



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

Ibar Federico Anderson.
Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Bellas Artes.

Resumen

El producto es un extractor de aire centrífugo, que resuelve el problema de los ambientes viciados de SARS-CoV-2 o Covid-19 (Coronavirus), pensado para su uso civil y comercial, funciona con un motor de corriente alterna (AC) monofásica de 220 (V) y 50 (Hz), de alta eficiencia energética (EE). Desarrollado bajo la metodología del Design Thinking, por simulación electromecánica por software NI Multisim 14.0, diseño de la carcasa por CAD por software Cfturbo 2020 R2.0; con un prototipado del bobinado del estator convencional de un motor sincrónico con un devanado de campo dos polos de tipo PMSM/IPM monofásico de corriente alterna (AC) y un rotor de imanes de cerámica ferromagnética de 4000 (Gauss). Innovando en la línea n° 15 de la patente del invento n° 381.968 de Nikola Tesla, 1/5/1888.

Corresponde al trabajo desarrollado adentro del Proyecto B374 radicado en la SCyT-FBA-UNLP, cuyo título es: “*Gestión integrada de Diseño e Innovación. Contribuciones para una revisión teórico-conceptual y metodológica*” a cargo del Director: Mg. D.I. Federico del Giorgio Solfa. En el año 2021, el proyecto participó del Concurso Nacional INNOVAR de la Agencia nacional de I+D+i y el MINCYT de la Nación habiendo ganado el 1º puesto es Proyectos: Covid-19.

Palabras clave: Extractor centrífugo, SARS-CoV-2, eficiencia energética, motor sincrónico PMSM/IPM, AC monofásica.

Introducción

Según la campaña oficial "Ventilar" establecida por el gobierno nacional; se recomienda siempre ventilar de manera continua para evitar el contagio del virus SARS-CoV-2 (Coronavirus). Las normas internacionales para ambiente cerrados establecen la necesidad de 12,5 (litros/segundo) de aire exterior fresco por persona; también hacer funcionar los sistemas HVAC (Siglas en inglés: *Heating, ventilation, and air conditioning*) en los edificios que exista (los sistemas deben funcionar desde 2 horas antes con el mayor recambio de aire exterior y hasta 2 horas después de que se ocupe el edificio) y utilizar extractores de aire para remover el virus por desplazamiento del aire hacia el exterior. Más recomendaciones sobre la ventilación y Covid-19 en la industria, se encuentran en otros sitios web oficiales como el Ministerio de Trabajo de la Nación.

Por otro lado, este trabajo de ventilación del aire viciado de Covid-19, se lo realiza con eficiencia energética. La relevancia que posee este tema queda claramente plasmado en la página web de la Secretaría de Energía de la Nación, donde existe un apartado especial para la eficiencia energética (EE).

Ideación de la innovación (hipótesis de diseño por abducción)



Primero se realizó una simulación electromecánica utilizando el software NI Multisim 14.0, tomando en cuenta diferentes variables y factores de diseño electrónico, luego se diseñó la carcasa mediante CAD (Computer-Aided Design) utilizando el software Cfturbo 2020 R2.0 más el complemento de software gratuito y rápido de creación de prototipos 3D para la impresora 3D OverLord Pro. En esta etapa de ideación, el maquetado con impresora 3D y software CAD, es posterior al dibujo y previo al prototipo convencional o tradicional. Luego de su simulación en tres dimensiones (3D), se procedió a la construcción física del producto y sus partes.

La idea central de la innovación tecnológica (I+D+i) de Eficiencia Energética (EE), está inspirada en la línea n° 15 de la patente de invención n° 381.968 del ingeniero eléctrico Nikola Tesla, del 1 de mayo de 1888 (inventor del sistema de corriente alterna que hoy en día se utiliza en todo el mundo), en efecto como se cita en el punto n° 15 de la citada patente: *“15: Tal solución, principalmente, exige una uniformidad de velocidad en el motor independientemente de su carga dentro de sus límites normales de trabajo”* (Tesla, 1887: US381968A).

Pero la patente de la invención, aquí se innovó, no en motores de inducción asincrónicos convencionales (como propuso originalmente Tesla), sino en motores síncronos tipo PMSM/IPM (Permanent Magnet Synchronous Motor/Interior Permanent Magnet); para aumentar la eficiencia energética (EE) del rendimiento del motor sin necesidad de utilizar electrónica compleja como los variadores de frecuencia (VDF) o variadores de velocidad utilizados frecuentemente en los motores de inducción. El secreto del invento no se muestra en las fotos del motor síncrono PMSM/IPM de bajo consumo energético y alta Eficiencia Energética (EE) para la reivindicación acorde a la Ley de Patentes N° 24481 modificada por su similar N° 24.572 (T.O. 1996) y su Reglamentación; para preservar la novedad y no divulgación previa.

La máquina síncrona es un convertidor de energía electromecánico, con una parte giratoria denominada rotor formada por un devanado inductor, cuya bobina puede ser excitada inyectando una corriente continua (pero en este caso el campo magnético generado por el devanado interior del rotor fue reemplazado por imanes permanentes de ferrite), y una pieza fija denominada estator o armadura cuyas bobinas forman el devanado de armadura, por donde circula una corriente alterna de 220 (Voltios) y 50 (Hertz). El devanado del inducido se inserta dentro del estator, que está hecho de láminas de acero al silicio (un material ferromagnético). Las corrientes alternas que circulan por los devanados del estator producen un campo magnético giratorio que gira en el entrehierro de la máquina con la frecuencia angular de las corrientes de armadura. Por eso esta máquina se llama síncrona; el rotor gira mecánicamente a la misma frecuencia que el campo magnético giratorio del estator durante la operación en estado estable. Las máquinas síncronas, aunque se usan principalmente como generadores de CA, también se pueden usar como motores de CA (y son muy eficientes). Una máquina síncrona es una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna cuya velocidad de giro en régimen permanente está ligada a la frecuencia de la tensión en los terminales y al número de pares de polos.

El problema de la variación de velocidad se ha resuelto alterando el “control escalar” de la Ley de Mando; es decir, manteniendo la relación voltaje/frecuencia (voltios/hercios) no-constante. El principio se resolvió por medios electromecánicos, físicamente más resistentes al trabajo y con menor generación de armónicos que un diseño electrónico con Triac. Lo cual constituye un estudio previo al desarrollo de otro prototipo, antecedente de este desarrollo, donde se analizó el uso de la electrónica.

Cómo los motores producen par debido al flujo en su campo giratorio. Cuando opera por debajo de su velocidad base, el par se entrega manteniendo constante la relación voltaje/frecuencia (voltios/hertz) aplicada al motor. Esto es lo que hacen los variadores



de frecuencia (VFD) para regular la velocidad mientras se mantiene el par. Entonces, si la velocidad del motor se reduce, porque el voltaje cae, la frecuencia debe caer para que la relación voltaje/frecuencia permanezca constante. Si la relación Volts/Hertz aumenta al reducir la frecuencia para reducir la velocidad del motor, la corriente aumentará y se volverá excesiva. Si, por el contrario, se reduce la relación Voltios/Hertz aumentando la frecuencia para aumentar la velocidad del motor, se reducirá la capacidad de par. Esto se conoce como control escalar (V/Hz) en variadores de velocidad o variadores de frecuencia (VFD),

Pero en el diseño aquí propuesto, la relación Volts/Hertz no es constante y reiteramos que la disminución de torque no afecta el normal funcionamiento y/o trabajo del motor; por el contrario, reduce las vibraciones, los decibeles (no medidos), y en consecuencia el aumento de temperatura de las partes y/o partes mecánicas de la máquina eléctrica debido a la transformación de la energía electromecánica en energía térmica. Lo que redundará en una mejora de la Eficiencia Energética (EE).

Como el motor opera con una carga ligera (fluido aire), la relación Volts/Hertz se puede reducir para minimizar la corriente del motor, y debido a que se aplica un voltaje más bajo, la corriente de magnetización se reduce y, en consecuencia, se produce una corriente más alta. El menor torque aún es tolerable por el motor.

Como se indicó, si se reduce la relación Voltios/Hertz (V/Hz) al aumentar la frecuencia para aumentar la velocidad del motor, se reducirá la capacidad del par. Efectivamente, aunque el par motor disminuyó, lo verdaderamente sorprendente es que para la carga (hélices conectadas al eje del motor) la velocidad de rotación (RPM) de los seis (6) álabes conectados al eje del rotor no disminuyó (verificando lo que afirmaba Nikola Tesla en la línea n° 15 de su patente: US381968A de 1887); por lo tanto, la capacidad de realizar trabajo mecánico (Joules) sobre el aire fluido no disminuyó. Esta es la innovación en Eficiencia Energética (EE) en el motor.

Esta innovación requirió tener en cuenta los principios físicos y las leyes fundamentales como la Ley de Ohm, la Ley de Faraday y otras leyes en corriente alterna por citar algunos ejemplos que representan conceptos clásicos de la electricidad y el magnetismo.

Atento a la amplia bibliografía específica en el enfoque de las problemáticas medioambientales y en la denominada "huella de carbono". De los siete (7) niveles de la Rueda Estratégica del Ecodiseño abordadas por el Ing. Guillermo Canale, imposibles de enumerar y profundizar en detalle -una por una- en este estudio; sobre la que se ha decidido el enfoque central es en el nivel de estructura del producto y la reducción del impacto durante el uso y el menor consumo de energía activa monofásica de 220 (voltios) y 50 (hertz) disponible en el sistema de distribución de la red eléctrica doméstica y comercial (no industrial trifásica).

Dado que el motor funciona con una carga ligera (fluido aire), la relación Volts/Hertz se puede reducir para minimizar la corriente del motor; y debido a que se aplica un voltaje más bajo, es posible reducir la corriente de magnetización y, en consecuencia, producir un par menor que aún es óptimo para el funcionamiento normal del motor (llevándolo al límite de sus capacidades físicas operables como lo describía en su patente Nikola Tesla).

Es por ello, con el objetivo de obtener un atenuador de onda de tensión (Voltios) e intensidad de corriente (Amperios), que funcione como limitador de la corriente eléctrica a la vez que un filtro EMI (ElectroMagnetic Interference) de tipo paso-bajo (LPF); el circuito de Eficiencia Energética (EE) fue diseñado con elementos pasivos cuya topología es inductivo-capacitiva: LC.



En el diseño que aquí se propone, el inductor “L” está conectado en serie y el capacitor “C” está conectado en paralelo”, formando un diseño LC para el filtro de paso bajo, que reduce la ondulación del rizo en la tensión de salida y produce una caída de la tensión promedio (V_{avg}) de entrada.

La innovación aquí radica en que el análisis de circuitos de filtros lineales de primer orden tiene una frecuencia de corte ($\omega_c=1/LC$) del tipo inductivo-capacitivo que funciona por analogía a uno resistivo-capacitivo, o sea ($\omega_c=R/L$). Ya que podemos suponer que en el inductor la reactancia-inductiva opera simultáneamente como una resistencia que reduce el flujo de corriente eléctrica (Amperios) con la consecuente caída de voltaje (Voltios) de la salida a la carga y como un tanque de almacenamiento de energía en la forma de un campo magnético que se devuelve a la red para su consumo; mientras que en el capacitor la reactancia-capacitiva almacena la energía en forma de campo eléctrico, ambos circuitos lineales filtran los armónicos presentes en la onda sinusoidal de la corriente alterna. Esta es la hipótesis por abducción de Peirce-Samaja.

La importancia de utilizar una reactancia inductiva tiene un doble significado: (a) como componente pasivo del filtro de paso bajo (LPF), ya que reduce la ondulación del rizo en la tensión de salida actuando como filtro de armónicos y posteriormente; (b) produce una caída de la tensión promedio (V_{avg}) de entrada, es decir produce una caída de voltaje de 220 (Voltios) a 110 (Voltios), lo que en el cálculo de la fórmula de potencia activa producirá una caída en la potencia del motor (sin pérdida de revoluciones por minuto ni de velocidad del motor). Es decir, sin afectar su capacidad de realizar trabajo mecánico (Joules).

Etapas de fabricación del prototipo

Según NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos), el motor síncrono que decidió construirse es del tipo PMSM/IPM con imanes cerámicos insertados tangencialmente en el rotor. Los imanes son de ferrita cerámica con un campo magnético de 2.000 a 4.000 (Gauss) o de 0,2 a 0,4 (Tesla), los más económicos del mercado; interactuando con un estator de 256 (Ω) de impedancia (Z).

Las actividades realizadas para la construcción del prototipo fueron: (a) acoplar un motor síncrono o autoexcitado tipo PMSM/IPM obtenido del rotor-estator de una electrobomba de lavavajillas de 65 (watts) de potencia nominal; conectándolo a (b) los seis álabes radiales del impulsor obtenido de un rotor de un motor asíncrono de polos sombreadas (de espira de frager o espira en cortocircuito) de un secador de cabello. En esta etapa experimental preliminar, sólo se pensó en obtener un prototipo experimental (comprobable), antes de obtener un producto mínimo escalable para su producción industrial para uso comercial-monofásico.

El control que se logra con el diseño de un circuito LC que consiste en una reactancia capacitiva y una reactancia inductiva son las encargadas de procesar la expresión binomial de la impedancia ($Z=A+jB$). La reactancia capacitiva se obtiene de un capacitor de 3 (μF) conectado en paralelo a las dos fases de la fuente de fem (fuerza electromotriz) monofásica de corriente alterna (CA) de 220 (V) y 50 (Hz) y cuya función es la corrección del factor de potencia (\cos de ϕ). La inductancia se obtiene de una bobina de 48 (Ω) conectado en serie a una de las fases de la fuente de fem (fuerza electromotriz), cuya función es limitar el paso de corriente o intensidad (Amperios) que pasa a través de él (debido a su reactancia inductiva), para que el funcionamiento del motor sea correcto (filtrando simultáneamente los armónicos de la corriente).

Finalmente, se completó el prototipado convencional de un motor síncrono monofásico de corriente alterna (AC) de 220 (Voltios) y 50 (Hz) de 2 polos PMSM/IPM con una voluta fabricada en material compuesto GFRP (Glass-Fiber Reinforced Plastic), y seis (6)



aspas de 105 (mm) de diámetro, con las dimensiones exactas de un ventilador de microondas.

Por tanto, la invención pertenece al campo técnico del control de arranque en motores eléctricos PMSM/IPM y proporciona un método para que el sistema-motor controle el arranque de los álabes radiales exteriores del ventilador centrífugo/extractor de aire y su posterior eficiencia energética (EE).

El método de arranque incluye: (1) un arranque a potencia nominal del motor de 17.7 (Watts) de potencia activa y, (2) un paso al filtro EMI-LC activado por el interruptor SPDT a 6.6 (Watts) de potencia activa en total que conforman el conjunto RLC (condensador + bobina inductora + estator motor).

Resultados y discusión.

Etapa de prueba o testeo.

La carga sobre el eje del motor son los álabes centrífugos, cuyo valor se expresa en ω , que es la velocidad angular medida en radianes/segundo: 314,159 (rad/s). Equivalente a 3000 revoluciones por minuto (RPM) obtenidas por el convertidor de (rad/s) a (RPM). Dichos 3000 (RPM) corresponden a una frecuencia de 50 (Hz).

La fórmula de la potencia activa media (P_{med}), en un circuito general RCL de corriente alterna (AC) es igual al producto de la tensión efectiva (V_{rms}), por la intensidad efectiva de la corriente eléctrica (I_{rms}), multiplicada por la factor de potencia o $\cos \phi$: $\cos(\Phi)$. Luego, considerando la estabilidad de la frecuencia (Hertz) de la corriente alterna (AC), que en la República Argentina es de 50 (Hertz), lo que asegura un giro constante a 3000 RPM (revoluciones por minuto) del eje del motor.

Cálculo con el que se obtienen los datos constantes de las revoluciones por minuto (r/min o RPM), según la frecuencia de la corriente en la República Argentina: $n_s = 120,50$ (Hz) / 2 = 3000 (r/min), o 3000 (RPM). El rotor, a diferencia de las máquinas asíncronas, gira sin deslizamiento a la velocidad del campo giratorio.

Las 3000 (revoluciones/minutos) o 3000 (RPM), como se indicó anteriormente, es consecuencia de la frecuencia de la corriente alterna (AC). Como el motor es de tipo PMSM; los polos (norte-sur) de los imanes del rotor están alineados con los polos (sur-norte) del estator (por donde circula la corriente alterna monofásica), siguiendo sincrónicamente la velocidad de rotación.

Anteriormente habíamos argumentado que el motor centrífugo presentado aquí no disminuye sus revoluciones por minuto (RPM) del rotor, cuando se reduce el consumo de energía activa; disminuyendo la potencia activa (Watts), ergo: su consumo de energía activa (kWh) disminuye. Pero se había notado que no sucedía lo mismo con el torque, ya que éste desciende al límite mínimo, sin afectar la capacidad de las palas del rotor para realizar un trabajo mecánico (Joules) sobre el aire.

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la unidad de torque (también llamada: par motor) es la cantidad física: Newtons.metros (abreviado: N.m). El par es el momento de una fuerza ejercida sobre el eje de transmisión de potencia (rotor). Según ciertos autores, por la fórmula del poder de rotación sabemos que: " $P = \tau \cdot \omega$ " (Tipler-Mosca, 2006:265).

Donde cada símbolo algebraico significa:

P , es la potencia (medida en Watts).

τ , es el par motor (medida en N.m). Representada por la letra del alfabeto griego: tau.

ω , es la velocidad angular (mediada en rad/s). Representada por la letra del alfabeto griego: omega.

En ambas situaciones (sin reactancia inductiva y con reactancia inductiva conectada en serie a una de las fases), la velocidad angular ω (representada por omega), o velocidad



de rotación medida en radianes/segundo (rad/s) es la misma: 314.159 (rad/s). Equivalente a 3000 (RPM) obtenido por la frecuencia de corriente alterna de 50 (Hz). Como los motores producen el torque debido al flujo en su campo rotatorio. Cuando se opera por debajo de su velocidad base el torque se lleva a cabo manteniendo constante la relación tensión/frecuencia (Volts/Hertz) que se aplica al motor. Esto es lo que hacen los VDF (Variadores de Frecuencia) para regular la velocidad, manteniendo el torque. Por lo que si la velocidad del motor se reduce, porque desciende la tensión; la frecuencia debe bajar para que la relación tensión/frecuencia se mantenga constante y no se sature el núcleo del motor generando distorsión armónica (THD).

Los motores de tipo PMSM proporcionan una rotación de eje a una velocidad fija en sincronía con la frecuencia de la fuente de alimentación independientemente de la fluctuación de la carga mecánica –mayor o menor- que produce par resistente. La tensión (voltios) e intensidad (amperios) de la corriente descienden cuando actúa la reactancia inductiva (Z_1) junto con el capacitor (C_1); y de todos modos, el motor funciona a una velocidad de sincronismo, siempre que la frecuencia de la red sea constante, en este caso 50 (Hz) para cualquier par de torsión hasta el límite de funcionamiento del motor.

Este efecto conjunto se logra por el trabajo combinado de la impedancia (Z_1) en serie con una fase más el capacitor (C_1) en paralelo con las dos fases.

Un inductor perfecto no generaría pérdidas por efecto Joule, limitando la corriente a través del inductor sin generar rendimientos más bajos. En realidad, un inductor tiene cierta resistencia interna, y consecuentemente las pérdidas por efecto Joule se minimizan pero no se eliminan.

La impedancia (Z) es una medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica una tensión. La impedancia extiende el concepto de resistencia a los circuitos de corriente alterna (CA), y posee tanto magnitud como fase, a diferencia de la resistencia, que solo tiene magnitud. Cuando un circuito es alimentado con corriente continua (CC), su impedancia es igual a la resistencia, lo que puede ser interpretado como la impedancia con ángulo de fase cero.

Por definición, la impedancia (Z) es la relación (cociente) entre el fasor tensión y el fasor intensidad de corriente.

En electrónica y electrotecnia se denomina reactancia a la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores (bobinas) y condensadores (capacitores), se mide en ohmios y su símbolo es (Ω). Junto a la resistencia eléctrica determinan la impedancia total de un componente o circuito, de tal forma que la reactancia (X) es la parte imaginaria de la impedancia (Z) y la resistencia (R) es la parte real.

Cuando la reactancia (Z_1) inductiva $Z=48 (\Omega)$ se activa con la llave (S_3), dicha reactancia es la encargada de procesar la expresión binómica de la impedancia ($Z=A+jB$); donde ($A=Resistencia$) es la parte real, (j) es la unidad imaginaria y donde ($B=X$) es la reactancia en ohmios, hace que la tensión en la entrada al motor caiga de 220 (V) a 97 (V) y la corriente descienda de 0.6 (A) a 0.105 (A). Pero la velocidad de sincronidad del eje del motor conectado a los seis (6) álabes radiales del rodete no pierden velocidad. Lo cual demuestra la eficiencia energética (EE).

La incorporación de la reactancia inductiva (Z_1) en una de las fases, lo cual ha mejorado el factor de potencia o coseño de ϕ , de 0.22 a 0.41 y sin el capacitor (C_1) (lo cual significó un aumento considerable o mejoría de la eficiencia energética). Con el capacitor conectado este valor sube de 0.17 a 0.81 y todavía se puede mejorar más aproximándonos a 0.99 cambiando el capacitor a 2.5 (μF).

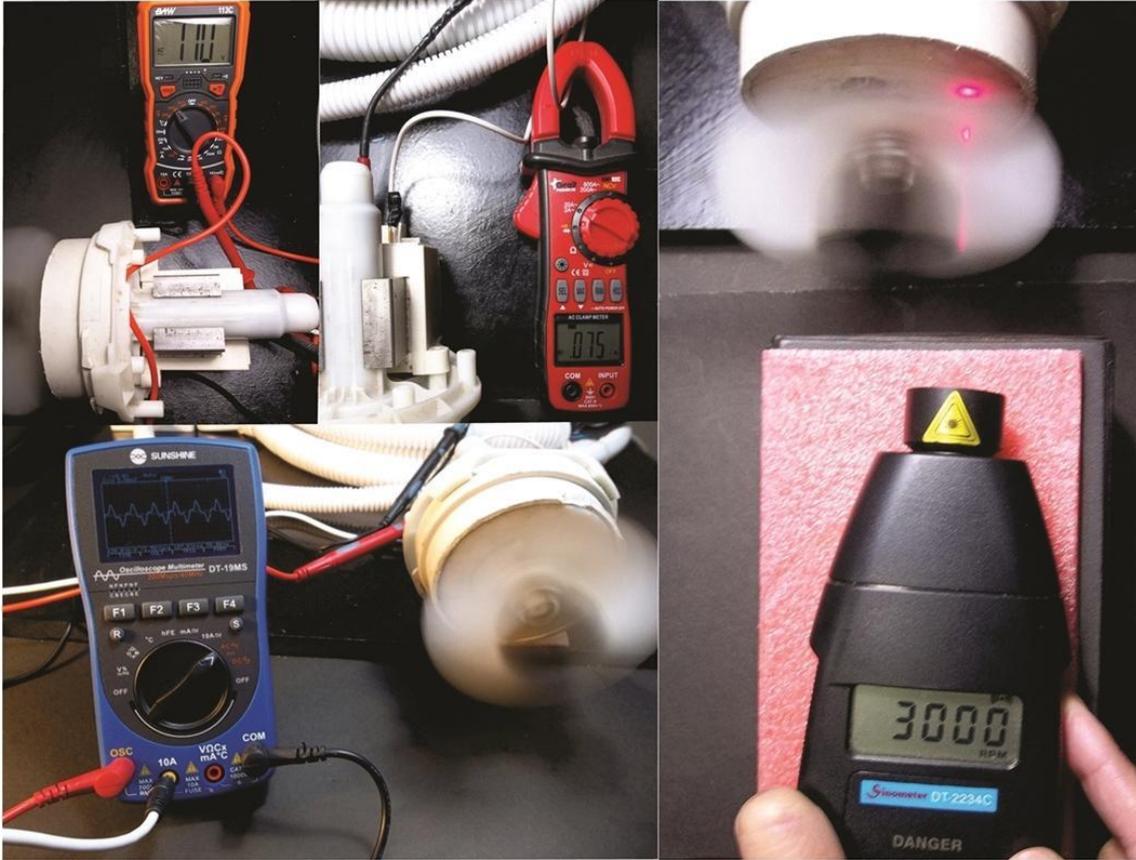
(voltímetro) apagado. Fuente: elaboración propia. A la derecha, testado del circuito de eficiencia energética (EE) encendido. Potencia activa 6,3 (watts) en todo circuito R-C-L.

Arriba la derecha, factor de potencia (f.d.p.) equivalente a 0.81 (coseno Φ). Fuente: elaboración propia.



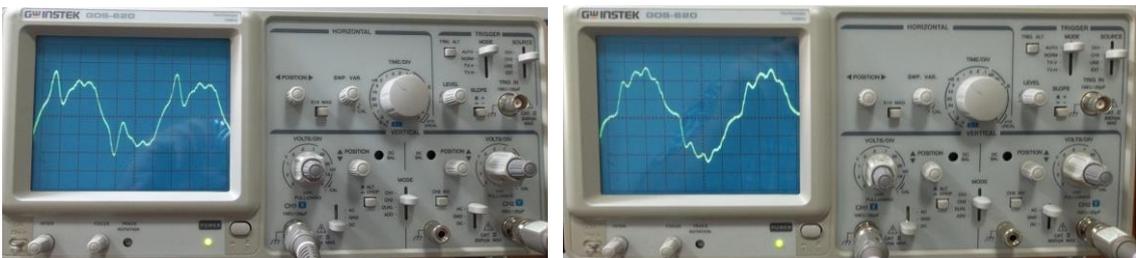
Figuras 1 (a) y 1 (b): Foto del Premio INNOVAR 2021, 1er Puesto Proyectos Covid-19 junto al proyecto Turbo y el banco de pruebas.

El testeo se realizó en un banco de pruebas, diseñado para tal efecto, con dos (2) osciloscopios –uno analógico y otro digital portátil- para observar y medir cuantitativa y cualitativamente la forma de onda (distorsión armónica de la señal: THD), un multímetro digital medidor de señal de onda de tensión AC pico-a-pico (Voltiosp-p), verdadero valor eficaz o (en inglés: True RMS) de la tensión media (en inglés: average, AVG) o tensión promedio (Vavg). Un frecuencímetro medidor de oscilación de corriente alterna (Hertz), una pinza amperométrica medidora de amperios (A) en AC, un cófímetro medidor del factor de potencia: coseno de ϕ ($\cos \Phi$). Un vatímetro medidor de potencia activa en vatios (Watts), un power-meter medidor de la energía activa en kilowatts-hora (kwh) y un fototacómetro láser medidor de la velocidad rotacional de los álabes del rotor en revoluciones por minutos (RPM).



Figuras 2 (a), 2 (b), 2 (c) y 2 (d). Motor sincrónico tipo PMSM/IPM 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.

En el osciloscopio la señal de onda es perfectamente sinusoidal cuando no está conectado al sistema de Eficiencia Energética (EE). No se observan presencia de armónicos (THD). Tensión pico 600 (*voltios_{pico}*) y 216 (V_{rms}), 50 (Hz). El equipo básico utilizado para análisis de voltajes y corrientes no sinusoidales es el osciloscopio, la gráfica de la forma de onda en el osciloscopio proporciona una información cuantitativa inmediata acerca del grado y tipo de distorsión; algunas veces los casos de resonancia son identificados a través de las distorsiones visibles que están presentes en las formas de ondas de voltaje y corriente. No se observa distorsión armónica.





Figuras 3 (a) y 3 (b). Para la observación de la distorsión armónica (THD) de la corriente alterna, aguas arriba del circuito RL de eficiencia energética se utilizó un transformador reductor de AC y sin filtrado a la salida de la reactancia capacitiva-inductiva. En la imagen de arriba del osciloscopio se observa la forma de onda sin filtrado, en la imagen de abajo se observa la forma de onda filtrada con un filtro EMI (ElectroMagnetic Interference) de tipo paso-bajo (LPF) con elementos pasivos. El factor de cresta (CF) es una indicación de armónicos causado por la carga no-lineal conectada al control de potencia de la reactancia-inductiva en serie a una de las fases, lo que demanda una corriente distorsionada o no-senoidal. Para una medición de corriente y voltaje, el valor de factor de cresta es $(CF)=1.9$. Fuente: elaboración propia.

El prototipo resuelve el problema de la carga no-lineal en electricidad y de la eficiencia energética en la reducción de la potencia activa y consumo de energía activa monofásica (kwh) atenuando la generación de armónicos. La calidad de energía consumida es buena debido a una baja distorsión armónica y un factor de potencia (coseno de ϕ) cercano a la unidad (0.99), donde se limita la corriente armónica a THDv (armónicos de tensión) $<5\%$ (situación normal) y THDi (armónicos de corriente) $<10\%$ (situación normal) inmediatamente aguas arriba del punto de instalación o punto de acople común (PCC) según la Norma IEEE 519.



Figuras nº 4 (a), 4 (b) y 4 (c). A la izquierda, vista del frecuencímetro encendido indicando los 50 (Hertz) de la corriente alterna (AC), junto al multímetro digital

Conclusiones

Por lo que, a partir de los resultados experimentales, se observa que se pueden desarrollar ventiladores centrífugos que ahorren energía eléctrica (kwh) sin necesidad de recurrir a: (a) la “Ley de afinidad de los ventiladores”, ni (b) al uso de variadores de velocidad (VDF) o frecuencia. Lo cual traería un enorme ahorro mundial del gasto de energía eléctrica con una tecnología más sencilla, aunque rudimentaria y limitada; pero efectiva, económica, rústica (electromecánica y no electrónica) y resistente a condiciones extremas de trabajo. Obteniendo ahorro económico en el gasto energético (kwh).



En efecto, 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) para un motor a-síncrono con una potencia de 19 (Watts) a 1690 (RPM) de velocidad de los álabes del rodete requeriría 106 (Watts) de potencia para igualar las 3000 (RPM) del motor síncrono de tipo PMSM/IPM como el utilizado en este experimento. Es decir que normalmente cualquier motor a-síncrono de inducción monofásico de refrigeración requeriría 16,8 veces más potencia para igualar a este diseño de alta eficiencia energética.

La potencia absorbida por un ventilador con motor a-síncrono varía con el cubo de su velocidad. 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) puesto que al reducir 23,7% la velocidad de giro de las aspas del ventilador centrífugo (medido en revoluciones por minutos), la potencia mecánica (medida en vatios) suministrada al ventilador se reduce un 56%.

Dado que en el motor a-sincrónico convencional (de inducción monofásico) la velocidad de giro de las aspas se debería reducir un 23,7% para una reducción del 56% de la potencia activa (Watts) del motor; aquí no se reduce la velocidad debido a que el motor es síncrono y conserva las 3000 (RPM) como consecuencia de la frecuencia de la corriente alterna: 50 (Hz).

Por eso decimos que el prototipo experimental aquí presentado es energéticamente más eficiente (EE), porque realiza más trabajo mecánico (Joules) sobre los álabes del rodete en el fluido aire, con menor potencia (Watts) consumiendo menos energía eléctrica (kilowatts-hora) que el motor a-síncrono sin escobillas (de tipo frager o de inducción convencional utilizados en equipos ventiladores/extractores centrífugos de aire) pero a mayores revoluciones por minuto (RPM) que los motores convencionales a-síncronos utilizados en los equipos de ventilación, extractores y sopladores. La ventaja es doble. Reiterando que, mientras la potencia activa (vatios) disminuye y el consumo de energía activa medido en kWh (kilovatios-hora) también disminuye, no ocurre lo mismo con su velocidad de trabajo (como suele ocurrir con cualquier extractor/forzador de aire centrífugo convencional conectado a un motor asincrónico).

De las conclusiones experimentales, evidentemente el motor síncrono tipo PMSM/IPM no pierde velocidad -ya que trabaja al 100% de su velocidad máxima de 3000 (RPM)- con solo el 35,6% de su potencia activa máxima, utilizando solo 6,3 (Watts) de los 17 nominales con los que opera- aunque está construido para trabajar hasta un límite operativo de 50 (Watts)-. Por lo que podemos asegurar que el motor síncrono ahorra un 67% de energía activa (kWh), realizando 56% más trabajo mecánico sobre el fluido aire con la misma potencia activa (Watts).

El motor presenta una caída en la potencia nominal del motor de 17,7 (Watts) con el circuito de Eficiencia Energética (EE) “apagado”, al “encenderlo” se redujo a 6,3 (Watts), en el total del circuito RCL. Sin perder velocidad en la rotación del rotor (6 álabes radiales); es decir, sin disminuir la capacidad de realizar trabajo mecánico (Joules) sobre los álabes de la turbina centrífuga. Es lo que se conoce como eficiencia energética (EE). No existe alteración armónica de la frecuencia de 50 (Hz), ya que el diseño electromecánico del filtro pasivo paso bajo “LC” actúa en un doble sentido como: (a) un reductor de tensión produciendo una caída de la misma de 220 (Voltios) a 110 (Voltios) y de la corriente de 0.45 (Amperios) a 0.1 (Amperios) elevando el factor de potencia de 0.17 ($\cos \Phi$) a 0.81 ($\cos \Phi$) lo que en el cálculo de la fórmula de potencia activa producirá un caída en la potencia del motor (sin pérdida de RPM o velocidad del rotor); es decir, sin afectar su capacidad de realizar trabajo mecánico (Joules). Mientras tanto, la potencia activa (vatios) y el consumo de energía medido en kWh (kilovatios-hora)



disminuyen el 56%, sin caída de las revoluciones por minuto (RPM) de los álabes centrífugos conectados al eje del rotor sincrónico y (b) como un reductor de la ondulación del voltaje de salida o filtro paso-bajo (LPF) de interferencia electromecánica (EMI) permitiendo que los valores de la distorsión armónica total se mantengan en: $THD_v < 5\%$ (situación normal) y $THD_i < 10\%$ (situación normal), acorde a la norma IEEE 519. Reduciendo el ripple en el voltaje de salida actuando como un filtro armónico Por lo que el motor síncrono de tipo PMSM/IPM con el control de reactancia-inductiva en serie con capacitor en paralelo reduce un 67% la potencia activa (Watts) y ceteris paribus: el consumo de energía activa (kWh). Realizando 56% más trabajo mecánico (Joules) sobre el fluido aire (con una reducción del 50% de la huella de carbono). La propuesta de valor agregado viene de la mano de la Eficiencia Energética (EE), lo que determina la reducción de la «huella de carbono»; donde se paso de consumir 202 (kwh) al año equivalente a 0,1 toneladas de CO₂ a 97 (kWh) al año equivalente 0.05 toneladas de CO₂ (lo cual significa una reducción del 50% de la huella de carbono) que nuestro desarrollo del prototipo deja sobre el Planeta Tierra (a la pequeña escala del prototipo experimentado). Por lo que la relación con la huella de carbono es directamente proporcional a la potencia del motor y a futuros prototipos de mayor potencia.

Agradecimientos

Al D.I. Federico del Giorgio Solfa por incluirme en el Proyecto B374 de la SCyT-FBA-UNLP. Al Ing. Guillermo Canale y la D.I. Rosario Bernatene por haber sido mis Profesores en Investigación y el Posgrado de “*Ecodiseño*” en la FBA-UNLP. A Pablo Ungaro y Ana Bocos del LIDDI del Departamento de Diseño Industrial por sus sabios consejos. A todos mis excolegas de la Cátedra de Integración Cultural 1 por el acompañamiento siempre incondicional. A Silvia Garcia por su gestión en Ciencia y Técnica, y obviamente a los Decanos Daniel Belinche y Mariel Ciafardo por sus políticas no solo de CyT, sino de Posgrado, con los cuales me doctoré. El premio del Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación les pertenece más a los citados, que a mi persona.

Referencias bibliográficas

- Tesla, N. “Electro-magnetic motor”, US 381968A, 12-oct-1887. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US381968A/en?q=tesla+381968>
- Anderson, IF. “Mejoras de eficiencia energética (EE) en los motores monofásicos sincrónicos de 220 (VAC)/50 (Hz), tipo PMSM”. En *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, Issue 4, pp. 57-70, 2019. Doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n4-2019005> [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/9300/9869>
- Anderson, IF. (2019). “Eco-turbina. Turbo ventilador eléctrico 220 (VAC)–50 (Hz), de bajo consumo: eficiente energéticamente”. En *Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social*, vol. 1, Issue 1, pp. 1-28, 2019. Doi: <https://doi.org/10.24215/26838559e001> [En línea]. Disponible en: <https://revistas.unlp.edu.ar/IDTS/article/view/6270/7812>
- Aller, J. M. (2008). *Máquinas eléctricas rotativas*. Caracas: Editorial Universidad Simón Bolívar. [En línea]. Disponible en: <http://prof.usb.ve/jaller/Maquinas1.pdf>
- Chapman, S. J. (1987). *Máquinas eléctricas* (5º Edición). México: Mc Graw Hill. [En línea]. Disponible en: https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf