su máxima velocidad de 3000 (RPM) con solo 6,3 (Watts). Esto se traduce como una potencia activa 75% inferior, con un 44% de superioridad en velocidad, lo que se resume en un ahorro del 75% de energía activa monofásica (kWh).

Palabras clave: mecatrónica; ahorro energía activa; AC monofásica; ley ventiladores.

¹ Universidad Nacional de La Plata. federico.anderson.argentina@gmail.com

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 electrotechnical techniques, practiced with the corresponding laboratory instruments on the work materials. The results found from the experimentation 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). The PMSM type synchronous motor coupled with an RL mechatronic circuit design performs mechanical work at its full speed of 3000 (RPM) with only 6.3 (Watts). This translates as a 75% lower active power, with a 44% superiority in speed, which is summarized in a saving of 75% of single-phase active energy (kWh).

Keywords: Mechatronics; active energy saving; single-phase AC; 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 en un tipo de motor síncrono de imán permanente (Permanent magnet Synchronous Motors). 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. Los resultados encontrados a partir de la experimentación del prototipo en el banco de pruebas se plasmaron en dos (2) 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 estudiados en español e inglés 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.

2.1. 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 sincrónicos: (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 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 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.



Figura 1. Banco de pruebas conectado al motor extractor/soplador centrífugo de aire viciado de SARS-CoV-2 o Covid-19 (Coronavirus): Turbo. Con multímetro digital (medidor de voltios en AC), pinza amperométrica (medidor de intensidad de la corriente en AC), frecuencímetro (medidor de Hertz), fotocómetro láser (medidor de velocidad en RPM), osciloscopio digital medidor de la forma de onda de la corriente alterna en tensión ($V_{pico-pico}$, V_{avg} , V_{rms}), para cálculo de factor de cresta de distorsión armónica, osciloscopio analógico para observación cualitativa de la THD (distorsión armónica de la corriente alterna), vatímetro (medidor de potencia activa en vatios o watts), factor de potencia (coseno de ϕ), power-meter (medidor del consumo de energía activa en kilowatts-hora: kwh). Fuente: elaboración propia.

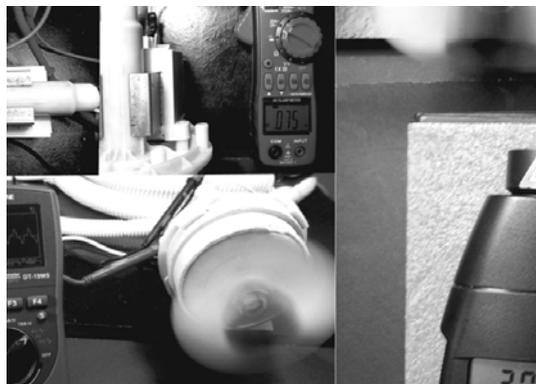


Figura 2. Motor sincrónico tipo PMSM/IPM (con el sistema de eficiencia energética “encendido”) conectado al osciloscopio mostrando la forma de onda de la tensión no-lineal, también conectado al multímetro digital mostrando la caída de tensión de 110 (voltios), y a la pinza amperométrica evidenciando la caída en la circulación de la corriente eléctrica a 0.075 (amperios) y de la constante en la velocidad del álabe a 3000 (RPM). Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Los resultados se muestran en forma de tablas elaboradas en los cuadros 1 y 2.

Cuadro 1. 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	$P = V_{\text{rms}} \cdot I_{\text{rms}} \cdot \text{Cos } \emptyset$	17,7	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{\text{RMS}} = \frac{V_{\text{pico}}}{\sqrt{2}}$	220	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{\text{RMS}} = \frac{I_{\text{pico}}}{\sqrt{2}}$	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	$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$	3000	(RPM) : Revoluciones por minuto

Cuadro 2. 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	$P = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \cdot \cos \phi$	6,3	(W) : Watts
Tensión eficaz	$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}}$	110	(V) : Voltios
Corriente eficaz	$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}}$	0,106	(A) : Amperios
Factor de potencia (coseno de fi)	$\cos \phi$	0,8	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = \text{Sen } \phi \cdot \frac{P}{\cos \phi}$	4,725	(VAr) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	7,875	(VA) : Voltiamperios
Impedancia total RL	$Z_{RL} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$	482,4	(Ω) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	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 total LC	$Z_{LC} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	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	(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	$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$	3000	(RPM) : Revoluciones por minuto
Frecuencia de resonancia	$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$	74,77	(Hz) : Hertz
Denominación	Fórmula	Valor	Unidades
Potencia activa	$P = V_{rms} \cdot I_{rms} \cdot \cos \phi$	17,7	(W) : Watts

4. Discusión

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

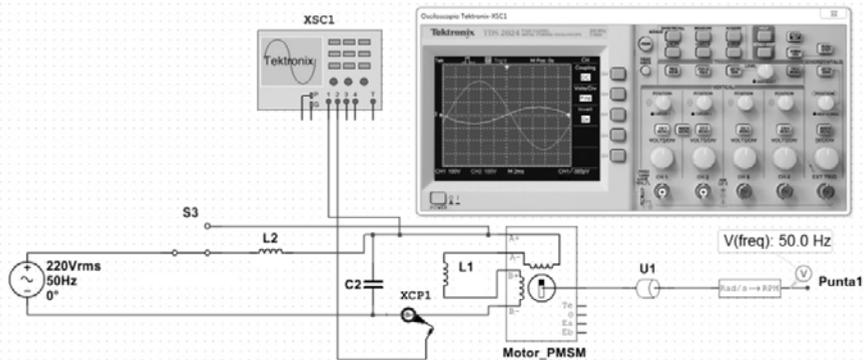


Figura 3. Diseño del circuito LC simulado por software de computadora NI Multisim 14.0, el circuito se enciende y apaga a través del interruptor SPDT (S3), alimentado por una fuente de fem de corriente alterna monofásica de 220 (VAC) y 50 (Hz). Consta de una reactancia capacitiva (C2) y una reactancia 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 (μF) 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 la tensión (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 (Rad/s) a revoluciones por minuto (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

El motor sincrónico tipo PMSM con el acople de un diseño de circuito mecatrónico RL para realizar trabajo mecánico sobre los álabes del rodete de la motor del ventilador centrífugo, que se traduce en velocidad de rotación sobre el mismo y transferirlo como velocidad del fluido aire, trabaja al 100% de su velocidad máxima de 3000 (RPM) con solo 6,3 (Watts), esto es solo el 25,2% de la potencia activa requerida por el motor asíncrono de inducción monofásico o motor de polos sombreados –de los que se utilizan usualmente en refrigeración-, el que necesitó 25 (Watts) para girar a 1690 (RPM), como comparación. Esto resulta una potencia activa 75% inferior, con un 44% de superioridad en velocidad, lo que se resume en un ahorro del 75% 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 asíncrono consumirá 64,8 (Watts), es decir un 90,3% mas potencia activa que la requerida para igualar la misma velocidad del motor sincrónico tipo PMSM; por lo cual el motor sincrónico consume solo el 10% de la energía activa monofásica del motor asíncrono universal AC. Todos con el mismo diámetro de los álabes del rodete y a iguales condiciones de temperatura y presión atmosférica del aire.

6. Referencias

- Aller, J. M. (2008). *Máquinas eléctricas rotativas*. Editorial Universidad Simón Bolívar
- Anderson, I. F. (2019a). Mejoras de eficiencia energética (EE) en los motores monofásicos sincrónicos de 220 (VAC)-50 (Hz), tipo PMSM. *Revista UIS Ingenierías*, 18(4), 57-70. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2019005>
- Anderson, I. F. (2019b). Eco-turbina. Turbo ventilador eléctrico 220 (VAC)–50 (Hz), de bajo consumo: eficiente energéticamente. *IDTS*, 1(1), 1-28. <https://doi.org/10.24215/26838559e001>
- Anderson, I. F. (22-23 de agosto de 2019). *Diseño industrial mecatrónico y eficiencia energética (EE)*. IX Jornadas de Investigación en Disciplinas Artísticas y Proyectuales (JIDAP), Facultad de Bellas Artes, UNLP, La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/80838/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y14
- Anderson, I. F. (13-16 de septiembre de 2022). *1° 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 Projectuales (JIDAP), Facultad de Bellas Artes, UNLP, La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/148463/Documento_completo.-ANDERSON.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Anderson, I. F. (2022b). Energy Efficient Centrifugal Air Extractor for Environments Contaminated With Sars-Cov-2 (Coronavirus). How to Build a Motor That Saves Electricity. *OSF Preprints*, 1-31. <http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/145958/Preprint.v1.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Anderson, I. F. (2023). An Innovative Method to Increase Energy Efficiency of PMSM-Type Synchronous Motors. *IUP Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 16(1), 7-35. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/150750/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Canale, G. (2010). *Manual de diseño para la sustentabilidad*. Diseño Librería Técnica CP67

Canale, G. (25-27 de marzo de 2013). *Aportes de ACV simplificado al diseño para la sustentabilidad. Casos de aplicación industrial*. V Conferencia Internacional sobre Análisis de Ciclo de Vida CILCA 2013, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza

Chapman, S. J. (1987). *Máquinas eléctricas*. (5ª ed.). Mc Graw Hill

Contreras Villamizar, E. F. y Sánchez Rodríguez, R. (2010). *Diseño y construcción de un banco de prácticas en motores eléctricos, como apoyo a la asignatura diseño de máquinas II*. Universidad Industrial de Santander

Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Kusko, A. (1975). *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*. Editorial Hispano Europea

Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Umans, S. D. (2003). *Máquinas eléctricas*. (6ª ed.). Mc Graw Hill

Freile Mora, J. (2008). *Máquinas eléctricas*. (6ª ed.). Mc Graw Hill

Harper, G. (2006a). *El ABC de las máquinas eléctricas II. Motores de corriente alterna*. Grupo Noriega Editores

Harper, G. (2006b). *El ABC de las máquinas eléctricas III. Instalación y control de motores de corriente alterna*. Grupo Noriega Editores

Instituto Tecnológico de Canarias (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. ITC, S.A.

- Mohan, N., Undeland, T. M. y Robbins, W. (2009). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA. Convertidores, aplicaciones y diseño.*(3ª ed.). McGraw Hill
- Resnick, R., Halliday, D. y Krane, K. (2007). *Física.* (6ª ed., Vol 2). Grupo Editorial Patria
- Sears, F. W. y Zemansky, M. W. (2009a). *Física Universitaria.* (12ª ed., Vol. 1). Pearson Educación
- Sears, F. W. y Zemansky, M. W.(2009b). *Física Universitaria con Física Moderna.* (12ª ed., Vol. 2). Pearson Educación
- Serway, R. y Jewett, J. W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna II.* (7ª ed.). Cengage Learning Editores
- Soler & Palau (2009). *Manual práctico de ventilación.* Editorial S&P
- Subsecretaría de ahorro y eficiencia energética (2017). *Guía de eficiencia energética para motores eléctricos.* Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación
- Tipler, P. A. y Mosca, G. (2006). *Física para la ciencia y la tecnología.* (5ª ed.). Editorial REVERTÉ
- Vargas-Machuca Saldariaga, F. (1990). *Máquinas eléctricas rotativas.* Ediciones Megaprint. https://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28690/maquinas_electricas_rotativas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Tesla, N. (1887). Electro-magnetic motor (Patente USA, N° US381968A). United States Patent Office
- Thompson, S. P. (1895). *Polyphase electric currents and alternate current motors.* E. & F. N. Spon
- Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia.* (6ª ed.). Pearson Educación

