

Diseño industrial y electromecánico de un
**extractor de aire
centrífugo de alta
eficiencia energética**
para ambientes con Covid-19



Desarrollo de un extractor de aire para ambientes con covid-19

Development of an air extractor for environments with covid-19

RESUMEN

El producto es un extractor de aire centrífugo, cuyo objetivo es extraer el aire viciado de SARS-CoV-2 o covid-19 (coronavirus); pensado para su uso civil y comercial. Este funciona con un motor de corriente alterna (AC) monofásico 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 software CAD Cfturbo 2020 R2.0 y prototipado rápido 3D con la impresora OverLord Pro; 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.º 15 de la patente del invento n.º 381 968 de Nikola Tesla, 1/5/1888.

Los resultados mostraron, según el análisis del banco de pruebas, que el motor síncrono de tipo PMSM/IPM utilizado en el extractor centrífugo, con la innovación del control de reactancia-inductiva en serie más el capacitor en paralelo, reduce un 67 % la potencia activa (watts) y 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). Lo cual nos lleva a la siguiente conclusión: se pueden desarrollar ventiladores centrífugos que ahorren energía eléctrica (kWh) sin necesidad de recurrir a (1) la «Ley de afinidad de los ventiladores», ni (2) al uso de variadores de velocidad (VDF) o frecuencia (que son dispositivos con una electrónica compleja y costosa). Lo cual traería un enorme ahorro del gasto de energía eléctrica.

ABSTRACT

The product is a centrifugal air extractor, whose objective is to extract the stale air of SARS-CoV-2 or Covid-19 (Coronavirus); designed for civil and commercial use, it works with a single-phase alternating current (AC) motor of 220 (V) and 50 (Hz), with high energy efficiency (EE). Developed under the Design Thinking methodology, by electromechanical simulation using NI Multisim 14.0 software, case design using Cfturbo 2020 R2.0 CAD software, and rapid 3D prototyping with the OverLord Pro printer; with a prototype of the conventional stator winding of a synchronous motor with a two-pole PMSM/IPM single-phase alternating current (AC) field winding and a 4000 (Gauss) ferromagnetic ceramic magnet rotor. Innovating online n° 15 of invention patent n° 381968 by Nikola Tesla, 5/1/1888.

Based on the tests bank analysis, the results showed that the PMSM/IPM type synchronous motor used in the centrifugal fan, with the innovation of the reactance-inductive control in series plus the capacitor in parallel, reduces the power by 67%. (Watts) and active energy consumption (kWh), performing 56% more mechanical work (Joules) on the fluid air (with a 50% reduction in carbon footprint). Which leads us to the following conclusion: it is possible to develop centrifugal fans that save electricity (kWh) without the need to resort to (1) the "Fan Affinity Law", nor (2) the use of variable speed drives (VDF) or frequency (which are devices with complex and expensive electronics). Which would bring an enormous saving of the cost of electrical energy, the best reliability and availability of their production processes.



Palabras Claves

Extractor centrífugo, SARS-CoV-2, covid-19, eficiencia energética, motor sincrónico, PMSM/IPM, corriente alterna monofásica.

Key words

Centrifugal fan, SARS-CoV-2, COVID-19, energy efficiency, synchronous motor, PMSM/IPM, single-phase alternating current.

INTRODUCCIÓN

El problema de la pandemia SARS-CoV-2, como se explica más adelante en la revisión bibliográfica de los fundamentos, planteó el diseño y/o desarrollo de un extractor de aire centrífugo de alta eficiencia energética.

En ese sentido, el proyecto se relaciona con una de las formas establecidas científicamente para combatir la pandemia del covid-19 debido a que renueva el aire viciado en los ambientes cerrados, reemplazando el aire contaminado de coronavirus, al introducir aire exterior fresco y libre de virus (evitando los aerosoles contaminados).

Se recomienda siempre ventilar de manera continua. 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 existan (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.

Por ello, uno de los objetivos centrales de este estudio se centra en el diseño industrial y electromecánico de un extractor de aire centrífugo acoplado a un motor sincrónico con un devanado de campo de 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.º 15 de la patente del invento n.º 381 968 de Nikola Tesla, 1/5/1888 (esta conforma la hipótesis de diseño electromecánico).

FUNDAMENTOS

Este trabajo se fundamenta principalmente en un estudio sobre la transmisión aérea a larga distancia del SARS-CoV-2, covid-19¹ o coronavirus²: revisión sistemática rápida de la bibliografía

1 La pandemia de covid-19, conocida también como pandemia de coronavirus, es una pandemia actualmente en curso derivada de la enfermedad causada por el virus SARS-CoV-2. Inicialmente, fue llamada «neumonía de Wuhan», puesto que los primeros casos fueron identificados en diciembre de 2019 en la ciudad china de Wuhan, al reportarse casos de un grupo de personas enfermas con un tipo de neumonía desconocida. La Organización Mundial de la Salud (OMS) la declaró una emergencia de salud pública de importancia internacional el 30 de enero de 2020 y la reconoció como una pandemia el 11 de marzo de 2020, cuando informó que había 4291 muertos y 118 000 casos en 114 países. Al 21 de enero de 2022 se han contabilizado más de 343 millones de casos de la enfermedad en 258 países y territorios, y 5.5 millones fallecidos. Por otra parte, para enero de 2021 se han alcanzado las 4500 millones de personas vacunadas con al menos una dosis, un 60 % de la población mundial. La Organización Mundial de la Salud estima que al menos el 10 % de la población mundial ya se había contagiado de esta enfermedad (unas 780 millones de personas infectadas aproximadamente), debido al gran subregistro de casos a nivel mundial.

2 La enfermedad por coronavirus de 2019, más conocida como covid-19, es una enfermedad infecciosa causada por el SARS-CoV-2. Produce síntomas que incluyen fiebre, tos, disnea (dificultad respiratoria), mialgia (dolor muscular) y fatiga. En casos graves se caracteriza por producir neumonía, síndrome de dificultad respiratoria aguda, sepsis y choque circulatorio. Choque séptico es la forma más común en estos casos, pero los otros tipos también pueden ocurrir. Por ejemplo, choque obstructivo puede resultar de embolia pulmonar, una complicación de covid-19. Según la OMS, la infección es mortal

citada [1]. Esta revisión rápida encontró evidencia que sugiere que la transmisión aérea de larga distancia (>2 m) del SARS-CoV-2 podría ocurrir en entornos interiores que no son de atención médica. Según los resultados de esta revisión, los entornos interiores que no son de atención médica que podrían estar en riesgo de transmisión aérea a larga distancia incluyen entornos de no hospitalidad como restaurantes, transporte público y lugares de trabajo con ventilación inadecuada, así como entornos donde las actividades que resultan en una mayor emisión de aerosoles, como cantar o hablar en voz alta. Estos resultados resaltan la importancia de evaluar la ventilación, especialmente en espacios interiores donde las personas se encuentran con otras personas que no pertenecen a su hogar. Se debe prestar especial atención a la ventilación en entornos con actividades que puedan aumentar la cantidad de partículas respiratorias, por ejemplo, cantar. Cuando se evalúe que la ventilación es inadecuada, se deben realizar mejoras.

Esta innovación requirió 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 y otras leyes en corriente alterna conocidos [2, 3, 4, 5] por citar algunos ejemplos que representan conceptos clásicos y la teoría y práctica de las máquinas eléctricas giratorias [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Por otro lado, atento a la nueva y amplia bibliografía específica en el enfoque de las problemáticas medioambientales y en la denominada «huella de carbono». Para la eficiencia energética (EE), el estudio se ha centrado en una revisión bibliográfica específica en ecodiseño y eficiencia energética en los sistemas de refrigeración [16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

De los siete (7) niveles de la denominada *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 (hercios) disponible en el sistema de distribución de la red eléctrica doméstica y comercial en la República Argentina (no industrial trifásica). Tal como se describe a lo largo de este trabajo.

entre el 0.5 % y el 1 % de los casos. No existe tratamiento específico; las medidas terapéuticas principales consisten en aliviar los síntomas y mantener las funciones vitales. La transmisión del SARS-CoV-2 se produce mediante pequeñas gotas —microgotas de Flüge— que se emiten al hablar, estornudar, toser o espirar, que al ser despedidas por un portador (que puede no tener síntomas de la enfermedad o estar incubándola) pasan directamente a otra persona mediante la inhalación, o quedan sobre los objetos y superficies que rodean al emisor, y luego, a través de las manos, que lo recogen del ambiente contaminado, toman contacto con las membranas mucosas orales, nasales y oculares, al tocarse la boca, la nariz o los ojos. También está documentada la transmisión por aerosoles (<5µm).

METODOLOGÍA

Siguiendo las cinco (5) etapas del *Design Thinking*³, que fue inicialmente popularizado por la firma de Silicon Valley *ideo*⁴, y cuyos pasos son los siguientes: (1) empatizar, (2) definir, (3) idear, (4) prototipar y (5) testear. Se procedió a desarrollar el producto.

Las etapas (1), (2), (3) y (4) conforman los materiales de trabajo. La etapa (5) corresponde a los resultados y discusión.

Materiales de trabajo

1. Etapa para empatizar con los usuarios/clientes

La empatía con los clientes nos permite entender sus necesidades y descubrir lo que realmente quieren o necesitan, mirando los productos y servicios desde la perspectiva de los mismos. Se trata de observar, comprender e interactuar con los futuros usuarios del producto; luego de empatizar con ellos, se llega a la fase de identificación del problema, es decir, el problema que el SARS-CoV-2 (coronavirus) generó en los individuos —a nivel nacional, regional y mundial— diversas enfermedades (principalmente en las vías respiratorias); lo que hace necesario mantener una distancia social mínima de dos (2) metros en ambientes cerrados para evitar los aerosoles y/o *sprays* generados por la propia respiración humana, tal como se investigó en la profunda revisión bibliográfica [1].

3 El pensamiento de diseño es un término utilizado para representar un conjunto de procesos cognitivos, estratégicos y prácticos mediante los cuales se desarrollan conceptos de diseño (propuestas de productos, productos de diseño industrial, etcétera). El *Design Thinking* es comúnmente más conocido como *Service Design* en Europa. Muchos de los conceptos y aspectos clave del pensamiento de diseño se han identificado a través de estudios, en diferentes dominios de diseño, de cognición de diseño y actividad de diseño en contextos naturales y de laboratorio. El pensamiento de diseño también está asociado con recetas para la innovación de productos y servicios dentro de contextos empresariales y sociales. Una figura importante en *Design Thinking* es Hasso Plattner, quien fundó dos importantes escuelas: la *d.school* en Stanford University, EE.UU, y el Hasso Plattner Institute en Potsdam, Alemania. Estas dos escuelas, referentes globales, forman hoy día a la mayoría de los practicantes *Design Thinking*.

4 IDEO es una firma de diseño y consultora, con oficinas en los EE. UU., Inglaterra, Alemania, Japón y China. Fue fundada en Palo Alto, California, en 1991. La compañía utiliza el enfoque de pensamiento de diseño para conceptualizar productos, servicios, entornos y experiencias digitales.

2. Etapa de definición

Para avanzar en esta etapa se debe responder la siguiente pregunta: ¿Cuál es la necesidad de los individuos y/o consumidores en su ámbito privado (ya sea la casa/hogar o domicilio particular), del comercio o la industria respecto a la necesidad de ciertos tipos de aparatos eléctricos o sistemas de ventilación para que dichos equipos consuman menos energía eléctrica (kWh) operando de forma continua?

Esta pregunta se responde en la siguiente etapa 3.

3. Etapa de ideación de la innovación

Primero se realizó una simulación electromecánica utilizando el *software* NI Multisim 14.0, tomando en cuenta diferentes variables y factores de diseño electromecánico, luego se diseñó la carcasa mediante *software* CAD (Computer-Aided Design) utilizando el programa Cfturbo 2020 R2.0 —bajo licencia— más el complemento de *software* gratuito y la creación de prototipos 3D por intermedio de la impresora 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.

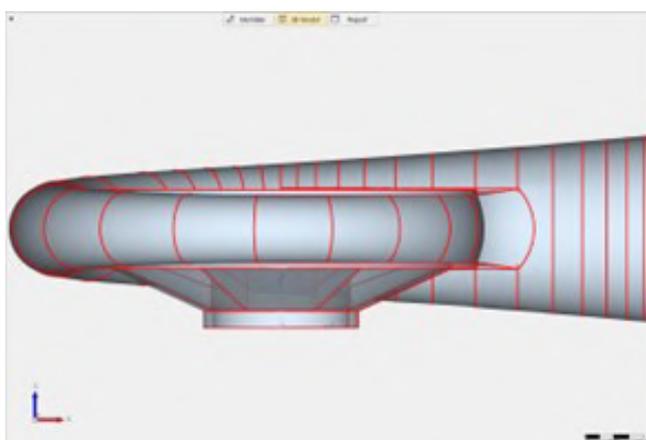
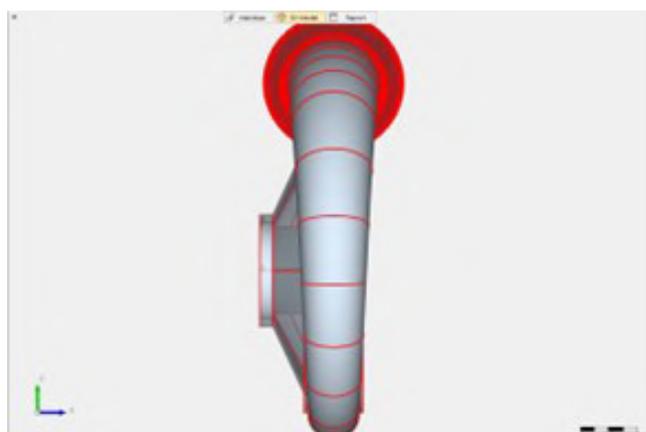


Figura 1 y 2. Arriba la imagen del *software* Cfturbo 2020 R2.0, modelado 3D del eje X del diseño de la carcasa del extractor/soplador. Abajo imagen del modelado 3D en el eje Y. Fuente: Elaboración propia.

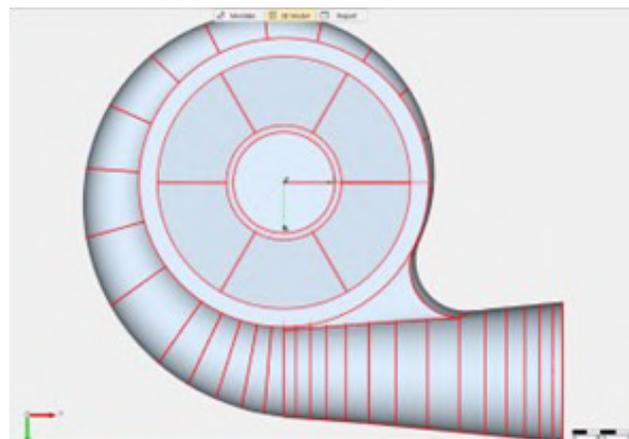


Figura 3 y 4. A la derecha, imagen del software CFturbo 2020 R2.0, modelado 3D del eje Z. A la izquierda, banco de pruebas conectado al motor extractor/soplador centrífugo de aire viciado de SARS-CoV-2 o covid-19 (coronavirus) con multimetro digital (medidor de voltios en AC), pinza amperométrica (medidor de intensidad de la corriente en AC), frecuencímetro (medidor de hercios), 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.

Luego de su simulación en tres dimensiones (3D), se procedió a la construcción física del producto y sus partes. La simulación 3D se utiliza generalmente como procedimiento, entre otras cosas, para ahorrar dinero y tiempo experimental; para corregir variables como dimensiones, volúmenes, tamaños, ensamblajes entre partes y piezas, relaciones de forma y función, aspectos que no solo son funcionales y estéticos, sino también ergonómicos, etc. Esto se analiza en la siguiente etapa de fabricación del prototipo.

La idea central de la innovación tecnológica (I+D+i) de eficiencia energética (EE), está inspirada en la línea n.º 15 de la patente de invención n.º 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.º 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*» [26].

Pero la patente de la invención aquí se innovó, no en motores de inducción a-síncronos convencionales (como propuso originalmente Tesla), sino en motores síncronos tipo PMSM/IPM (Permanent Magnet Synchronous Motor/Interior Permanent Magnet); con el fin de 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.

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. Esto constituye un estudio previo al desarrollo de otro prototipo, antecedente de este desarrollo, donde se analizó el uso de la electrónica [16, 17].

Como 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/hercios) 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 voltios/hercios aumenta al reducir la frecuencia para reducir la velocidad del motor, la corriente aumentará y se volverá excesiva. Si, por el contrario, se reduce, 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 voltios/hercios 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, se reduce 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 de aire), la relación voltios/hercios 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 baja también. El menor torque aún es tolerable por el motor.

Como se indicó, si se reduce la relación voltios/hercios (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.º 15 de su patente: US381968A de 1887); por lo tanto, la capacidad de realizar trabajo mecánico (joules) sobre el aire fluido no disminuyó (aunque él se refería a motores de inducción asíncronos y no sincrónicos, como el propuesto en este desarrollo). Esta es la innovación tecnológica.

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).

Dado que el motor funciona con una carga ligera (fluido aire), la relación voltios/hercios se puede reducir para minimizar la corriente del motor; y debido a que se aplica un voltaje más bajo, también 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 describe en su patente Nikola Tesla). Manteniendo la relación tensión/frecuencia no constante, aunque con una disminución del par.

Por ello, con el objetivo de obtener un atenuador de onda de tensión (voltios) e intensidad de corriente (amperios), funciona 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 ($\omega_c=R/L$). En ese sentido, 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.

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).

Etapa de fabricación del prototipo

Las actividades realizadas para la construcción de dicho prototipo, de un soplador centrífugo de aire para uso civil y comercial (no industrial), fueron las siguientes.

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 2000 a 4000 (gauss) o de 0.2 a 0.4 (tesla), los más económicos del mercado; interactuando con un estator de 482 (Ω) de impedancia (Z). En el futuro, se planea reemplazar los imanes de ferrita con imanes de tierras raras de neodimio ($Nd_2Fe_{14}B$) entre 11 000 y 14 000 (gauss) o 0.2 a 0.4 (tesla) de intensidad de campo magnético; lo cual es un factor clave para aumentar la eficiencia energética.

Las actividades realizadas para la construcción del prototipo fueron las siguientes: (a) acoplar un motor síncrono o auto excitado 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 pelo. En esta etapa experimental preliminar, solo 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, es el encargado 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 análoga a un balasto magnético 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

Esta etapa de prueba o testeo terminará confirmando (afirmando) como «verdadera» la línea n.º 15 de la patente del invento n.º 381968 de Nikola Tesla, del 1/5/1888 (que conforma la hipótesis de diseño electromecánico con la cual se ejecutó inicialmente este trabajo). Tal como se anticipó en la introducción.

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 $\cos \phi$: $\cos(\phi)$.

Exactamente, según algunos autores clásicos de la física, la electricidad y el magnetismo: « $P_{med} = \frac{1}{2} V I \cos(\phi) = V_{rms} I_{rms} \cos(\phi)$ » [12, 1076]. Valores que fueron tomados con los correspondientes instrumentos de verdadero valor efectivo o RMS (Root Means Square).

Luego, considerando la estabilidad de la frecuencia (Hz) de la corriente alterna (AC), que en la República Argentina es de 50 (Hz), lo que asegura un giro constante a 3000 RPM (revoluciones por minuto) del eje del motor. Si el par de polos de la máquina síncrona es equivalente a dos (2) polos (norte-sur) en el estator. Siendo $p = 2$, el número de polos utilizados en el diseño del prototipo -según autores en el campo de las máquinas eléctricas- tiene la siguiente fórmula:

El rotor y el estator siempre tienen el mismo número de polos (...), el número de polos determina la velocidad síncrona del motor: $ns = 120 \cdot f/p$

Donde:

ns = velocidad del motor (r/min)

f = frecuencia de la fuente (Hz)

p = número de polos (Wildi, 2019: 379)

Caracterizado por la siguiente fórmula:

$$ns = \frac{120 \cdot f}{p} = \frac{120 \cdot 50}{2} = \frac{6000}{2} = 3000 \text{ (RPM)}$$

Como se mencionó anteriormente:

f : Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz).

p : Número de polos que tiene la máquina.

ns : Velocidad síncrona de la máquina o revoluciones por minuto (RPM).

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: $ns = 120 \cdot 50 \text{ (Hz)} / 2 = 3000 \text{ (r/min)}$ 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

$$P = \tau \cdot \omega \text{ [14, 265].}$$

Donde cada símbolo algebraico significa:

P : potencia (medida en watts).

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

ω : 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).

Analizando los valores de potencia a la entrada del motor, solo del motor y no del total del circuito RCL, obtenemos los siguientes valores con el circuito de eficiencia energética (EE): «apagado» y «encendido». Despejando el par-motor (tau) o torque, obtenemos los siguientes valores: 0.057 (Newtons * metros) con la llave «apagada» y 0.025 (Newtons * metros) con la llave «encendida».

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. 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 %. Variables de potencia (W) y velocidad (RPM) determinadas según las Normas Internacionales ISO 5801-96(E) y WD 13348-1998.

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 internacional que establezca dichos parámetros de comparación). Dado que, en

el motor asincrónico 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 sincrónico y conserva las 3000 (RPM) como consecuencia de la frecuencia de la corriente alterna: 50 (Hz). Por otro lado, ello inducía a operar el motor reduciendo la relación voltios/hercios, y disminuyendo el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida.

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 (voltios/hercios) 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).

Tabla 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.

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 ϕ)	$\cos \phi$	0.17	(f.d.p.)
Potencia reactiva	$Q = X_L \cdot I_{RMS}^2$	98.73	(VAR) : Voltiamperios reactivos
Potencia aparente	$S = V \cdot I$	100.32	(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)
Frecuencia angular (pulsaciones)	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	314.159	(Rad/S) : Radianes/segundos
Frecuencia de la red	f	50	(Hz) : Hercios
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 (°) 1.39 (Rad)	(°) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$ms = \frac{120 \cdot f}{p}$	3000	(RPM) : Revoluciones por minuto

Fuente: Elaboración propia.

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 (Z1) junto con el capacitor (C1); 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 (Z1) en serie con una fase más el capacitor (C1) en paralelo con las dos fases. Un inductor perfecto no generaría pérdidas por efecto joules, 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. Pero utilizado en el diseño del sistema de eficiencia energética (EE) para el motor, su reactancia limita la corriente disponible con pérdidas de potencia mínimas en el inductor. Vulgarmente al balasto se lo conoce también como reactancia, debido a la corriente alterna la bobina presenta una reactancia inductiva.

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, según la siguiente igualdad:

$$Z = R + jX, \text{ representación binómica.}$$

Cuando circula corriente alterna por alguno de los dos elementos que poseen reactancia, la energía es alternativamente almacenada, y liberada en forma de campo magnético en el caso de las bobinas o de campo eléctrico en el caso de los condensadores.

No obstante, las bobinas y condensadores reales presentan una resistencia asociada, que en el caso de las bobinas se considera en serie con el elemento, y en el caso de los condensadores en paralelo. En esos casos, como ya se indicó arriba, la impedancia es (Z).

Cuando la reactancia inductiva (Z1) tiene por valor $Z = 48 (\Omega)$ se activa con la llave (S3), 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 sincronización del eje del motor conectado a los seis (6) álabes radiales del rodete no pierden velocidad. Esto demuestra la eficiencia energética (EE).

La incorporación de la reactancia inductiva (Z1) en una de las fases ha mejorado el factor de potencia o coseno de ϕ , de 0.22 a 0.41 y sin el capacitor (C1) (lo cual significó un aumento considerables o mejora de la eficiencia energética). Con el capacitor conectado este valor sube de 0.17 a 0.81.

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), medidor de señal de onda de tensión 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). Con un multímetro digital medidor del voltaje (Vrms), un frecuencímetro medidor de oscilación de corriente alterna (Hz), una pinza amperométrica medidora de amperios (A), un cofímetro medidor del coseno de ϕ ($\cos \Phi$), un vatímetro medidor de potencia activa en vatios (W), 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).

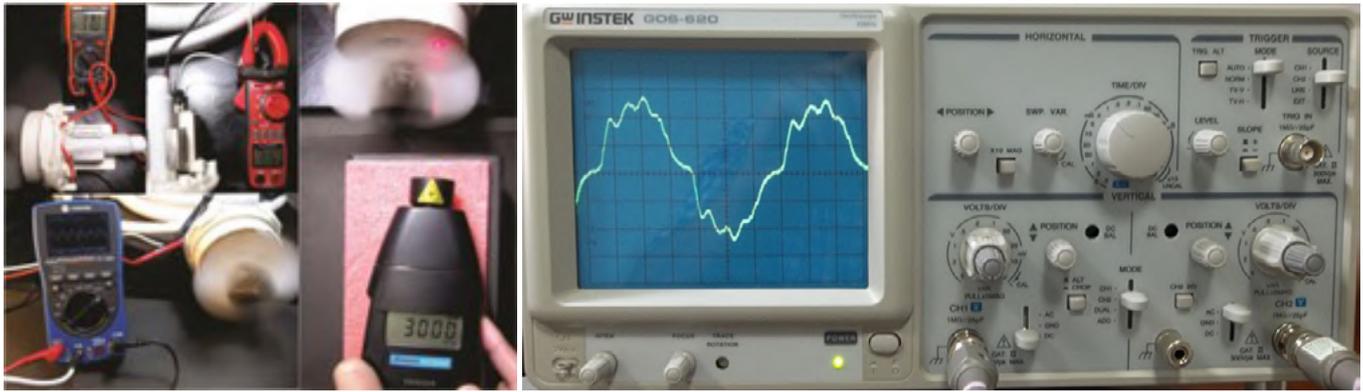
Tabla 2

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

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 ϕ)	$\cos \phi$	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 LC total	$Z_{LC} =$	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) : Hercios
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	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	3000	(RPM) : Revoluciones por minuto
Frecuencia de resonancia	$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$	74.77	(Hz) : Hercios

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, algunas imágenes (fotos) y descripciones ilustrativas experimentales.



Figuras 5, 6, 7, 8 y 9. A la izquierda, se observa el 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). A la derecha, para la observación de la distorsión armónica (THD) se utilizó un osciloscopio donde 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). Fuente: Elaboración propia.

La ampliación de la imagen observada 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.

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.

El dato del valor del factor de cresta (CF) se calculó con la siguiente fórmula:

$$CF = \frac{V_{peak}}{V_{rms}} = CF = \frac{420 (Volts_{peak})}{2} = 210 (Volts) \rightarrow \frac{210 (Volts)}{107.8 (Volts_{RMS})} = 1,948$$

CONCLUSIONES

El arranque no suave del motor, al inicio de su encendido, se debe a la necesidad de la potencia activa nominal del par estático de arranque requerido por la masa de la carga (álabes radiales conectados al eje del rotor) que deben ser acelerados. El arranque no suave no ahorra energía debido a la demanda inicial de potencia del motor en el momento del arranque; pero esto solo dura un instante (2-3 segundos), una vez alcanzada la velocidad de sincronismo de 3000 (RPM), se cambia manualmente al modo de eficiencia energética (EE). El cambio de modo a eficiencia energética (EE) se logra mediante los contactos mecánicos o interruptor SPDT.

Independientemente de si el interruptor SPDT se encuentra en modo «apagado» o «encendido» en el modo de eficiencia energética (EE), en ambos casos la frecuencia de la corriente alterna siempre actúa con 50 (Hz). Por esta razón, el motor, aunque disminuya su par, no disminuye su velocidad ni su capacidad para realizar un trabajo mecánico sobre los álabes

radiales (siempre que el par motor no disminuya el torque por debajo del límite mínimo requerido para mantener al rotor funcionando a la velocidad de sincronismo).

En efecto, la hipótesis de diseño electromecánico está claramente orientada en la dirección correcta, ya que los armónicos disminuyen (la señal sinusoidal de la corriente alterna se rectifica, como se observa en la forma de la onda de tensión observada en el osciloscopio), aunque la señal indica que la carga sigue siendo no lineal y requiere un filtro EMI (interferencia electromagnética) de tipo paso bajo (LPF) con elementos pasivos en su construcción.

Adicionalmente, otra información que resultó del análisis de los datos es que 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 del siguiente modo:

- (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 Φ) a 0,81 (Cos Φ) lo que en

el cálculo de la fórmula de potencia activa en circuitos de corriente alterna (AC) producirá una caída en la potencia del motor sin pérdida de velocidad del rotor (RPM); es decir, sin afectar su capacidad de realizar trabajo mecánico (joules). Mientras tanto, la potencia activa (Watts) y el consumo de energía medido en kilovatios-hora (kWh) disminuyen el 56%, sin caída de las revoluciones por minuto (RPM) de los álabes centrífugos conectados al eje del rotor sincrónico.

- (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.

Reiterando que, mientras la potencia activa (vatios) disminuye y el consumo de energía activa medido en kilovatios-hora (kWh) 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 sincrónico de 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 en el arranque. Aunque está construido para trabajar hasta un límite operativo de 50 (watts).

A modo de comparación un motor de inducción monofásico, de los que se utilizan normalmente en los equipos de refrigeración o ventilación, es un motor asincrónico sin escobillas de tipo *frager* (en cortocircuito) y trabaja con una velocidad máxima de 1690 (RPM) con el 100 % de su potencia activa máxima de 19 (watts); lo que significa un 44 % menos velocidad si se lo compara con el motor aquí desarrollado de alta eficiencia energética. En cambio, el motor sincrónico 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 35.6 % de su potencia activa máxima, utilizando solo 6.3 (watts); frente al claro descenso de la velocidad del motor a-síncrono sin escobillas de tipo «*frager*» o «en cortocircuito» o de inducción monofásico (que es el que se utiliza normalmente en los equipos de refrigeración).

Por lo que podemos asegurar que el motor sincrónico ahorra un 67 % de energía activa (kWh), realizando 56 % más trabajo mecánico sobre el fluido aire con la misma potencia activa (watts).

Se debe aclarar que en otros países donde la frecuencia de la corriente alterna (AC) es de 60 (Hz) la eficiencia de este diseño electromecánico sería superior, llevando la velocidad del motor de 3000 (RPM) a 3600 (RPM); mucho más de las 1690 (RPM) del mismo motor asincrónico a 60 (Hz) pero con un 64.4 % de mayor consumo de energía activa. Es decir que si en el país donde la corriente alterna monofásica es de 60 (Hz), el motor asincrónico de 19 (watts) de potencia activa, tendría una velocidad de 1690 (RPM); pero en el mismo país de 60 (Hz) el motor sincrónico de tipo PMSM/IPM con 6.3 (watts) tendría una velocidad de 3600 (RPM) con los mismos seis (6) álabes radiales (el mismo peso y diámetro del rodete o paletas impulsoras del fluido aire).

Otra ventaja del motor sincrónico de tipo PMSM/IPM es la siguiente, 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) es el siguiente: el motor asincrónico, con una potencia de 19 (watts) a 1690 (RPM) de velocidad de los álabes del rodete requeriría 106 (watts) de potencia activa para igualar las 3000 (RPM) del motor sincrónico de tipo PMSM/IPM. Es decir, que normalmente cualquier motor asincrónico de inducción monofásico de refrigeración requeriría 16.8 veces más potencia activa para igualar a este diseño de alta eficiencia energética.

Por lo que este diseño propuesto experimentalmente reduce un 67 % la potencia activa (watts) y 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).

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 medida en kilowatts-hora (kWh) que el motor a-sincrónico 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 asincrónicos utilizados en los equipos de ventilación, extractores y sopladores. La ventaja es doble.

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) al uso de variadores de velocidad (VDF) o frecuencia, ni (b) la «Ley de afinidad de los ventiladores». Esto último cambiaría todo lo que se sabe en el mundo sobre la «Ley de afinidad de los ventiladores» e implicaría una nueva revisión bibliográfica y desarrollo experimental (nuevos estudios comparativos como el aquí desarrollado); pues se estima que se podrían crear y desarrollar nuevas y sustanciales ventajas comparativas que conduzcan al ahorro energético y la eficiencia (nunca antes estudiados, creando nuevos campos y líneas de investigación). 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.

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 pasó 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). En ese sentido, la relación con la huella de carbono es directamente proporcional a la potencia del motor y a futuros prototipos de mayor potencia (no está estudiada la relación en motores trifásicos industriales).

La obtención de este producto mínimo viable experimental se estima escalable a mayor potencia monofásica ya sea para su uso comercial y a un modelo trifásico (de conexionado tipo estrella-delta) para uso industrial (aunque esto último no ha sido experimentado). Por lo cual bien podríamos describir a esta innovación tecnológica como un motor hertziano.

REFERENCIAS

- [1] Duval, D. *et al.* (2022). Long distance airborne transmission of SARS-CoV-2: rapid systematic review. *bmj*, 377. <https://doi.org/10.1136/bmj-2021-068743>
- [2] Aller, J. (2008). *Máquinas eléctricas rotativas*. Editorial Universidad Simón Bolívar. <http://prof.usb.ve/jaller/Maquinas1.pdf>
- [3] Chapman, S. J. (1987). *Máquinas eléctricas* (5.ª ed.). Mc Graw Hill. https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf
- [4] Fitzgerald, A., Kingsley, Ch., y Umans, S. (s. f.). *Máquinas eléctricas* (6.ª ed.). Mc Graw Hill. https://www.academia.edu/17314182/maquinas_electricas
- [5] Fitzgerald, A., Kingsley, Ch., y Kusko, A. (1975). *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*. Editorial Hispano Europea. <https://es.scribd.com/document/185915953/teoria-y-analisis-de-las-maquinas-electricas-fitzgerald-kingsley-kusko>
- [6] Fraile Mora, J. (2008). *Máquinas eléctricas* (6.ª ed.). Mc Graw Hill. https://www.academia.edu/42010234/Maquinas_electricas_6a_ed_Fraile_Mora_Jesus
- [7] Harper, G. (2006). *El ABC de las máquinas eléctricas II. Motores de corriente alterna*. Grupo Noriega Editores. <https://es.scribd.com/doc/314652965/EL-ABC-de-Las-Maquinas-Electricas-II-Motores-de-Corriente-Alternativa-Enrique-Harper>
- [8] Harper, G. (2006). *El ABC de las máquinas eléctricas III. Instalación y control de motores de corriente alterna*. Grupo Noriega Editores. <https://es.scribd.com/document/388385650/El-ABC-de-La-Maquinas-Electricas-Instalacion-y-Control-de-Motores-de-Corriente-Alternativa-Enrique-Harper-pdf>
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers (2016). IEEE - The world's largest technical professional organization dedicated to advancing technology for the benefit of humanity. [Página web]. <https://www.ieee.org/index.html>
- [10] Mohan, N., Undeland, T., y Robbins, W. (2009). *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño* (3.ª ed.). Mc Graw Hill. <https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/PIES/electronica-de-potencia-mohan-3ra-edicion.pdf>
- [11] Resnick, R., Halliday, D., y Krane, K. (2007). *Física*, vol. 2 (6.ª ed.). Grupo Editorial Patria. https://www.academia.edu/31428733/F%C3%ADsica_Vol_2_Halliday_Resnick_and_Krane_5th_Edition_Espa%C3%B1ol
- [12] Sears, F., y Zemansky, M. (2009). *Física Universitaria con Física Moderna* (vol. 2). Pearson Educación. https://www.u-cursos.cl/usuario/42103e5ee2ce7442a3921d69b0200c93/mi_blog/r/Fisica_General_-_Fisica_Universitaria_Vol_2__ed_12%28Sears-Zemansky%29.pdf
- [13] Serway, R., y Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna* (7.ª ed.) (vol. II). Cengage Learning Editores. https://www.academia.edu/27915502/Serway_7_Edicion_2_Volumen
- [14] Tipler, P., y Mosca, G. (2006). *Física para la ciencia y la tecnología* (5.ª ed.). Editorial Reverté.
- [15] Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia* (6.ª ed.). Pearson Educación. <https://lc.fie.umich.mx/~jorgeahb/Pagina/materias/Libro2.pdf>
- [16] Anderson, I. (2019). 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://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/9300/9869>
- [17] Anderson, I. (2019). Eco-turbina: turbo ventilador eléctrico 220 (VAC)-50 (Hz), de bajo consumo: eficiente energéticamente. *Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social (IDTS)*, 1(1), 1-28.
- [18] Canale, G. (2013). *Ciclo de Vida de Productos. Aportes para su uso en Diseño Industrial*. INTI. <https://proyectaryproducir.com.ar/wp-content/uploads/2015/09/ACV%20Libro%20A4%20Rev%20b%2016-12-13.pdf>
- [19] Canale, G., Bernatene, M., y Flores, F. (2013). Aportes de ACV simplificado al diseño para la sustentabilidad. Casos de aplicación industrial. En *V Conferencia Internacional sobre Análisis de Ciclo de Vida* (pp. 2001-2013). Universidad Tecnológica Nacional. https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/CILCA%202013%20en%20castellano%20FINAL%2001-2013.pdf
- [20] Canale, G. (2014). Introducción. En *Materialoteca. Perfil ambiental de materiales*. https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/Extracto%20de%20Introducci%C3%B3n%20-%20Materialoteca.pdf
- [21] Canale, G. (2010). S.O.S. Diseño sustentable. Sustentabilidad, Economía y Diseño. En *5.º Foro de Ética y Sustentabilidad. Diseño Sustentable*. Buenos Aires, 2009. Boletín 158 del INTI. https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Bibliog_obligat/INTI%20bol158-1%20SOS%20Dise%C3%B1o%20Sustentable.pdf
- [22] Instituto Tecnológico de Canarias. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Canarias. ITC, S. A. <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>
- [23] Soler & Palau (2009). *Manual práctico de ventilación*. Autor. <https://www.solerpalau.mx/ASW/recursos/mven/spventilacionc2.pdf>
- [24] Subsecretaría de ahorro y eficiencia energética (2017). *Guía de eficiencia energética para motores eléctricos*. Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_de_eficiencia_energetica_para_motores_electricos.pdf

[25] Zitrón (2007). *Conferencias sobre ventilación en minas*. Autor. <https://fdocuments.ec/document/libro-de-ventilacion.html>

[26] Tesla, N. (1887). Electro-magnetic motor (US 381968A, 12-oct-1887) <https://patents.google.com/patent/US381968A/en?q=tesla+381968>

[27] NI (s. f.). Página principal. [Página web]. <https://www.ni.com>

ACERCA DEL AUTOR

Federico Anderson

Diseñador industrial por la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) en 1999, máster en Estética y Teoría del Arte (UNLP, 2008) y doctor en Arte (UNLP, 2014). Profesor titular e investigador categoría III del proyecto B374 a cargo del director Mg. D. I. Federico del Giorgio Solfa, la Secretaría de Ciencia y Técnica del Departamento de Diseño Industrial en Universidad Nacional de La Plata (UNLP).

 ianderson@empleados.fba.unlp.edu.ar

Recibido: 15-10-22

Revisado: 03-11-22

Aceptado: 09-11-22



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.