

Extractor de aire centrífugo energéticamente eficiente para ambientes contaminados con SARS-CoV-2 (Coronavirus)

Anderson, Ibar Federico

*Investigador Categoría 3, Secretaría de Ciencia y Técnica, Departamento de Diseño Industrial, Universidad Nacional de La Plata, Agente de Propaganda Médica. Matrícula N° 4937 F° 194 L° 27, 21/02/2000. Ministerio de Salud, Provincia de Buenos Aires, Profesor Titular de Educación Tecnológica, Escuela Técnica N° 2 "Independencia", Concordia, Entre Ríos, República Argentina.
eco.blower.air@gmail.com*

Resumen. El producto es un extractor/soplador de aire centrífugo, que resuelve el problema de los ambientes viciados de SARS-CoV-2 o Covid-19 (Coronavirus), pensado para su uso doméstico y comercial. Funciona con un motor de corriente alterna (AC) monofásica de 220 (V) y 50 (Hz), de alta eficiencia energética. Ha sido desarrollado bajo la metodología del Design Thinking, Según las conclusiones preliminares, analizadas en el banco de pruebas, 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. Se demuestra que se pueden desarrollar ventiladores centrífugos que ahorren energía eléctrica sin necesidad de recurrir a: (a) la "Ley de afinidad de los ventiladores", ni (b) al uso de variadores de velocidad (VDF) o frecuencia (que son dispositivos con una electrónica compleja y costosa). Esta innovación implica un enorme ahorro del gasto de energía eléctrica para la ventilación doméstica, comercial e industrial, con una tecnología sencilla, aunque rudimentaria y limitada; pero efectiva, económica y rústica (electromecánica y no

electrónica) que según la evidencia empírica y las pruebas experimentales han demostrado que efectivamente funciona. Se simplificó el diseño electromecánico, reduciendo costos y obteniendo ahorro económico en el gasto energético.

Palabras clave: Extractor centrífugo, SARS-CoV-2, COVID-19, eficiencia energética, motor sincrónico, PMSM/IPM, corriente alterna monofásica

Energy efficient centrifugal air extractor for environments contaminated with SARS-CoV-2 (Coronavirus)

Abstract. The product is a centrifugal air extractor/blower, which solves the problem of SARS-CoV-2 or Covid-19 (Coronavirus) foul environments, designed for domestic and commercial use. It operates with a single-phase alternating current (AC) motor of 220 (V) and 50 (Hz), with high energy efficiency. It has been developed under the Design Thinking methodology. According to preliminary conclusions, analyzed in the test bench, the PMSM/IPM type synchronous motor used in the centrifugal fan, with the innovation of the series reactance-inductive control plus the parallel capacitor, reduces by 67% the active power (Watts) and the active energy consumption (kWh), performing 56% more mechanical work (Joules) on the air fluid, with a 50% reduction of the carbon footprint. It is demonstrated that centrifugal fans that save electrical energy (kWh) can be developed without resorting to: (a) the "Fan Affinity Law", nor (b) the use of variable speed drives (VDF) or frequency drives (which are devices with complex and expensive electronics). This innovation implies an enormous saving in the expenditure of electrical energy for domestic, commercial and industrial ventilation, with a simple, although rudimentary and limited technology; but effective, economical and rustic (electromechanical and not electronic) that according to empirical evidence and experimental tests have shown that it actually works. The electromechanical design was simplified, reducing costs and obtaining economic savings in energy expenditure.

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

Novedad u originalidad local en el conocimiento

La novedad consiste en que el motor no desciende su velocidad de trabajo (medido en revoluciones por minuto), aunque descienda el consumo de energía activa (medido en kWh), adicionalmente el diseño del prototipo se encuentra manufacturado con una tecnología comparativamente sencilla frente a la electrónica utilizada en un variador de frecuencia (VFD); que es un controlador diseñado para ahorro de energía (de un costo comparativamente elevado al diseño electromecánico aquí presentado). El diseño aquí propuesto, es rústico en su diseño electromecánico y con ciertas limitaciones tecnológicas. Posee control de potencia por reactancia-inductiva y reactancia-capacitiva que filtra los armónicos, dado que puede asumirse que el inductor opera en simultáneo como una resistencia que reduce el paso de la corriente eléctrica (Amperios) con una consecuente caída de la tensión (Voltios) de salida hacia la carga no-lineal y como un tanque de almacenamiento de la energía en forma de campo magnético que es regresada a la red para su consumo. En tanto, en el capacitor la energía es almacenada en forma de campo eléctrico. Ambos circuitos filtran los armónicos presentes en la onda sinusoidal de la corriente alterna, por lo que la calidad de energía consumida es buena.

Grado de relevancia

El proyecto se relaciona de una de las formas establecidas científicamente para combatir la pandemia del Covid-19² debido a que renueva el aire viciado en los

² 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

ambientes cerrados, reemplazando el aire contaminado de SARS-CoV-2 (Coronavirus)³, al introducir aire exterior fresco y libre de virus (evitando los aerosoles contaminados).

Según la campaña oficial "VENTILAR" establecida por el gobierno nacional, en su página web oficial⁴; 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 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

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.

³ 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 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 Flügge— 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).

⁴ Campaña ventilar en la web del gobierno nacional:
<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/unidad-coronavirus/ventilar>

el exterior⁵. 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 Nación⁶. 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 Nación⁷, donde existe un apartado especial para la eficiencia energética (EE)⁸.

Grado de pertinencia

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. Como ya se expresó con anterioridad, 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.

Para una mejor visualización de la perturbación eléctrica con la variación de la forma de onda (distorsionada), se pudo observar con el uso del osciloscopio que el factor de cresta (CF) –levemente- superó el límite máximo recomendado de 1.8 (CF) hasta 1.9, lo cual se corrigió con un filtro EMI (ElectroMagnetic Interference) de tipo paso-

⁵Ver: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/unidad-coronavirus/ventilar/recomendaciones>

⁶ Ver la ficha técnica de ventilación y Covid-19 en el siguiente link oficial del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social de la Nación: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha_tecnica_ventilacion_y_covid_150920.pdf

⁷ Ver: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia>

⁸ Ver: <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/eficiencia-energetica>

bajo (LPF) con elementos pasivos que reduce la ondulación del rizo en la tensión de salida y pasa la tensión promedio (V_{avg}) de entrada.

Grado de demanda

El agente demandante fue el Concurso Nacional INNOVAR 2021⁹, organizado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación (MINCYT)¹⁰ junto a la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (ANPCyT, actualmente conocida como Agencia de I+D+i)¹¹; ambos organismos gubernamentales que han realizado un diagnóstico que refleja que la innovación tecnológica –su desarrollo– puede solucionar la demanda existente para combatir el SARS-CoV-2 en ambientes cerrados de uso civil, comercial e industrial contaminados con el Coronavirus.

La situación epidemiológica de la pandemia del Covid-19 genera la necesidad de ventilación en lugares como viviendas domésticas, comercios con alto tránsito de clientes, estaciones de trenes y subterráneos, colectivos, sector industrial, PyMEs, entre otros. Dado que, en esta nueva normalidad atravesada por la pandemia del Covid-19, y ante un escenario inesperado, muchas innovaciones son el producto resultante de nuevas necesidades identificadas y demandadas por la sociedad.

⁹ Página web oficial: <http://www.innovar.mincyt.gob.ar>

¹⁰ Página web oficial: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia>

¹¹ Página web oficial: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/agencia>

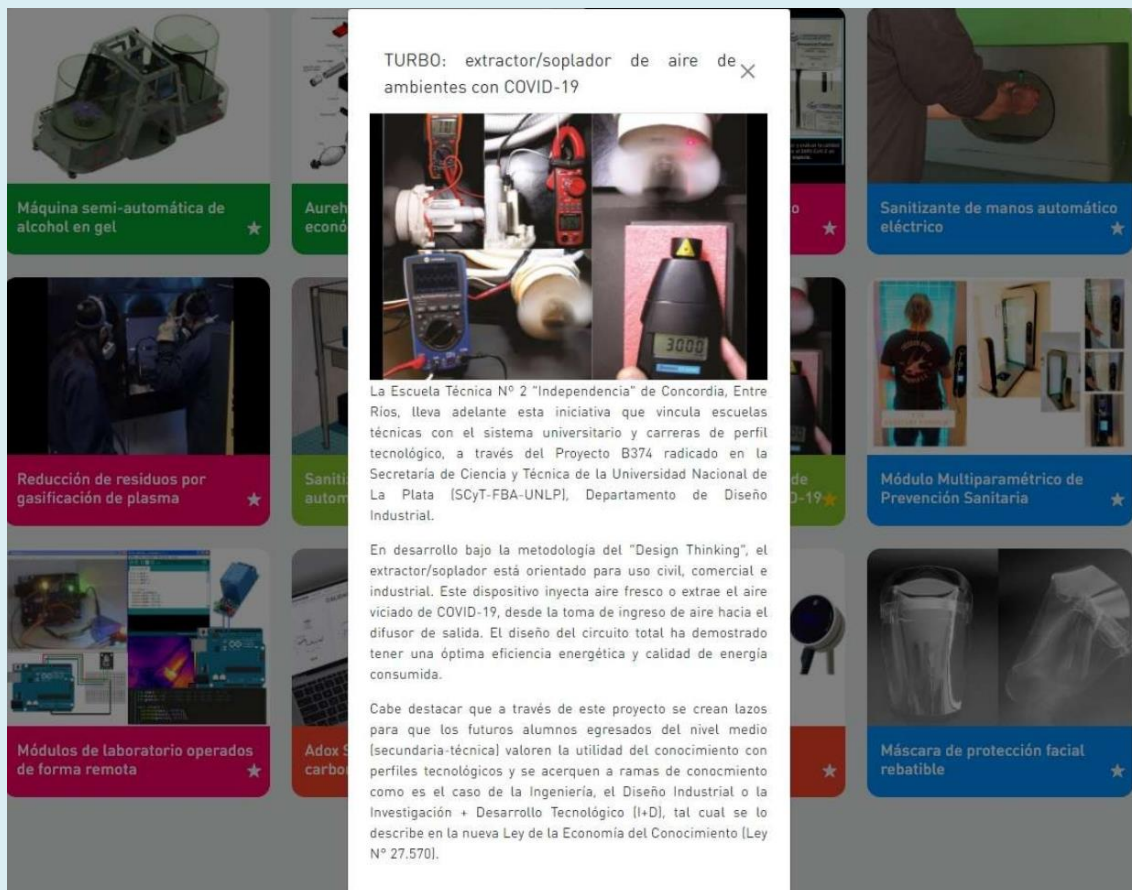


Figura 1. Captura de la web oficial del Ministerio de Ciencia y Tecnología de la Nación en el marco de la edición 2021 del CONCURSO INNOVAR y la Agencia Nacional de Promoción de la Innovación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (Agencia I+D+i) cuando sometieron a votación pública los proyectos de temática COVID-19 que fueron seleccionados para evaluar la percepción de la ciudadanía sobre sus niveles de impacto en la vida cotidiana

Figure 1. Capture of the official website of the Ministry of Science and Technology of the Nation within the framework of the 2021 edition of the INNOVAR CONTEST and the National Agency for the Promotion of Innovation, Technological Development and Innovation (R+D+i Agency).) when they submitted to a public vote the COVID-19-themed projects that were selected to assess the perception of citizens about their levels of impact on daily life

Desarrollo del producto, basado en las cinco etapas del Design Thinking:

El producto se desarrolló siguiendo las cinco (5) etapas del Design Thinking¹², que fue inicialmente popularizado por la firma de Silicon Valley ideo¹³, y cuyos pasos son: (1) empatizar, (2) definir, (3) idear, (4) prototipar y (5) testear. 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) que generó en las personas -a nivel nacional, regional y mundial- diversas sintomatología (principalmente en las vías respiratorias); que hace necesario

¹² 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.

¹³ 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.

mantener una distancia social mínima de dos (2) metros en ambientes cerrados para evitar aerosoles y/o sprays generados por la propia respiración humana y ventilar los ambientes para recambiar el aire y reducir la carga viral.

2. Etapa de definición:

Para avanzar en esta etapa se debe responder la siguiente pregunta: ¿cuál es la necesidad de las personas 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 (hipótesis de diseño):

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 proporcionado por el INET (Instituto Nacional de Educación Tecnológica). En esta etapa de ideación, el maquetado con impresora 3D y software CAD, es posterior al dibujo y previo al prototipo convencional o tradicional.

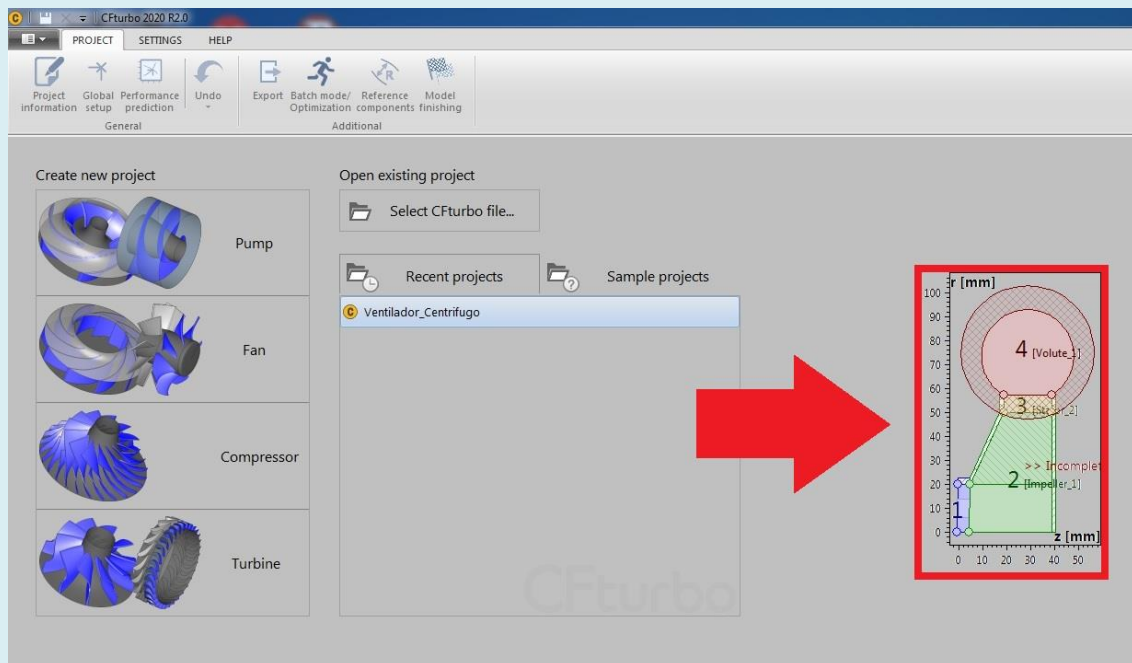


Figura 2. Software CFturbo 2020 R2.0. Desarrollo del ventilador centrífugo (ventilador). Apertura de archivos, bajo licencia: <https://www.cfturbo.com>.

Figure 2. CFturbo 2020 R2.0 software. Development of the centrifugal fan (fan). Opening files, under license: <https://www.cfturbo.com>.

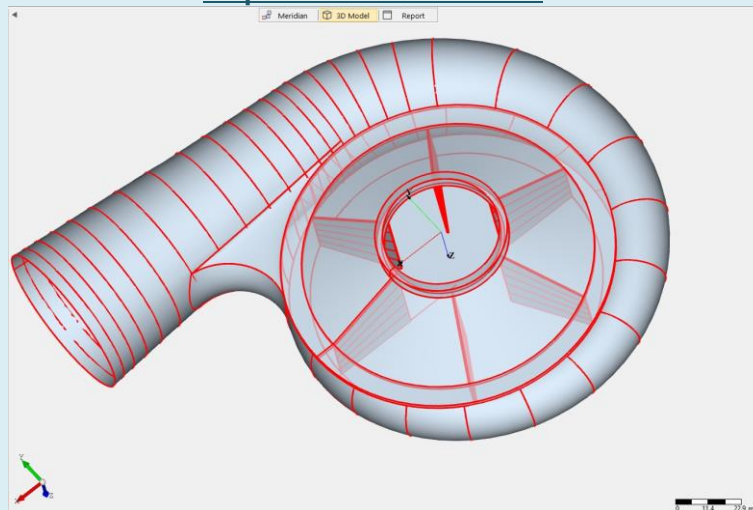


Figura 3. Software CFturbo 2020 R2.0. Selección en modelado 3D de estator, impulsor y voluta.

Figure 3. CFturbo 2020 R2.0 software. Selection in 3D modeling of stator, impeller and volute.

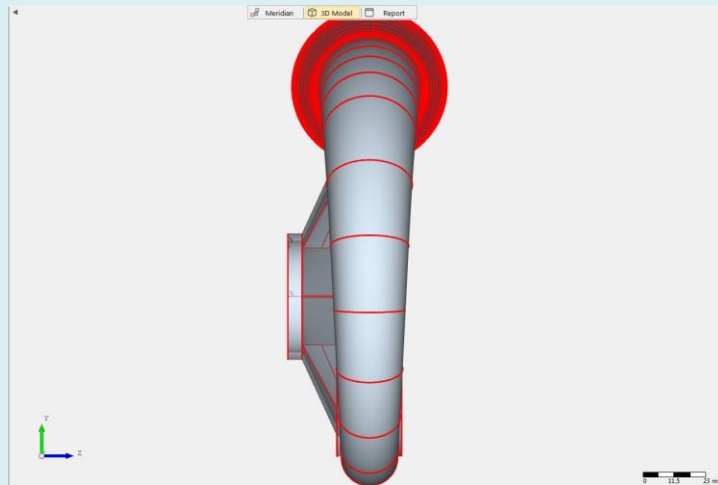


Figura 4. Software CFturbo 2020 R2.0. Selección en modelado 3D, eje X.
Figure 4. CFturbo 2020 R2.0 software. Selection in 3D modeling, X axis.

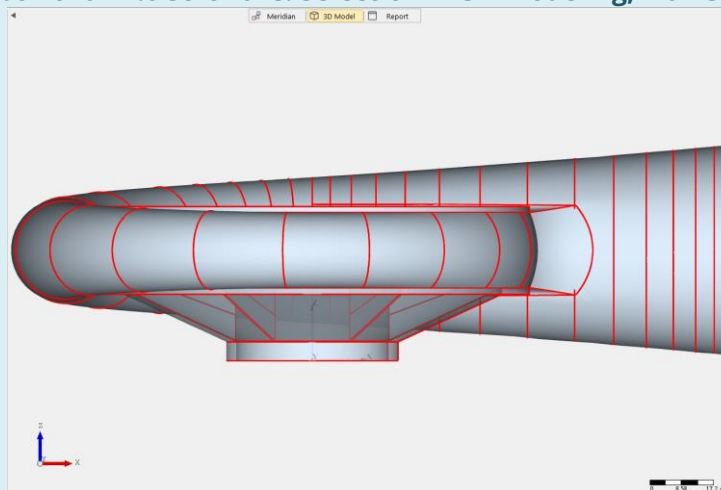


Figura 5. Software CFturbo 2020 R2.0. Selección en modelado 3D, eje Y.
Figure 5. CFturbo 2020 R2.0 software. Selection in 3D modeling, Y axis.

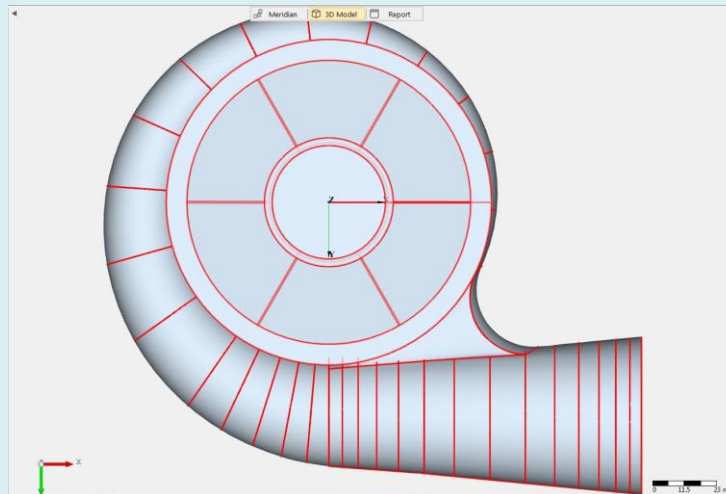


Figura 6. Software CFturbo 2020 R2.0. Selección en modelado 3D, eje Z.
Figure 6. CFturbo 2020 R2.0 software. Selection in 3D modeling, Z axis.

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. 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 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).

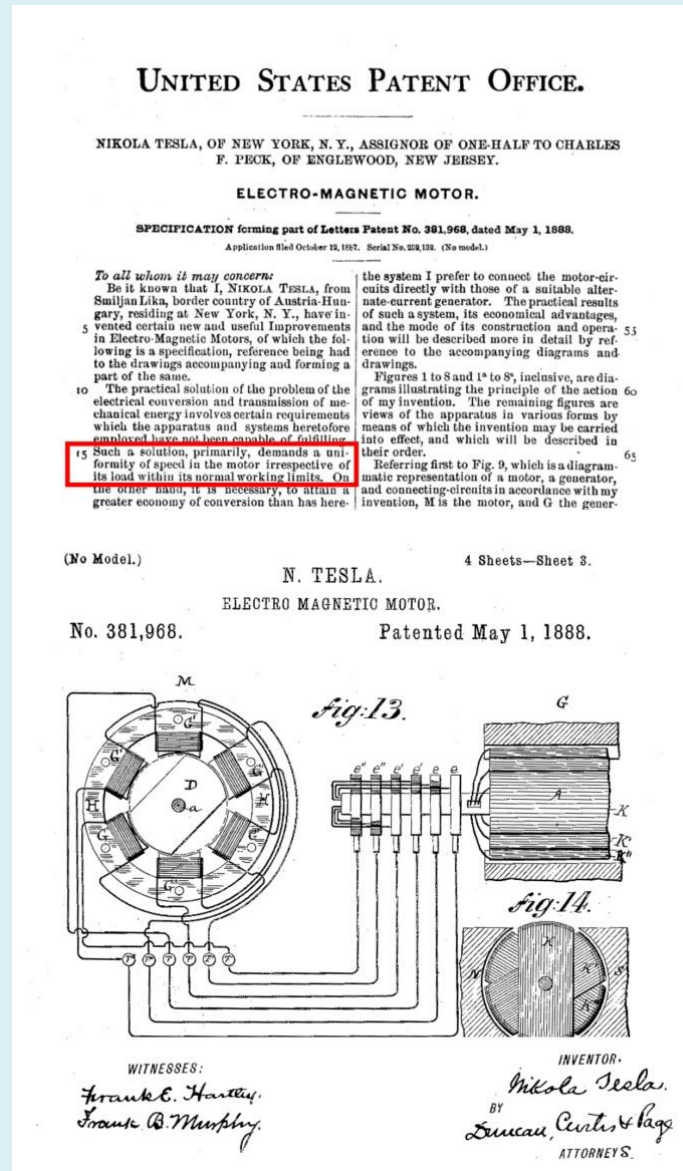


Figura 7. Fotomontaje realizado con las imágenes y textos de la patente de Tesla, para indicar de dónde se obtuvo la idea inspiradora, creación propia a partir de la patente. Después de los años de protección legal, la patente es de libre utilidad para la humanidad. Detalle de la línea n° 15 de la patente de invención n° 381.968 del ingeniero eléctrico Nikola Tesla y dibujo del mismo, fechado el 1 de mayo de 1888 (padre del sistema de corriente alterna mundial). Fuente: Tesla, 1887: US381968A.

Figure 7. Photomontage made with the images and texts of the Tesla patent, to indicate where the inspiring idea was obtained, own creation based on the patent. After the years of legal protection, the patent is of free utility to mankind. Detail of line No. 15 of the invention patent No. 381,968 of the electrical engineer Nikola Tesla and his drawing, dated May 1, 1888 (father of the world alternating current system). Source: Tesla, 1887: US381968A.

La citada patente de la invención, se basa en motores de inducción asincrónicos convencionales (como propuso originalmente Tesla), y en la presente innovación se propone el uso de 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.

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 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). En este caso, el campo magnético generado por el devanado interior del rotor fue reemplazado por imanes permanentes de ferrite. 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. En el caso de su uso como motores, una cuestión importante es su método de arranque, que se comenta en otro apartado.

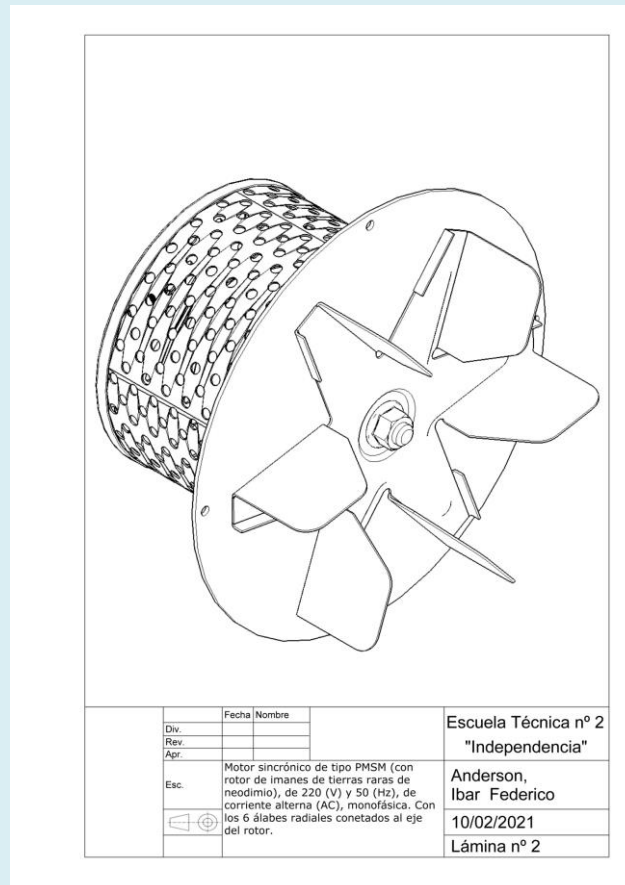


Figura 8. Perspectiva isométrica del motor síncrono monofásico de corriente alterna (AC) PMSM/IPM 220 (V) y 50 (Hz), con las seis palas radiales conectadas al eje del rotor.
Figure 8. Isometric view of the PMSM/IPM 220 (V) and 50 (Hz) single-phase alternating current (AC) synchronous motor, with the six radial blades connected to the rotor shaft.

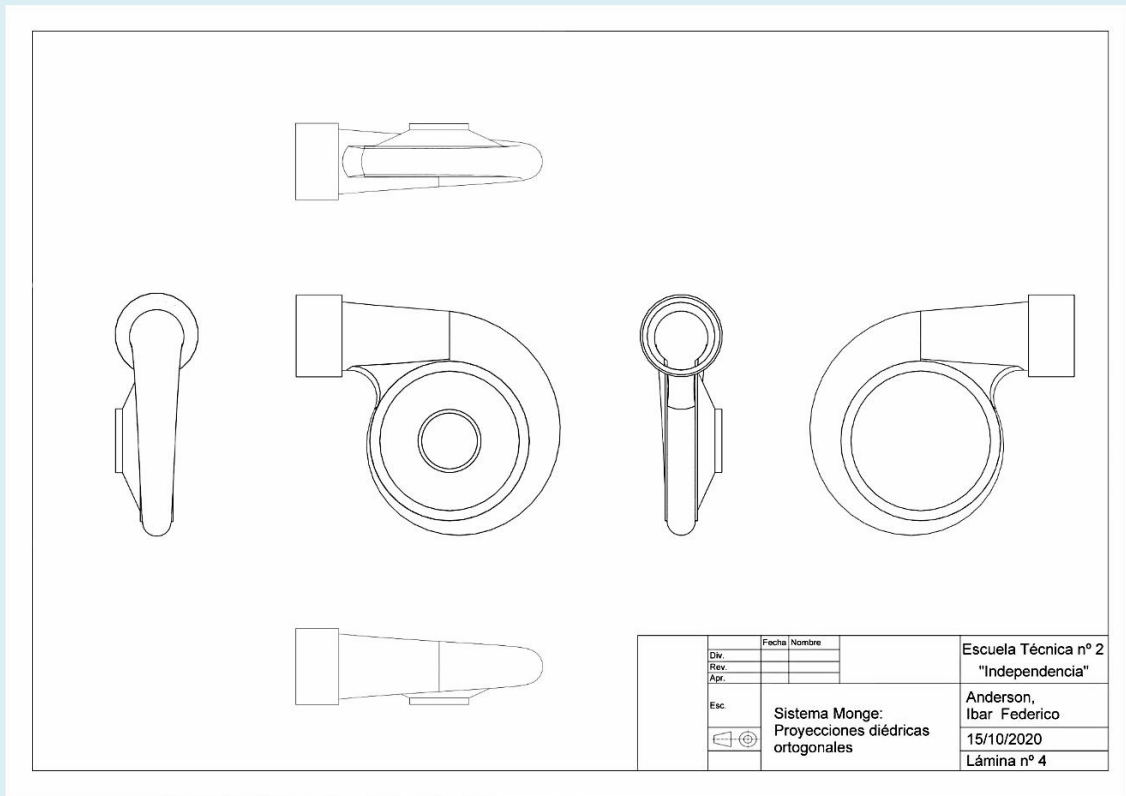


Figura 9. Sistema Monge: Proyecciones diédricas ortogonales de la carcasa: estator, impulsor y voluta.

Figure 9. Monge System: Orthogonal dihedral projections of the casing: stator, impeller and volute.

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. Este análisis 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). En el diseño aquí propuesto, la relación Volts/Hertz no es constante y 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, que redundará en una mejora de la Eficiencia Energética (EE), tal como se puede observar en la Tabla 1.

Tabla 1. La relación tensión/frecuencia constante en 4.4 a partir del uso de un variador de frecuencia (VFD) se consigue que la velocidad del motor disminuya sin perder par. Table 1. The constant voltage/frequency relationship in 4.4 from the use of a variable frequency drive (VFD) makes the motor speed decrease without losing torque.

Voltaje (Voltios)	Frecuencia (Hertz)	Voltaje/frecuencia (V/Hz)
220	50	4.4
110	25	4.4

Tabla 2. La relación voltaje/frecuencia constante en 4.4 baja a 2.2 en el diseño del motor síncrono tipo PMSM/IPM de alta Eficiencia Energética (EE) para ser aplicado al soplador de aire centrífugo; lo que implica una disminución del par.

Table 2. The constant voltage/frequency ratio in 4.4 drops to 2.2 in the design of the PMSM/IPM type synchronous motor with high Energy Efficiency (EE) to be applied to the centrifugal air blower; which implies a decrease in torque.

Voltaje (Voltios)	Frecuencia (Hertz)	Voltaje/frecuencia (V/Hz)
220	50	4.4
110	50	2.2

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, aunque debe advertirse que este principio no se aplica experimentalmente para mover otros fluidos como el agua, por lo que no está indicado su uso en bombas centrífugas para líquidos.

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 nº 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.

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, aunque 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).

En términos generales, esta innovación requería tener en cuenta los principios físicos clásicos y las leyes fundamentales de la electricidad y el magnetismo como el comportamiento de la ley de Ohm en corriente alterna, la ley de Faraday-Lenz y otras leyes de corriente alterna conocidas (Resnick et al., 2007; Sears y Zemansky, 2009a, 2009b; Tipler y Mosca, 2006; y Serway y Jewett, 2008), por citar algunos ejemplos que representan conceptos clásicos sobre los fundamentos teóricos y físicos de los motores que explican su funcionamiento electromagnético; además, teniendo en mente una bibliografía sobre máquinas eléctricas de corriente alterna publicada en español (Fitzgerald et al., 1975, 2003; Chapman, 1987; Vargas-Machuca Saldariaga, 1990; Harper, 2006a, 2006b; Wildi, 2007; Aller, 2008; Fraile Mora, 2008; Mohan et al., 2009 y Contreras Villamizar y Sánchez Rodríguez, 2010) y otro material bibliográfico en inglés (Thompson, 1895; Wildi, 2007; Anderson, 2022b, 2022c). Se procedió a analizar la bibliografía a la luz de la idea del invento del motor de inducción de dos fases de 1885 que se le atribuye al ingeniero eléctrico italiano Galileo Ferraris y especialmente a la patente nº 381968 de 1888 del ingeniero eléctrico serbio Nikola Tesla (Tesla, 1887). Asimismo, atento a la nueva y extensa bibliografía específica sobre el abordaje de los problemas ambientales y la denominada “huella de carbono” y eficiencia energética (EE), el estudio se ha centrado en una revisión bibliográfica específica sobre ecodiseño y EE en sistemas de refrigeración y ventilación; teniendo en cuenta un par de trabajos personales en español e inglés (Anderson, 2019a; 2019b; 2019c; 2022a) y otros más generales y de varios autores (Instituto Tecnológico de Canarias, 2008; Soler y Palau, 2009; Canale, 2010; 2013; Subsecretaría de Ahorro y Eficiencia Energética, 2017).

De los siete (7) niveles de la Rueda Estratégica del Ecodiseño se ha decidido el enfoque central 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). Comparando el diseño “antiguo” (electrónico) versus el “nuevo” diseño (electromecánico) podemos efectuar algunas consideraciones. En el nuevo proyecto, la relación tensión/frecuencia se sigue manteniendo de forma no-constante (con disminución del par); pero con una diferencia conceptual entre el nuevo diseño (electromecánico) del circuito RCL para el motor síncrono tipo PMSM/IPM de alta eficiencia energética (EE), con reactancia inductiva en serie a la entrada de una de las fases al motor y condensador en paralelo al motor. Comparado con el antiguo diseño (electrónico) que generaba un alto porcentaje de armónicos en tensión (THDv) y en corriente (THDi) debido a la carga no lineal (producto del recorte de la tensión de corriente alterna por parte del Triac), por encima del 60%, según simulaciones en el software de electrónica NI Multisim 14.0, valores que superan los estándares permitidos por la norma IEEE 519, que solo permite THDv<5% (situación normal) y THDi<10% (situación normal). Por otro lado, el Factor de Cresta (CF) calculado para el diseño antiguo (electrónico) era equivalente a 2.63, mientras que el valor recomendado no debe exceder 1.8. Con el nuevo diseño (electromecánico) ese valor se redujo a 1,9, aspecto que confirma la hipótesis de trabajo inicial para el diseño de este prototipo experimental.

Los inconvenientes que todavía persisten se pueden solucionar con un filtro pasivo tipo paso bajo (LPF) o filtro de interferencia electromagnética (EMI). El filtro EMI es un filtro de la interferencia conducida en la red eléctrica, generada por la carga. El principal objetivo de un filtro de red sería minimizar el nivel de radiación electromagnética que produce el motor (carga). Los elementos LC del filtro de paso

bajo (LPF) reducen la ondulación del voltaje de salida y producen una caída de voltaje de entrada promedio (V_{avg}).

La nueva hipótesis de diseño electromecánico en vez de electrónico está claramente orientada en la dirección correcta, ya que los armónicos descienden (rectifica la señal sinusoidal de la corriente alterna, como se observa en la forma de la onda de tensión), aunque la señal indica que la carga sigue siendo no lineal. Adicionalmente, como otro dato interesante de análisis, no hay alteración armónica de la frecuencia de 50 (Hz), mientras que la potencia activa (vatios) y el consumo energético medido en kWh (kilovatios-hora) disminuyen. 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, aunque manteniendo la relación tensión/frecuencia no constante, con una disminución del par. 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. Dado 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. En la Figura 10 se puede observar una simulación del software NI Multisim 14.0.

Lo importante es lo que ocurre en ambos casos sobre el trabajo mecánico realizado por el rotor sobre los álabes radiales centrífugos (carga)(Figuras 10 y 11) en la sonda (Punto 1) que registra el detalle de la punta del analizador, convirtiendo radianes sobre segundos a revoluciones por minuto (Rad/s a RPM) y éstas en frecuencia (Hertz). Se observa que gira a 3000 (RPM) lo que equivale a 50 (Hz), producto de la frecuencia del motor síncrono. Independientemente de si el interruptor SPDT está "apagado" o "encendido" en el modo de eficiencia energética (EE), la frecuencia de la corriente alterna es siempre de 50 (Hertz). Por esta razón, el motor, aunque disminuya su par, no disminuye su velocidad.

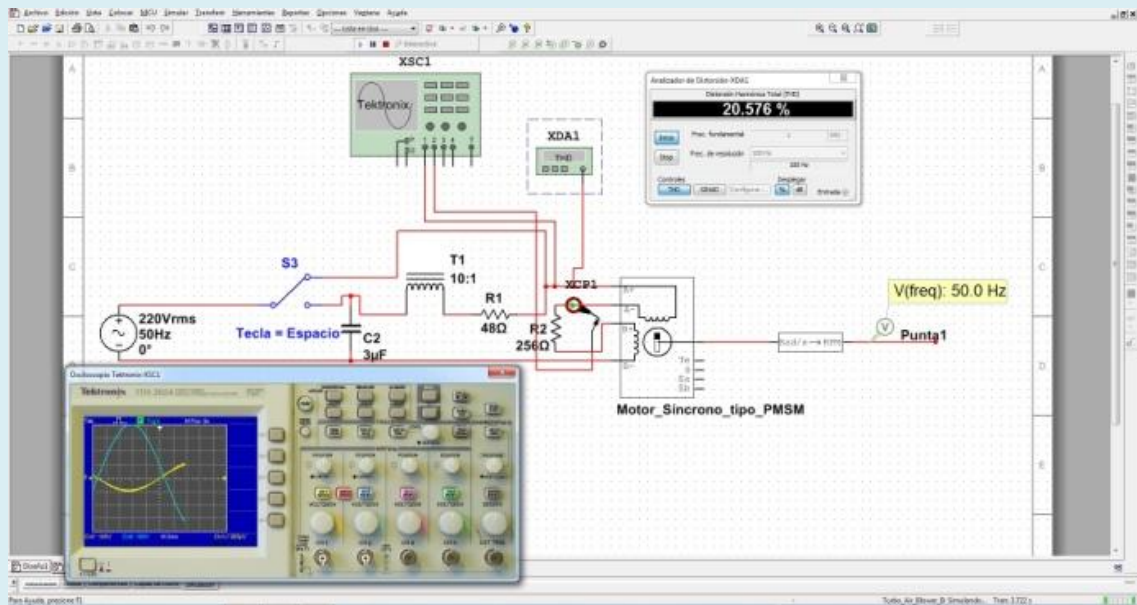


Figura 10. Figura de simulación del software NI Multisim 14.0, con el interruptor SPDT desconectado, el THDv (en voltaje) es de 20.5%, y tiene un THD superior al 5%, lo cual no es aceptable por el estándar IEEE 519, La tensión y corriente se observan en el osciloscopio.

Figure 10. NI Multisim 14.0 software simulation figure, with the SPDT switch off, the THDv (in voltage) is 20.5%, and it has a THD greater than 5%, which is not acceptable by the user. IEEE 519 standard, The voltage and current are observed on the oscilloscope.

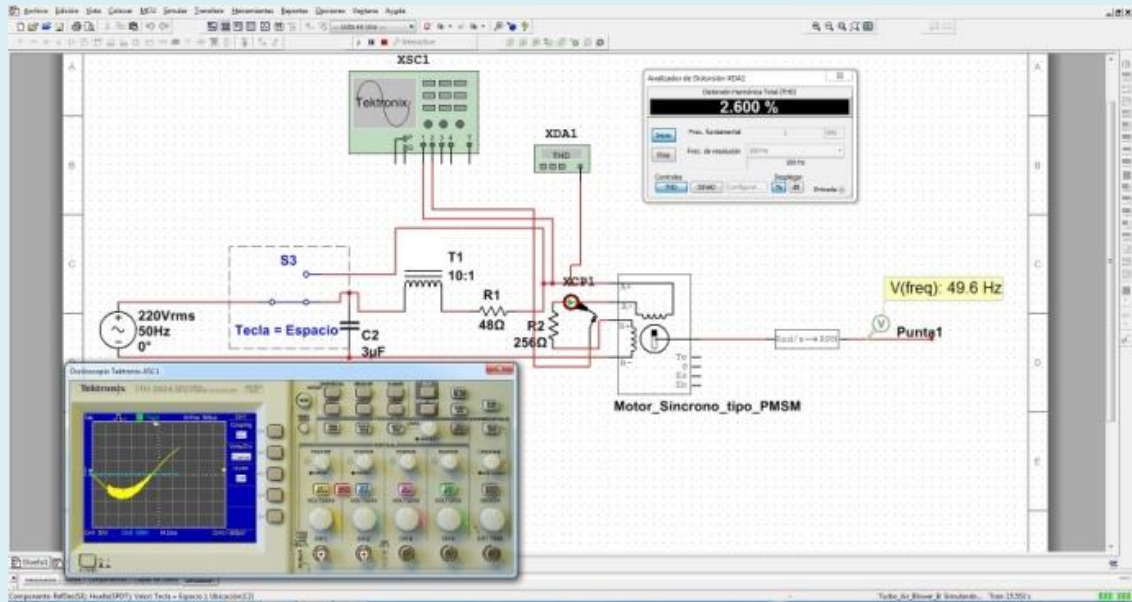


Figura 11. Simulación del software NI Multisim 14.0, con el interruptor SPDT conectado al circuito RCL, el diseño de circuito de paso bajo de tipo inductivo-capacitivo que funciona por analogía con uno resistivo-capacitivo tiene un THDv (voltaje) menos del 5 %, lo que es aceptable según el estándar IEEE 519. Se reducen los armónicos en el osciloscopio, en la forma de onda de tensión. Todo nos lleva a suponer que la hipótesis de diseño para la fabricación del prototipo es correcta.

Figure 11. NI Multisim 14.0 software simulation figure, with the SPDT switch connected to the RCL circuit, the inductive-capacitive type low-pass circuit design that works by analogy with a resistive-capacitive one has a THDv (voltage) less than 5%, which is acceptable according to the IEEE 519 standard. Harmonics in the oscilloscope, in the voltage waveform, are reduced. Everything leads us to assume that the design hypothesis for the manufacture of the prototype is correct.

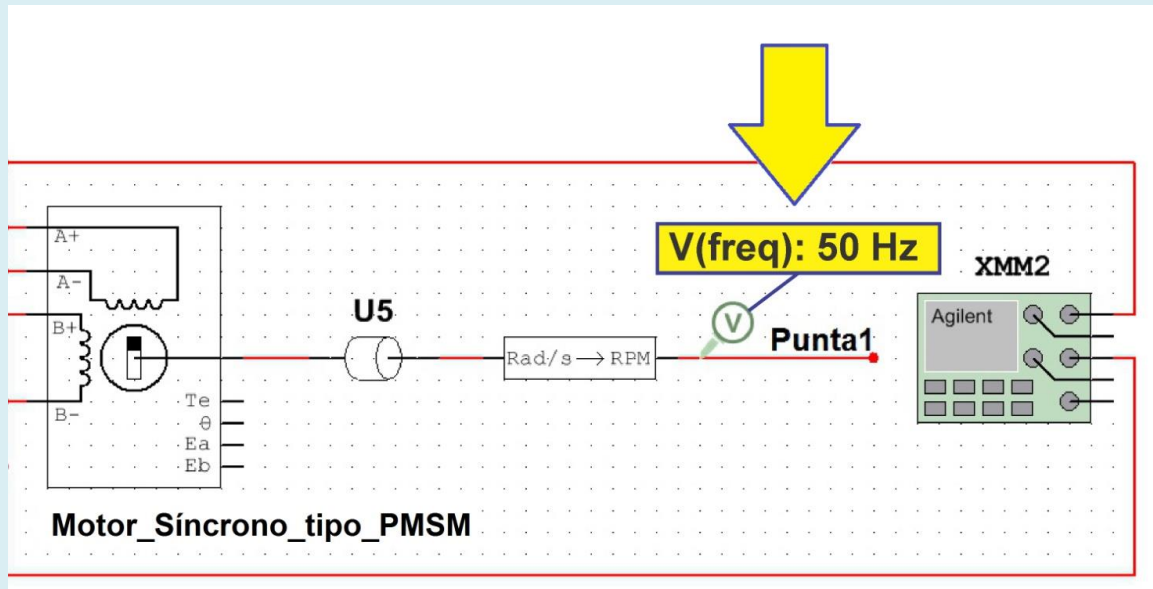


Figura 12. Ampliación del detalle de la punta del analizador que convierte revoluciones por minuto (RPM) a frecuencia (Hertz), sobre el trabajo mecánico realizado por el motor (representado por el símbolo de carga: U5). Se observa que gira a 3000 (RPM) que equivale a 50 (Hz) de la frecuencia del motor síncrono, alimentado con la fuente de alimentación monofásica de 220 (VAC) y 50 (Hz). Sin perder velocidad en la rotación del eje del rotor, es decir, sin reducir la capacidad de realizar trabajo mecánico sobre los álabes radiales.

Figure 12. Enlargement of the detail of the tip of the analyzer that converts revolutions per minute (RPM) to frequency (Hertz), on the mechanical work done by the motor (represented by the load symbol: U5). It is observed that it rotates at 3000 (RPM) which is equivalent to 50 (Hz) of the frequency of the synchronous motor, fed with the single-phase power supply of 220 (VAC) and 50 (Hz). Without losing speed in the rotation of the rotor shaft, that is, without reducing the ability to perform mechanical work on the radial blades.

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

Las actividades realizadas para la construcción del prototipo del soplador centrífugo de aire para uso civil y comercial (no industrial), iniciaron con la selección del motor. 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). 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, factor clave para aumentar la eficiencia energética.

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 pelo. 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 que 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 ($\cos \phi$). La inductancia se obtiene de una bobina análoga a un balasto magnético de $48 \text{ } (\Omega)$ 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).

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) que 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 $\cos \phi$: $\cos (\Phi)$: " $P_{med} = \frac{1}{2}.V.I \cos (\Phi) = V_{rms}.I_{rms}.\cos (\Phi)$ " (Sears-

Zemansky, 2009:1076), valores que fueron tomados con los correspondientes instrumentos de verdadero valor efectivo o RMS (Root Means Square).

Luego, considerando la estabilidad de la frecuencia (Hertz) de la corriente alterna (AC), que en la República Argentina es de 50 (Hertz), se asegura un giro constante a 3000 RPM 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- se obtiene la siguiente fórmula:

$$ns = 120 \cdot f/p$$

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 sincrónica 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. El rotor, a diferencia de las máquinas asíncronas, gira sin deslizamiento a la velocidad del campo giratorio. 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 de la turbina; 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: " $P=\tau.\omega$ " (Tipler-Mosca, 2006:265), donde P , es la potencia (medida en Watts), τ , es el par motor (medida en N.m). y ω , es la velocidad angular (mediada en rad/s). 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). Analizando los valores de potencia a la entrada del motor, solo del motor y no del total del circuito RCL, obtenemos los valores con el circuito de Eficiencia Energética (EE): "APAGADO" y "ENCENDIDO" (Tabla 3).

Tabla 3. Tabla del par-motor (τ) o torque medido en Newtons.metros (N.m), a partir del cálculo de la potencia/velocidad angular (Watts)/(Rad/s): $\tau = P/\omega$.

Table 3. Torque table (τ) or torque measured in Newtons.meters (N.m), from the calculation of power/angular speed (Watts)/(Rad/s): $\tau = P/\omega$.

Llave (S3) al circuito R-C-L	Potencia activa	Par.motor: Torque
Eficiencia Energética (EE)	(Watts)	(Newtons.metros)
Llave (S3) APAGADO	18	0.057
Llave (S3) ENCENDIDO	7.9	0.025

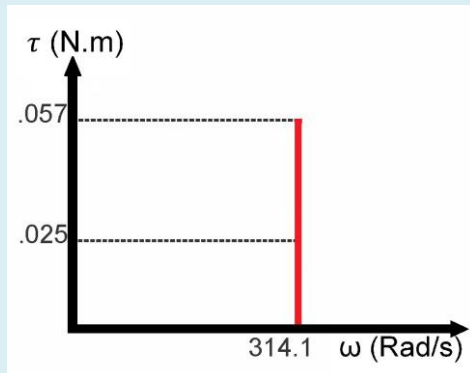


Figura 13. Gráfica de la curva par-velocidad, donde la velocidad sincrónica $\omega=313.159$ (Rad/s) del rotor en función del torque mínimo de $\tau=0.025$ (N.m) y del torque máximo de $\tau=0.057$ (N.m). Recordando que la velocidad de rotación de un motor síncrono es directamente proporcional a la frecuencia de la red en que se conecta de 50 (Hz), donde 314.159 (Rad/s)=3000 (RPM).

Figure 13. Graph of the torque-speed curve, where the synchronous speed $\omega=313.159$ (Rad/s) of the rotor as a function of the minimum torque of $\tau=0.025$ (N.m) and the maximum torque of $\tau=0.057$ (N.m). Remembering that the speed of rotation of a synchronous motor is directly proportional to the frequency of the network in which it is connected to 50 (Hz), where 314.159 (Rad/s)=3000 (RPM).

Según la “Ley de afinidad de los ventiladores” especificada en la Norma UNE 100-230-95, 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= RPM), la potencia mecánica (medida en vatios= W) suministrada al ventilador se reduce un 56%, con las variables de potencia (W) y velocidad (RPM) determinadas según las Normas internacionales ISO 5801-96(E) y WD 13348-1998.

La densidad no varía

	Condiciones conocidas	Calcular (Seleccionar)
r.p.m. [N]	<input type="text" value="3000"/>	<input checked="" type="radio"/> <input type="text" value="2289,4"/>
Potencia [Pw]	<input type="text" value="18"/>	<input type="radio"/> <input type="text" value="8"/>

Figura 14. Imagen obtenida a partir de la calculadora online para la “Ley de afinidad de los motores de los ventiladores a-sincrónicos”, si la densidad del fluido aire no varía.
Figure 14. Image obtained from the online calculator for the "Law of affinity of a-synchronous fan motors", if the density of the air fluid does not vary.

Considerando que la “Ley de afinidad de los ventiladores” aplica para los motores a-sincrónicos y no aplica para los motores sincrónicos, como el utilizado en el proyecto, la ventaja de eficiencia energética (EE) es notablemente superior (e imposible de comparar dado que no existe una Norma que establezca dichos parámetros de comparación). 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 (W) del motor, 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 de 50 Hz. Por otro lado, inducía a operar el motor reduciendo la relación Vots/Hertz 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 (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, 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. Un inductor es utilizado comúnmente en los balastos para proporcionar las adecuadas condiciones de arranque y funcionamiento eléctrico para alimentar una lámpara fluorescente, lámpara de neón o de descarga de alta intensidad (HID). Sin embargo, 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, ya que debido a la corriente alterna la bobina del balasto 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 (Z).

Donde:

j es la unidad imaginaria.

$X = (X_L - X_C)$ es la reactancia en ohmios (Ω).

ω es la velocidad angular a la cual está sometido el elemento, L y C son los valores de inductancia y capacidad respectivamente.

Dependiendo del valor de la energía y la reactancia se dice que el circuito presenta:

Si, $X < 0$, reactancia capacitiva ($X_C > X_L$).

Si, $X > 0$, reactancia inductiva ($X_L > X_C$).

Si, $X = 0$, no hay reactancia y la impedancia es puramente resistiva ($X_L = X_C$).

La reactancia capacitiva se representa por X_C y su valor viene dado por la fórmula:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

La reactancia inductiva es representada por X_L y su valor viene dado por:

$$X_L = 2\pi f L$$

Donde:

X_L = Reactancia inductiva en ohmios (Ω).

L = Inductancia en henrios (H).

f = Frecuencia en hercios (Hz).

ω = Velocidad angular en radianes/segundo (rad/s).

Cuando la reactancia (Z_1) inductiva 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. 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 coseno 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).

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 (V_{avg}). Con un multímetro digital medidor del voltaje (V_{rms}), 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) (Figuras 15 a 20).



Figura 15. Banco de pruebas conectado al motor extractor/soplador centrífugo de aire viciado de SARS-CoV-2 o Covid-19 (Coronavirus): Turbo. Con multímetro digital (medidor de voltios en AC), pinza amperométrica (medidor de intensidad de la corriente en AC), frecuencímetro (medidor de Hertz), fotocómetro láser (medidor de velocidad en RPM), osciloscopio digital medidor de la forma de onda de la corriente alterna en tensión ($V_{pico-pico}$, V_{avg} , V_{rms}), para cálculo de factor de cresta de distorsión armónica, osciloscopio analógico para observación cualitativa de la THD (distorsión armónica de la corriente alterna), vatímetro (medidor de potencia activa en vatios o watts), factor de potencia (coseno de ϕ), power-meter (medidor del consumo de energía activa en kilowatts-hora: kwh).

Figure 15. Test bench connected to SARS-CoV-2 or Covid-19 (Coronavirus) stale air extractor/centrifugal blower motor: Turbo. With digital multimeter (volt meter in AC), clamp meter (current intensity meter in AC), frequency meter (Hertz meter), laser photometer (speed meter in RPM), digital oscilloscope waveform meter the alternating current in voltage ($V_{pico-pico}$, V_{avg} , V_{rms}), to calculate the harmonic distortion crest factor, analog oscilloscope for qualitative observation of the THD (harmonic distortion of the alternating current), wattmeter (active power meter in watts or watts), power factor (cosine ϕ), power-meter (active energy consumption meter in kilowatt-hours: kwh).



Figura 16. Vista del frecuencímetro encendido indicando los 50 (Hertz) de la corriente alterna (AC), junto al multímetro digital (voltímetro) apagado.
Figure 16. View of the frequency meter turned on indicating the 50 (Hertz) of the alternating current (AC), next to the digital multimeter (voltmeter) turned off.

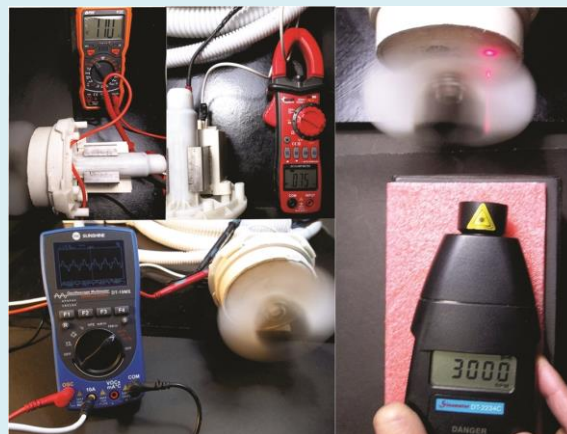


Figura 17. Motor sincrónico tipo PMSM/IPM conectado al osciloscopio mostrando la forma de onda de la tensión no-lineal, también conectado al multímetro digital mostrando la caída de tensión de 110 (voltios), y a la pinza amperométrica evidenciando la caída en la circulación de la corriente eléctrica a 0.075 (amperios) y de la constante en la velocidad del álabe a 3000 (RPM).
Figure 17. PMSM/IPM type synchronous motor connected to the oscilloscope showing the non-linear voltage waveform, also connected to the digital multimeter showing the voltage drop of 110 (volts), and to the amperometric clamp showing the drop in current flow electrical to 0.075 (amps) and the constant in the speed of the blade to 3000 (RPM).



Figura 18. Arriba a la izquierda, motor sincrónico tipo PMSM/IPM testeado con 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). Abajo, detalle de las conexiones eléctricas de la llave térmica y el disyuntor diferencial del banco de pruebas y la reactancia inductiva conectada en serie a una fase, en su interior junto al capacitor en paralelo a las dos (2) fases en el punto de acople (aguas abajo). El capacitor en paralelo conectado a las dos fases, va unido a la reactancia-inductiva en serie a una de las fases, que es el secreto del funcionamiento del motor sincrónico PMSM/IPM de bajo consumo energético y alta Eficiencia Energética(EE); su secreto se guarda para la reivindicación acorde a la Ley de Patentes N° 24481 modificada por su similar N° 24.572 (T.O. 1996) y su Reglamentación (no se muestra para preservar la novedad y no divulgación previa).

Figure 18. Top left, tested PMSM/IPM type synchronous motor with energy efficiency (EE) circuit on. Active power 6.3 (watts) in all R-C-L circuit. Top right, power factor (f.d.p.) equivalent to 0.81 (cosine Φ). Below, detail of the electrical connections of the thermal switch and the differential circuit breaker of the test bench and the inductive reactance connected in series to one phase, inside it together with the capacitor in parallel to the two (2) phases at the coupling point (downstream). The parallel capacitor connected to the two phases is linked to the inductive-reactance in series to one of the phases, which is the secret of the operation of the PMSM/IPM synchronous motor with low energy consumption and high Energy Efficiency (EE); its secret is kept for the claim according to the Patent Law No. 24481 modified by its similar No. 24,572 (T.O. 1996) and its Regulations (not shown to preserve novelty and no prior disclosure).

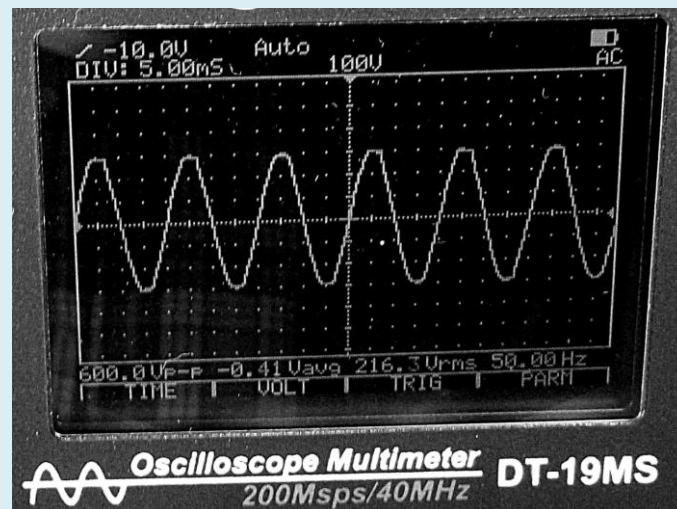


Figura 19. Ampliación de la imagen observada en el osciloscopio la señal de onda es perfectamente sinusoidal cuando no está conectado al sistema de Eficiencia Energética (EE). No se observan presencia de armónicos (THD). Tensión pico 600 ($voltios_{pico}$) y 216 (V_{rms}), 50 (Hz). El equipo básico utilizado 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.

Figure 19. Enlargement of the image observed in the oscilloscope, the wave signal is perfectly sinusoidal when it is not connected to the Energy Efficiency (EE) system. No presence of harmonics (THD) are observed. Peak voltage 600 ($voltios_{pico}$) y 216 (V_{rms}), 50 (Hz). The basic equipment used for the analysis of non-sinusoidal voltages and currents is the oscilloscope. The graph of the waveform on the oscilloscope provides immediate quantitative information about the degree and type of distortion; Sometimes resonance cases are identified through the visible distortions that are present in the voltage and current waveforms. No harmonic distortion is observed.

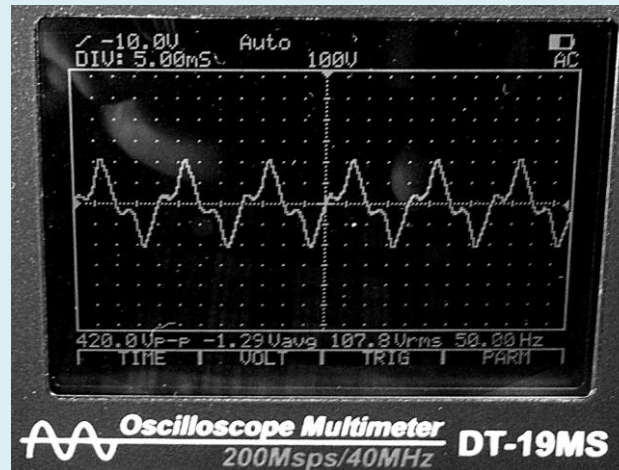


Figura 20. El factor de cresta (CF) es una indicación de armónicos causado por la carga no-lineal conectada al control de potencia de la reactancia-inductiva en serie a una de las fases, lo que demanda una corriente distorsionada o no-senoidal. Para una medición de corriente y voltaje, el valor de factor de cresta es (CF)=1.9.

Figure 20. The crest factor (CF) is an indication of harmonics caused by the non-linear load connected to the inductive-reactor power control in series to one of the phases, which demands a distorted or non-sinusoidal current. . For a current and voltage measurement, the crest factor value is (CF)=1.9.

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

$$CF = \frac{V_{peak}}{V_{rms}} = CF = \frac{420 (Volts_{peak})}{2} = 210 (Volts) \rightarrow \frac{210 (Volts)}{107.8 (Volts_{RMS})} = 1.948$$

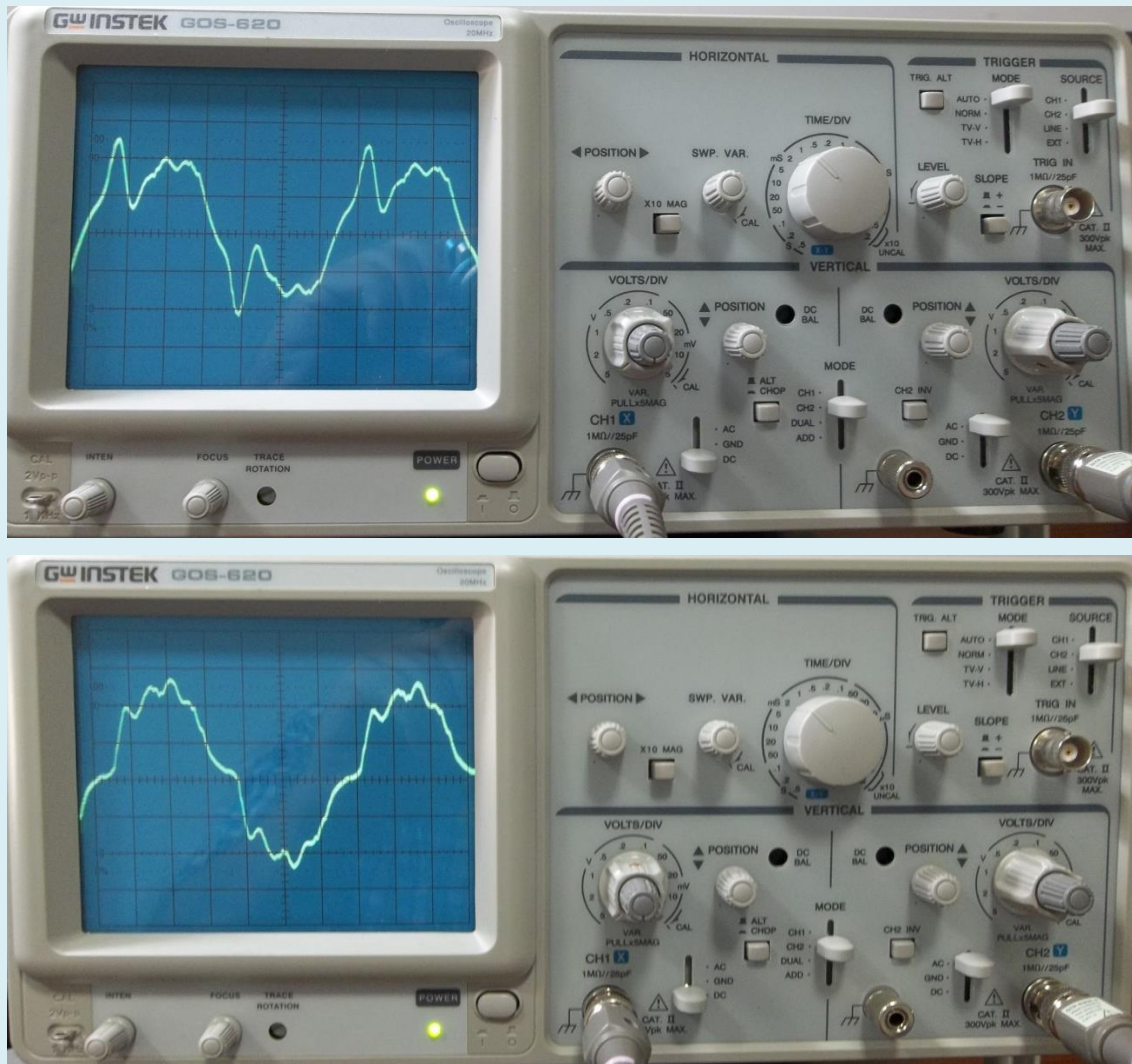


Figura 21. Para la observación de la distorsión armónica (THD) de la corriente alterna, aguas arriba del circuito RL de eficiencia energética se utilizó un transformador reductor de AC y sin filtrado a la salida de la reactancia capacitiva-inductiva. En la imagen de arriba del osciloscopio se observa 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.

Figure 21. To observe the harmonic distortion (THD) of the alternating current, upstream of the energy efficiency RL circuit, an AC step-down transformer was used without filtering at the output of the capacitive-inductive reactance. The oscilloscope image above shows the waveform without filtering, and the waveform filtered with an EMI (ElectroMagnetic Interference) low-pass filter (LPF) with passive elements is observed in the image below.

Tabla 4. (*) Valores calculados por fórmula, a partir de la fórmula de potencia activa en corriente alterna. () Valores obtenidos por instrumento (vatímetro). Reducción de un 56% del consumo de energía eléctrica activa (kWh), debido a que la potencia activa (Watts) se reduce 67% de la potencia nominal del motor.**

Table 4. (*) Values calculated by formula, from the active power formula in alternating current. () Values obtained by instrument (wattmeter). 56% reduction in active electrical energy consumption (kWh), due to the fact that the active power (Watts) is reduced by 67% of the motor's nominal power.**

(a) Motor síncrono tipo PMSM/IPM monofásico (AC), 220 (V) – 50 (Hz). Con el circuito de Eficiencia Energética (EE) APAGADO.				
Revoluciones por minuto (RPM)	Potencia activa (Watts)	Tensión (Voltios)	Intensidad de la corriente (Amperios)	Factor de potencia (Cos Φ)
3000	17.3(*)	220	0.454	0.17
3000	17,7(**)	220	0.456	0.17
(b) Motor síncrono tipo PMSM/IPM monofásico (AC), 220 (V) – 50 (Hz). Con el circuito de Eficiencia Energética (EE) ENCENDIDO.				
Revoluciones por minuto (RPM)	Potencia activa (Watts)	Tensión (Voltios)	Intensidad de la corriente (Amperios)	Factor de potencia (Cos Φ)
3000	6.6(*)	110	0.075	0.81
3000	6.3(**)	110	0.106	0.81

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 -3000 (RPM)-, se cambia manualmente al modo de Eficiencia Energética (EE). El cambio de modo a Eficiencia Energética (EE) se logra mediante 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 (Hertz). 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 nueva hipótesis de diseño electromecánico está claramente orientada en la dirección correcta, ya que los armónicos disminuyen, evidenciado porque 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, como otro dato interesante que resultó del análisis de los datos, 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 ($\text{Cos } \Phi$) a 0.81 ($\text{Cos } \Phi$) 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.

-(b) como un reductor de la ondulación del voltaje de salida o filtro paso-bajo (LPF) de interferencia electromecánico (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, y reduce el ripple en el voltaje de salida actuando como un filtro armónico

Es importante destacar 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)-.

A modo de comparación un motor de inducción monofásico, de los que se utilizan normalmente en los equipos de refrigeración, o motor a-síncrono sin escobillas de tipo "frager" (en cortocircuito) trabaja a una velocidad 44% menor que el motor síncrono, en su velocidad máxima de 1690 (RPM), con el 100% de su potencia activa máxima de 19 (Watts). En cambio, el motor sincrónico de tipo PMSM/IPM diseñado para este proyecto (con un control de potencia por reactancia-inductiva con capacitor) 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). En contraposición, se produce un 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. Este motor trabaja a una velocidad 44% menor que el motor síncrono, en su velocidad máxima de 1690 (RPM)- con el 100% de su potencia activa máxima de 19 (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).

Otra ventaja del motor síncrono de tipo PMSM/IPM es que 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), el 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. 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. Por lo tanto, 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).

Por eso decimos que el prototipo experimental aquí presentado tiene doble ventaja ya que 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, pero a mayores revoluciones por minuto (RPM) que los motores convencionales a-síncronos utilizados en los equipos de ventilación, extractores y sopladores.

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.

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. Por lo tanto, la relación con la huella de carbono es directamente proporcional a la potencia del motor y a futuros prototipos de mayor potencia aunque 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 podríamos describir a esta innovación tecnológica como un motor hertziano.

Información sobre registro de la innovación

El producto/diseño se puede proteger acorde a la Ley de Patentes N° 24.481 modificada por su similar N° 24.572 (T.O. 1996) y su Reglamentación, como un “Modelo de Utilidad” (pequeño invento o innovación tecnológica). Hay detalles y ciertos aspectos constructivos que no se han mostrado/revelados en esta publicación para preservar la novedad y no divulgación previa. La publicación busca su perfil científico de cara a la sociedad, ocultando los aspectos tecnológicos. Se busca socio para acordar patente y/o transferencia de *know how* por intermedio del LIDDI (Laboratorio de Investigación Y Desarrollo del Departamento de Diseño

Industrial-FBA-UNLP) y por intermedio de la oficina de la Dirección de Propiedad Intelectual, Secretaría de Asuntos Jurídicos-Legales¹⁴ de la UNLP.

Agradecimientos

Al Director del Proyecto (Código: B374) con sede en la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SCyT), Departamento de Diseño Industrial (DDI), Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Cuyo título es: *"Gestión Integrada del Diseño y la Innovación. Aportes para una revisión teórico-conceptual y metodológica"* Mg. DI. Federico del Giorgio Solfa. A la Directora de la E.E.T. N° 2 "Independencia" de la ciudad de Concordia, Provincia de Entre Ríos. Prof. Patricia Peña quien permitió y habilitó los espacio para el desarrollo de esta práctica profesional con los alumnos del Ciclo Superior.

Bibliografía

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

¹⁴ Ver: <https://unlp.edu.ar/propiedadintelectual>

- Anderson, I. F. (13-16 de septiembre de 2022). *1º Premio Nacional INNOVAR 2021 de la Agencia Nacional I+D+I – MINCYT Nación: extractor de aire centrífugo, para ambientes contaminados con SARS-CoV-2, de alta eficiencia energética*. X Jornadas de Investigación en Disciplinas Artísticas y Proyectuales (JIDAP), Facultad de Bellas Artes, UNLP, La Plata.
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/148463/Documento_completo.-ANDERSON.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Anderson, I. F. (2022b). Energy Efficient Centrifugal Air Extractor for Environments Contaminated With Sars-Cov-2 (Coronavirus). How to Build a Motor That Saves Electricity. *OSFPREPRINTS*, 1-31. <https://doi.org/10.31219/osf.io/gepbc>
- Anderson, I. F. (2022c). Hertzian Motor: An Innovative Method to Obtain an Energy Efficiency of 90%, in Savings in Single-Phase Active Energy (Kwh), If The “Fan Law” Is Applied To PMSM-Type Synchronous Motors Without The Need to Apply The Use of Variable Frequency Drives (VFD). *Preprints*. <https://doi.org/10.20944/preprints202212.0319.v1>
- Canale, G. (2010). *Manual de diseño para la sustentabilidad*. Diseño Librería Técnica CP67
- Canale, G. (25-27 de marzo de 2013). *Aportes de ACV simplificado al diseño para la sustentabilidad. Casos de aplicación industrial*. V Conferencia Internacional sobre Análisis de Ciclo de Vida CILCA 2013, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza.
- Chapman, S. J. (1987). *Máquinas eléctricas*. (5ª ed.). Mc Graw Hill
- Contreras Villamizar, E. F. y Sánchez Rodríguez, R. (2010). *Diseño y construcción de un banco de prácticas en motores eléctricos, como apoyo a la asignatura diseño de máquinas II*. Universidad Industrial de Santander
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Kusko, A. (1975). *Teoría y análisis de las máquinas eléctricas*. Editorial Hispano Europea
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, Ch. y Umans, S. D. (2003). *Máquinas eléctricas*. (6ª ed.). Mc Graw Hill
- Frailé Mora, J. (2008). *Máquinas eléctricas*. (6ª ed.). Mc Graw Hill
- Harper, G. (2006a). *El ABC de las máquinas eléctricas II. Motores de corriente alterna*. Grupo Noriega Editores
- Harper, G. (2006b). *El ABC de las máquinas eléctricas III. Instalación y control de motores de corriente alterna*. Grupo Noriega Editores
- Instituto Tecnológico de Canarias (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. ITC, S. A.

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