



# Investigación aplicada e innovación

Volumen 16, 2022 Lima, Perú • ISSN 1996-7551 | ISSN-L 2707-9368

Oscar Peña  
Jordy Abanto

**Filtros activos en  
media tensión como  
alternativa al uso de  
SVC para el  
mejoramiento de la  
calidad de energía  
en plantas  
siderúrgicas**

Pág. 5

Sixto Sarmiento Chipana  
Luis Rojas Mosquera

**Detección de fallas de  
rodamientos mediante  
análisis vibracional**

Pág. 19



[www.tecsup.edu.pe](http://www.tecsup.edu.pe)



# LE CO ND IN

Filtros activos en media tensión como alternativa al uso de SVC para el mejoramiento de la calidad de energía en plantas siderúrgicas

.....Oscar Peña  
.....Jordy Abanto  
**5**

Detección de fallas de rodamientos mediante análisis vibracional

.....Sixto Sarmiento Chipana  
.....Luis Rojas Mosquera  
**19**

El error de muestreo de minerales, un análisis del muestreo manual y el uso del divisor Jones

.....Luis Huere Anaya  
**31**

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

.....Anderson Ibar Federico  
**45**

Factores asociados a la violencia familiar en el Perú (2019-2021), una aproximación desde la ciencia de datos

.....Roberto León  
.....George Tarazona  
**59**

Efectos de la gamificación en la habilidad de resolución analítica de problemas

.....Luisa Turkowsky  
**71**

---

**Director:** Antonio Lazo de la Vega, *Tecsup*

---

**Editor en jefe:** Jorge Bastante Pazos, *Tecsup*.

---

**Comité editorial:** Aurelio Arbildo, *Inducontrol*; Carlos Hernández, *Alicorp*; Elena Flores, *UTE*; Jack Vainstein, *Vainstein Ingenieros*.

---

**Coordinador editorial:** Diego Nishimazuruga Lima

---

**Colaboradores:** Milton Chuquiruna Bernales, José Espinoza Melgarejo, María Eugenia Morales Villanueva, Adriana Arista Valdivia, Claudia Enriquez Rivera, Jorge Castillo Migone, Ignacio Mamani Mamani, Luis Gonzáles Obando, Alfredo Pacheco Effio, Julio Monjarás Salvo, Elmer Ramírez Quiroz, Carlos Cuba Anicama, José Lazarte Rivera, Pedro Vizarreta García.

---

**Correctora de estilo:** Laura Gómez Rojas

---

**Diagramación:** Tarea Asociación Gráfica Educativa

---

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú: 2007-04706

Publicado en diciembre 2022

---

---

**Tecsup:**

**Sede Norte:**

Vía de Evitamiento s/n Víctor Larco Herrera. Trujillo, Perú.

**Sede Centro:**

Av. Cascanueces 2221 Santa Anita. Lima, Perú.

**Sede Sur:**

Urb. Monterrey Lote D-8 José Luis Bustamante y Rivero. Arequipa, Perú.

---

**Publicación:**

Tecsup se reserva todos los derechos legales de reproducción del contenido, sin embargo autoriza la reproducción total o parcial para fines didácticos, siempre y cuando se cite la fuente.

**Publicación Indexada en Latindex**



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional.

---

**Suscripciones:**

[investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe](mailto:investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe)

**Página Web:**

<https://www.tecsup.edu.pe/revista>

---

**Nota:** Las ideas y opiniones contenidas en los artículos son de responsabilidad de sus autores y no refleja necesariamente el pensamiento de nuestra institución.

---



Revisa todas las ediciones de la Revista I+i en versión digital

# EDITORIAL

Apreciados lectores:

Es un honor poner a su disposición la edición número dieciséis de nuestra revista. El 2022 será recordado como el año en el que estamos a puertas de neutralizar completamente los daños de la pandemia, pero enfrentamos sus secuelas junto con nuevos retos políticos, económicos y tecnológicos que seguirán su curso en los siguientes meses. La virtualidad dominante de 2020 y 2021 ha dado paso a un retorno acelerado por las actividades presenciales. En educación, seguimos buscando el balance adecuado entre actividades presenciales y remotas con mucho enfoque en el proceso de aprendizaje. Un ejemplo de virtualidad es la publicación de nuestra revista I+i que tiene en esta edición su tercera publicación consecutiva de manera digital.

En este número encontraremos artículos relacionados con temas tecnológicos de distintas áreas de aplicación indicadas a continuación: *Electricidad* con el artículo que trata sobre filtros en media tensión para mejorar la calidad de la energía, *Mecánica* con el artículo sobre detección de fallas en rodamientos mediante análisis vibracional, *Estadística* con un artículo sobre el muestreo manual y el divisor Jones, *Salud* con el artículo sobre extractor de aire para ambientes con Covid-19, *Ciencia de Datos* analizando la violencia familiar en Perú, y *Tecnología Digital* estudiando los efectos de la gamificación en la resolución analítica de problemas.

Reconocemos y agradecemos el esfuerzo y dedicación de los autores en la elaboración de los artículos de tecnología aplicada. Igualmente, agradecemos el trabajo del equipo de producción y edición que permite lograr una revista que transmite calidad e innovación en cada uno de los mencionados artículos.

Estamos seguros de que esta edición será del agrado de ustedes y los animamos cordialmente a participar en el siguiente número a publicarse el próximo año. Si usted precisa más detalle sobre alguno de los artículos, le animamos a que se ponga en contacto con sus autores. De la misma forma, si está interesado en colaborar en la próxima edición, nuestro coordinador editorial gustosamente lo guiará en el proceso. Muchas gracias por ser parte de la revista I+i.

Antonio Lazo de la Vega Velarde  
Director Académico Nacional

Una alternativa para la  
**reducción del flicker y  
compensación reactiva en  
plantas siderúrgicas**  
empleando filtros activos en media  
tensión



# Filtros activos en media tensión como alternativa al uso de SVC para el mejoramiento de la calidad de energía en plantas siderúrgicas

## Active Filters in Medium Voltage as an Alternative to the Use of SVC for the Improvement of Energy Quality in Steel Plants

### RESUMEN

En las plantas siderúrgicas, es necesario contar con equipos que puedan fundir los metales empleando grandes corrientes (hornos de arco). Al generar cortocircuitos consecutivos para fundir el metal, los hornos de arco introducen problemas de calidad de energía a las otras áreas que forman parte del proceso como las plantas de laminación, de oxígeno, de acería, de hierro, fajas y muelles. Durante su trabajo de fundición y refinado, originan problemas de desbalance de fases, fluctuaciones de tensión, flicker, transitorios de maniobra y generación de armónicos. El proceso productivo en este tipo de plantas también hace necesario compensar el factor de potencia en la barra principal y en cada subplanta.

Las soluciones tradicionales han sido el uso de bancos de compensación reactiva y filtros pasivos en media tensión, teniendo el mayor inconveniente en no poder controlar la generación del flicker por la operación de los hornos de arco. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, se cuenta con el equipo SVC (static var compensator), el cual es implementado en muchas plantas siderúrgicas. Sin embargo, si bien esta solución es efectiva, también es costosa y ocupa mucho espacio.

Este trabajo muestra una alternativa para la reducción del flicker y la compensación reactiva que puede implementarse en plantas siderúrgicas, empleando filtros activos en media tensión.

Se procesaron los datos de mediciones de calidad de energía y parámetros eléctricos de una planta siderúrgica en el Perú por 120 días, obtenidos del sistema de gestión y monitoreo de energía y de la instalación de analizadores de redes. Se ha modelado el sistema en el software ETAP, se ha dimensionado el SVC y la solución con filtros activos en media tensión (realizando el análisis comparativo correspondiente). Se muestra la ingeniería básica de esta solución, demostrando que la solución con filtros activos en media tensión es una alternativa eficiente

desde el punto de vista técnico y económico para aplicaciones en plantas siderúrgicas.

### ABSTRACT

Steel plants need to have metal melting equipment that use high electrical current (arc furnaces). When generating consecutive short circuits to melt the metal, arc furnaces make other production areas such as rolling mills, oxygen mills, steel mills, iron shafts and docks have energy quality-related issues. Among the problems that may arise during melting and refining processes are phase imbalance, voltage fluctuations, flickering, transients and harmonics. In this type of plant production processes demand to balance the power factor between the main bus bar and every sub-plant.

Among the common solutions are reactive power compensation and passive filtering in medium voltage, being the flicker control a major inconvenience when operating arc furnaces. With the development of power electronics, SVC (Static Var Compensator) has been implemented in many steel plants. While this solution is effective, it is expensive and takes up space to get installed.

This article proposes an alternative to flicker reduction and reactive compensation that can be implemented in steel plants with the use of active filters in medium voltage.

The data of energy quality measurements and electrical parameters of a steel plant in Peru were processed for 120 days. The information was collected from an energy management and monitoring system and network analyzers. The electrical system was modeled in the ETAP software, the SVC was measured and active filters in medium voltage were used under proper comparative analysis. Active filters in medium voltage are technically and economically efficient to use in steel plants.



### Palabras Claves

SVC (compensador estático de potencia reactiva), filtros activos, hornos de arco, flicker, armónicos.

### Key words

SVC (static var compensator), active filters, arc furnaces, flicker, harmonics.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la industria siderúrgica es una de las más importantes del proceso productivo del país, no solo por la necesidad de producción de hierro y aleaciones para la construcción, sino también por el alto consumo de energía de las plantas. En su actividad se originan varios problemas desde el punto de vista eléctrico como variación de tensión, déficit de potencia reactiva y *flicker*. Una planta siderúrgica cuenta con diferentes subplantas como son: laminación, hornos, área de fundición, puente grúas y acería. Siendo los equipos principales los hornos de arco para la fundición de hierro y la elaboración de acero. Estos hornos de arco operan como cortocircuitos trifásicos desbalanceados de gran potencia y se representan como grandes cargas no lineales y de comportamiento no característico. Debido a las elevadas demandas de potencia que intervienen en la fundición de metal, se ocasionan problemas al sistema eléctrico que afectan la calidad de energía tales como: fluctuaciones de tensión, desbalances de carga y distorsiones de forma de onda.

El proceso productivo en este tipo de plantas también hace necesario compensar el factor de potencia en la barra principal y en cada subplanta. Las soluciones tradicionales han sido el uso de bancos de compensación reactiva y filtros pasivos en media tensión, teniendo el mayor inconveniente de no poder controlar la generación del *flicker* por la operación de los hornos de arco. Por este motivo, se tenía que buscar soluciones alternativas, en un primer momento a través de inductancias y capacitancias series, siendo ineficiente debido a la variación dinámica de la carga. A ello se le suma que las normas y recomendaciones establecían límites para la generación de *flicker* que eran superados por cualquier operación en este tipo de plantas. Con el desarrollo de la electrónica de potencia, se propusieron los primeros modelos de SVC, los cuales vienen siendo implementados en muchas plantas que procesan el acero. Esto se evidencia en los artículos técnicos de Yvan Ponce [1], Eduardo Illanes [2] (quien muestra el performance de los SVC light) y Daniel Sullivan [3].

Debido a la necesidad de utilizar hornos de arco para la fundición de acero, es importante contar con equipos que controlen la tensión y reduzcan el efecto del *flicker*. Actualmente, se propone al SVC como la principal solución empleada, debido a su rápida respuesta. Sin embargo, se debe de considerar a los filtros activos como una gran alternativa pues ofrece beneficios similares. En este sentido, es importante establecer las ventajas de usar una solución respecto a la otra.

## FUNDAMENTOS

El SVC ofrece una respuesta rápida en el control de la tensión mediante la compensación de potencia reactiva utilizando tiristores de conmutación de alta velocidad, como lo muestran N. E. Deryuzhkova, V. A. Solovyev y A. V. Kupova [4] en su control inteligente del SVC para su aplicación en hornos de arco.

En [5], S. I. Deaconu, M. Topor, G. N. Popa y I. Popa, analizan las condiciones de funcionamiento de un horno de arco eléctrico con el fin de evaluar la mejor opción para solucionar el problema del consumo de energía. Evalúan además el rendimiento de los equipos, prueban diferentes puntos de ajustes para los hornos

de arco. Concluyen que la solución de compensación de energía reactiva con SVC es buena, pero también tiene los costos más altos.

En [6], se analiza la interacción entre los SVC y los filtros pasivos en una planta que cuenta con hornos de arco, realizando mediciones en campo y concluyendo que cuando operan los filtros pasivos la distorsión armónica de tensión en el sistema es dos veces más pequeña que cuando se desconectan.

Los filtros activos de potencia se ofrecen también como soluciones a los problemas de calidad de energía en baja tensión, entre sus funciones encontramos la mitigación de armónicos, compensación de potencia reactiva, control de factor de potencia, regulación de la tensión y reducción del Flicker.

En un principio los filtros activos eran aplicados a sistemas de 3 hilos basando su funcionamiento en la teoría de potencia instantánea p-q publicada por H. Akagi, Y. Kanazawa y A. Nabae [7]. Años más tarde, en Sudamérica, los investigadores M. Áreles y E. Watanabe desarrollaron la estructura de control de 3 hilos a 4 hilos. [8].

Los filtros activos son una tecnología que comenzó con sus primeros prototipos a nivel investigación la década de los 80's [7], [9]. La evolución tecnológica ha logrado que actualmente sean equipos muy empleados en baja tensión en sistemas comerciales, industriales y mineros. Estos equipos son fabricados para baja tensión, sin embargo, al conectarlos a un transformador elevador podemos llevar sus potencialidades a media tensión.

En [10] J. Dolezal, A. G. Castillo, J. Tlustý y V. Valouch, desarrollan topologías y control de filtros activos para la mitigación del *flicker*, en arreglos serie y paralelo, mostrando las características operativas básicas de los parámetros de un sistema de distribución de energía real con un horno de arco y SVC. El artículo promueve la instalación de un filtro activo para la mitigación de la fluctuación de voltaje, concluyendo que la acción combinada de filtros activos y SVC son beneficiosos para el sistema. De igual manera, M. Takeda, K. Ikeda, A. Teramoto y T. Aritsuka [11] muestran las ventajas de los filtros activos para suprimir el flicker en comparación con el reactor controlado por tiristores (TCR) tipo SVC.

Otra aplicación interesante de la acción conjunta del SVC con los filtros activos es mostrada por H. Kojima, K. Matsui y K. Tsuboi [12]. Este artículo está orientado a la acción del filtro activo para mitigar los órdenes armónicos producidos por los SVC, empleando un inversor tipo NPC-PWM. En [13], se emplea una configuración en delta de un TCR y un filtro activo enseriados por fase, mostrando sus ventajas y potencialidades.

En Perú se tienen dos industrias siderúrgicas que trabajan en la fundición de acero: la Empresa Siderúrgica del Perú y Aceros Arequipa, donde solo en la segunda ha sido instalado un equipo SVC de 170 MVar para solucionar los problemas mencionados anteriormente.

El presente trabajo propone la implementación de filtros activos aplicados en media tensión, con el fin de reducir el *flicker* y controlar la tensión en una planta siderúrgica del Perú tomando como base a M. Takeda [11]; mostrando sus ventajas técnicas y económicas frente a una solución con SVC.

**METODOLOGÍA**

**Diseño de un SVC (Compensador estático de var) para horno de arco**

**A. Principio de funcionamiento de un SVC**

El SVC se encuentra constituido por un transformador de acoplamiento, válvulas de tiristores, capacitores y reactores. Los cuales al agruparse forman sus partes constitutivas: un bloque capacitivo fijo (FC) y capacitores conmutados por tiristores (TSC)

o reactores controlados por tiristores (TCR). La mayoría de los SVC implementados posee TCR [14], [15] y [16].

En esta parte del artículo, pondremos énfasis en el principio de funcionamiento de un SVC tipo FC/TCR.

La figura 1 muestra el principio de operación del SVC (FC/TCR). El objetivo en este esquema es mantener en un rango aceptable la tensión de la barra A. El FC entrega potencia reactiva capacitiva constante y el TCR consume una potencia reactiva inductiva variable mediante el control de los ángulos de disparo de los tiristores, los cuales se modifican de acuerdo a la necesidad de la red.

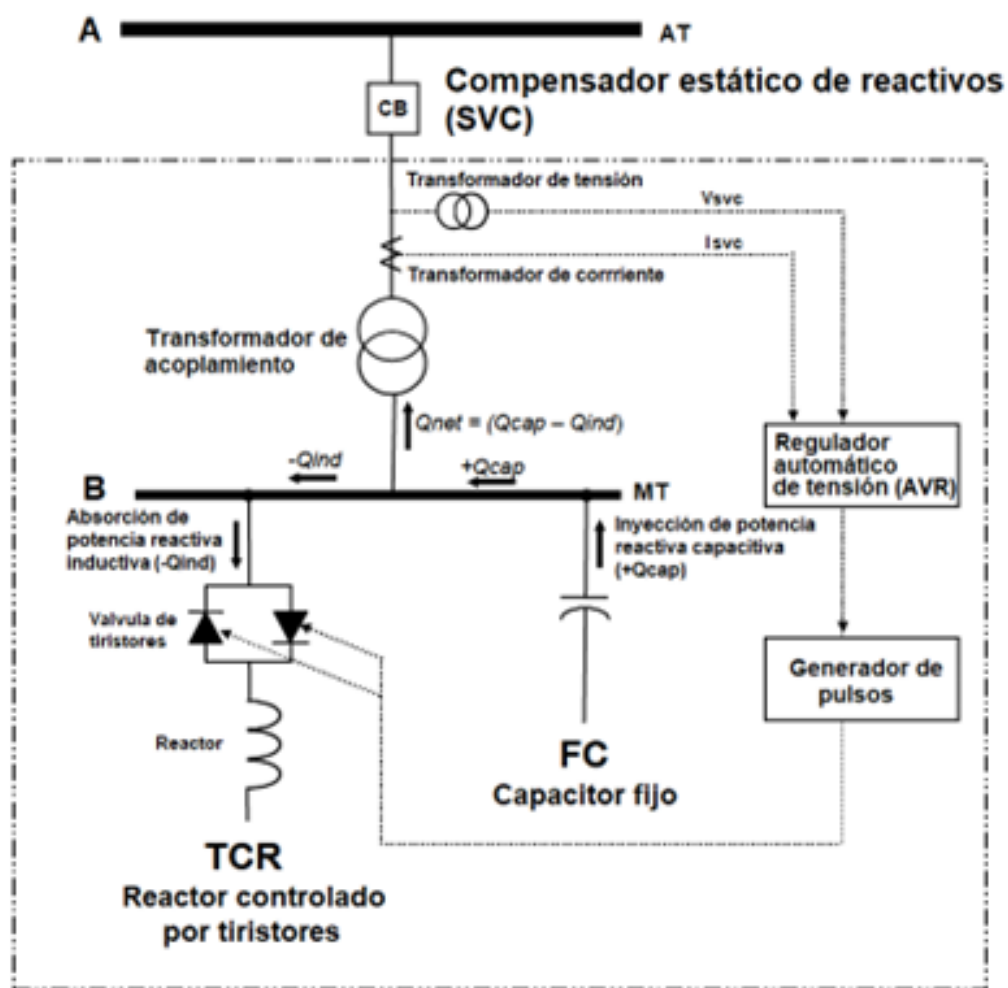


Figura 1. Principio de operación SVC (FC/TCR).

Fuente: [3].

El esquema mostrado en la figura 2 nos permitirá analizar el comportamiento del SVC para el control de tensión y la corrección del factor de potencia.

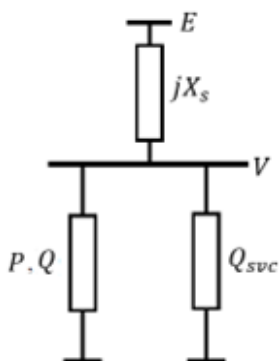


Figura 2. Diagrama de impedancia de un sistema con SVC.

Fuente: Elaboración propia.

La caída de tensión puede expresarse como:

$$\Delta V = E - V = jX_s \left[ \frac{P - j(Q - Q_{SVC})}{V} \right] \dots (1)$$

Trabajando la expresión en función de los módulos tenemos:

$$E^2 = \left[ V + \frac{X_s(Q - Q_{SVC})}{V} \right]^2 + \left[ \frac{X_s P}{V} \right]^2 \dots (2)$$

Para controlar la tensión, se requiere un valor de  $Q_{svc}$  que haga que  $E=V$  y, para controlar el factor de potencia, es necesario que  $Q_{svc} = Q$ . Entonces, podemos concluir que no es posible controlar el factor de potencia y la tensión al mismo tiempo.

## B. Dimensionamiento de un SVC para una planta siderúrgica

La figura 3 muestra el diagrama unifilar de la planta siderúrgica a analizar. Esta planta es alimentada desde una barra de 138 kV, a través de dos transformadores de 45/60MVA alimenta a las barras principales del proceso (barra norte y barra sur) en 13.8kV. Conectado a la barra norte se cuenta con un horno eléctrico de 40 MVA, un horno cuchara de 8MVA, una subplanta de fundición, fajas y muelles. Asociados a la barra sur se tienen las subplantas de laminación, hierro y acero.

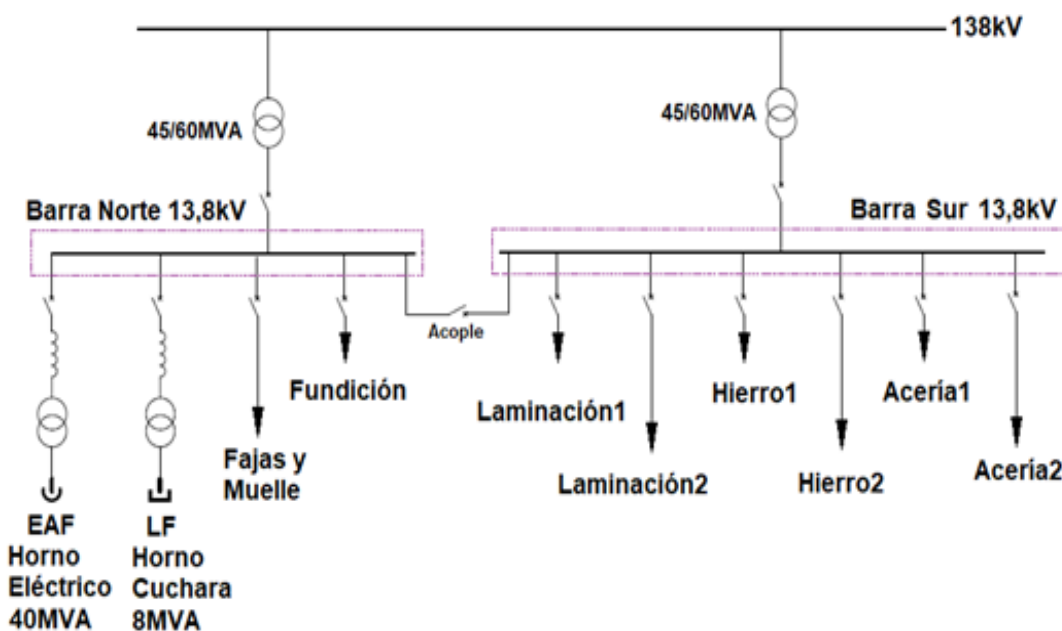


Figura 3. Diagrama unifilar de la planta siderúrgica.

Fuente: Elaboración propia.

Se ha modelado el sistema de potencia en el software ETAP, tal como se muestra en la figura 4. Se han analizado diferentes

escenarios de funcionamiento de la planta para dimensionar el SVC y sus componentes.



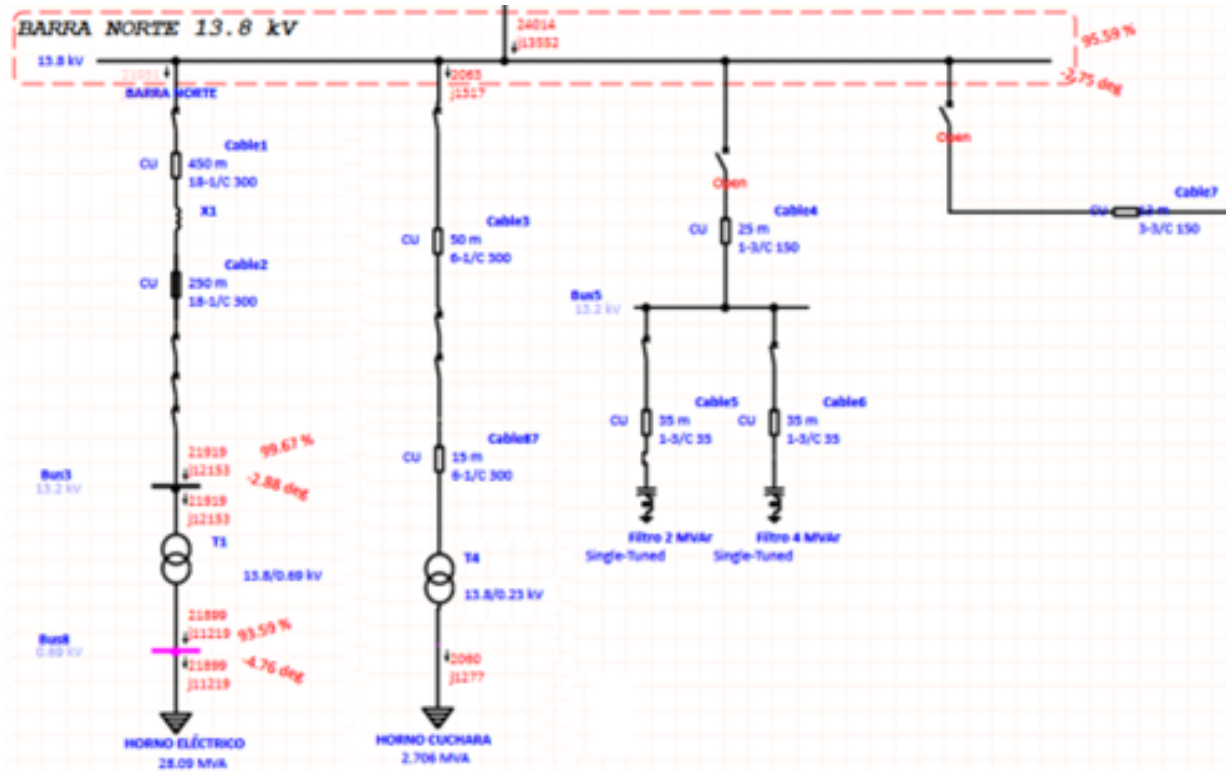


Figura 4. Modelamiento del sistema eléctrico en el software ETAP.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 5 muestra el esquema equivalente del circuito a analizar para el cálculo de la impedancia total del sistema. Este análisis

se hace considerando la recomendación IEEE 1453 [17] y la base normativa de la IEC 61000-3-7 [18].

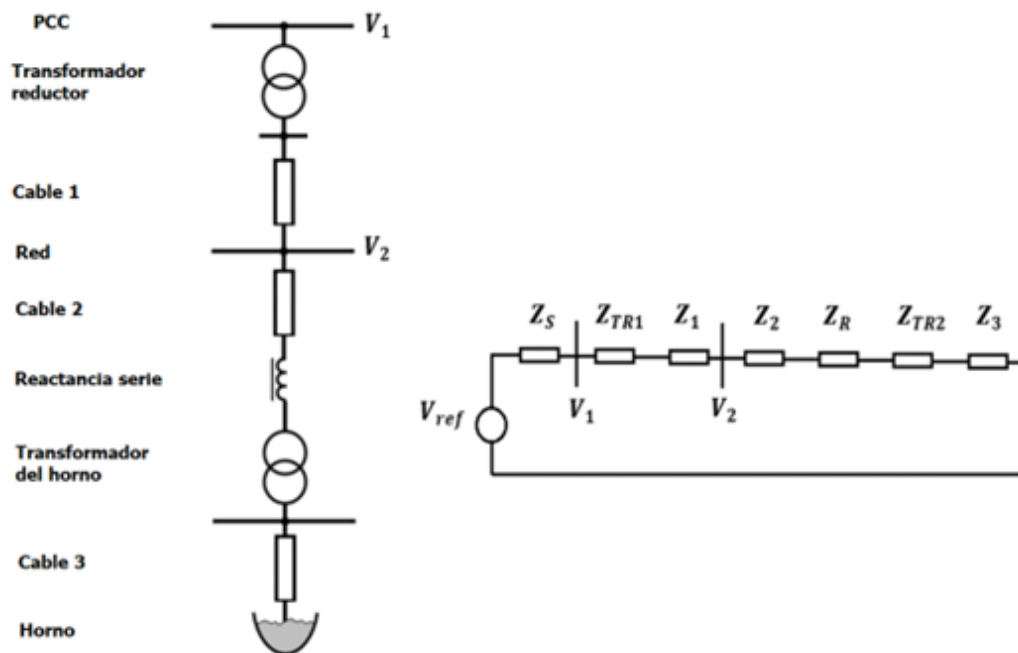


Figura 5. Esquema equivalente para el cálculo de la impedancia total del sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

$V_{ref}$ : Tensión referencial, equivalente Thévenin.

$V_1$ : Tensión en el punto 1, lado de alta tensión del transformador reductor (138 kV).

$V_2$ : Tensión en el punto 2, lado de baja tensión del transformador reductor (13.8 kV).

$Z_S$ : Impedancia equivalente Thévenin del sistema.

$Z_{TR1}$ : Impedancia del transformador reductor.

$Z_I$ : Impedancia del conductor 1, llegada a barra 13.8 kV.

$Z_R$ : Impedancia de la reactancia serie por dimensionar, en nivel 13.8 kV.

$Z_2$ : Impedancia del conductor 2, llegada al transformador del horno.

$Z_{TR2}$ : Impedancia del transformador del horno.

$Z_3$ : Impedancia de las conexiones del horno en baja tensión.

El cálculo de los parámetros reflejados correspondientes a la red se muestra a continuación:

$$Z_S = \frac{V_S^2}{S_{cc}}$$

$$Z_{TR1} = vtr\ 1\%_{sc} * \frac{V_S^2}{S_{tr1cc}}$$

$$Z_1 = z_1 * \left(\frac{V_S}{V_1}\right)^2$$

$$Z_2 = z_2 * \left(\frac{V_S}{V_2}\right)^2$$

$$Z_R = z_r * \left(\frac{V_S}{V_r}\right)^2$$

$$Z_{TR2} = vtr\ 2\%_{sc} * \frac{V_S^2}{S_{tr2cc}}$$

$$Z_3 = z_3 * \left(\frac{V_S}{V_3}\right)^2$$

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1

Resultado de los cálculos de impedancia en cada parte del sistema

Valor de impedancia reflejado a 138 kV		
ZS	12.24	Ohm
ZTR1	37.83	Ohm
Z1	0.72	Ohm
Z2	2.28	Ohm
ZR	0.00	Ohm
ZTR2	28.84	Ohm
Z3	1.63	Ohm
ZTOT	83.54	Ohm

Fuente: Elaboración propia.

La tensión en las barras se calcula del siguiente modo:

- $$V_1 = V_{ref} * \frac{(Z_{TR1} + Z_1 + Z_2 + Z_R + Z_{TR2} + Z_3)}{Z_{TOT}}$$

$$V_1 = 79,7 * \frac{(37,84 + 0,72 + 2,28 + 0 + 28,84 + 1,63)}{83,54} = 68,0V$$
- $$V_2 = V_{ref} * \frac{(Z_2 + Z_R + Z_{TR2} + Z_3)}{Z_{TOT}}$$

$$V_2 = 79,7 * \frac{(2,28 + 0 + 28,84 + 1,63)}{83,54} = 31,2V$$

Las máximas variaciones de tensión en los puntos 1 y 2 se calculan con las siguientes relaciones:

- $$d_1 = \frac{(V_{ref} - V_1)}{V_{ref}} = \frac{(79,7 - 68,0)}{79,7} = 0,146$$
- $$d_2 = \frac{(V_{ref} - V_2)}{V_{ref}} = \frac{(79,7 - 31,2)}{79,7} = 0,61$$

En el punto 1, la variación de tensión se encuentra alrededor de 0.146, mientras que, en el punto 2, la variación de tensión se encuentra alrededor de 0.61.

El flicker de corta duración (Pst) se puede calcular de:

$$P_{st} = k * d$$

De donde:

$d$ : Máxima variación de tensión en el punto de análisis.

$k = \left(\frac{F}{d_{P_{st}=1}}\right)$ : Valor resultado del cociente del factor de forma de la fluctuación de tensión y la variación de tensión para Pst = 1, en este caso usaremos el valor calculado (k = 18.3).

El resultado de  $P_{st}$  en el punto 1, entonces:

$$P_{st1} = (k) * d_1 = 18,3 * 0,146 = 2,68$$

### C. Cálculo de componentes del SVC

El SVC puede reducir el flicker hasta en un factor de 2 (la mitad), factor necesario para reducir el Pst a niveles inferiores a 1.

El dimensionamiento del SVC se calcula por dos métodos:

#### C.1 Dimensionamiento del SVC a partir del límite expresado en Pst

Como límite de Pst tenemos 1:

$$Pst_{ref} = 1$$

Factor de reducción del flicker  $R_{Pst}$ :

$$R_{Pst} = \frac{Pst}{Pst_{ref}} = 2.68$$

La potencia del SVC se calcula con la fórmula:

$$Q_{SVC_{Pst}} = (R_{Pst} - 1) * \frac{S_f}{\cos\phi_f}$$

De donde:

$$Q_{SVC_{Pst}} = 89.67 \text{ MVar}$$

#### C.2 Dimensionamiento del SVC a partir del límite expresado en $\Delta V_{10}$

Como límite de  $\Delta V_{10}$  tenemos 0,32, correspondiente al límite de molestia.

$$\Delta V_{10_{ref}} = 0.32$$

Factor de reducción del flicker  $R_{\Delta V_{10}}$ :

$$R_{\Delta V_{10}} = \frac{\Delta V_{10}}{\Delta V_{10_{ref}}} = \frac{2.68}{0.32} = 8.38$$

La potencia del SVC se calcula con:

$$Q_{SVC_{\Delta V_{10}}} = C * S_{ccf}$$

C es un coeficiente que depende de R, toma un valor entre 0(para  $R_{\Delta V_{10}} = 0$ ) y alrededor de 0,7(para  $R_{\Delta V_{10}}$  elevados). En este caso tomaremos un valor válido de 0,35, lo que da:

$$Q_{SVC_{\Delta V_{10}}} = 0.35 * S_{ccf}$$

Lo que da:

$$Q_{SVC_{\Delta V_{10}}} = 82,32 \text{ MVar}$$

Matemáticamente, se necesita una SVC de alrededor de 80 MVar para reducir el flicker.

### D. Modelamiento del SVC

A continuación, se muestran los resultados de diseño de 80 MVar de TCR. Pudiendo operar el sistema sin reactancia, pero es importante tenerla bajo condiciones de contingencia.

Revisando los diferentes escenarios de operación, la variación de tensión esperada, variación de la potencia de consumo de los hornos, una posible ampliación de carga, el espectro armónico de corriente medido en la barra norte y la regulación de potencia reactiva necesaria, tenemos la configuración del SVC mostrada en la tabla 2.

Tabla 2  
Potencia de diseño de los componentes del SVC

Componente	Potencia
TCR	80 MVar
Filtro pasivo 2th	26 MVar
Filtro pasivo 3th	27 MVar
Filtro pasivo 4th	18 MVar

Fuente: Elaboración propia.

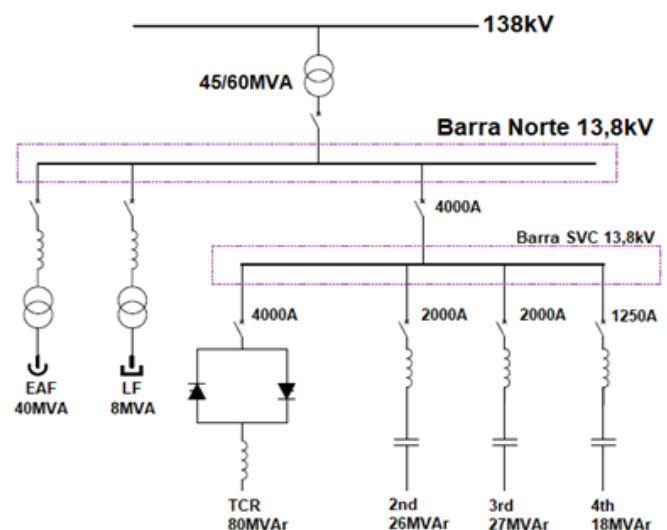


Figura 6. Esquema equivalente del SVC a colocarse en la barra norte 13,8kV.

Fuente: Elaboración propia.

#### TCR

Tiene una potencia de 80 MVar inductivos y está formada por reactores y las válvulas del TCR. Cada una de las fases tienen dos reactores, en caso se produzca una falla de cortocircuito en una de las bobinas del reactor del TCR, la corriente de falla será limitada por la otra bobina del reactor de la misma fase.

Cálculo de la inductancia del TCR:

$$Q_L = 80MVar$$

$$V = 13.8kV$$

$$Q_{L, fase} = 26.667MVar$$

$$L = \frac{V^2}{2\pi f x Q_L}$$

$$L = \frac{13.8kV^2}{2\pi 60 x 80MVar}$$

$$L = 6.31mH$$

Por lo tanto, se va a requerir para el TCR La figura 7 muestra el esquema trifilar del SVC y la figura 8 muestra el plano de planta del SVC, donde se puede observar las dimensiones consideradas para el emplazamiento del SVC y sus componentes (50 x 30 metros).

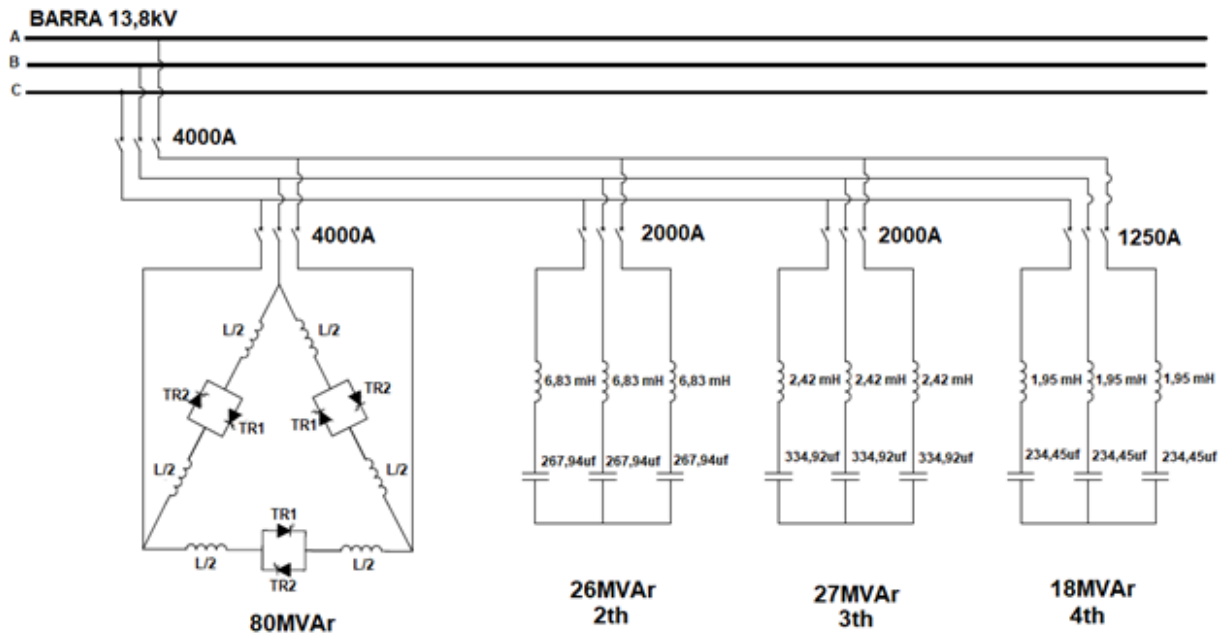


Figura 7. Esquema trifilar del SVC.

Fuente: Elaboración propia.

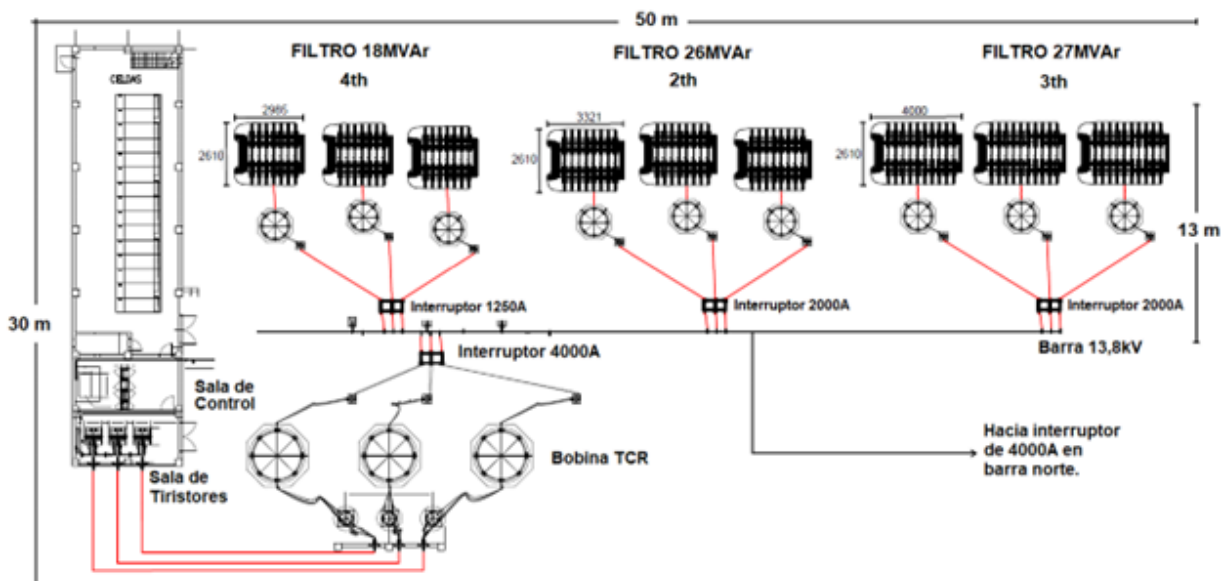


Figura 8. Plano de planta del SVC.

Fuente: Elaboración propia.

## Diseño de un filtro activo en MT para de horno de arco

### A. Principio de funcionamiento de un filtro activo

La figura 9 muestra el principio de funcionamiento de un filtro activo. Su sistema de control mide la forma de onda de la carga distorsionada, separando la corriente activa, corriente reactiva

y corriente armónica. El filtro activo compensa las corrientes armónicas y/o reactivas en el sistema. En las aplicaciones para media tensión, se colocan filtros activos en paralelo (un maestro y varios esclavos) y mediante un transformador elevador se llevan las ventajas del filtro activo a la media tensión. Aunque su función principal es el control de armónicos y factor de potencia, estos equipos también pueden realizar el balance de fases y reducir el flicker.

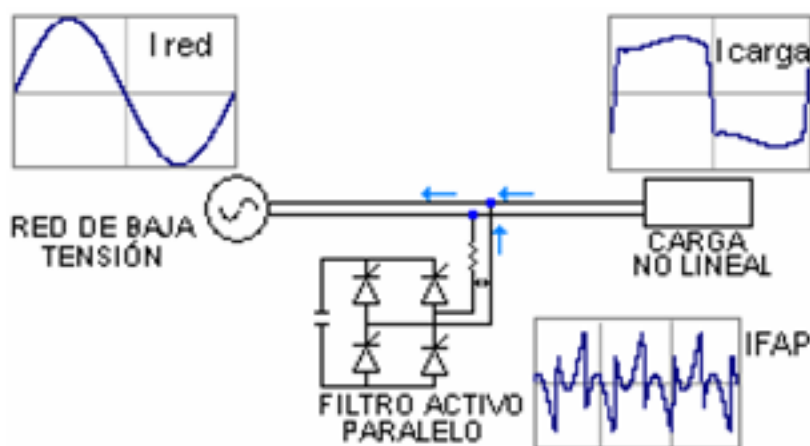


Figura 9. Principio de funcionamiento de un filtro activo.

Fuente: [19].

### B. Dimensionamiento de filtro activo MT para la planta siderúrgica

#### B.1 Determinación de la corriente armónica a compensar

La principal carga armónica a compensar es la que entrega el horno, se toma el espectro armónico por fase y se obtiene la

corriente armónica equivalente para el diseño de los equipos de filtrado, tal como lo muestra la figura 10.

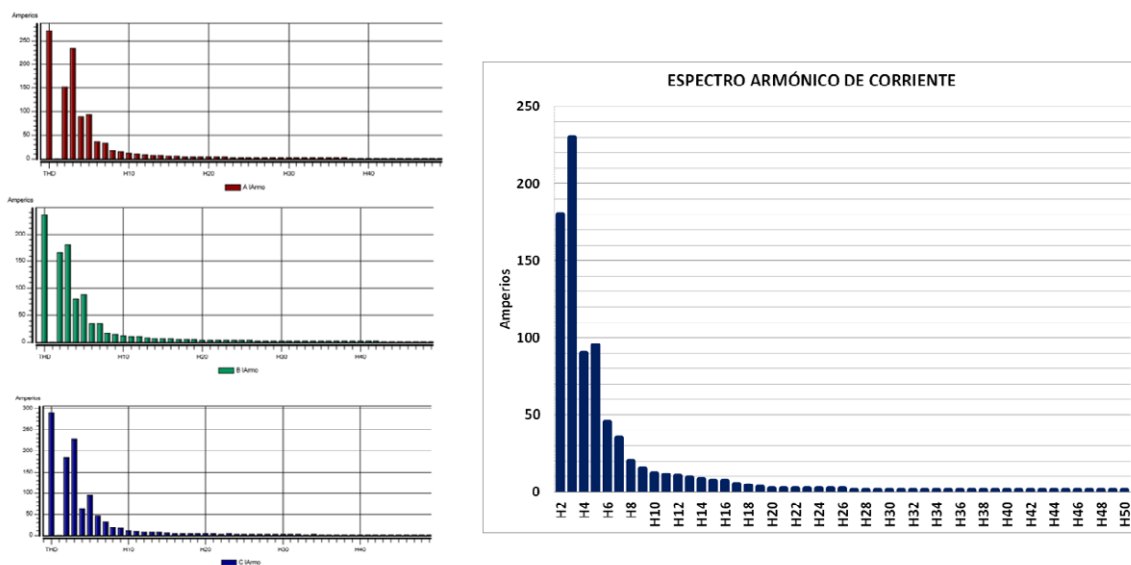


Figura 10. Corrientes armónicas por fase medidas en el sistema.

Fuente: Elaboración propia.

Dado el comportamiento dinámico de la carga, se seleccionó los casos de máxima corriente armónica, con ello se obtiene el espectro armónico equivalente para poder seleccionar el amperaje del filtro activo en media tensión.

Podemos observar que se requiere filtrar principalmente hasta el orden 5. Con esto la corriente del filtro activo sería:

$$I_{rms} = \sqrt{I_{2h}^2 + I_{3h}^2 + I_{4h}^2 + I_{5h}^2 + I_{6h}^2 + \dots + I_{nh}^2}$$

$$I_{rms} = 320A$$

Por lo que se necesitan 320 A armónicos aplicados en 13.8 kV.

Como los filtros activos son equipos de baja tensión de 300 A de capacidad, se debe tener en cuenta la relación de transformación de 13.8kV/0.48 kV= 28.75, por lo que se requiere 31 equipos solo para compensar los armónicos, además de un transformador elevador.

### B.2 Determinación de la corriente reactiva a compensar

El diagrama de carga promedio medido en la barra norte es mostrado en la figura 11, en el análisis se toma en cuenta la información de los medidores ION instalados en la subestación eléctrica principal en un periodo de 120 días.

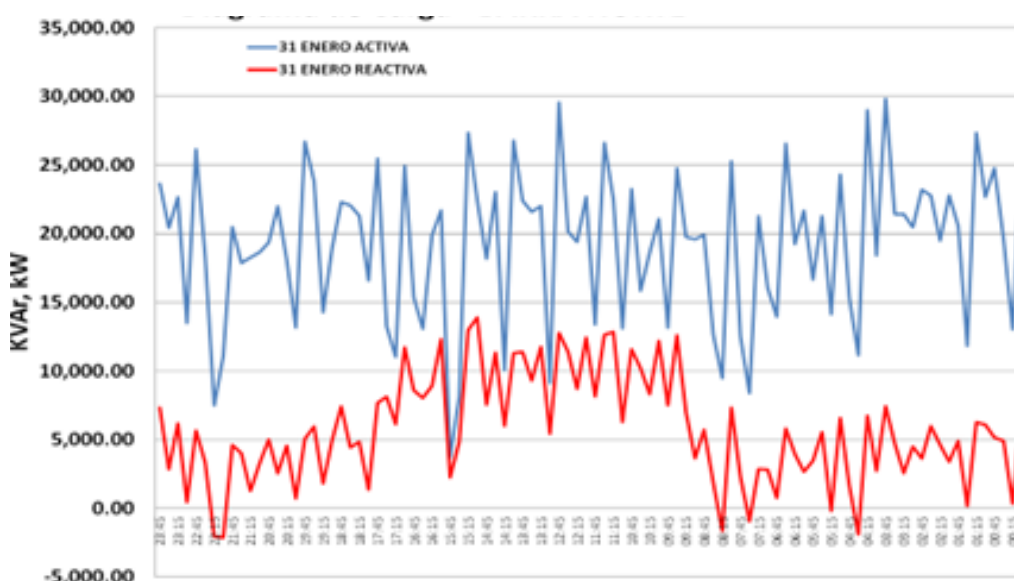


Figura 11. Diagrama de carga medido en la barra norte 13,8kV.

Fuente: Elaboración propia.

Del análisis correspondiente tenemos:

Se tomaron registros con analizadores de redes en intervalos de 1 min debido a la gran variación de carga de los hornos de arco. Sin embargo, la facturación de energía eléctrica se desarrolla en intervalos de 15 minutos, por lo tanto, para el análisis también se toma en cuenta este intervalo de tiempo. La potencia activa máxima registradas es de picos de 30 MW.

El factor de potencia total de la planta en promedio es 0.9324. Se identificó que las cargas asociadas a la barra norte tienen un factor de potencia que oscila entre 0.70 y 0.80.

La figura 12 muestra la potencia reactiva dinámica a compensar y se puede concluir que la máxima potencia reactiva requerida por el sistema se encuentra entre 7 MVar (fdp = 0.96) y 8 MVar (fdp = 0.97).

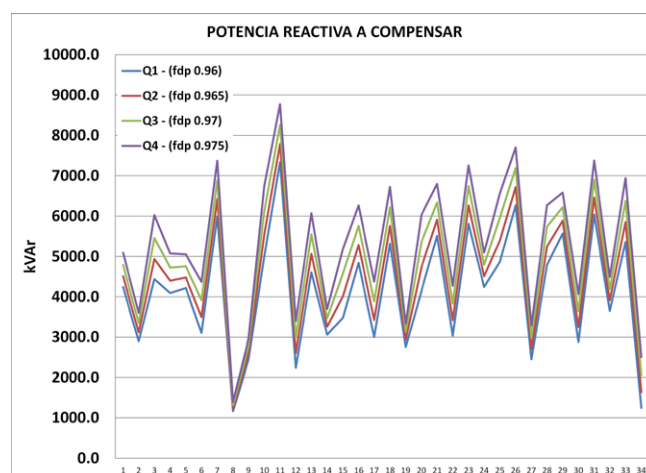


Figura 12. Potencia reactiva dinámica a compensar en el sistema.

Fuente: Elaboración propia.

### C. Cálculo de componentes del sistema de filtrado

Considerando los 7.2 MVar, tendríamos:

$$I_R = \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot V_N}$$

$$I_R = \frac{7.2 \text{ MVar}}{\sqrt{3} \cdot 13.8 \text{ kV}}$$

$$I_R = 301.23 \text{ A}$$

Como los filtros activos son equipos de baja tensión de 300 A de capacidad, se debe tener en cuenta la relación de transformación de 13.8 kV/0.48 kV = 28.75, por lo que se requiere 29 equipos solo para compensar la potencia reactiva, además de un transformador elevador.

Considerando la solución mixta para un sistema de filtros activos que realice los dos trabajos, compensar el factor de potencia y los armónicos tenemos:

$$I_F = \sqrt{I_{arm}^2 + I_R^2}$$

$$I_F = \sqrt{(28.75 \cdot 320)^2 + (28.75 \cdot 301)^2}$$

$$I_F = 12634.9 \text{ A}$$

Como cada unidad es de 300 A, entonces se necesitarían 12634.9/300 = 42 unidades.

### D. Modelamiento del filtro activo MT

El costo de un filtro activo de 300 A es alrededor de 40 000 USD por unidad, entonces el monto por la implementación de la solución estaría alrededor de los 2 600 000 USD. Sería la mejor solución técnica aplicada al sistema. El esquema eléctrico de la solución y sus dimensiones se muestran en la figura 13.

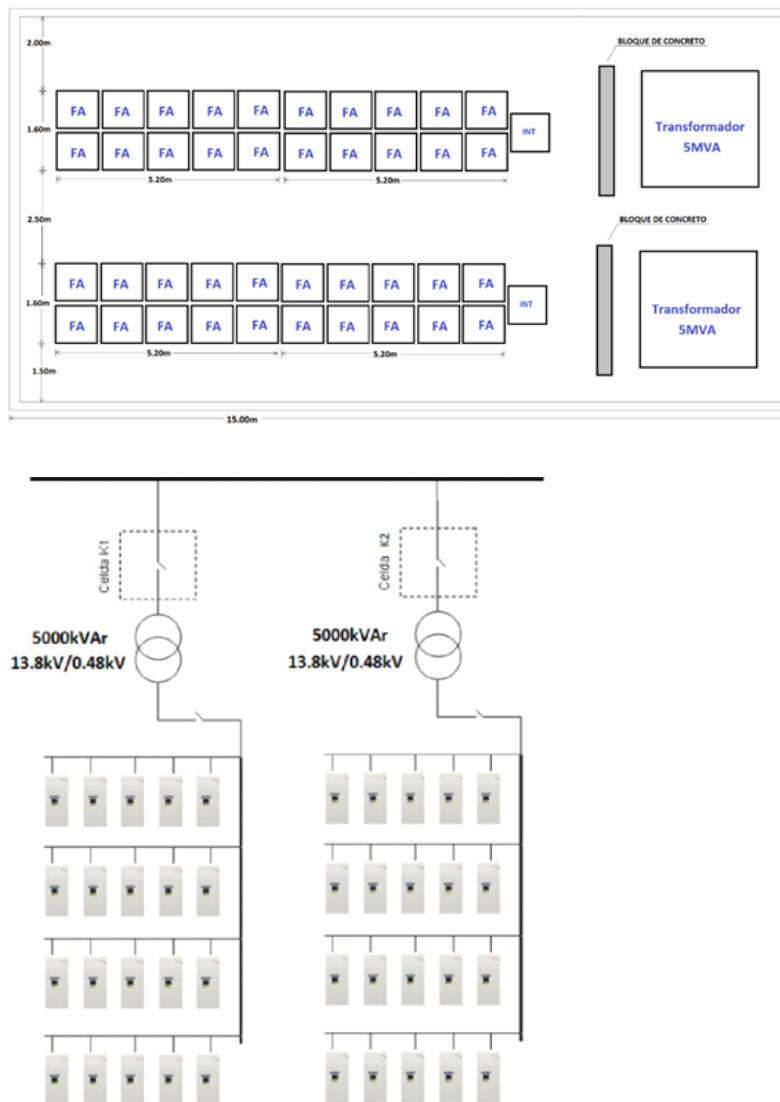


Figura 13. Plano de planta y de distribución de equipos en el sistema filtro activo en MT.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 muestra los resultados comparativos de las soluciones:

Tabla 3  
Cuadro comparativo de las soluciones

Concepto	SVC	Filtro activo en MT
Tiempo de implementación en meses	24	12
Dimensiones (m <sup>2</sup> )	1500	500
Equipos	TCR, filtros pasivos, sala de control, sala de tiristores, celdas de media tensión.	2 transformadores, 40 filtros activos BT, celdas de media tensión y tableros de baja tensión.
Costo de implementación MM\$	4,1	2,6

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

- El presente trabajo muestra que la solución de filtro activo en MT es una alternativa para el control de la variación de tensión, potencia reactiva, armónicos y flicker generados por hornos de arco que tiene ventajas competitivas sobre la solución con SVC.
- Tanto el filtro activo en MT como el SVC emplean electrónica de potencia, la diferencia, desde el punto de vista de la calidad de energía, es que el TCR del SVC genera armónicos (lo que obliga a implementar en la misma solución filtros pasivos para reducirlos). Por otro lado, la solución alternativa con filtros activos en MT tiene como parte de su misión (de acuerdo con la programación de los equipos) generar armónicos con polaridad contraria a los que están presentes en el sistema de potencia.
- Un filtro activo en MT ocupa un menor espacio que un SVC y tiene menor costo de implementación.
- La implementación del SVC o del filtro activo MT permitirá reducir el tiempo de procesamiento del acero y, por lo tanto, aumentará la productividad. También reducirá las interrupciones, tendrá un efecto positivo considerable sobre el consumo de electrodos, las pérdidas de calor y la vida útil del revestimiento interior del horno. A medida que mejore la calidad de la energía de la red aumentará la vida útil de los equipos en la planta.

## REFERENCIAS

- [1] Ponce Trillo, Y. (2010). *Reducción de perturbaciones en la red eléctrica de una planta Siderúrgica con Horno Eléctrico de arco a través de la instalación de un SVC* [Informe de suficiencia para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [2] Illanes Chacón, E. (2014). *Compensación reactiva en hornos de arco eléctrico mediante el uso de SVC Light* [Informe de suficiencia para optar el título de ingeniero, Universidad Nacional de Ingeniería].
- [3] Sullivan, D. (2006). *Improvements in Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission Systems Using Static VAR Compensators (SVC)* [Tesis de maestría, Universidad de Pittsburgh].
- [4] Deryuzhkova, N., Solovyev, V., y Kupova, A. (2019). *Intelligent Control System for Static Var Compensator of Arc Furnace* [Conferencia]. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Rusia.
- [5] Deaconu, S., Topor, M., Popa, G., Popa, I. (2009). *Comprehensive Analysis for Modernization of 100 t Electric Arc Furnace for Steel Production* [Conferencia]. 2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, Texas, Estados Unidos.
- [6] Jagiela, K. Gala, M., Kopinski, M. y Rak, J. (2018). *Influence of Harmonic Filters on the Operation of AC Arc Furnace Power Installation* [Conferencia]. 2018 Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science (EPMCCS), Kielce.
- [7] Akagi, H., Kanazawa, Y., y Nabae, A. (1983). Generalized theory of the Instantaneous reactive power in three-phase circuits. En *Proc. Int. Power Electronics Conf., 1983* (pp. 1375-1386).
- [8] Watanabe, E., y Aredes, M. (1995). New control algorithms for series and shunt three-phase four-wire active power filters. *IEEE Transactions on Power delivery, 10*(3), 1649-1656.
- [9] Akagi, H., Kanazawa, Y., y Nabae, A. (1984). Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications, (3)*, 625-630.
- [10] Dolezal, J., Castillo, A. G., Tlustý, J., y Valouch, V. (diciembre de 2000). Topologies and control of active filters for flicker compensation. En *ISIE'2000. Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, (1)*, (pp. 90-95). IEEE.
- [11] Takeda, M., Ikeda, K., Teramoto, A., & Aritsuka, T. (1988, April). Harmonic current and reactive power compensation with an active filter. En *PESC'88*



*Record., 19th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* (pp. 1174-1179). IEEE.

- [12]** Kojima, H., Matsui, K. y Tsuboi, K. (2004). *Static Var compensator having active filter function for lower order harmonics. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2004, Busan, Corea del Sur.*
- [13]** Wang, L., Lao, K., Lam, C., y Wong, M. (2017). *Delta-connected static var compensator (SVC) based hybrid active power filter (SVC-HAPF) and its control method* [Conferencia]. IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing.
- [14]** Mohan Mathur, y R. Varma, R. (2002). *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*. IEEE Press and Wiley & Sons, Inc.
- [15]** Miller, T. (1982). *Reactive Power Control In Electrical Systems*. Wiley & Sons, Inc.
- [16]** Hingorani, N., y Gyugyi, L. (1999). *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. Wiley – IEEE Press.
- [17]** *IEEE 1453 -2015. Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems.*
- [18]** *IEC 61000-3-7-2008. Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems.*
- [19]** Peña Huaranga, O. (2007). Estudio y simulación de los filtros pasivos, activos e híbridos de potencia, para el mejoramiento de la calidad de energía. En *Simposio Internacional sobre la Calidad de la Energía Eléctrica - SICEL, 4*. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/SICEL/article/view/694>

## ACERCA DEL AUTOR

### M.Sc. Oscar Julian Peña Huaranga

Candidato a doctor en Ciencias con mención en Energética por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Máster en Gestión de las Energías Renovables por la Universidad de Barcelona (UNIBA). Maestro en Ciencias con Mención en Sistemas de Potencia, por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Ingeniero electricista por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). Docente en la maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa UNSA y del programa de pre-Maestría en Sistemas de Potencia de la Universidad Nacional de Ingeniería. Actualmente es gerente de la empresa Power & Technology Systems (PTSYS).

@ oscar.pena.h@uni.pe

@ oscar@ptsys.com.pe

### BSc. Jordy Daniel Abanto Cueva

Bachiller en Ciencias con mención en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Con experiencia en la elaboración de estudios eléctricos; solución a problemas de calidad de energía en plantas industriales, mineras y comerciales, implementación de filtros activos, compensación reactiva en media y baja tensión. Actualmente, labora como ingeniero de servicios en PTSYS SAC.

@ jabantoc@uni.pe

@ Jordy.abanto@ptsys.com.pe

Recibido: 01-07-22  
 Revisado: 04-08-22  
 Aceptado: 16-08-22



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

Metodología basada en la  
**medición de la amplitud  
de la aceleración y  
en la medición de la  
señal espectral de su  
envolvente**



## Detección de fallas de rodamientos mediante análisis vibracional

### *Using Vibration Analysis to Detect Failure of Bearings*

#### RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es establecer una metodología para la detección de fallas en rodamientos en equipos industriales mediante el uso de tecnologías predictivas. Esto permitirá identificar tempranamente las fallas de los rodamientos en equipos industriales a través de la identificación de las frecuencias forzantes del rodamiento. La tecnología predictiva utilizada es el análisis de vibraciones. El alcance de estudio abarca equipos rotativos de plantas industriales y como campo de estudio se realizará en una unidad rotativa estacionaria. El desarrollo de fallas en los rodamientos es progresivo y está asociado a las condiciones de trabajo del mismo. Estas fallas se expresan en señales y estas señales se van desarrollando progresivamente de acuerdo a la condición del rodamiento. Para el estudio se ha tomado como muestra el rodamiento SKF 1211 EK dispuesto sobre un soporte SKF – SNL 511-609.

La metodología de trabajo es experimental. En razón de ello, se utilizó un colector de vibraciones VibXpert II, un sensor piezoeléctrico VIB 6. 142 y para el análisis de la información se utilizó el software Omnitrend V.2.92.

Los principales hallazgos del trabajo muestran la identificación de las frecuencias de fallo de los rodamientos, considerando la programación del rango de frecuencia de medición y la resolución de la señal previos a la medición.

La conclusión principal es que, para poder monitorear la condición de los rodamientos de debe seguir una metodología, esta se basa en la medición de la amplitud de la aceleración y en la medición de la señal espectral de la envolvente de la aceleración.

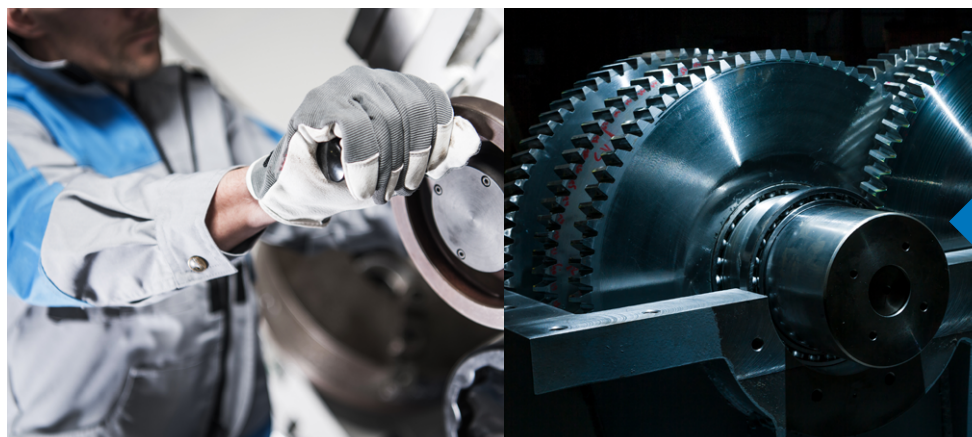
#### ABSTRACT

*This research aims at setting a methodology to identify failures in bearings in industrial equipment by using predictive technologies. This will allow the detection of early failures of bearings in industrial equipment by identifying bearing forcing frequencies. Predictive technology was used to analyze vibration. The scope of this study covers rotating equipment in industrial plants, which will be developed in a stationary rotating unit. Failures in bearings appear progressively and are associated with working conditions. These may be expressed through signals that develop gradually depending on the bearing condition. For this study, a SKF 1211 EK bearing supported on a SKF – SNL 511-609 was used as a sample.*

*This experimental research used a VibXpert II vibration collector and a VIB 6.142 piezoelectric sensor. For information analysis purposes, an Omnitrend V.2.92 software was used.*

*The main findings of the work show the identification of failure frequencies in bearings, taking into account the programming of the measurement frequency range and the signal resolution prior to the measurement.*

*As a conclusion, a methodology is needed to monitor the condition of the bearings, which may be based on measuring the acceleration amplitude and the spectral signal of the acceleration enveloping.*



#### Palabras Claves

Falla de rodamientos, monitoreo de condición, frecuencias de fallo de rodamientos.

#### Key words

Bearing failure, condition monitoring, bearing failure frequencies.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas críticos en maquinaria rotativa de plantas industriales está asociado a los soportes de carga. La ausencia de una metodología de monitoreo de condición o la aplicación inadecuada del mismo, generan eventos no deseados que afectan la producción o la prestación de servicios con el consecuente efecto en la confiabilidad y disponibilidad de los equipos de planta. Los cojinetes de rodadura (rodamientos) son elementos mecánicos muy sensibles y por lo tanto de extremo cuidado durante su instalación y en su mantenimiento. Estas actividades están relacionadas directamente con su tiempo de vida y el desempeño de los equipos. Las tasas de fallas en maquinaria rotativa asociada a los cojinetes de rodadura son elevadas y representan un problema serio para las industrias. Todos los esfuerzos que se realizan no han logrado mitigar y menos eliminar estos problemas.

El problema principal de la presente investigación es la presencia de alta tasa de fallas de rodamientos en maquinaria industrial, esto se explica por una tardía o inadecuada detección de señales de vibración que terminan en acciones de mantenimiento con nulo o poco aporte en la solución del problema o poco aporte de valor agregado a las acciones de mantenimiento.

En razón a ello es que se establece el objetivo de la investigación que es establecer una metodología de monitoreo de condición de los rodamientos de maquinaria rotativa mediante análisis vibracional. Como parte de este objetivo mayor, se definirán los lineamientos para programar la señal de vibración a fin de identificar las frecuencias forzantes de los rodamientos.

## FUNDAMENTOS

Estudios realizados documentan que «El 10 % de los rodamientos alcanzan su vida útil. Cuando la carga se duplica en un 20 %, su vida se reduce a la mitad. Cuando la carga se duplica, su vida se reduce a un séptimo del tiempo que debería ser útil» [1].

Los rodamientos soportan cargas radiales, axiales o cargas combinadas. Para el estudio, se ha elegido una unidad rotativa que trabaja con rodamientos de bolas a rótula. «Los rodamientos de bolas a rótula tienen dos hileras de bolas y un camino de rodadura esférico común en el aro exterior. Los rodamientos son insensibles a la desalineación angular del eje en relación con el soporte» [2], pero reaccionan generando señales si las condiciones de montaje y regulación del juego radial interno no corresponde a lo que indica las condiciones de diseño y los procedimientos de ensamble y operación. Las señales se expresan en las altas frecuencias y podemos observarlas en el dominio del tiempo como ondas o en el dominio de la frecuencia como espectros. Los espectros que generan las fallas de los rodamientos son asincrónicos.

Los rodamientos expresan sus fallas progresivamente. La primera etapa de las fallas se expresa en la emisión de sonidos audibles en el rango ultrasónico. En la segunda etapa se incrementa la intensidad del ruido y además se generan señales espectrales correspondientes a la frecuencia natural del rodamiento; conforme se va incrementando el nivel de excitación (conducente a la falla), el espectro incrementa su amplitud y además presenta bandas

laterales. En la tercera etapa, la intensidad del ruido se incrementa considerablemente y se mezcla con el ruido de las fallas de los componentes del rodamiento, la falla del rodamiento se expresa en forma espectral y es la que corresponde a las frecuencias forzantes de los elementos del rodamiento; aquí, según la intensidad de la falla, las frecuencias forzantes pueden desarrollar frecuencias armónicas acompañadas de bandas laterales. En la cuarta etapa, la intensidad del ruido sigue en ascenso y abarca la zona donde se expresan las frecuencias forzantes de fallas del rodamiento, zona donde es dificultoso observar los espectros forzantes de las fallas; en esta última etapa, es evidente que una falla catastrófica está en desarrollo acelerado, sin embargo, es de cuidado observar la señal espectral porque no se visualizan las frecuencias forzantes de fallas del rodamiento [3].

Las frecuencias generadas por fallas de los rodamientos dependen de su construcción física. Los fabricantes lo pueden construir con un número determinado de elementos rodantes, esto depende de las condiciones de carga para lo que es diseñado, de acuerdo con ello se generan las fallas. Estas fallas son de absoluto interés para identificar en los espectros y explicar la falla en sí:

- BPF: frecuencia de falla del aro interior
- BPFO: frecuencia de falla del aro exterior
- BSF: frecuencia de falla de los elementos rodantes
- FTF: frecuencia de falla de la jaula

Donde:

$N_b$  = número de elementos rodantes

$dr$  = diámetro de elemento rodante

$dc$  = diámetro primitivo de rodamiento

$\alpha$  = ángulo de contacto

$$BPFO = \left(1 - \frac{dr}{dc} \cos \alpha\right) \frac{N_b}{2}$$

$$BPF: = \left(1 + \frac{dr}{dc} \cos \alpha\right) \frac{N_b}{2}$$

$$BSF = \left(1 - \left(\frac{dr}{dc}\right)^2 \frac{dc}{2dr}\right)$$

$$FTF = \left(1 - \frac{dr}{dc} \cos \alpha\right) \frac{1}{2}$$

Estas frecuencias asincrónicas se observan cuando el rodamiento desarrolla algún tipo de falla y se desarrollan progresivamente en la tercera etapa de fallo. Las frecuencias forzantes son posibles de ser detectadas mediante tecnología de análisis vibracional. Cuanto más temprano se detecten e identifiquen, será posible tomar acciones correctivas y proactivas con el consecuente efecto en la confiabilidad y disponibilidad del activo físico.

Estas frecuencias se generan en la alta frecuencia. La aceleración está asociada a las fuerzas que se desarrollan en los componentes estudiados. En nuestro caso, los rodamientos generan altas fuerzas friccionales y concentran mucha energía. Esta es la razón por la que para nuestro estudio realizaremos mediciones de aceleración.

## METODOLOGÍA

Para la recolección de información se utilizó un colector de vibraciones VibXpert II y para el análisis de la información se utilizó el software Omnitrend V.2.92. El sensor de vibración utilizado en un acelerómetro piezoeléctrico Vib 5 - 436

Para la medición de la señal de la aceleración se han programado los siguientes parámetros:

*Frecuencia máxima = 192000 CPM*  
*Número de líneas = 3200*  
*Promediado = 4*  
*Ventana = Hanning*

En la unidad se han realizado mediciones durante un periodo de 8 meses para observar el desarrollo de las frecuencias forzantes. La unidad rotativa en estudio es un centrador industrial que trabaja en las siguientes condiciones:

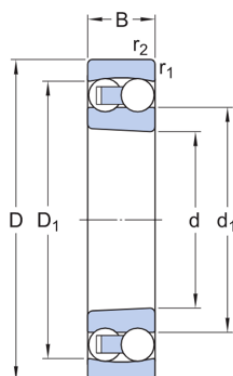
*RPM = 1800*  
*Potencia = 2 HP*  
*Frecuencia de Línea = 60 Hz*  
*Número de polos = 2*  
*Soportes de pie: SKF SNL – 511 - 609*

La siguiente es la data correspondiente al rodamiento instalado (SKF - 1211EK) [4].



Figura 1. Rodamiento SKF 1211EK.

Fuente: SKF [4].



### DIMENSIONES

d	55 mm	Diámetro del agujero
D	100 mm	Diámetro exterior
B	21 mm	Ancho
d <sub>1</sub>	≈ 70.3 mm	Diámetro del resalte del aro interior
D <sub>1</sub>	≈ 86.5 mm	Diámetro del resalte del aro exterior
r <sub>1,2</sub>	min. 1.5 mm	Dimensión del chaflán

Agujero cónico, conicidad de 1:12

Figura 2. Datos técnicos del rodamiento SKF 1211EK.

Fuente: SKF [4].

$$N_b = 18$$

$$dr = 10.32$$

$$dc = (do + di)/2 = 77.5$$

$$\alpha = 0^\circ$$

## 1. Elementos componentes de un rodamiento

### De las pistas o anillos

Las pistas de los rodamientos están diseñadas con las respectivas curvaturas para conformar la forma del rodamiento (esférico, cilíndrico). Las calzas de los componentes armados dependen de la carga, dimensiones del rodamiento, temperatura de operación, características de expansión y por supuesto de los requerimientos operacionales.

Las frecuencias de paso de bolas (BPFI, BPFO) son físicamente definidas como el promedio de paso de cada bola o rodillo a través de un punto definido de las pistas [5].

Ecuación 2: BPFI

$$BPFI = \left(1 + \frac{dr}{dc} \cos \cos \alpha\right) \frac{N_b}{2}$$

$$BPFI = (1 + 0.13316) 9.5$$

$$BPFI = 10.76 \text{ x RPM}$$

Ecuación 1: BPFO

$$BPFO = \left(1 - \frac{dr}{dc} \cos \cos \alpha\right) \frac{N_b}{2}$$

$$BPFO = \left(1 - \frac{dr}{(do + di)/2} \cos \cos \alpha\right) \frac{N_b}{2}$$

$$BPFO = \left(1 - \frac{10.32}{77.5} \cos \cos 0\right) \frac{19}{2}$$

$$BPFO = \left(1 - \frac{10.32}{77.5} \cos \cos 0\right) 9.5$$

$$BPFO = 8.24 \text{ x RPM}$$

### Elementos rodantes

Los elementos rodantes están diseñados para rotar sobre las pistas que están diseñadas conforme a la forma del elemento (curvatura). La transferencia de la carga para un movimiento relativo requiere de esferas (bolas) o cilindros (rodillos o agujas) según la superficie de rodamiento, curvatura y una buena lubricación llegan a crear y reducir la fricción y transmisión del torque a altas velocidades rotacionales.

La frecuencia de giro de las bolas (BSF) es físicamente descrita como la velocidad angular del rodamiento con respecto a su centro. La cinemática del rodamiento permite el derivado de la velocidad de la bola y la geometría del rodamiento [5].

Ecuación 3: BSF

$$BSF = \left(1 - \left(\frac{dr}{dc}\right)^2\right) \frac{dc}{2dr}$$

$$BSF = \left(1 - \left(\frac{dr}{dc}\right)^2\right) \frac{77.5}{2(10.32)}$$

$$BSF = (1 - 0.01773) \frac{77.5}{2(10.32)}$$

$$BSF = 3.6883 \text{ x RPM}$$

### Jaula

Las función primordial de la jaula de un rodamiento es la de separar los elementos del rodamiento (bolas o rodillos), permitiendo una operación segura a una variedad de velocidades. La jaula evita el roce de los elementos entre sí, así como el desgaste prematuro. Las jaulas no tienen cargas, pero facilitan una distribución de carga uniforme entre los elementos del rodamiento.

La frecuencia de la jaula (FTF) está físicamente relacionada con la velocidad del diámetro del círculo del rodamiento o la línea de centro de los elementos del rodamiento, y el análisis permite al analista determinar la relación de la velocidad de la jaula con respecto a la pista exterior del rodamiento, basándose en la geometría física del rodamiento [5].

Ecuación 4:

$$FTF = \left(1 - \frac{dr}{dc} \cos \cos \alpha\right) \frac{1}{2}$$

$$FTF = \left(1 - \frac{10.32}{77.5} \cos \cos 0\right) 0.5$$

$$FTF = 0.4334 \text{ x RPM}$$

## 2. Etapas de falla de los rodamientos

De acuerdo con diversos estudios se consideran 4 etapas de fallo [5].

### Etapas 1

La energía ultrasónica tiende a incrementarse como respuesta a las fuentes de impacto, fricción, debido a una inadecuada lubricación (deficiente o exceso) o por fallas iniciales en las superficies. Aquí son visibles espectros de muy baja amplitud en el espectro de la aceleración.

### Etapas 2

La energía ultrasónica continúa en incremento. No existen indicaciones visuales de fallas. Aquí se visibilizan, en el espectro de aceleración, espectros no sincrónicos que corresponden a la

frecuencia natural del rodamiento, entre 30K -120K CPM, como resultado de un proceso de excitación de las mismas por fallas iniciales del rodamiento. Con el incremento de las fallas iniciales se observan bandas laterales alrededor de las frecuencias naturales.

### Etapa 3

La energía ultrasónica continúa en incremento. Aquí se observan patrones de defectos visuales de los componentes del rodamiento. En el espectro de aceleración y velocidad se observan espectros correspondientes a BPFI, BPFO, BSF y FTO, La severidad de la falla se determina por el número de armónicos y de las bandas laterales presentes. En esta etapa se debe tomar la decisión de reemplazar el rodamiento.

### Etapa 4

La energía ultrasónica general tiende en aumento como respuesta a fricción y a los impactos producidos por las superficies con falla. Esta puede caer abruptamente antes de una falla total del rodamiento. Aquí se observan, en el espectro de aceleración y velocidad, picos en forma de armónicos del defecto del rodamiento con sus respectivas bandas laterales tendientes a desaparecer. Los defectos pueden variar en la frecuencia debido a holguras o cambios geométricos o pueden desaparecer por completo, según la intensidad del ruido, que es el que se incrementa en la base de la señal.

## RESULTADOS

Los cálculos de las frecuencias forzantes del rodamiento instalado (SKF 1211EK) son los siguientes:

$$BPFI = 10.76 \times RPM = 10.76 \times 1800 = 19368 \text{ CPM}$$

$$BPFO = 8.24 \times RPM = 8.24 \times 1800 = 14832 \text{ CPM}$$

$$BSF = 3.6883 \times RPM = 3.6883 \times 1800 = 6638 \text{ CPM}$$

$$FTF = 0.4334 \times RPM = 0.434 \times 1800 = 780 \text{ CPM}$$

La medición de la señal de la vibración es el aspecto más importante del programa de análisis de vibración [6]. Sin buenos datos no se pueden lograr buenos resultados. El análisis y el software automatizado confían en buenos datos para hacer diagnósticos exactos [7]. De acuerdo con ello, la programación de la señal considera los siguientes parámetros:

*Tipo de detección: Envolvente de aceleración (RMS)*  
*Frecuencia de trabajo = 10 BPFI (193680 CPM) (\*)*  
*Número de líneas = 3200*  
*Ventana = Hanning*  
*Promediado = 4*

Figura 3. Programación de la señal.

(\*) De acuerdo con las consideraciones recomendadas por Charlotte [8]

El sensor utilizado para la medición de la señal es un acelerómetro (VIB 6.142) de  $1.0 \mu A/ms^{-2}$  [ $9.8 \mu A/g$ ]  $\pm 3\%$  con un rango de frecuencia de 1 Hz hasta 20 kHz y con Frecuencia de resonancia de 36 kHz.

En el gráfico de cascada, que corresponde a mediciones de envolvente de aceleración, se observan espectros de falla que corresponden a frecuencias forzantes originadas por eventos en alta frecuencia, espectros que corresponden a la etapa 3 de falla del rodamiento.

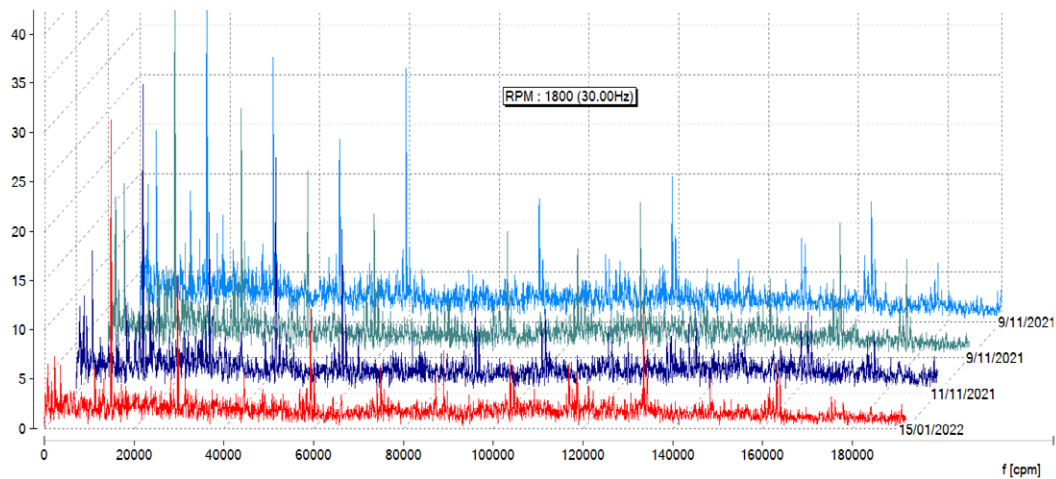


Figura 4. Gráfico de cascada de mediciones de envolvente de aceleración de un periodo de 4 fechas.

Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico, se observan frecuencias forzantes ( $F_f$ ), que desarrollan frecuencias armónicas ( $2F_f$ ,  $3F_f$ , ...).

$F_f = 14820 \text{ CPM}$   
 $2F_f = 29640 \text{ CPM}$

$3F_f = 44460 \text{ CPM}$   
 $4F_f = 59280 \text{ CPM}$   
 $5F_f = 74100 \text{ CPM}$   
 $6F_f = 88920 \text{ CPM, etc.}$

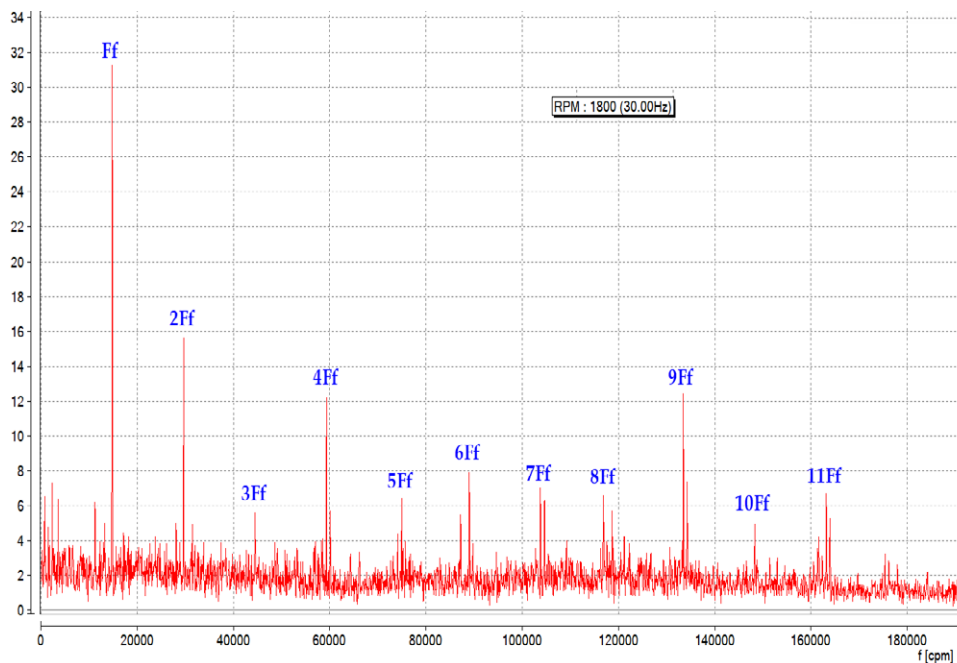


Figura 5. Gráfico del espectro de la señal envolvente de aceleración para observar la frecuencia forzante y sus armónicos.

Fuente: Elaboración propia.

La frecuencia forzante ( $F_f$ ) y sus armónicos están moduladas y presentan bandas laterales.

Frecuencia portadora ( $5F_f$ ) = 74100 CPM  
 Banda lateral anterior = 73320 CPM (Diferencia de 780 CPM)  
 Banda lateral posterior = 74880 CPM (Diferencia de 780 CPM)

En el siguiente gráfico se describe al armónico 5Ff:



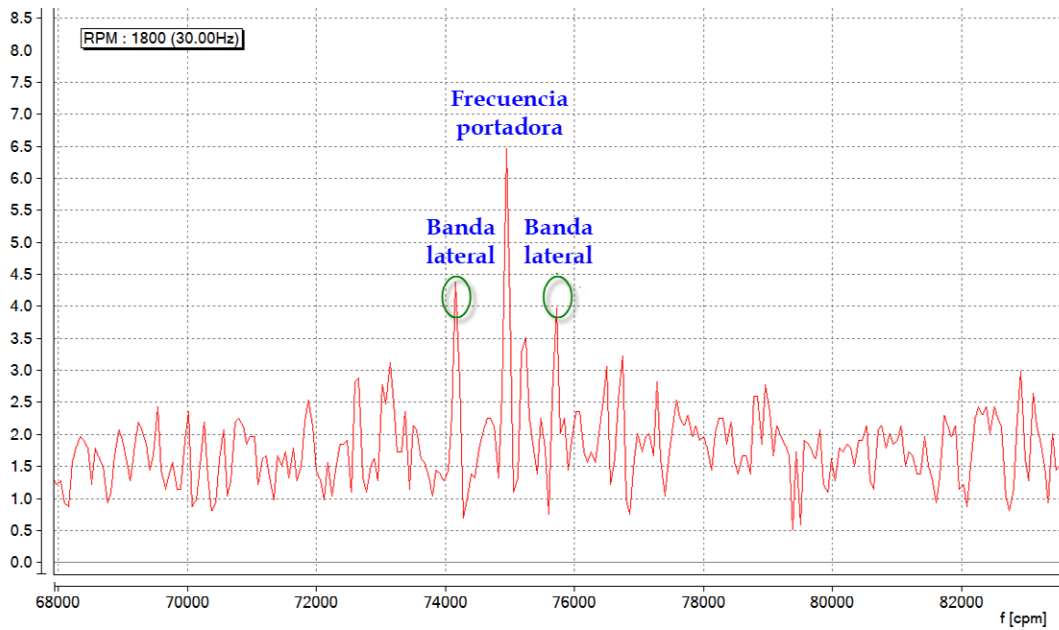


Figura 6. Gráfico del espectro de la señal de envolvente de aceleración para observar la frecuencia forzante y sus bandas laterales.

Fuente: Elaboración propia.

En los siguientes gráficos se observa que las frecuencias forzantes corresponden a la frecuencia de paso del aro exterior (BPFO) que coincide con 14820 CPM que a su vez desarrolla armónicos. Se

observa también que cada uno de los espectros se encuentra modulados por bandas laterales (780 CPM) que corresponden a la frecuencia forzante de la jaula (FTF).

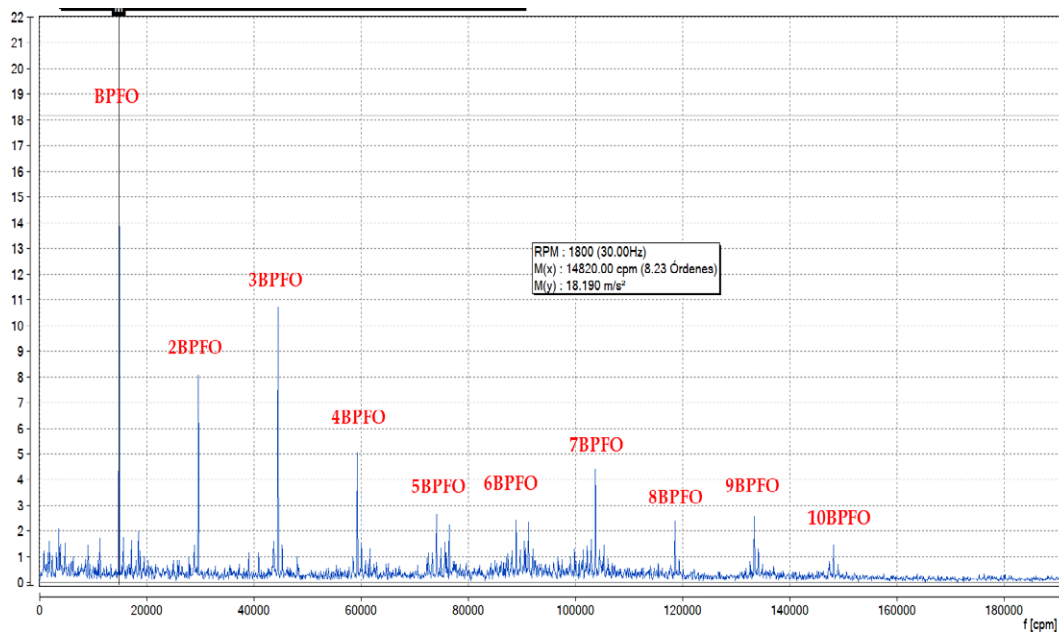


Figura 7. Gráfico del espectro de la señal envolvente de aceleración para observar la frecuencia forzante BPFO y sus armónicos.

Fuente: Elaboración propia.

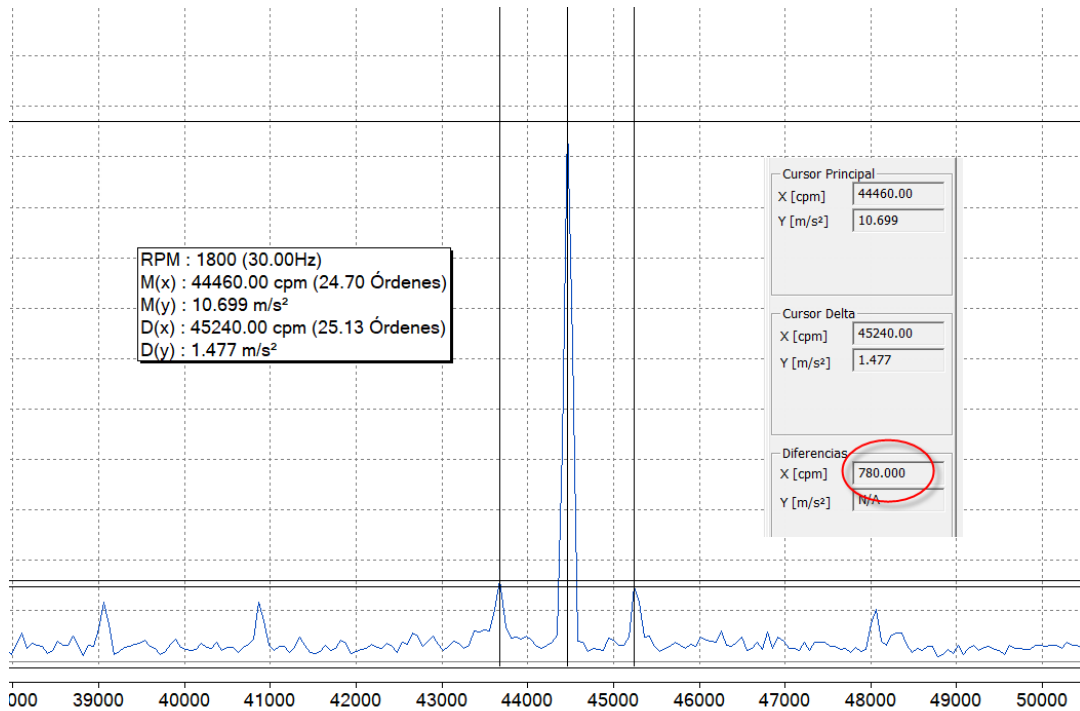


Figura 8. Gráfico del espectro de la señal de envolvente de aceleración para observar la frecuencia forzante BPF0 y sus bandas laterales.

Fuente: Elaboración propia.

El cambio de condición de la unidad se logra cambiando el rodamiento. Siguiendo el procedimiento de instalación de rodamiento de bolas a rótula, regulando el juego radial interno

correspondiente se logra su funcionamiento óptimo. Luego se procedió a alinear los ejes utilizando equipos láser y finalmente al balanceo estático. Finalmente, la señal espectral obtenida se presenta en el siguiente gráfico.

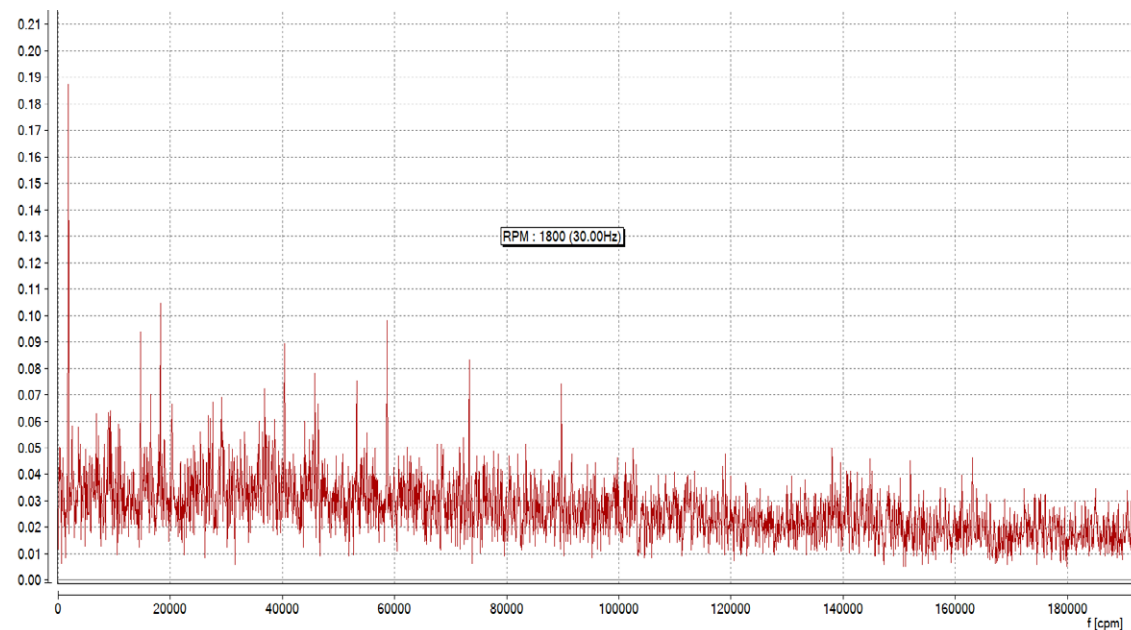


Figura 9. Gráfico del espectro de la señal de envolvente de aceleración donde se visualiza la señal limpia y libre de frecuencias de falla.

Fuente: Elaboración propia.

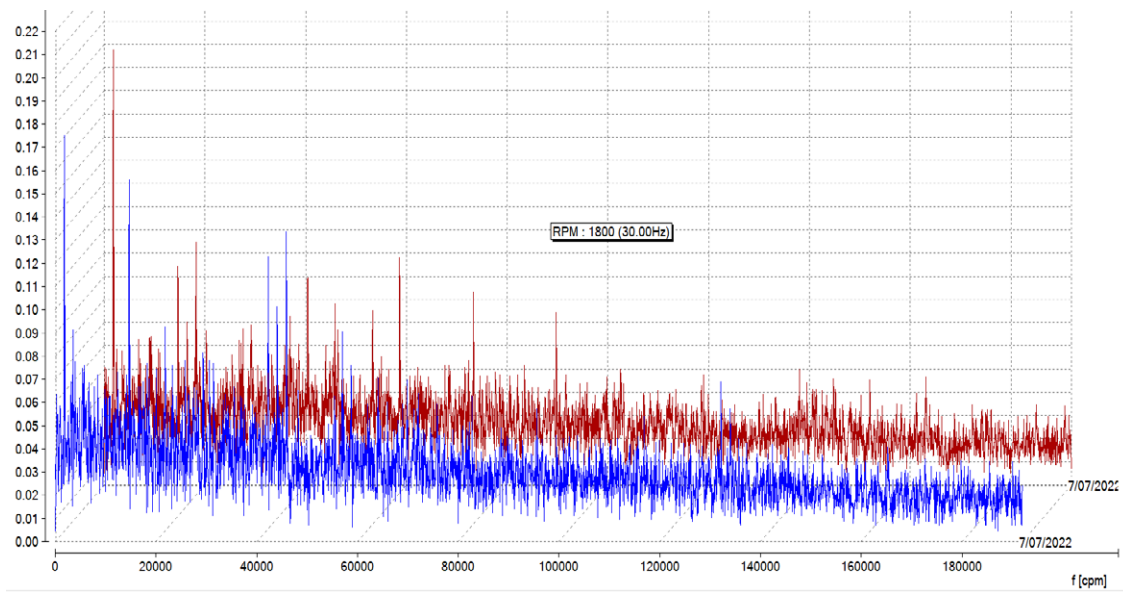


Figura 10. Gráfico de cascada de la señal de envolvente de aceleración donde se visualiza la señal limpia y libre de frecuencias de falla.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se observa el gráfico de cascada con todas las mediciones. Se observa la efectividad del tratamiento correctivo de la falla como consecuencia de un diagnóstico adecuado.

(Compare los espectros, por ejemplo 1 y 5, y se observa la diferencia marcada de las características del espectro).

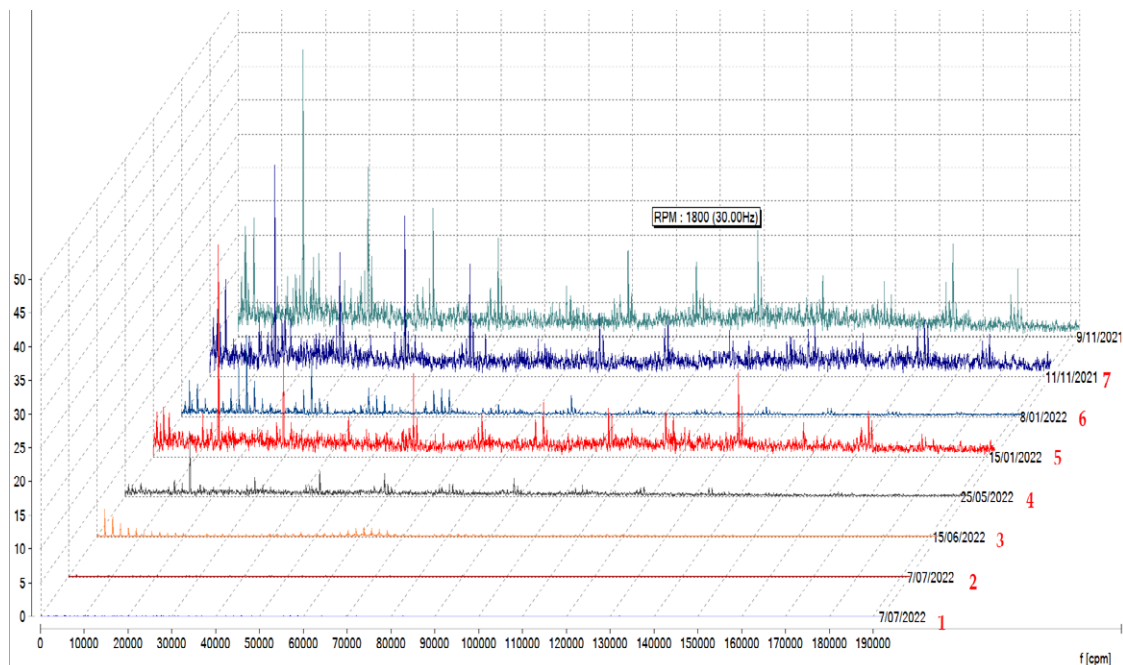


Figura 11. Gráfico de cascada de la señal de envolvente de aceleración donde se observa la efectividad del trabajo de mantenimiento y se compara la señal antes (3, 4, 5, 6, 7 y 8) y posterior al cambio del rodamiento (1 y 2).

Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

La metodología para monitorear la condición de los rodamientos se basa en la medición de la amplitud de la aceleración y en la medición de la señal espectral de la envolvente de la aceleración. Aplicando la metodología se logra el incremento de la disponibilidad y mejora de la confiabilidad de la maquinaria rotativa de plantas industriales.

En el espectro se visualizan las fallas de los rodamientos, independientemente de la fuente que lo ocasiona. Para el análisis y la identificación de cuáles son las frecuencias generadas comprometidas, se deben medir la señal espectral en el dominio de la frecuencia.

El diseño de la señal de la vibración, correspondiente a la señal espectral de la amplitud de la envolvente de la aceleración realizada en el presente estudio, permite visualizar la fase inicial de la falla. Para esto se ha considerado la señal con las siguientes características: 10 BPFi como frecuencia de trabajo, 3200 como número de líneas para obtener un delta de 60 CPM y 4 promediados lineales para asegurar la calidad de la señal.

La identificación de las frecuencias forzantes asociadas a los rodamientos (BPFi, BPFO, BSF, FTF) se ha realizado con los cálculos previos y con el asistente de identificación de frecuencias de rodamientos del *software* y la efectividad del trabajo final se verifica utilizando la herramienta de comparación de gráficos de cascada.

## ACERCA DE LOS AUTORES

### Sixto Sarmiento Chipana

Doctor en Educación por la UPSM, licenciado en Educación por la Universidad Nacional de Educación La Cantuta. Profesor de Tecsup y en la maestría de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Especialista en Mantenimiento Predictivo. Profesional certificado en Vibration Analyst Cat III, Machinery Lubrication Analyst Cat II, Thermographer Cat I y Ultrasonido Cat I. Reconocido formador y capacitador para el sector industrial. Articulista de la revista tecnológica *Industria al día*.

@ ssarmiento@tecsup.edu.pe

### Luis Rojas Mosquera

Licenciado en Educación por la Universidad Nacional de Educación La Cantuta. Profesor de Tecsup, especialista en Mantenimiento Industrial y Mantenimiento Predictivo. Profesional certificado en Vibration Analyst Cat III, Thermographer Cat II y Ultrasonido Cat I. Reconocido formador y capacitador para el sector industrial.

@ lrojas@tecsup.edu.pe

Recibido: 18-07-22  
Revisado: 07-09-22  
Aceptado: 25-10-22



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

## REFERENCIAS

- [1] Mobius Institute. (2015). *Vibration Training Course Book Category I*. USA.
- [2] SKF. (2010). *SKF Bearing Maintenance Handbook*. SKF Group.
- [3] Nakhaeinejad, M. (2011). *Practical Vibration Analysis of Machinery*.
- [4] SKF. (2008). *Catálogo general*. SKF Group.
- [5] Ambre, D. (2007). *Vibration Analysis Techniques Guide. Full Spectrum Diagnostics*. England.
- [6] Goldman, S. (1999). *Vibration Spectrum Analysis*. USA.
- [7] Mobius Institute. (2015). *Vibration Training Course Book Category II*. USA.
- [8] Technical Associates of Charlotte. (2010). *Vibration Diagnostic Handbook*. USA

# ¡CONVIÉRTETE EN EL **OPERADOR**

**QUE LAS EMPRESAS BUSCAN!**

## Programas y Cursos

¿Sabes por qué debes estudiar con  
nuestros expertos?



Maquinaria Real



Simuladores de alta gama  
únicos en el país



Vive la experiencia real en  
el Internado de mala



Cursos con respaldo  
de **Ferreyros**

\*aplica para algunos cursos de escuela de operadores

CONTÁCTATE CON NUESTRO  
ASESOR COMERCIAL ESPECIALIZADO



📞 Rodrigo Salas  
✉️ rsalas@tecsup.edu.pe  
📞 939 117 015

# El efecto de la granulometría sobre la técnica muestral, basado en pruebas de diferentes minerales y los errores presentados en técnicas de muestreo



# El error de muestreo de minerales, un análisis del muestreo manual y el uso del divisor Jones

## Mineral Sampling Error, Manual Sampling Analysis and Use of Jones Splitter

### RESUMEN

El error más común en la realización de una técnica muestral es diferente que la determinación del error de muestra según Gy. Los resultados de pruebas metalúrgicas generan resultados que muchas veces al escalarlos a las operaciones, no son aplicables al tener resultados que no mejoran la performance del proceso a evaluar; y la pregunta que surge es «¿dónde está el error?».

El artículo describe la evaluación de técnicas muestrales tanto manuales como mecánicas aplicados a diferentes tipos de minerales, considerando el error muestral obtenido según la técnica empleada en el proceso.

En la mayoría de laboratorios, no se tiene un equipo que reduzca la masa del mineral, esto se realiza utilizando el equipo Jones y al ser la masa pequeña un cuarteo manual. Para evitar los errores propios del cambio de muestra, se trabajó por cada grupo con el mismo mineral caracterizado por su distribución granulométrica.

En la parte experimental se tomaron diversas muestras minerales entre sulfuros de cobre, sulfuros de zinc, sulfuros de Pb-Zn, sulfuros de Pb-Cu-Zn-Ag y minerales auríferos. En la parte experimental se realizaron 584 cuarteos, divididos en 192 pruebas para el cuarteo manual, 192 para el cuarteador Jones y 192 para el cuarteo por damero. Las 192 pruebas de cada bloque fueron divididas en 8 grupos de 24 cuarteos cada uno.

Los resultados de las pruebas indicaron que el cuarteo manual presenta mayor error que cuarteo utilizando el equipo Jones y este a su vez presenta mayor error que el muestreo por damero. El error general de los muestreos por cuarteo manual fue de 6.75 % comparado con el error del cuarteo en el equipo Jones que fue de 4.87 %. Realizando la discriminación de la peor muestra por Grubbs se obtuvieron los siguientes resultados 5.91 % para el cuarteo manual y 4.22 % para el cuarteo por Jones. En el caso del cuarteo por la técnica del damero fue de 1.53 %.

Con la experimentación se corrobora que el muestreo manual es la peor técnica en la reducción de muestras para pruebas metalúrgicas.

### ABSTRACT

*Sampling technique errors differ from sampling error determination according to Gy. Metallurgical tests provide results that, when applied to operations, do not improve the process performance, so the question is where is error is.*

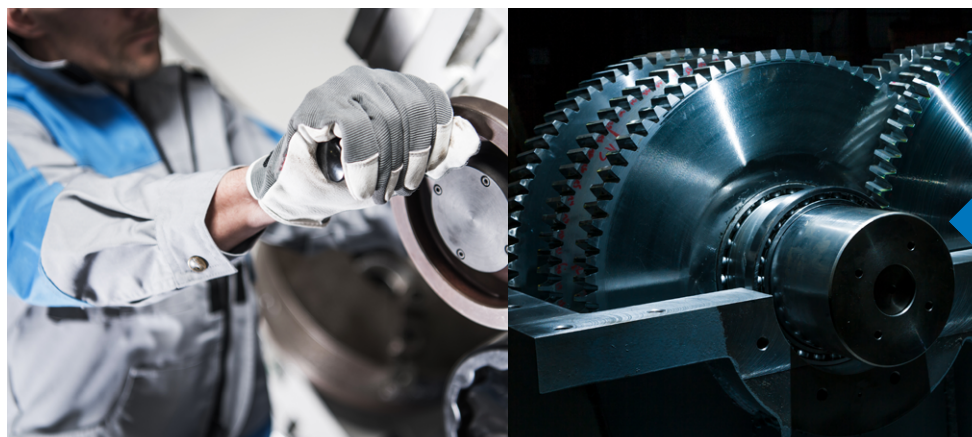
*This article describes the evaluation of both manual and mechanical sampling techniques applied to different types of minerals.*

*Most laboratories do not have proper equipment to reduce mineral mass, which is done with a Jones Splitter because of the small size of the sample. To avoid errors due to sampling changes, each group worked with the same mineral based on its granulometric distribution.*

*The experiment considered different mineral samples like copper sulfides, zinc sulfides, Pb-Cu sulfides, Pb-Cu-Zn-Ag sulfides and gold minerals. There were 584 quartering processes divided as follows: 192 for manual reduction, 192 for the Jones divider, and 192 for checkerboard reduction. Every block was divided into 8 groups of 24 reductions each.*

*The results showed that manual quartering has more errors compared to the use of a Jones splitter, but this in turn presents more errors than the checkerboard method. The manual quartering sampling had a 6.77% error compared to that of Jones with 4.87%. The Grubbs' test was performed to identify the worst sample resulting in 5.91% for the manual reduction, 4.22% for the Jones divider, and 1.53% for the checkerboard method.*

*The experiment proves that manual sampling is not the best technique to divide samples for metallurgic tests.*



### Palabras Claves

Error de muestreo, método de Pierre Gy, equipo Jones, damero, distribución granulométrica.

### Key words

Sampling error, Pierre Gy method, Jones equipment, checkerboard method, particle-size distribution.

## INTRODUCCIÓN

Para la realización de pruebas de cuarteo, generalmente se utiliza, en muchas operaciones metalúrgicas y laboratorios, el cuarteo manual como parte de su procedimiento de reducción de muestra. Sin embargo, no se toma en consideración el error generado al realizar este muestreo, sumando a otros errores propios de la estadística, así como de errores manuales y de contaminación, los cuales hacen que las pruebas posteriores realizadas a estas muestras —ya sean de lixiviación o de concentración por flotación— no guarden relación con lo que el proceso requiere al estar fuera de la confiabilidad deseada.

Según Pittard (2009), la precisión del muestreo puede llegar al 20 % al ser medido en muestras gruesas; si utilizamos divisor, podría llegar al 13 %, reduciéndose conforme el tamaño de las partículas se hace más pequeño o, metalúrgicamente, el D80 se hace más pequeño; lo menciona como un error general suma de todos los errores en muestreo.

Khan (1968), en su tesis, plantea las desviaciones *standard* encontradas a través de las pruebas que realizó con diversas muestras. Al aplicar la técnica de cuarteo, plantea que el error es de 6.8 %, muy cercano a los valores de esta investigación; para muestras que cumplen las mejores condiciones al utilizar el cuarteador Jones, el resultado fue de entre 1.01 % y 5.14 % con un promedio de 3.8 %, también guardando cierta relación con los datos obtenidos en la investigación actual.

Gy (1979 y 2004) nos plantea, desde el enfoque de la teoría de muestreo (TOS), que una de las variables más influyentes y determinantes del error muestral es el tamaño máximo de partícula, que en nuestro caso lo relacionamos a la función granulométrica y el D80 del mismo.

Según Francois Bongarcon (1999), el error común del uso de la fórmula de Gy es la determinación del error muestral, y nos plantea que error muestral es la suma de múltiples errores que se comenten en el desarrollo de la toma de la muestra de análisis, ya sea analíticamente o para pruebas metalúrgica, en su propuesta plantea tres tipos de errores comunes.

Toconas (2008) refiere los tipos de errores: el fundamental, producida por la pérdida de precisión de la muestra, la segregación, generada por distribuciones no al azar del mineral, la heterogeneidad de largo alcance que es un error fluctuante y no al azar, la heterogeneidad periódica generada por la fluctuación temporal/espacial, la delimitación de incrementos producida por un mal diseño de muestreo, así como una mala selección de equipos, la extracción de incrementos en la cual el procedimiento muestral falla por la extracción imprecisa del incremento de la muestra final y, por último, la preparación error producido por contaminación de la muestra y pérdidas del proceso.

Uno de los problemas más comunes en los laboratorios es definir los tipos de cuarteos por un lado y por otro el efecto de la granulometría en el error de una determinada técnica muestral. Estudios al respecto sobre cuál es el error de una técnica específica de muestreo son muy escasos, no se determina la diferencia entre los errores cometidos al realizar una técnica, no se evalúa el impacto de la forma del mineral, pese a que la masa muestral está dentro de las consideraciones de los estadísticos, lo cual es muy importante.

En este trabajo se busca determinar el efecto de la granulometría sobre la técnica muestral, basados en pruebas de diferentes tipos de minerales tanto oxidados como sulfurados, así como también determinar sobre todo el error por cada técnica muestral. Para este estudio se tomó como base las técnicas muestrales de cuarteo manual, uso del *splitter* Jones y técnica del damero, técnicas que son las más difundidas y utilizadas en los laboratorios metalúrgicos, sin que esto elimine otros tipos de técnicas que podrían aplicarse a la reducción de muestras aplicables a protocolos hechos en laboratorios.

## FUNDAMENTOS

En muchas plantas concentradoras no confían en las pruebas metalúrgicas realizadas en sus instalaciones, esto se debe a múltiples causales, podría deberse a inexperiencia en la realización de pruebas metalúrgicas, contaminación de las muestras, mal muestreo, reactivos vencidos, equipo de laboratorio defectuoso o limpieza deficiente. Entre estos posibles causales, no se toma en consideración el error en la reducción de la muestra, que puede estar asociada a un mal método muestral o diseño de protocolo muestral.

Uno de los errores que no se toma en consideración en la mayoría de operaciones es el error de reducción de la muestra; no la consideran al realizar sus experimentos y esto puede generar la desconfianza en sí de los resultados, asumiendo que los otros causales de error se minimizan.

Evans y Napier (2003) señalan: «Cuando las características del mineral, como las distribuciones de tamaño de grano mineral, se cuantifican mediante mediciones en muestras de partículas, existe un error asociado con los valores medidos». La magnitud de este error es función de la ley del mineral de interés, la textura del mineral y la cantidad de partículas de mineral medidas en el análisis. En la práctica, el deseo de minimizar el error debido al muestreo, aumentando el número de partículas medidas, debe equilibrarse con el aumento del tiempo y el coste de analizar este aumento del número de partículas.

Kim Esbensen y Claas Wagner (2014) plantean la incertidumbre de la medición en el proceso de muestreo, generada por el proceso de reproducibilidad de pruebas dentro de la teoría del muestreo (TOS), en la cual recalca la importancia de un buen protocolo de muestreo para evitar elevar el error propio de la no representatividad de la muestra extraída del todo que se analizará posteriormente.

Simon (2019) presenta un estudio de un caso basado en una operación de oro subterránea, donde un muestreo metalúrgico deficiente condujo a un rendimiento inferior a la ley y la recuperación. Los problemas relacionados con el muestreo incluyeron enlace deficiente entre geólogos y metalúrgicos, pobre dominio, muy pocas muestras metalúrgicas recolectadas y analizadas, muestras compuestas y submuestras no representativas, mala práctica de laboratorio, y la falta de documentación y QAQC. Estos problemas provocaron interrupciones durante cuatro años y se estima que costaron alrededor de 115 millones de dólares en ingresos perdidos y 7.5 millones de dólares en gastos correctivos.

Una de las principales limitaciones del estudio en la determinación de cuál es el error muestral es la escasa bibliografía que nos



permita comprender mejor los orígenes de dichos errores; sin embargo, pese a ello, se realizaron cientos de cuarteos por diversos métodos, así como a diferentes granulometrías para tener la suficiente data que nos permita realizar la estadística del caso y tener referentes sobre los errores de las técnicas muestrales más conocidas en diversas condiciones de estudio como lo es el factor de forma de las partículas y la variedad granulométrica.

pequeña muestra representativa que tenga el menor error posible y que esté enmarcada por debajo del error estadístico aceptado según la teoría de Pierre Gy.

El mineral utilizado para las pruebas fue mineral oxidado aurífero y cuprífero, mineral sulfurado de cobre y de plomo, así como polimetálicos también.

Las pruebas experimentales tuvieron como objetivo principal determinar el error de los cuarteos para los diferentes minerales y evaluar el efecto de este error en las pruebas metalúrgicas y de análisis químicos para las cuales se toman dichas muestras.

La cantidad de mineral empleado en cada una de las pruebas fue de 50 kg en principio, que fue reduciéndose de tamaño en función a un protocolo muestral, hasta obtener una muestra que en masa se encuentre por debajo de los 5 kg para la realización de los cuarteos manuales, y por debajo de 10 kg para la realización del cuarteo con el equipo Jones.

Cada grupo de muestras analizadas granulométricamente y las pruebas de reproductibilidad realizadas fueron ejecutadas con las mismas herramientas y en el mismo ambiente, para las pruebas con el equipo Jones de igual manera se desarrolló la experiencia siguiendo los mismos estándares.

Se prueba el exploratorio sobre el cuarteo por damero, que es muy utilizado para concentrados; se realizó unas pruebas piloto donde el error muestral fue del orden del 2 %.

## METODOLOGÍA

Se seleccionaron los minerales motivo del estudio en tres grandes bloques: uno para prueba de muestreo por cuarteo manual, otro para muestreo por cuarteo con el equipo Jones y el tercero para las pruebas por damero. Cada bloque de muestras consta de ocho muestras minerales de diferentes orígenes, óxidos, sulfuros y mixtos. Cada una de las ocho muestras sirvió para la reproductibilidad de las pruebas de muestreo respectivo.

Las muestras minerales motivo de la investigación en el proceso de cuarteo por las tres técnicas de reducción de muestra fueron tratadas de igual forma por el equipo de operadores, que ejecuto la práctica. La experimentación se realizó en el caso del muestreo manual siguiendo los estándares de protocolo muestral, es decir, reduciendo de ser el caso la granulometría de la misma para que encaje dentro del método de GY con un error de muestreo homogéneo, planteados por Pittard en 2019.

Se realizaron ocho pruebas con una repetitividad de 8 experimentos por cada prueba, las muestras fueron entre mineral ligeramente grueso y fino para el muestreo por cuarteo manual, de igual manera para las pruebas del cuarteador Jones. La data granulométrica de las muestras se adjunta en los resultados, donde el tiempo de uso en el rotal fue de 18 minutos por cada pasada por el equipo.

Los cuarteos fueron realizados por cada muestra el mismo día, es decir a razón de ocho muestras a cuartear por día del mismo mineral, así sucesivamente, para evitar el cambio en la humedad de las muestras que generen resultados diferentes.

La elección de las técnicas muestrales se dio a partir de encuestas realizadas en las operaciones mineras sobre cuál es la técnica de reducción de muestra que utilizan para obtener una

## RESULTADOS

La data granulométrica de las muestras se adjunta, donde el tiempo de uso en el rotap fue de 18 minutos por cada pasada por el equipo; en dicho proceso, el error por cada granulométrico fue el siguiente: 0.13 %, 0.76 %, 0.28 %, 0.53 %, 0.27 %, 0.17 %, 0.38 % y 0.60 % para las muestras de cuarteo manual, el error granulométrico para las muestras que pasaron por el cuarteador Jones fueron: 0.24 %, 0.49. %, 0.27 %, 0.32 %, 0.23 %, 0.55 %, 0.49 % y 0.21 % respectivamente para la data adjunta en resultados. Las muestras de ensayo tuvieron humedades relativamente bajas por lo que no se realizó para algunas mallas finas el tamizaje en húmedo.

### Cuarteo manual

Tabla 1  
Análisis granulométrico 1

Granulométrico n.º 1 - Mineral grueso						
Masa inicial:		476.10				
Malla	Abertura (um)	Masa(g)	% en masa	G <sub>(x)</sub>	F <sub>(x)</sub>	
4	4750	112.40	23.64	23.64	76.36	
6	3350	212.90	44.77	68.41	31.59	
8	2360	85.70	18.02	86.44	13.56	
12	1700	50.20	10.56	96.99	3.01	
16	1180	3.30	0.69	97.69	2.31	
20	841	1.10	0.23	97.92	2.08	
30	595	0.70	0.15	98.07	1.93	
Base	-	9.20	1.93	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>475.50</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.13</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2  
Análisis granulométrico 2

<b>Granulométrico n.º 2 - Mineral fino</b>						
<b>Masa inicial: 211.90</b>						
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
12	1700	30.80	14.65	14.65	85.35	
16	1180	52.40	24.92	39.56	60.44	
20	841	40.70	19.35	58.92	41.08	
30	600	19.60	9.32	68.24	31.76	
40	425	14.40	6.85	75.08	24.92	
50	300	9.90	4.71	79.79	20.21	
70	212	6.90	3.28	83.07	16.93	
Base	-	35.60	16.93	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>210.30</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.76</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3  
Análisis granulométrico 3

<b>Granulométrico n.º 3 - Mineral grueso</b>						
<b>Masa inicial: 246.85</b>						
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
8	2360	36.50	14.83	14.83	85.17	
12	1700	44.05	17.90	32.72	67.28	
16	1180	49.95	20.29	53.02	46.98	
20	841	32.85	13.35	66.36	33.64	
30	600	18.90	7.68	74.04	25.96	
40	425	14.85	6.03	80.07	19.93	
50	300	10.90	4.43	84.50	15.50	
Base	-	38.15	15.50	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>246.15</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.28</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4  
Análisis granulométrico 4

<b>Granulométrico n.º 4 - Mineral fino</b>						
<b>Masa inicial: 271.40</b>						
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
16	1180	86.90	32.19	32.19	67.81	
20	841	16.80	6.22	38.41	61.59	
30	600	23.55	8.72	47.14	52.86	
40	425	23.15	8.58	55.71	44.29	
50	300	22.55	8.35	64.07	35.93	
70	212	15.45	5.72	69.79	30.21	
100	150	28.05	10.39	80.18	19.82	
Base	-	53.50	19.82	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>269.95</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.53</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5  
Análisis granulométrico 5

<b>Granulométrico n.º 5 - Mineral fino</b>						
<b>Masa inicial: 262.30</b>						
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
20	841	108.80	41.59	41.59	58.41	
30	600	28.90	11.05	52.64	47.36	
40	425	24.30	9.29	61.93	38.07	
50	300	20.25	7.74	69.67	30.33	
70	212	13.05	4.99	74.66	25.34	
100	150	21.95	8.39	83.05	16.95	
140	106	12.90	4.93	87.98	12.02	
Base	-	31.45	12.02	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>261.60</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.27</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6  
Análisis granulométrico 6

<b>Granulométrico n.º 6 - Mineral grueso</b>						
<b>Masa inicial:</b>		<b>302.80</b>				
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
4	4750	16.95	5.61	5.61	94.39	
6	3350	26.10	8.63	14.24	85.76	
8	2360	29.05	9.61	23.85	76.15	
12	1700	64.20	21.24	45.09	54.91	
16	1180	40.55	13.41	58.50	41.50	
20	841	30.80	10.19	68.69	31.31	
30	595	18.25	6.04	74.73	25.27	
Base	-	76.40	25.27	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>302.30</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.17</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7  
Análisis granulométrico 7

<b>Granulométrico n.º 7 - Mineral grueso</b>						
<b>Masa inicial:</b>		<b>269.47</b>				
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
30	595	125.40	46.71	46.71	53.29	
40	425	27.10	10.09	56.81	43.19	
50	300	18.85	7.02	63.83	36.17	
70	212	15.00	5.59	69.42	30.58	
100	150	15.45	5.76	75.17	24.83	
140	106	11.10	4.13	79.31	20.69	
200	75	10.60	3.95	83.26	16.74	
Base	-	44.95	16.74	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>268.45</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.38</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8  
Análisis granulométrico 8

<b>Granulométrico n.º 8 - Mineral grueso</b>						
<b>Masa inicial:</b>		<b>285.65</b>				
<b>Malla</b>	<b>Abertura (um)</b>	<b>Masa(g)</b>	<b>% en masa</b>	<b>G<sub>(x)</sub></b>	<b>F<sub>(x)</sub></b>	
16	1180	57.65	20.30	20.30	79.70	
20	841	35.85	12.63	32.93	67.07	
30	600	26.15	9.21	42.14	57.86	
40	425	23.50	8.28	50.41	49.59	
50	300	19.05	6.71	57.12	42.88	
70	212	18.30	6.44	63.57	36.43	
100	150	23.30	8.21	71.77	28.23	
Base	-	80.15	28.23	100.00	0.00	
<b>Total</b>		<b>283.95</b>	<b>100.00</b>			
<b>Error granulométrico =</b>		<b>0.60</b>	<b>%</b>			

Fuente: Elaboración propia.

## A. Errores del cuarteo manual

Tabla 9  
Errores del cuarteo manual 1

Del granulométrico 1 grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2221.90</b>	1174.50	608.90	323.50	5.72	3.69	6.26
<b>Prueba 2</b>	<b>2221.75</b>	1170.20	608.10	331.60	5.34	3.93	9.06
<b>Prueba 3</b>	<b>2221.68</b>	1129.50	581.00	298.70	1.68	2.88	2.82
<b>Prueba 4</b>	<b>2221.15</b>	1138.50	571.90	300.20	2.51	0.47	4.98
<b>Prueba 5</b>	<b>2221.15</b>	1142.70	562.70	293.50	2.89	1.51	4.32
<b>Prueba 6</b>	<b>2221.05</b>	1138.90	607.90	305.00	2.56	6.75	0.35
<b>Prueba 7</b>	<b>2220.95</b>	1127.30	549.70	276.80	1.52	2.47	0.71
<b>Prueba 8</b>	<b>2220.80</b>	1132.20	607.10	255.90	1.96	7.24	15.70
					<b>3.02</b>	<b>3.62</b>	<b>5.52</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10  
Errores del cuarteo manual 2

Del granulométrico 2 fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>1759.20</b>	893.85	439.25	224.75	1.62	1.72	2.33
<b>Prueba 2</b>	<b>1758.83</b>	861.20	433.10	219.80	2.07	0.58	1.50
<b>Prueba 3</b>	<b>1758.75</b>	874.90	450.40	233.40	0.51	2.96	3.64
<b>Prueba 4</b>	<b>1758.70</b>	916.30	443.95	227.71	4.20	3.10	2.58
<b>Prueba 5</b>	<b>1758.15</b>	891.70	444.75	233.75	1.44	0.25	5.12
<b>Prueba 6</b>	<b>1758.08</b>	843.90	424.10	213.90	4.00	0.51	0.87
<b>Prueba 7</b>	<b>1757.95</b>	863.80	443.50	215.80	1.73	2.69	2.68
<b>Prueba 8</b>	<b>1757.93</b>	875.30	433.70	221.50	0.42	0.90	2.14
					<b>2.00</b>	<b>1.59</b>	<b>2.61</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11  
Errores del cuarteo manual 3

Del granulométrico 3 grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2010.35</b>	1002.65	498.50	259.20	0.25	0.56	3.99
<b>Prueba 2</b>	<b>2010.25</b>	983.80	469.70	229.15	2.12	4.51	2.43
<b>Prueba 3</b>	<b>2009.80</b>	988.70	493.50	240.75	1.61	0.17	2.43
<b>Prueba 4</b>	<b>2009.75</b>	1004.50	502.65	257.50	0.04	0.08	2.46
<b>Prueba 5</b>	<b>2009.60</b>	964.15	459.10	219.00	4.05	4.77	4.60
<b>Prueba 6</b>	<b>2009.51</b>	1032.80	525.10	257.10	2.79	1.68	2.08
<b>Prueba 7</b>	<b>2009.15</b>	984.40	512.40	258.20	2.01	4.10	0.78
<b>Prueba 8</b>	<b>2008.82</b>	1003.30	507.40	215.70	0.11	1.15	14.98
					<b>1.62</b>	<b>2.13</b>	<b>4.22</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12  
Errores del cuarteo manual 4

Del granulométrico 4 fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2087.75</b>	1019.15	499.20	255.15	2.37	2.04	2.22
<b>Prueba 2</b>	<b>2087.10</b>	1089.90	547.50	278.90	4.44	0.47	1.88
<b>Prueba 3</b>	<b>2086.50</b>	1048.40	562.70	287.95	0.49	7.34	2.35
<b>Prueba 4</b>	<b>2086.50</b>	1056.00	517.90	253.10	1.22	1.91	2.26
<b>Prueba 5</b>	<b>2086.10</b>	1063.90	518.20	260.85	2.00	2.58	0.68
<b>Prueba 6</b>	<b>2085.90</b>	1065.63	529.25	254.00	2.17	0.67	4.02
<b>Prueba 7</b>	<b>2085.70</b>	1017.90	496.25	246.90	2.39	2.50	0.49
<b>Prueba 8</b>	<b>2085.40</b>	1008.20	502.55	252.30	3.31	0.31	0.41
					<b>2.30</b>	<b>2.23</b>	<b>1.79</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13  
Errores del cuarteo manual 5

Del granulométrico 5 fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2012.35</b>	1028.00	503.95	245.20	2.17	1.96	2.69
<b>Prueba 2</b>	<b>2012.35</b>	1054.20	522.75	266.85	4.77	0.83	2.09
<b>Prueba 3</b>	<b>2011.85</b>	996.35	482.95	251.25	0.95	3.06	4.05
<b>Prueba 4</b>	<b>2011.50</b>	1005.65	510.25	252.80	0.01	1.48	0.91
<b>Prueba 5</b>	<b>2011.05</b>	1017.80	493.30	251.30	1.22	3.07	1.89
<b>Prueba 6</b>	<b>2010.70</b>	966.65	480.45	240.85	3.85	0.59	0.26
<b>Prueba 7</b>	<b>2010.55</b>	1018.00	512.10	263.15	1.27	0.61	2.77
<b>Prueba 8</b>	<b>2010.30</b>	1029.05	531.35	261.30	2.38	3.27	1.65
					<b>2.08</b>	<b>1.86</b>	<b>2.04</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 14  
Errores del cuarteo manual 6

Del granulométrico 6 grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2037.50</b>	1026.95	548.35	266.08	0.80	6.79	2.95
<b>Prueba 2</b>	<b>2037.09</b>	1040.47	547.35	282.55	2.15	5.21	3.24
<b>Prueba 3</b>	<b>2036.65</b>	1012.75	531.15	269.65	0.55	4.89	1.53
<b>Prueba 4</b>	<b>2036.35</b>	1038.05	526.50	248.30	1.95	1.44	5.68
<b>Prueba 5</b>	<b>2034.80</b>	1039.05	523.80	276.30	2.13	0.82	5.50
<b>Prueba 6</b>	<b>2033.50</b>	1056.15	512.95	270.15	3.88	2.86	5.33
<b>Prueba 7</b>	<b>2033.45</b>	1055.75	512.90	268.56	3.84	2.84	4.72
<b>Prueba 8</b>	<b>2033.09</b>	1051.67	536.29	259.95	3.46	1.99	3.06
					<b>2.34</b>	<b>3.36</b>	<b>4.00</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15  
Errores del cuarteo manual 7

Del granulométrico 7 grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2072.50</b>	1063.20	542.75	278.20	2.60	2.10	2.51
<b>Prueba 2</b>	<b>2072.30</b>	973.10	482.50	250.95	6.09	0.83	4.02
<b>Prueba 3</b>	<b>2071.90</b>	1049.20	553.40	294.60	1.28	5.49	6.47
<b>Prueba 4</b>	<b>2071.65</b>	1107.40	586.55	302.05	6.91	5.93	2.99
<b>Prueba 5</b>	<b>2071.20</b>	1004.20	516.30	270.85	3.03	2.83	4.92
<b>Prueba 6</b>	<b>2071.15</b>	1084.10	572.60	296.45	4.69	5.64	3.55
<b>Prueba 7</b>	<b>2070.08</b>	1075.45	544.35	286.45	3.90	1.23	5.24
<b>Prueba 8</b>	<b>2069.60</b>	1067.95	537.15	285.95	3.20	0.59	6.47
					<b>3.96</b>	<b>3.08</b>	<b>4.52</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16  
Errores del cuarteo manual 8

Del granulométrico 8 grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2004.10</b>	1002.90	502.80	275.95	0.08	0.27	9.77
<b>Prueba 2</b>	<b>2003.90</b>	1041.40	531.70	274.20	3.94	2.11	3.14
<b>Prueba 3</b>	<b>2003.40</b>	1075.30	543.55	276.05	7.35	1.10	1.57
<b>Prueba 4</b>	<b>2003.25</b>	1037.40	546.38	284.04	3.57	5.34	3.97
<b>Prueba 5</b>	<b>2003.03</b>	1027.95	526.20	268.70	2.64	2.38	2.13
<b>Prueba 6</b>	<b>2002.43</b>	1057.85	553.72	297.69	5.66	4.69	7.52
<b>Prueba 7</b>	<b>2002.70</b>	1041.18	529.84	298.14	3.98	1.78	12.54
<b>Prueba 8</b>	<b>2002.50</b>	1025.15	518.56	275.15	2.39	1.17	6.12
					<b>3.70</b>	<b>2.35</b>	<b>5.85</b>

Fuente: Elaboración propia.

## B. Errores del cuarteo Jones

Tabla 17  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 1

Cuarteo 1 de mineral fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	2024.70	1017.10	495.00	248.50	0.47	2.66	0.40
<b>Prueba 2</b>	2024.60	1008.20	537.20	281.80	0.41	6.57	4.91
<b>Prueba 3</b>	2024.60	983.30	498.50	243.20	2.86	1.39	2.43
<b>Prueba 4</b>	2024.50	1039.30	502.30	249.70	2.67	3.34	0.58
<b>Prueba 5</b>	2024.50	1055.80	516.55	271.55	4.30	2.15	5.14
<b>Prueba 6</b>	2024.00	1012.50	550.10	254.45	0.05	8.66	7.49
<b>Prueba 7</b>	2023.50	1004.40	516.40	261.80	0.73	2.83	1.39
<b>Prueba 8</b>	2023.00	1002.60	520.90	259.30	0.88	3.91	0.44
					<b>1.55</b>	<b>3.94</b>	<b>2.85</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 2

Cuarteo 2 de mineral grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	2053.95	1074.40	523.65	268.90	4.62	2.52	2.70
<b>Prueba 2</b>	2053.00	1052.45	527.00	240.20	2.53	0.15	8.84
<b>Prueba 3</b>	2052.60	1051.20	527.00	257.90	2.43	0.27	2.13
<b>Prueba 4</b>	2053.40	1021.60	491.70	250.70	0.50	3.74	1.97
<b>Prueba 5</b>	2053.60	1018.20	522.90	261.60	0.84	2.71	0.06
<b>Prueba 6</b>	2052.00	1084.02	500.00	240.40	5.65	7.75	3.84
<b>Prueba 7</b>	2051.80	973.10	488.60	250.60	5.15	0.42	2.58
<b>Prueba 8</b>	2056.60	1026.70	492.90	226.90	0.16	3.98	7.93
					<b>2.73</b>	<b>2.69</b>	<b>3.76</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 3

Cuarteo 3 de mineral fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	1997.60	1018.10	500.60	262.80	1.93	1.66	4.99
<b>Prueba 2</b>	1997.55	982.85	477.00	243.65	1.59	2.94	2.16
<b>Prueba 3</b>	1997.55	986.55	468.55	255.85	1.22	5.01	9.21
<b>Prueba 4</b>	1997.50	998.55	490.15	279.50	0.02	1.83	14.05
<b>Prueba 5</b>	1997.20	1000.60	490.00	250.90	0.20	2.06	2.41
<b>Prueba 6</b>	1996.90	1002.50	508.00	249.00	0.41	1.35	1.97
<b>Prueba 7</b>	1995.75	980.75	494.80	243.30	1.72	0.90	1.66
<b>Prueba 8</b>	1995.55	977.20	492.20	246.40	2.06	0.74	0.12
					<b>1.14</b>	<b>2.06</b>	<b>4.57</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 4

Cuarteo 4 de mineral grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	<b>2002.90</b>	987.50	486.85	261.80	1.39	1.40	7.55
<b>Prueba 2</b>	<b>2002.60</b>	1005.00	478.20	237.70	0.37	4.84	0.59
<b>Prueba 3</b>	<b>2001.90</b>	1034.00	524.00	251.30	3.30	1.35	4.08
<b>Prueba 4</b>	<b>2001.65</b>	1004.80	503.25	264.50	0.40	0.17	5.12
<b>Prueba 5</b>	<b>2001.40</b>	1005.05	497.50	244.70	0.43	1.00	1.63
<b>Prueba 6</b>	<b>2001.10</b>	1037.70	503.85	248.05	3.71	2.89	1.54
<b>Prueba 7</b>	<b>2000.70</b>	1020.70	553.85	284.20	2.03	8.52	2.63
<b>Prueba 8</b>	<b>2000.35</b>	1001.90	487.80	254.85	0.17	2.63	4.49
					<b>1.48</b>	<b>2.85</b>	<b>3.45</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 5

Cuarteo 5 de mineral fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	2004.15	1021.10	508.60	239.20	1.90	0.38	5.94
<b>Prueba 2</b>	2003.80	989.25	504.70	266.00	1.26	2.04	5.41
<b>Prueba 3</b>	2003.45	992.80	495.90	253.10	0.89	0.10	2.08
<b>Prueba 4</b>	2003.45	998.85	493.80	257.30	0.29	1.13	4.21
<b>Prueba 5</b>	2003.10	1028.00	501.75	268.50	2.64	2.38	7.03
<b>Prueba 6</b>	2002.65	1038.60	550.85	272.70	3.72	6.08	0.99
<b>Prueba 7</b>	2002.25	1053.80	519.10	290.30	5.26	1.48	11.85
<b>Prueba 8</b>	2001.85	1038.10	520.70	283.15	3.71	0.32	8.76
					<b>2.46</b>	<b>1.74</b>	<b>5.78</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 6

Cuarteo 6 de mineral grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	2007.00	979.90	501.45	248.65	2.35	2.35	0.83
<b>Prueba 2</b>	2006.65	1074.35	542.60	262.85	7.08	1.01	3.11
<b>Prueba 3</b>	2006.55	1103.70	488.25	257.45	10.01	11.52	5.46
<b>Prueba 4</b>	2006.35	1006.85	484.65	253.45	0.37	3.73	4.59
<b>Prueba 5</b>	2006.20	1027.45	542.65	283.45	2.43	5.63	4.47
<b>Prueba 6</b>	2006.10	1031.35	470.05	235.95	2.82	8.85	0.39
<b>Prueba 7</b>	2006.05	1012.65	492.75	268.65	0.96	2.68	9.04
<b>Prueba 8</b>	2006.00	1058.25	535.05	265.85	5.51	1.12	0.63
					<b>3.94</b>	<b>4.61</b>	<b>3.57</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 7

Cuarteo 7 de mineral fino							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	2007.50	1022.00	510.85	260.95	1.82	0.03	2.16
<b>Prueba 2</b>	2007.35	1047.70	526.90	260.50	4.39	0.58	1.12
<b>Prueba 3</b>	2007.25	1042.00	541.80	277.10	3.82	3.99	2.29
<b>Prueba 4</b>	2007.15	1050.90	519.70	264.95	4.72	1.09	1.96
<b>Prueba 5</b>	2007.00	1025.15	528.80	276.10	2.16	3.17	4.43
<b>Prueba 6</b>	2006.85	1018.50	513.60	268.40	1.50	0.85	4.52
<b>Prueba 7</b>	2006.75	994.70	490.10	243.50	0.86	1.46	0.63
<b>Prueba 8</b>	2006.55	1028.40	509.20	248.00	2.50	0.97	2.59
					<b>2.72</b>	<b>1.52</b>	<b>2.46</b>

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24  
Errores del cuarteo con el splitter Jones 8

Cuarteo 8 de mineral grueso							
	Masa inicial	Cuarteo 1	Cuarteo 2	Cuarteo 3	Error 1	Error 2	Error 3
<b>Prueba 1</b>	2002.00	1076.75	544.70	290.20	7.57	1.17	6.55
<b>Prueba 2</b>	1999.45	989.45	502.70	259.55	1.03	1.61	3.26
<b>Prueba 3</b>	1999.10	1028.20	521.75	257.85	2.87	1.49	1.16
<b>Prueba 4</b>	1998.75	1043.65	508.60	261.80	4.43	2.53	2.95
<b>Prueba 5</b>	1998.10	1071.25	551.75	280.25	7.23	3.01	1.59
<b>Prueba 6</b>	1997.86	1063.35	530.50	274.05	6.45	0.22	3.32
<b>Prueba 7</b>	1997.85	1069.45	546.40	268.45	7.06	2.18	1.74
<b>Prueba 8</b>	1997.83	1020.87	523.84	275.20	2.20	2.63	5.07
					<b>4.85</b>	<b>1.86</b>	<b>3.20</b>

Fuente: Elaboración propia.

### C. Para la prueba de damero

Tabla 25  
Errores del cuarteo por damero 1

Prueba 1			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.59		
Agua	110	504.65	2.065806965
% de agua	10.67 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	130	248	3.370348724
% de agua	12.37 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26  
Errores del cuarteo por damero 2

Prueba 2			
Cuarteo 1		Error	
Masa	960.65		
Agua	70	481.48	6.5677
% de agua	6.79 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	80 g	235.91	3.93370526
% de agua	6.73 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27  
Errores del cuarteo por damero 3

Prueba 3			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.18		
Agua	90	530.57	5.04464551
% de agua	8.91 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	90 g	261.3	2.95985442
% de agua	8.91 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28  
Errores del cuarteo por damero 4

Prueba 4			
Cuarteo 1		Error	
Masa	923.14		
Agua	90	475.74	6.08602957
% de agua	8.88 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	90 g	225.4	9.96245107
% de agua	8.88 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29  
Errores del cuarteo por damero 5

Prueba 5			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.35		
Agua	100	495.31	2.913706081
% de agua	9.80 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	110	224.6	17.03298733
% de agua	10.68 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30  
Errores del cuarteo por damero 6

Prueba 6			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.38		
Agua	80	518.86	3.73258162
% de agua	7.99 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	100	271.18	9.4880491
% de agua	9.80 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31  
Errores del cuarteo por damero 7

Prueba 7			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.31		
Agua	100	506.42	0.73213043
% de agua	9.80 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	100	258.3	4.10285346
% de agua	9.80 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32  
Errores del cuarteo por damero 8

Prueba 8			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.55		
Agua	110	517.55	0.44151181
% de agua	10.67 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	130	274.1	12.5898542
% de agua	12.37 %		

Fuente: Elaboración propia.



Tabla 33  
Errores del cuarteo por damero 9

Prueba 9			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.35		
Agua	100	495.31	2.913706081
% de agua	9.80 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	110	224.6	17.03298733
% de agua	10.68 %		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34  
Errores del cuarteo por damero 10

Prueba 10			
Cuarteo 1		Error	
Masa	920.11		
Agua	90	487.21	3.53327855
% de agua	8.91 %		
Cuarteo 2		Error	
Agua	90	248.3	3.93035034
% de agua	8.91 %		

Fuente: Elaboración propia.

En la realización de la técnica de muestreo manual, se empleó el cono y cuarteo manual. Los resultados de las pruebas de muestreo manual arrojaron un error de muestreo de 6.75 % en promedio en todas pruebas como error general.

En las pruebas de cuarteo manual se observó que el error se elevaba, cuanto menor era la masa a cuartear, mayor era este error.

En las pruebas de cuarteo manual, cuanto más fino era el mineral, menor era el error de cuarteo.

Lo anteriormente indicado se replicaba también en las pruebas en equipo Jones, es decir, el error era mayor al cuartear una determinada más manteniendo la granulometría del mismo.

Realizando la discriminación de muestra fuera de rango utilizando el *software* Minitab, se determinó que error del cuarteo con el splitter Jones fue de 4.87 %. Si se discriminan las pruebas en las cuales se determina que al alimentar al costado existe un mayor que en la alimentación central en el equipo Jones, entonces el error se reduce a 4.22 %.

El error en la prueba de damero es mucho más bajo que en las anteriores pruebas, fue de 1.53 % en promedio de todas las pruebas, esto se debe principalmente porque la granulometría es fina, así como también las masas de donde se deben extraer las respectivas muestras fueron pequeñas.

En las pruebas exploratorias realizadas a mineral fino con características de concentrados el error se redujo hasta el 1.17 % comparado con las pruebas más gruesas, lo cual hace suponer que es la mejor técnica para muestras húmeda finas, así porque es la más utilizada en las operaciones metalúrgicas y laboratorios químicos.

## CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la técnica de cuarteo manual presenta el mayor error de todas las técnicas muestrales, lo cual se alinea con investigaciones anteriores.

El equipo Jones presenta menor error al realizar la experiencia comparada con el muestreo manual.

Cuanto más fino es el mineral, el error también se minimiza por cada muestreo ejecutado, lo cual corrobora el planteamiento del TOS de Gy.

Es fundamental realizar más investigaciones al respecto para poder minimizar el error muestral en el proceso de reducción, muy aparte del error determinado por TOS según la base de Gy.

## REFERENCIAS

- [1] Evans, C., y Napier-Munn, T. (2013). Estimating error in measurements of mineral grain size distribution. *Minerals Engineering*, 52, 198-203.
- [2] Esbensen, K., y Wagner, C. (2014). Theory of sampling (TOS) versus measurement uncertainty (MU)—A call for integration. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 57, 93-106.
- [3] Dominy, S., O'Connor, L., y Purevgerel, S. (2019). Importance of representative metallurgical sampling and testwork programmes to reduce project risk—a gold case study. *Mining Technology*.
- [4] Pitard, F. (2019). *Theory of sampling and sampling practice*. Chapman and Hall/CRC.

## ACERCA DEL AUTOR

### Luis Huere Anaya

Ingeniero metalurgista de la Universidad Nacional de Ingeniería, con maestrías en Gestión Integrada en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos y Docencia Universitaria por la Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, candidato a doctor en Ciencias de la Educación.

Trabajó en diversas unidades mineras polimetálicas Pb-Cu-Zn-Ag preconcentración de minerales, flotación *bulk* y separación diferencial con controles en sala de control y sistemas automatizados. Asimismo, en plantas hidrometalúrgicas de procesamiento de oro y plata, PADs

de lixiviación, flotación de pirita aurífera, tecnologías de carbón activado CIL, CIP y CIC, precipitación por los procesos Merrill Crowe y electrodeposición.

Docente principal de Procesamiento de Minerales e Hidrometalurgia en Tecsup, consultor de procesos en plantas de procesamiento de minerales, docente de programas de extensión universitaria y capacitación continua.

 [lhure@tecsup.edu.pe](mailto:lhure@tecsup.edu.pe)

Recibido: 17-08-22

Revisado: 02-09-22

Aceptado: 08-11-22



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

**CARRERAS**

# PROFESIONALES Y TÉCNICAS



 **ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA**

 **MINERÍA PROCESOS QUÍMICO -  
METALÚRGICOS**

 **AVIÓNICA Y MECÁNICA**

 **TECNOLOGÍA DIGITAL**

 **DISEÑO Y PRODUCCIÓN INDUSTRIAL**



**+100** 

**LABORATORIOS  
ALTAMENTE EQUIPADOS**



**CRÉDITO  
EDUCATIVO**



**RESPALDO DE  
ACREDITACIONES  
INTERNACIONALES**



VIVE LA  
**MEJOR PARTE**  
DE LA TECNOLOGÍA



SCAN ME

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 sincrónico 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-19<sup>1</sup> o coronavirus<sup>2</sup>: 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*<sup>3</sup>, que fue inicialmente popularizado por la firma de Silicon Valley *ideo*<sup>4</sup>, 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.

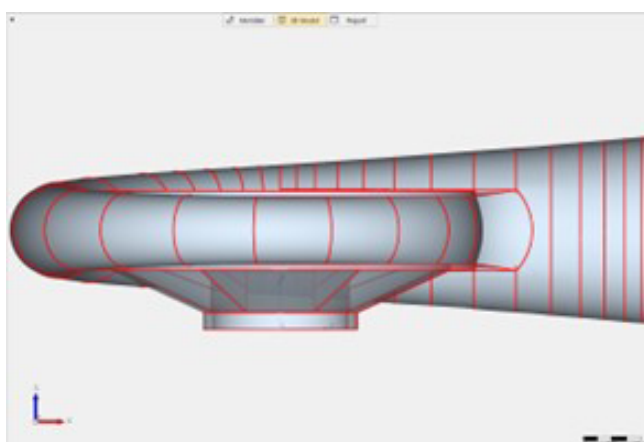
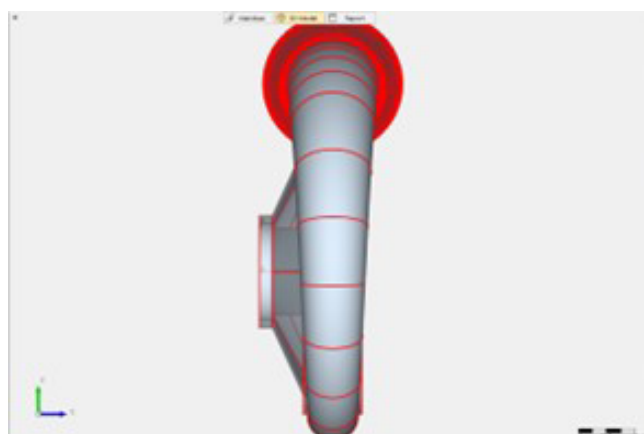


Figura 1 y 2. Arriba la imagen del *software* Cfturbo 2020 R2.0, modelado 3D del eje X del diseño de la carcasa del extractor/soplador. Abajo imagen del modelado 3D en el eje Y. Fuente: Elaboración propia.

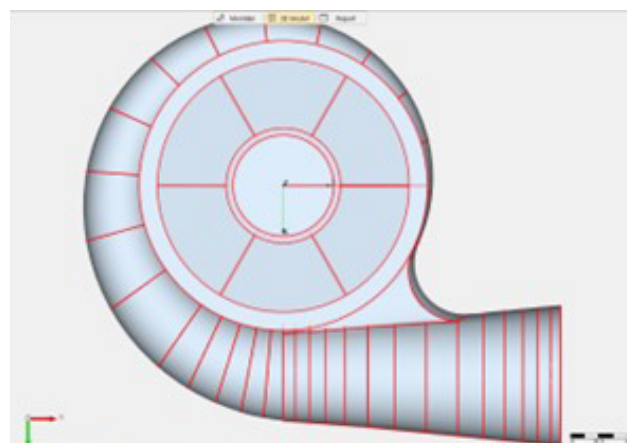


Figura 3 y 4. A la derecha, imagen del software CFturbo 2020 R2.0, modelado 3D del eje Z. A la izquierda, banco de pruebas conectado al motor extractor/soplador centrífugo de aire viciado de SARS-CoV-2 o covid-19 (coronavirus) con multimetro digital (medidor de voltios en AC), pinza amperométrica (medidor 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  $\phi$ ), 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-sincrónicos convencionales (como propuso originalmente Tesla), sino en motores sincrónicos 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 ( $\Omega$ ) 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 ( $\mu F$ ) 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  $\phi$ ). La inductancia se obtiene de una bobina análoga a un balasto magnético de 48 ( $\Omega$ ) 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).

## 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  $\omega$ , 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 asincrónicas, 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).

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

$\omega$ : 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  $\omega$  (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 asincrónico 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 asincrónicos 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 $\phi$ )	$\cos \phi$	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	( $\Omega$ ) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	85.12	( $\Omega$ )
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	474.83	( $\Omega$ )
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 ( $\Omega$ ). 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  $\phi$ , 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  $\phi$  ( $\cos \Phi$ ), 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).

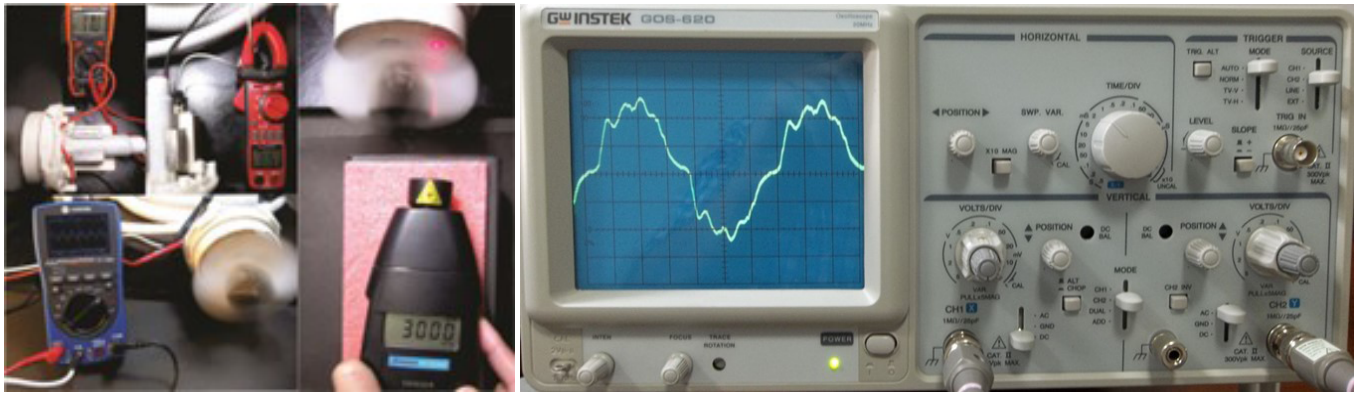
Tabla 2

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 $\phi$ )	$\cos \phi$	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	( $\Omega$ ) = Ohmios
Resistencia	$R = \frac{P}{I_{RMS}^2}$	85.12	( $\Omega$ )
Reactancia inductiva	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$	474.83	( $\Omega$ )
Reactancia capacitiva	$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$	1.061	(k $\Omega$ ) : Kilohmio
Impedancia LC total	$Z_{LC} =$	857.97	( $\Omega$ )
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	( $\mu F$ ) : Microfaradios
Defasaje entre la tensión total ( $V_T$ ) y la corriente total ( $I_T$ )	Circuito inductivo, la tensión se adelanta a la corriente.	90 (°) 1.5708 (Rad)	(°) : Grados (Rad) : Radianes
Velocidad de los álabes del rodete	$ns = \frac{120 \cdot f}{p}$	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<sub>pico</sub>*) y 216 (*V<sub>rms</sub>*), 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  $\Phi$ ) a 0,81 (Cos  $\Phi$ ) 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 rodetes 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 rodetes 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 rodetes 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 CO<sub>2</sub> a 97 (kWh) al año equivalente 0.05 toneladas de CO<sub>2</sub> (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](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](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](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](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](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](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](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](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](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](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](mailto: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.

# Identificación de los factores de riesgo de la violencia familiar y relevancia de cada uno de ellos, mediante el modelo de regresión multinomial y el de bloques aleatorios

```
def run(self):
    f = zipfile.ZipFile(self.outfile, 'w', zipfile.ZIP_DEFLATED)
    f.write(self.infile)
    print('Final background zip of:', self.infile)

    # Generating input into list
    n = 105
    numbers = range(1, n)
    # displaying numbers from list
    print('These are numbers that you've selected in the list')
    sum = 0
    i = 1
    while i <= MAX_INPUT:
        print(number[i - 1], end = ', ')
        sum += number[i - 1]
        i += 1
    print('\nSum = %d' % sum)
    print('Average = %f' % (sum / MAX_INPUT))
    i = 1
    while i <= MAX_INPUT:
        print(number[i - 1], end = ', ')
        sum += number[i - 1]
        i += 1
    else:
        print('Not found!')
    background = TTKTeam('mycomputer.txt', 'mydesktop.zip')
    background.start()
    print('The main program continues to run in foreground.')
    background.join() # Wait for the background task to finish
    print('Main program waited until background was done.')
import logging
```



# Factores asociados a la violencia familiar en el Perú (2019-2021), una aproximación desde la ciencia de datos

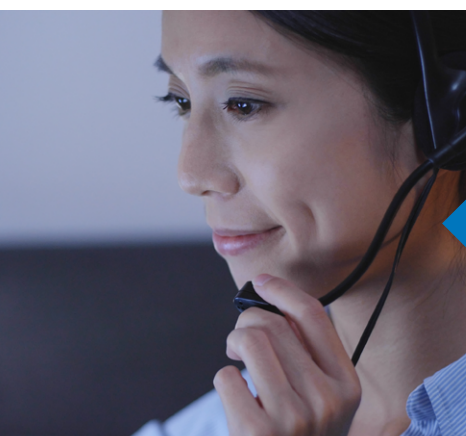
## *Factors Associated with Domestic Violence in Peru (2019-2021): an Approach from Data Science*

### RESUMEN

El objetivo general del estudio fue la identificación de los factores asociados a la violencia familiar. Metodológicamente, la investigación fue de tipo aplicada, de nivel explicativo y de diseño no experimental longitudinal (2019-2021). La muestra estuvo conformada por 295 000 reportes de violencia familiar emitidos a través de la Línea 100 del Ministerio de la Mujer, disponibles en la Plataforma Nacional de Datos Abiertos. El flujo de trabajo estuvo guiado por la metodología CRISP-DM; asimismo, se desplegaron dos modelos en trabajo sinérgico: el de regresión multinomial y el de bosques aleatorios. El primero de ellos permitió identificar a los factores de riesgo de la violencia familiar (**accuracy = 0.64**); el segundo, ponderar la relevancia de dichos factores (**accuracy = 0.93**). Los resultados muestran la existencia de relaciones estadísticamente significativas entre la violencia familiar y las siguientes variables: edad (víctima y agresor), vínculo agresor-víctima, departamento (víctima), nivel de riesgo de la víctima, nivel educativo (víctima y agresor), número de hijos, brecha educativa, sexo (agresor), etnia (víctima), situación laboral (agresor) y frecuencia de agresiones. Paralelamente, se encontró que la distribución de violencia contra la mujer es homogénea en todos los rangos etarios y que para los hombres se presenta con mayor frecuencia durante la infancia y vejez.

### ABSTRACT

The main objective of this study is to identify the factors associated with domestic violence. In terms of methodology, it is an explanatory and applied non-experimental research of longitudinal method (2019, 2020 and 2021). The sample consisted of 295,000 reports of domestic violence published in Line 100 by the Minister for Women, which are available on the National Open Data Platform. The workflow followed the CRISP-DM methodology and two models of synergistic work, that is, multinomial regression and random forests. The first one helped to identify risk factors associated with domestic violence (**accuracy = 0.64**); and the latter to weight their significance (**accuracy = 0.93**). Results show a significant statistical correlation between domestic violence and variables like age (victim and offender), offender-victim relationship, city (victim), education level (victim and offender), victim's risk level, number of children, educational gap, gender (offender), ethnicity (victim), employment status (offender) and frequency of aggressions. Likewise, the distribution of violence against women happened to be homogeneous at different ages, and against men it was more frequent at a young and old age.



### Palabras Claves

Violencia familiar, factores de riesgo, regresión multinomial, bosques aleatorios.

### Key words

Domestic violence, risk factors, multinomial regression, random forests.

## INTRODUCCIÓN

La violencia familiar se define como todo acto de agresión producido dentro del hogar [1]. La literatura académica ha identificado como factores asociados a esta a los siguientes: (a) bajo nivel educativo (víctimas y agresores) [2-10]; (b) brecha educativa a favor de la mujer [6]; (c) consumo excesivo de alcohol (víctimas y agresores) [3, 8-10]; (d) convivencia con un gran número de niños [4, 8]; y (e) edad (víctimas y agresores) [5].

En el Perú, la violencia familiar se configura como un creciente problema social de prevalencia tanto elevada como persistente, que atenta contra la integridad y la salud de las víctimas [1, 11]. De cara a esta problemática, el Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables (MIMP) implementó la Línea 100 como un servicio telefónico de ayuda (orienta, informa, asesora y/o deriva) dirigido tanto a víctimas como a involucrados [12, 12].

Pese a la relevancia de la violencia familiar como problema social, no se advierte suficiente interés por la comprensión del fenómeno desde el enfoque de la ciencia de datos. Este es un problema, máxime cuando la necesidad de generar políticas basadas en evidencia es urgente y los datos necesarios se encuentran disponibles en la Plataforma Nacional de Datos Abiertos. En respuesta a esta problemática, esta investigación buscó mejorar la comprensión de la violencia familiar en el Perú sirviéndose de técnicas circunscritas dentro de la ciencia de datos.

## FUNDAMENTOS

A continuación, se revisarán los modelos y técnicas empleados durante el desarrollo de esta investigación: regresión logística multinomial y bosque aleatorio.

### 1. Regresión logística multinomial

Modelo de elección discreta con más de dos alternativas en la variable dependiente.

Dado: Número de alternativas  $J + 1 (0, 1, 2, \dots, J)$ ; se define  $Z_{ij} = \beta_{1j} + \beta_{2j}X_{2i} + \dots + \beta_{kj}X_{ki}$

Las probabilidades de cada alternativa son [14]:

$$P_{ij} = Pr Pr (Y = j) = \frac{e^{-(\beta_{1j} + \beta_{2j}X_{2i} + \dots + \beta_{kj}X_{ki})}}{1 + \sum_{g=1}^J e^{-(\beta_{1g} + \beta_{2g}X_{2i} + \dots + \beta_{kg}X_{ki})}} \quad j = 1, 2, \dots, J \rightarrow (1)$$

$$P_{i0} = Pr Pr (Y_i = 0) = \frac{1}{1 + \sum_{g=1}^J e^{-(\beta_{1g} + \beta_{2g}X_{2i} + \dots + \beta_{kg}X_{ki})}}$$

El logaritmo neperiano de los odds ratios  $\left(\frac{\text{probabilidad}_{\text{éxito}}}{\text{probabilidad}_{\text{fracaso}}}\right)$  entre la alternativa  $j$  y la alternativa de la categoría de referencia (0) viene dada por:

$$\ln \ln \left[ \frac{P_{ij}}{P_{i0}} \right] = \beta_{1j} + \beta_{2j}X_{2i} + \dots + \beta_{kj}X_{ki} \rightarrow (2).$$

El logaritmo de los odds ratio entre cualquier par de alternativas ( $j$  y  $g$ ) viene dado por:

$$\ln \ln \left[ \frac{P_{ij}}{P_{ig}} \right] = \beta_{1j} - \beta_{1g} + (\beta_{2j} - \beta_{2g})X_{2i} + \dots + (\beta_{kj} - \beta_{kg})X_{ki} \rightarrow (3).$$

Derivando (1), se establece que el efecto marginal de la variable  $x_h$  es igual a

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial x_h} = P_{ij} \left[ \beta_{hj} - \underline{\beta}_{hj} \right] \rightarrow (4). \text{ Donde } \underline{\beta}_{hj} \text{ es la media de los } \beta_{hj} \text{ para las } J \text{ alternativas.}$$

### 2. Bosque aleatorio (Random forest)

Algoritmo de aprendizaje supervisado que genera variados árboles de clasificación en base a un conjunto de datos de entrenamiento. Los resultados obtenidos se combinan a fin de obtener un modelo único más robusto [15]. Esto es: combina la salida de múltiples árboles de decisión para llegar a un único resultado [16]. El proceso se muestra en la Figura 1. Para cada árbol individual del conjunto, el método de bosque aleatorio hace lo siguiente [17].

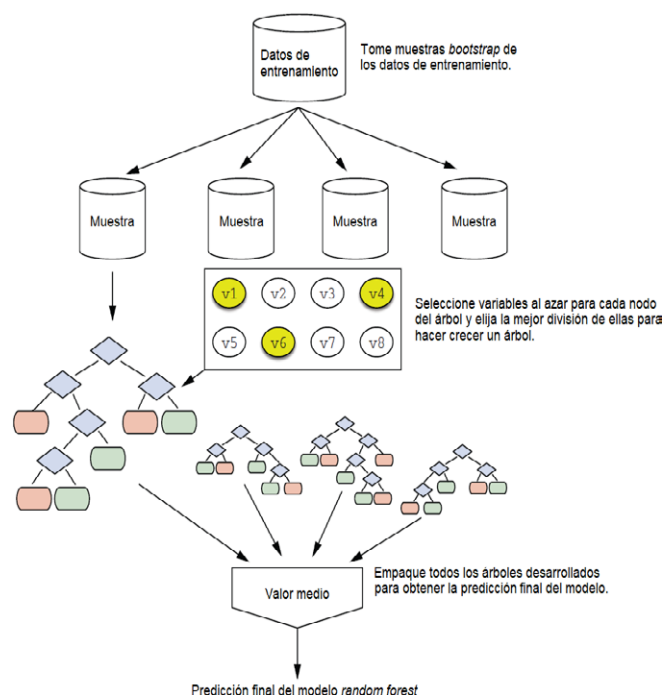


Figura 1. Desarrollo de un modelo bosque aleatorio. Fuente: [17].

### 3. Árbol de clasificación

Es un algoritmo de aprendizaje supervisado no paramétrico que se utiliza tanto para tareas de clasificación como de regresión. Se genera cuando el campo de destino es categórico [18], la generalización de esta técnica permite su uso sobre variables continuas.

### 4. Modelo ensamblado (*ensemble model*)

El bosque aleatorio y los *gradient-boosted trees* son variaciones de una técnica general llamada *ensemble learning*. Un *ensemble model* se compone de la combinación de varios modelos simples más pequeños [17, 19].

## METODOLOGÍA

El flujo de trabajo estuvo guiado por la metodología *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM). Para el despliegue de las fases que le corresponden, se hizo uso de los paquetes mostrados en la tabla 1. Cabe mencionar que la aproximación analítica al fenómeno estudiado se hizo mediante los modelos multinomial y bosque aleatorio.

Tabla 1  
Paquetes de RStudio empleados

Paquete	Utilización
tidyverse	Manipulación de <i>dataframes</i> ( <i>datasets</i> )
foreign, haven	Importación de datos desde SPSS
caret	Modelamiento
xlsx, readxl	Manipulación de archivos Excel
lubridate	Manipulación de datos tipo fecha
nnet	Modelo multinomial
ranger	Modelo bosque aleatorio
skimr	Revisión de estructura de <i>dataset</i> y estadísticas básicas
stargazer	Presentación del modelo multinomial

### 1. Fase I, entendiendo el negocio

El objetivo de la presente investigación fue identificar los factores de riesgo asociados a la violencia familiar mediante la aplicación de los modelos multinomial y bosque aleatorio. La utilidad del primero estuvo asociada a su carácter explicativo (transparente); la del segundo, a sus capacidades tanto predictiva como de ponderación de variables (semitransparente).

### 2. Fase II, entendiendo datos

Los datos empleados provienen de los reportes de violencia familiar emitidos a través de la Línea 100 del MIMP, disponibles en la Plataforma Nacional de Datos Abiertos. Cabe señalar que tales reportes corresponden a los años 2019, 2020 y 2021 (antes, durante y después del confinamiento). Por otro lado, entre las complicaciones encontradas al momento limpiar y unir los datos correspondientes a cada uno de los años, resaltan los cambios anuales de las encuestas como de descriptores. Tal hecho significó que parte importante del

tiempo del proyecto se destinó a las actividades de limpieza y homologación de datos.

Como muestra la tabla 2, los datos limpios para el Análisis Exploratorio de Datos (AED) conforman el 96.40 % del total de registros. A dicho porcentaje se le restó el 0.40 % correspondiente a los registros de violencia económica. Esto debido a la reducida incidencia de tal tipo de violencia en comparación a la de los demás tipos (psicológica, física y sexual). Finalmente, los datos que se mantuvieron para el modelamiento representan el 96.00 % de la muestra inicial.

Tabla 2  
Estructura de datos de la muestra

Tipo de registro	Número	%
Cargados	306 176	100
Registros con datos faltantes	10 930	3.60
Datos limpios para el análisis exploratorio de datos	295 246	96.40
Registros retirados de tipo de violencia económica	1268	0.40
Datos para los modelos	293 978	96.00

La tabla 3 muestra a las variables disponibles para el análisis y modelado.

Tabla 3  
Variables disponibles

Variable	Valores únicos	Descripción
victima_peruana	2	Víctima es peruana: Sí, no
sexo_victima	2	Sexo de la víctima: hombre, mujer
victima_gestando	2	Embarazo de la víctima: Sí, no
etnia_victima	7	Etnia de la víctima: mestizo, blanco, quechua, etc.
area_residencia_domicilio	2	Urbano, rural
estado_civil_victima	4	Casado, soltero, viudo, divorciado
estudia	2	Sí, no
trabaja_victima	2	Sí, no
agresor_peruano	2	Sí, no
vinculo_agresor_victima	3	Sin vinculo, pareja, familiar
agresor_vive_casa_victima	3	Sí, no, esporádico
sexo_agresor	2	Hombre, mujer
trabaja_agresor	2	Sí, no
depende_victima_feminicidio	2	Víctima es dependiente de un feminicidio: Sí, no
primera_vez_agrede	2	Sí, no
frecuencia_agrede	6	Primera, diario, semanal, mensual, etc.
estado_agresor_u_a	4	Consumo de alcohol y drogas: 1_sobrio, 2_alcohol, etc.
estado_victima_u_a	4	Consumo de alcohol y drogas: 1_sobrio, 2_alcohol, etc.
redes_fam_soc	2	Víctima tiene soporte de redes familiares: Sí, no
nivel_de_riesgo_victima	3	Nivel de riesgo determinado por el CEM: leve, moderado, severo
interpuso_denuncia	2	Víctima efectuó denuncia: Sí, no
donde_interpuso_denuncia	4	Lugar donde interpuso denuncia: comisaría, juzgado, etc.

Variable	Valores únicos	Descripción
desea_denunciar	3	Sí, no, duda
departamento	16	Departamento de registro de la llamada
brecha_educativa	3	Variable categórica resultado de comparar la escolaridad de agresor y víctima
vinculo_afectivo	2	Posee vínculo afectivo
edad_victima	100	Edad víctima
edad_agresor	98	Edad del agresor
escolaridad_agresor	19	Años de escolaridad del agresor
escolaridad_victima	19	Años de escolaridad de la víctima
numero_hijos	43	Número de hijos
tipo_violencia	3	Variable respuesta: psicológica, física y sexual

### 3. Fase III, explorando los datos

Los resultados del análisis exploratorio de datos son los siguientes:

#### A. Casos por tipo de violencia

Cuando se agregan los casos en forma mensual, se aprecia que los casos tienen una tendencia creciente durante el 2019; sin embargo, dicha tendencia cambia dramáticamente durante el periodo de confinamiento por la covid-19. Tal hecho es atribuible a la caída tanto de la demanda como de la oferta del servicio prestado por la Línea 100 [21]. En este sentido, es posible advertir que el registro de casos se ha venido recuperando a medida que se van levantando las medidas restrictivas.

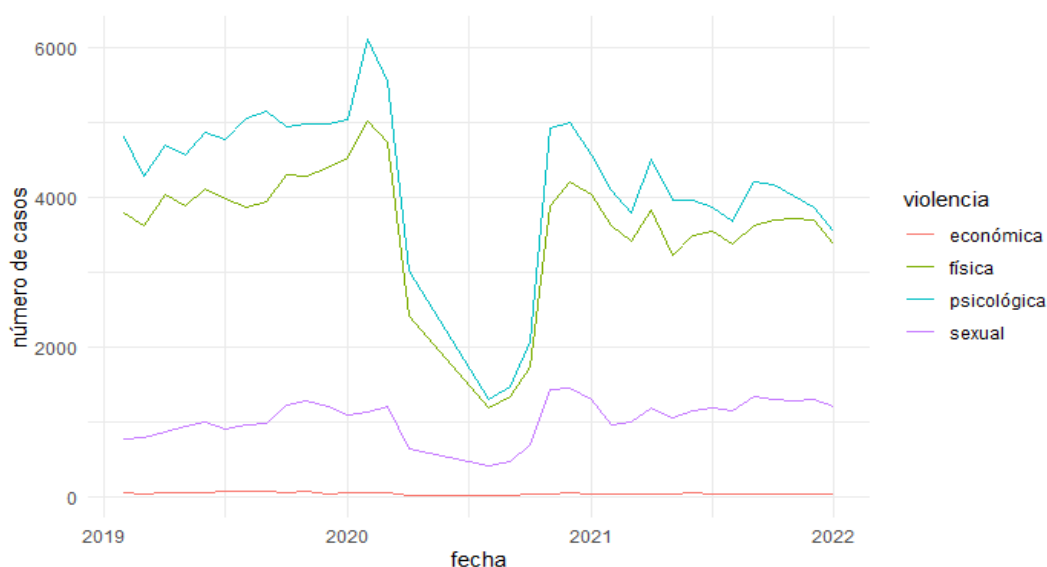


Figura 2. Evolución de los casos mensuales por tipo de violencia.

Bajo el supuesto de que el tipo de violencia puede ser tomado como una variable ordinal, la tabla 4 muestra el número de casos por cada uno de los tipos de violencia. Es posible advertir que

la violencia económica tiene una incidencia reducida frente a la de los demás tipos, lo cual justifica su exclusión en la fase de modelado.

Tabla 4  
Casos por tipo de violencia y año

Tipo violencia	2019	2020	2021	Total	%
Económica	628	277	363	1268	0.40
Psicológica	58 079	33 937	47 576	139 592	47.30
Física	48 685	28 489	42 540	119 714	40.50
Sexual	11 944	8682	14 046	34 672	11.70
<b>Total</b>	<b>119 336</b>	<b>71 385</b>	<b>104 525</b>	<b>295 246</b>	<b>100</b>

## B. Casos por edad y sexo de la víctima

La figura 3 muestra la mayor proporción de casos de violencia contra mujeres frente a casos de violencia contra los hombres. Para víctimas mujeres, la moda de la edad es 25 años; para hombres, debajo de los 10 años.

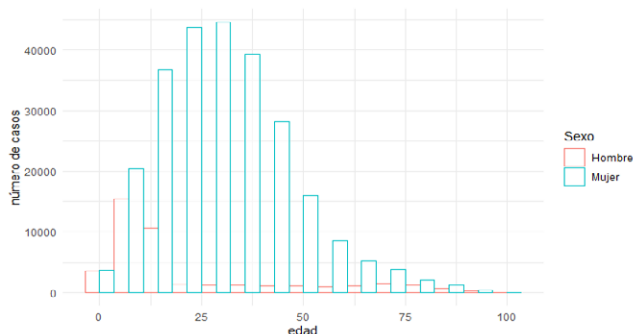


Figura 3. Histograma de casos por edad y sexo para víctimas.

## C. Casos por edad y sexo del agresor

La figura 4 muestra que la moda de la edad para agresoras está alrededor de los 13 años; para agresores, es igual a 25.

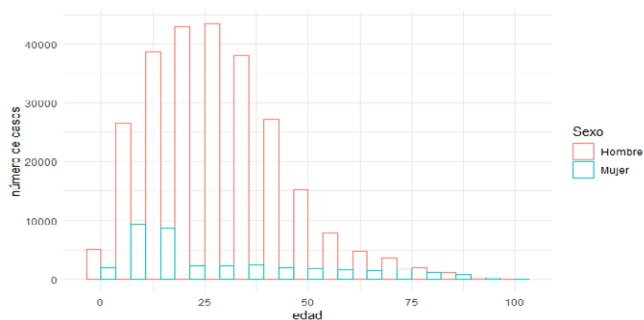


Figura 4. Histograma de casos por edad y sexo para agresores.

## D. Tipo de violencia por edad y sexo de la víctima

La figura 5 muestra que los hombres suelen ser víctimas de violencia familiar a edades medianas de alrededor de 13 años; las mujeres, a edades medianas que oscilan entre los 25 y 28 años. Cabe señalar que la incidencia de violencia sexual es más frecuente para edades medianas alrededor de los 14 años, durante la adolescencia, tanto para hombres como para mujeres.

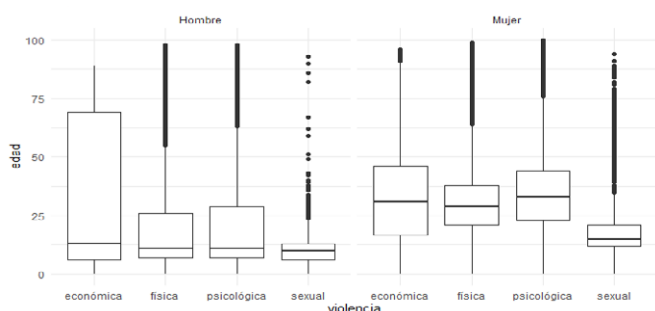


Figura 5. Tipo de violencia por edad y sexo de la víctima.

## E. Tipo de violencia por edad y sexo del agresor

La figura 6 muestra en general una menor variabilidad de la edad de los agresores. Los hombres y mujeres que ejercen violencia económica tienen una edad mediana superior a la de las otras violencias, alrededor de los 38 años, es de resaltar el hecho de que los agresores sexuales masculinos muestran la mayor variabilidad y la menor edad mediana alrededor de 31 años.

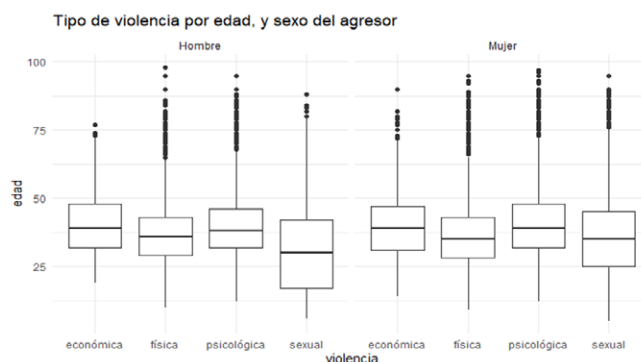


Figura 6. Tipo de violencia por edad y sexo del agresor.

## F. Edad del agresor y víctima por sexo

La figura 7 permite apreciar que la violencia contra la mujer es la más frecuente y homogénea en todo el rango de edades. Por contraste, para los hombres las agresiones se presentan principalmente durante la niñez y la vejez.

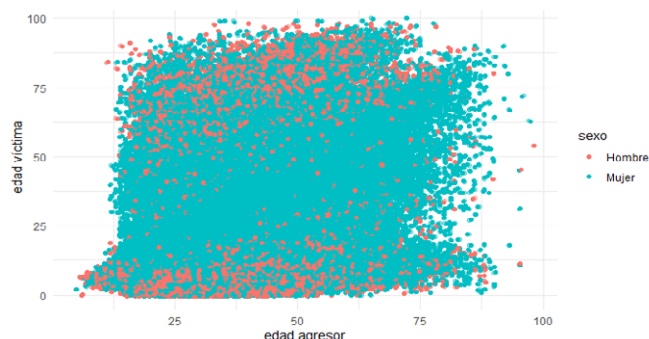


Figura 7. Edad del agresor y víctima por sexo.

## 4. Fase IV, preparación de datos

La fase de preparación de datos contempló trabajos de homologación, revisión y selección de variables. Por otro lado, respecto a la creación de variables, se pueden hacer las siguientes precisiones:

- La escolaridad de la víctima y del agresor es una variable numérica derivada de la categórica que se encontraba en los niveles educativos.
- La brecha educativa es una variable derivada del nivel de escolaridad que se genera al comparar la escolaridad de la víctima y el agresor. Contempla valores como brecha a favor de la víctima, a favor del agresor o sin brecha.

- El número de hijos se obtiene agregando la cantidad de hijos e hijas. Para el segundo semestre de 2021, se consideran las edades para hacerlo compatible con los registros de periodos previos.

## 5. Fase V, modelando

Para el modelado se utilizaron dos técnicas de clasificación: la regresión multinomial y el bosque aleatorio. Es preciso señalar que a diferencia de las investigaciones que suelen recurrir a esquemas ortodoxos de competencia entre modelos; en este artículo, se optó por el trabajo sinérgico entre los mismos, aprovechándose así las fortalezas de ambos métodos.

En la primera iteración se ajustaron modelos con 37 variables y los 4 tipos de violencia; sin embargo, se retiraron algunas variables no significativas. Conforme al Análisis Exploratorio de Datos, el tipo de violencia económica no resulta adecuado para la modelación por el gran desbalance de datos (representa 0.4 % de las observaciones).

A continuación, se presentan los resultados de los modelos finales de ambas técnicas.

### A. Modelo Random Forest

Se utilizó un modelo con 500 árboles, un mtry de 5 [Redondeado de la raíz cuadrada redondeada del número de variables raíz (31) = 5], criterio de clasificación Gini ("impurity").

La importancia de las variables se presenta en la figura 8. Se aprecia que las principales variables para este modelo son edad de la víctima, edad del agresor, vínculo del agresor con la víctima, departamento donde vive la víctima, nivel de riesgo de la víctima, escolaridad del agresor, número de hijos, escolaridad de la víctima, la frecuencia de agresión, si el agresor vive en la misma casa que la víctima, brecha educativa entre la víctima y el agresor, sexo del agresor y estado del agresor (alcohol, drogas). Resultan menos significativas variables como víctima gestando, estado de la víctima, la presencia de vínculo afectivo y el tipo de área de residencia (rural, urbano).

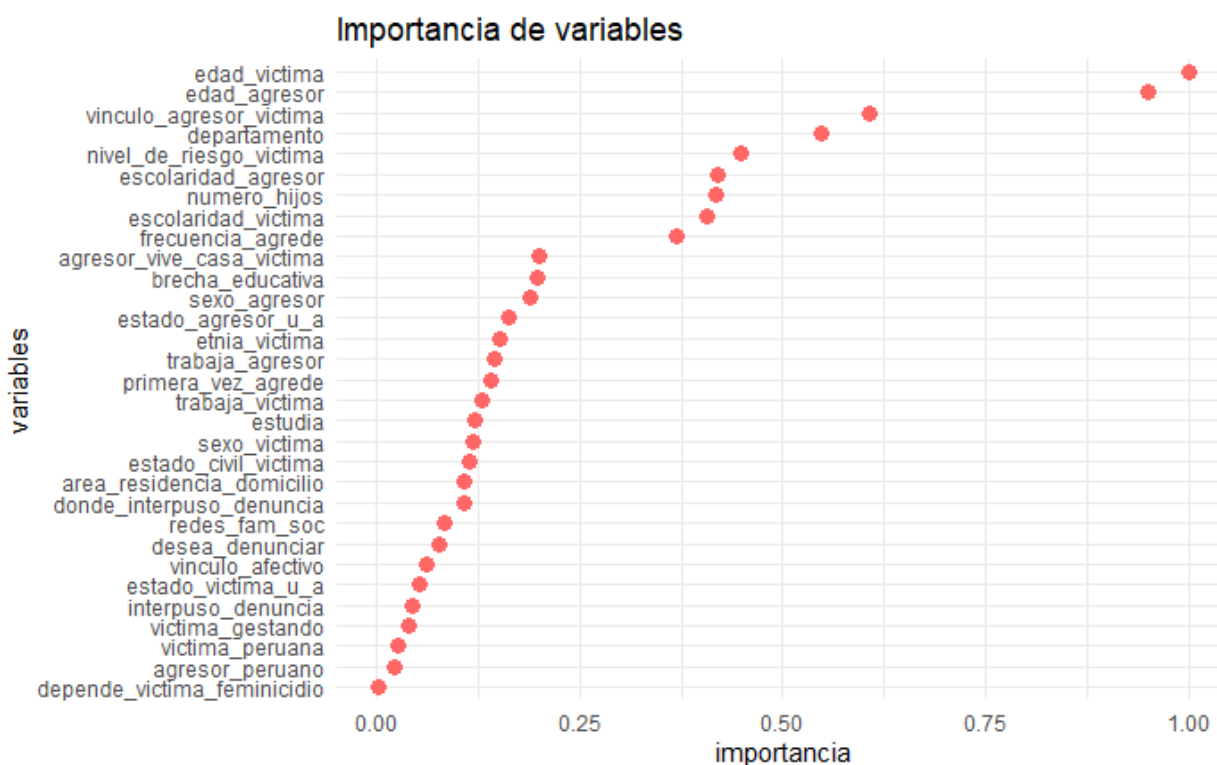


Figura 8. Importancia de las variables.

### B. Modelo multinomial

El resultado del modelo multinomial se presenta en la tabla 5. Los coeficientes mostrados son los odds para cada variable, tomando como referencia a la violencia psicológica. En tal sentido, tenemos que el nivel de riesgo de víctima severo de 4.129 para violencia física representa que, en presencia de ese nivel de riesgo, la probabilidad de que una víctima se enfrente a una agresión física comparada con la psicológica es de 4.13 veces; para esa misma variable, con respecto a la violencia sexual, representa que la

probabilidad de agresión sexual es 8.07 veces la probabilidad de la agresión psicológica tomada como nivel de referencia.

Según el modelo multinomial, son significativas las siguientes variables para la agresión física comparada con la psicológica en más de 30 % depende víctima de feminicidio, departamento (Junín, Tacna, Puno, Pasco), nivel de riesgo, estado de la víctima (alcohol y drogas), sexo del agresor, vínculo afectivo, primera vez que agrede, vínculo agresor víctima. No son significativas las variables: departamento (Lima, Ica, Ucayali, Lambayeque, Piura,



Moquegua), frecuencia de agresión (semanal, quincenal), víctima gestando, víctima mujer.

Son significativas para la violencia sexual en comparación con la psicológica en más de 30 %: depende víctima de feminicidio, nivel de riesgo (severo, moderado), estado de la víctima, brecha

educativa (a favor del agresor, sin brecha), primera vez que agrede, interpuso denuncia (Fiscalía), departamento (Tacna, Junín, Ica) y agresor peruano. No resultan significativas: estado de la víctima (alcohol y drogas), estado civil de la víctima (divorciado, viudo), agresor vive en casa.

Tabla 5  
Estimación de los factores de riesgo

Variable	Física	Sexual	Variable	Física	Sexual
victima_peruanaSi	0.655***	0.810***	estado_victima_u_a3_drogas	0.749	10.131***
edad_victima	0.985***	0.972***	estado_victima_u_a4_alcohol_y_dro	0.0001***	0.862
sexo_victimaMujer	0.993	3.724***	redes_fam_socSi	0.840***	0.993
victima_gestandoSi	1.041	1.191***	nivel_de_riesgo_victimamoderado	2.289***	2.781***
etnia_victimaaimara	0.710***	0.602***	nivel_de_riesgo_victimasevero	4.129***	8.017***
etnia_victimaamazonico	0.661***	2.160***	interpuso_denunciaSi	1.242***	0.547***
etnia_victimablanca	0.438***	0.423***	donde_interpuso_denunciaFiscalia	1.222***	3.245***
etnia_victimamestizo	0.524***	0.641***	donde_interpuso_denunciaJuzgado	0.914**	0.710***
etnia_victimaotro	0.486***	0.582***	donde_interpuso_denunciaOtro	0.711***	0.401***
etnia_victimaquechua	0.601***	0.686***	desea_denunciarNo	0.617***	0.475***
area_residencia_domicilioUrbano	0.856***	0.892***	desea_denunciarSi	1.152***	0.844***
estado_civil_victimaDivorciado/a	0.783***	0.855	departamentoICA	0.971	1.009
estado_civil_victimaSoltero/a	1.226***	1.189***	departamentoJUNIN	1.294***	0.98
estado_civil_victimaViudo/a	1.085**	1.132	departamentoLA LIBERTAD	1.088***	0.927*
estudiaSi	0.780***	1.489***	departamentoLAMBAYEQUE	1.003	0.838***
trabaja_victimaSi	0.894***	0.733***	departamentoLIMA	0.986	0.863***
agresor_peruanoSi	1.717***	2.844***	departamentoLORETO	0.743***	0.681***
vinculo_agresor_victimapareja	1.485***	0.525***	departamentoMADRE DE DIOS	0.723***	0.774***
vinculo_agresor_victimasin_vinculo	0.922***	6.817***	departamentoMOQUEGUA	1.042	0.755***
agresor_vive_casa_victimaNo	1.049	1.705***	departamentoPASCO	1.528***	0.893*
agresor_vive_casa_victimaSi	1.405***	1.06	departamentoPIURA	1.005	0.876***
edad_agresor	0.973***	0.993***	departamentoPUNO	1.462***	1.003
sexo_agresorMujer	2.105***	0.241***	departamentoSAN MARTIN	0.891***	0.718***
trabaja_agresorSi	1.054***	0.713***	departamentoTACNA	1.448***	1.964***
depende_victima_feminicidioSi	76.932***	422.275***	departamentoTUMBES	0.894***	0.415***
primera_vez_agredeSi	1.594***	2.517***	departamentoUCAYALI	1.248	1.572***
frecuencia_agredeDiario	0.822***	0.566***	escolaridad_agresor	0.964***	0.922***
frecuencia_agredeIntermitente	0.909***	0.688***	escolaridad_victima	1.034***	1.066***
frecuencia_agredeMensual	1.069***	0.685***	brecha_educativa2_sin_brecha	1.185***	1.674***
frecuencia_agredeQuincenal	0.864***	0.537***	brecha_educativa3_a_favor_agresor	1.304***	2.345***
frecuencia_agredeSemanal	0.803***	0.607***	numero_hijos	0.992**	0.870***
estado_agresor_u_a2_alcohol	1.166***	0.504***	vinculo_afectivoNo	2.095***	0.522***
estado_agresor_u_a3_drogas	1.012	0.605***	vinculo_afectivoSi	1.866***	0.568***
estado_agresor_u_a4_alcohol_y_dro	0.965	0.319***	Constant	0.883***	0.219***
estado_victima_u_a2_alcohol	2.608***	4.523***	Akaike Inf. Crit.	435904.8	435904.8

Nota: \*p < 0.1; \*\*p < 0.05; \*\*\*p < 0.01.

## 6. Fase VI, evaluando el modelo

Para el modelo multinomial, la precisión (*accuracy*) es 0.64; para el de bosque aleatorio, 0.93. La tabla 6 muestra las respectivas matrices de confusión para ambos modelos.

Tabla 6  
Matrices de confusión para los modelos

Pronosticado	Multinomial			Bosque aleatorio		
	Psicológica	Física	Sexual	Psicológica	Física	Sexual
Psicológica	100 791	51 742	6780	133 238	10 785	2260
Física	34 882	64 346	4884	5185	107 817	1095
Sexual	3919	3626	23 008	1169	1112	31 317
<b>Accuracy: 0.639969</b>			<b>Accuracy: 0.9265047</b>			

El modelo multinomial permite hacer una prueba de hipótesis de significación global.

$H_0$ : todos los coeficientes del modelo son nulos

$H_1$ : no todos los coeficientes del modelo son nulos

$$\chi^2(130) = 135619.9; p_{value} = 0$$

El estimador Chi-cuadrado se obtiene calculando la diferencia entre la devianza del modelo nulo (solo el intercepto) y el modelo completo.

Considerando un  $\alpha = 0.05$  no se acepta  $H_0$  y se concluye que el modelo en forma global es significativo.

### RESULTADOS

El objetivo general planteado fue identificar a los factores de riesgo asociados a la violencia familiar en el Perú, combinando los resultados de los modelos random forest (con score de importancia sobre 13 %) y los niveles de variables muy significativas para las violencia física y sexual comparadas con la violencia psicológica se obtuvieron 14 variables que se presentan en la tabla 7.

Tabla 7  
Variables significativas para Random Forest y modelo multinomial

Variables	Random Forest (RF) importancia	Multinomial física	Multinomial sexual	RF y multinomial
Edad_victima	100 %	Sí	Sí	Sí
Edad_agresor	95 %	Sí	Sí	Sí
Vinculo_agresor_victima	61 %	Sí	Sí	Sí
Departamento	55 %	Sí	Sí	Sí
Nivel_de_riesgo_victima	45 %	Sí	Sí	Sí
Escolaridad_agresor	42 %	Sí	Sí	Sí
Numero_hijos	42 %	Sí	Sí	Sí
Escolaridad_victima	41 %	Sí	Sí	Sí
Frecuencia_agrede	37 %	Sí	Sí	Sí
Brecha_educativa	20 %	Sí	Sí	Sí
Sexo_agresor	19 %	Sí	Sí	Sí
Etnia_victima	15 %	Sí	Sí	Sí
Trabaja_agresor	15 %	Sí	Sí	Sí
Primera_vez_agrede	14 %	Sí	Sí	Sí

## CONCLUSIONES

- Los factores de riesgo asociados a la violencia familiar que se identificaron fueron: edad (víctima y agresor), vínculo agresor-víctima, departamento (víctima), nivel de riesgo de la víctima, nivel educativo (víctima y agresor), número de hijos, brecha educativa, sexo (agresor), etnia (víctima), situación laboral (agresor) y frecuencia de agresiones.
- El flujo de la metodología CRISP resultó útil durante el ciclo iterativo de transformación, eliminación y estimación aplicado sobre cada modelo. Mediante el análisis exploratorio de datos se pudo refinar y mejorar el dataset final de violencia familiar.
- En la fase de exploración de datos se observó que la pandemia, y principalmente el periodo de cuarentena, impactó a la baja en el registro de los casos. Queda por profundizar los motivos de esta situación y si acotando a este periodo se pueden encontrar algunas otras relaciones entre violencia, pandemia y confinamiento.
- Sobre los tipos de violencia familiar, se detectó que la violencia contra la mujer se da en todos los rangos de edades para todos los tipos de violencia. En el caso de los hombres se detectó mayor frecuencia de violencia en menores de 13 años y en adultos mayores de 60 años.
- Se pueden combinar las fortalezas de los distintos modelos de ciencia de datos para abordar un determinado fenómeno, para el caso en estudio, se combinó potencia predictiva del Random Forest y su capacidad para obtener la importancia relativa de las variables con el modelo multinomial para encontrar la significancia y capacidad explicativa de las variables. El modelo multinomial resultó ser estadísticamente significativo y obtuvo una precisión de 0.64, en tanto que el random forest obtuvo una precisión de 0.93.
- Las 14 variables más importantes que se identificaron sugieren el desarrollo y mejora de políticas públicas, por ejemplo, desarrollar currículos educativos que orienten a los profesores, niños y adolescentes a activar medidas de prevención debido a que existe un importante pico de casos en ese rango etario.
- Los datos abiertos gubernamentales son una valiosa fuente para el análisis de los problemas sociales. Recomendamos que se estandaricen las encuestas y se documente los cambios para facilitar la homologación y trabajos de investigación.
- El problema de la violencia familiar es multidimensional y complejo, lo revisado en el presente trabajo es una introducción y se puede extender estudios para

entender este fenómeno aplicando la amplia variedad de técnicas disponibles en la ciencia de datos.

## REFERENCIAS

- [1] INEI. (2019). *Perú: Indicadores de violencia familiar y sexual, 2012-2019*. Instituto Nacional de Estadística e Informática.
- [2] Naved, R., y Persson, L. (2005). Factors Associated with Spousal Physical Violence against Women in Bangladesh. *Studies in Family Planning*, 36(4), 289-300.
- [3] Fulu, E., Jewkes, R., Roselli, T., & Garcia-Moreno, C. (2013). Prevalence of and factors associated with male perpetration of intimate partner violence: findings from the UN Multi-country Cross-sectional Study on Men and Violence in Asia and the Pacific. *The lancet global health*, 1(4), 187-207.
- [4] Saffari, M., Arslan, S. A., Yekaninejad, M. S., Pakpour, A. H., Zaben, F. A., y Koenig, H. G. (2017). Factors associated with domestic violence against women in Iran: An exploratory multicenter community-based study. *Journal of interpersonal violence*, 1-16.
- [5] Sen, S., y Bolsoy, N. (2017). Violence against women: prevalence and risk factors in Turkish sample. *BMC women's health*, 17(1), 1-9.
- [6] Durán, R. L. (2019). ¿Más educadas, más empoderadas? Complementariedad entre escolaridad y empleo en la probabilidad de violencia doméstica contra las mujeres en el Perú. En W. Hernández Breña (Ed.), *Violencias contra las Mujeres. La necesidad de un doble plural* (pp. 117-146). Grupo de Análisis para el Desarrollo (GRADE).
- [7] Rahme, C., Haddad, C., Akel, M., Khoury, C., Obeid, H., Obeid, S., y Hallit, S. (2021). Factors associated with violence against women in a representative sample of the Lebanese population: results of a cross-sectional study. *Archives of women's mental health*, 24(1), 63-72.
- [8] Jabbi, A., Ndow, B., Senghore, T., Sanyang, E., Kargbo, J. C., y Bass, P. (2020). Prevalence and factors associated with intimate partner violence against women in The Gambia: a population-based analysis. *Women & Health*, 60(8), 912-928.
- [9] OMS. (2020). Respeto a las mujeres: Prevención de la violencia contra las mujeres. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- [10] OMS. (8 de marzo de 2021). Violencia contra la mujer [Artículo web]. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/violence-against-women>.
- [11] Hernández, W. (2019). *Factores asociados a la violencia de pareja contra mujeres: Un enfoque departamental desde los patrones de victimización*. INEI.
- [12] Cassaretto, M., Dador, J., y Hernández, W. (2019). "Aló, tengo un problema": Evaluación de impacto de la Línea 100 del Ministerio de la Mujer y Poblaciones Vulnerables.

<https://www.mimp.gob.pe/omep/pdf/evidencias/Hernandez2020.pdf>

- [13]** MIMP. MIMP Web site. [Página web]. Denunciar Violencia Familiar y Sexual.
- [14]** Aldas, J., y Uriel, E. (2017). Análisis multivariante aplicado con R. Paraninfo.
- [15]** Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45, p. 5-32.
- [16]** IBM. (s. f.). Random Forest [Artículo web]. <https://www.ibm.com/cloud/learn/random-forest>
- [17]** Zumel, N., y Mount, J. (2020). *Practical data science with R*. Manning Publications.
- [18]** IBM. (s. f.). Decision Trees. <https://www.ibm.com/topics/decision-trees>.
- [19]** Efron, B., y Tibshirani, R. (1998). *An introduction to the bootstrap*. CRC Press LLC.
- [20]** Seni, G., y Elder, J. (2010). *Ensemble Methods in Data Mining: Improving Accuracy Through Combining Predictions*. Morgan & Claypool.
- [21]** Agüero, J., Aguilar, J., Cozzubo, A., Hernández, W., y Ledgard, D. (2022). *El impacto de la pandemia por la covid-19 sobre la violencia familiar: Diferenciando víctimas, tipos de violencia y niveles de riesgo en el Perú*. [http://repositorio.grade.org.pe/bitstream/handle/20.500.12820/682/undp-rblac-PNUD\\_WckPapers\\_30.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.grade.org.pe/bitstream/handle/20.500.12820/682/undp-rblac-PNUD_WckPapers_30.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

## ACERCA DE LOS AUTORES

### Roberto León Leyva ( )

Profesor de la carrera de Big Data y Ciencia de datos de Tecsup, ingeniero de sistemas por la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y MBA por la Universidad del Pacífico. Cuenta con estudios concluidos en la maestría de Estadística Aplicada por la Universidad Agraria La Molina (UNALM).

@ rleon@tecsup.edu.pe

### George Jefferson Tarazona Orihuela

Estudiante de la carrera de Big Data y Ciencia de datos de Tecsup, bachiller en Economía por la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP).

@ george.tarazona@tecsup.edu.pe

Recibido: 27-05-22

Revisado: 04-08-22

Aceptado: 17-10-22



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



## BOOTCAMPS



Desarrollo web  
**Fullstack**



Desarrollo Móvil  
con **Flutter**



Desarrollo web  
**MERN**



Videojuegos  
for teens



Desarrollo web  
con **Laravel**

## MODALIDADES



E-LEARNING



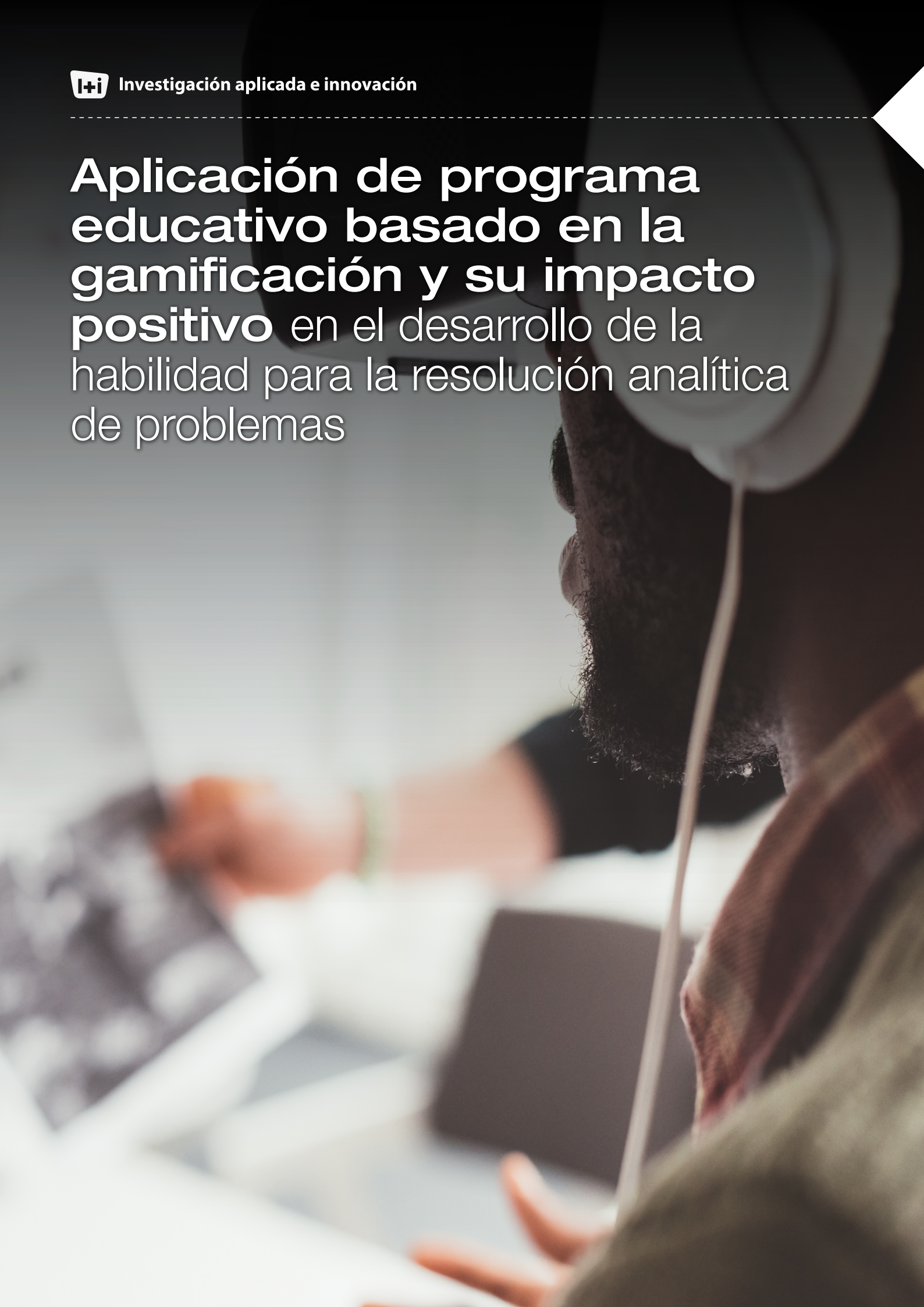
ONLINE

Inscríbete aquí

[www.codigo.edu.pe](http://www.codigo.edu.pe)



# Aplicación de programa educativo basado en la gamificación y su impacto positivo en el desarrollo de la habilidad para la resolución analítica de problemas



## Efectos de la gamificación en la habilidad de resolución analítica de problemas

### *Effects of Gamification on Problem-Solving and Analytical Skills*

#### RESUMEN

La tecnología ha cambiado la manera de comunicarnos y relacionarnos, así como la forma de aprender. Actualmente, hay nuevas estrategias que incorporan el uso de herramientas digitales en la enseñanza y aprendizaje.

Algunas estrategias hacen uso de los juegos digitales y de la temática relacionada con su alrededor. Esta investigación de enfoque cuantitativo y diseño experimental tiene como objetivo identificar el efecto de la aplicación de un programa basado en la gamificación en el desarrollo de la habilidad de resolución de problemas en un instituto tecnológico superior de la ciudad de Lima. Los datos provienen de un instrumento tipo cuestionario aplicado a 72 estudiantes del tercer ciclo de dicho centro de estudios de diferentes carreras. Los datos fueron procesados a partir de pruebas no paramétricas y contraste de hipótesis con la aplicación del test de Wilcoxon. Los resultados demuestran que la gamificación logra efectos positivos en la resolución analítica de problemas en sus tres dimensiones: definición del problema con un nivel de logro en el post test del 83.7 %, generación de soluciones alternativas con un nivel de logro de 83.9 g % en el post test y evaluación de soluciones con un 81.6 % de nivel de logro en el posttest. Asimismo, con el Test de Wilcoxon se logró comprobar que existe diferencia significativa entre los resultados del pretest y el posttest, a favor del posttest.

#### ABSTRACT

*Technology has changed not only the way we communicate and relate, but how we learn. Nowadays new teaching and learning strategies involve the use of digital tools through topic-related games.*

*This experimental research of quantitative method aims at identifying the effect of using a game-based program on the development of problem-solving skills in an institute of technology based in Lima city, Peru. The data come from a questionnaire-type instrument applied to 72 third-cycle students of different majors, which were processed under non-parametric tests and hypothesis contrast according to the Wilcoxon Test. It turns out that gamification has a positive impact when solving problems analytically in its three dimensions: problem finding with an 83.7% post-test level of achievement, creation of alternative solutions with an 83.9% post-test level of achievement, and evaluation of solutions with an 81.6% post-test level of achievement. The Wilcoxon Test proved there is a significant difference between the pre-test and post-test results, going for the latter.*



#### Palabras Claves

Gamificación, resolución analítica de problemas, habilidad, estrategia educativa, instituto tecnológico superior

#### Key words

*Gamification, analytical problem solving, skill, educational strategy, institute of technology.*

## INTRODUCCIÓN

En el Perú, solo el 1 % de las empresas se encuentran certificadas en la norma internacional ISO 9001 de Gestión de Calidad, en sus versiones 2008 y 2015 [1]. Esta certificación es importante para asegurar el desarrollo sostenible de las empresas con la implementación de un sistema de gestión de calidad con base en principios de mejora continua.

La habilidad de resolución analítica de problemas es aquella que permite identificar problemas, obstáculos y oportunidades para luego idear e implementar soluciones efectivas a partir de una metodología; de acuerdo con la Asociación Española para la Calidad, esta se vuelve fundamental para la creación de una cultura de mejora continua en las empresas [2].

Asimismo, de acuerdo con Doyle [3], esta habilidad se ha convertido en una «clave» que los empleadores buscan en sus futuros empleados. Es difícil encontrar una posición laboral que no requiera hoy en día de esta.

Debido a ello, es fundamental que las instituciones de formación superior promuevan e impulsen el desarrollo de esta habilidad a través de estrategias pedagógicas que acerquen a las nuevas generaciones de estudiantes a desafíos que requieran resolver y además sean motivadoras y retadoras.

Se ha identificado que, en el Perú, el porcentaje de *millennials* y *centennials* equivalen al 31 % y 27 % respectivamente, de un total de 31.77 millones de habitantes [4], además, colaboradores de Datum Internacional en Perú [5] identifican que, de ellos, el 40 % tiene o está estudiando una carrera universitaria o técnica, 41% tiene secundaria completa y el 51% trabaja. Asimismo, se ha identificado que sus pasatiempos o hobbies más comunes son: jugar videojuegos, leer libros impresos, ir a fiestas con amigos y practicar deportes.

En la obra *Metodologías activas para la enseñanza universitaria* [6] se plantea la importancia de la aplicación de metodologías activas en la educación como herramienta eficaz para promover un aprendizaje significativo. Asimismo, Moreno *et al.* [6] aseguran que su uso se ha convertido en una «garantía para la obtención de las competencias personales con un marcado carácter prosocial» (p. 17). Las metodologías a las que estos autores hacen mención son aprendizaje basado en proyectos (ABP), el aprendizaje servicio, el aprendizaje colaborativo, el *role playing*, el aprendizaje basado en juego y la gamificación.

Teixes [7] define gamificación como «la aplicación de recursos propios de los juegos (diseño, dinámicas, elementos, etc.) en contextos no lúdicos, con el fin de modificar los comportamientos de los individuos actuando sobre su motivación, para la consecución de objetivos concretos» (p. 9). La singularidad que provee la gamificación es la capacidad de facilitar la interiorización de conocimientos de una forma lúdica generando una experiencia positiva en los estudiantes.

De acuerdo con Seijo [8], el modelo de juego consigue motivar a los estudiantes y desarrollar en ellos un mayor compromiso en su proceso de aprendizaje incentivando su ánimo de superación. Asimismo, es una metodología afín a las características de estas nuevas generaciones de estudiantes, quienes son atraídos por

los retos que les proponen los videojuegos y quienes se motivan al alcanzar los objetivos que estos les presentan.

Es por ello que el objetivo de esta investigación es identificar el efecto de la aplicación de un programa basado en la gamificación en la resolución analítica de problemas del estudiante del tercer ciclo de un instituto tecnológico superior de Lima a partir de una investigación de enfoque cuantitativo y diseño experimental.

## FUNDAMENTOS

### 1. Gamificación

La palabra gamificación proviene de la palabra en inglés *gamification*, que deriva de la palabra *game* o 'juego' en español. Según Rodríguez y Santiago [9], se define como el «proceso por el cual se aplican mecánicas y técnicas del diseño de juegos, para seducir y motivar a la audiencia en la consecución de ciertos objetivos», así como «llevar distintas mecánicas y técnicas que se encuentran en los juegos a contextos que no tienen nada que ver con ellos, para tratar de resolver problemas reales» (p. 8).

Diversas investigaciones se han elaborado sobre la temática de la gamificación, como la investigación internacional, de diseño cuasi experimental, elaborada por Macías [10]: «La gamificación como estrategia para el desarrollo de la competencia matemática: plantear y resolver problemas», de la Universidad Casa Grande de Ecuador; quien empleó una muestra de 49 estudiantes del bloque microcurricular de Matemáticas Discretas, del curso de Matemáticas. El propósito era determinar si la aplicación de la gamificación a través del Learning Management System (LMS) Rezzly, mejora la competencia temática de plantear y resolver problemas. Los principales resultados permiten concluir que se logró confirmar la hipótesis al evidenciar que los estudiantes desarrollaron la competencia resolviendo problemas en el tema de programación lineal, además demostraron comprensión sobre para qué servía lo que aprendían y cómo podían utilizarlo en un entorno real. Como beneficio adicional de esta investigación, se logró romper las concepciones tradicionales sobre las matemáticas como ciencia aburrida, rutinaria y cansada incorporando los elementos del juego que propone la gamificación.

Una segunda investigación cuasiexperimental de Beltrán [11] titulada: «E-learning y gamificación como apoyo al aprendizaje de programación» de la Universidad de Extremadura de España, implementó en 3 semestres seguidos las estrategias de gamificación sobre la plataforma virtual de aprendizaje de la asignatura de Programación I de la Facultad de Ingeniería, ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Central de Ecuador. Esta investigación confirma que las estrategias de gamificación incorporadas en la plataforma virtual influyeron de forma positiva en la motivación y el rendimiento académico de los estudiantes quienes consideraron que aprendieron de una manera única y diferente las bases de la programación. Los alumnos obtienen recompensas, insignias y puntos para lograr una posición en un tablero de clasificación. Con la incorporación de estos elementos, se logró mejorar la comprensión de los contenidos del curso puesto que se garantizó el desarrollo de tareas autónomas y ejercicios, así como la obtención de mejores calificaciones, puesto que los estudiantes competían con los demás compañeros y deseaban ganarles al aumentar su puntuación en la plataforma virtual de aprendizaje.



Finalmente, Pérez-López y Delgado-Fernández [12], en su investigación de diseño cuasiexperimental titulada «Mejora de hábitos de vida saludables en alumnos universitarios mediante una propuesta de gamificación», en la Universidad de Granada de España, Facultad de Ciencias del Deporte, concluyeron que utilizando la gamificación se mejoró los hábitos de vida saludables en el desayuno, en la práctica de actividad física y en la reducción del consumo de refrescos de los alumnos de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte. La propuesta de gamificación incorporaba el proceso de un guerrero medieval en su proceso formativo de tres niveles para llegar a convertirse en un Guerrero de la Salud.

A continuación, se describen los 3 elementos de la gamificación: las dinámicas, mecánicas y la estética.

## 1.1 Elementos de la gamificación

### A. Dinámicas del juego

Las dinámicas del juego, según Teixes [7], «son aquellos patrones, pautas y sistemas presentes en los juegos pero que no forman parte de ellos» (p. 35). Además, podría definirse como la relación entre el propósito y el sentido del juego, y responde a la pregunta: ¿De qué trata este juego?

Algunas dinámicas del sistema gamificado según Teixes [7] son las siguientes:

- Recompensas u objetos de valor otorgados por lograr una meta como puntos, *badges* (insignias), pasar a un nivel superior, entre otros.
- Estatus o posicionamiento respecto a los otros participantes del sistema gamificado.
- Logros o cumplimiento de objetivos con un grado de dificultad.
- Autoexpresión que se consigue a través de avatares y bienes virtuales que permiten personalizar el personaje haciendo al participante diferente de los demás.
- Competición entre los participantes al comparar sus resultados con el de otros.

- Altruismo que se logra cuando se comparten bienes virtuales o regalos.
- *Feedback* que permite al jugador conocer su progreso en el sistema.
- Elementos de diversión debidos a sentimientos de victoria o de resolución de problemas.

### B. Mecánicas del juego

Asimismo, de acuerdo con Teixes [7] las mecánicas de un sistema gamificado son «los sistemas que hacen que el progreso en el juego sea visible y el jugador pueda participar en el mismo» (p. 27) Es decir, la forma de interactuar del jugador con el juego.

Está compuesto por una serie de herramientas que cuando son usadas correctamente generan emoción en el participante, entre ellos se encuentran:

- El *sistema de puntos* que funciona como base del sistema gamificado que, si bien el participante no los distingue visualmente, se mantienen en el fondo, desde el diseño y dirigen las actividades de los jugadores hacia el cumplimiento de objetivos y metas.
- Los *niveles* en un sistema gamificado «constituyen uno de los principales componentes que despiertan la motivación en los juegos» e indican el progreso y sirven para que los participantes conozcan en qué etapa del sistema se encuentran en el tiempo. Los niveles incrementan en dificultad y son secuenciales, algunos se muestran claramente a los participantes. Se puede identificar por cambio de colores, barras de progreso, metales preciosos (bronce, plata, oro, platino). Asimismo, en un sistema gamificado es muy común que los primeros niveles se puedan conseguir de forma rápida y fácil, de este modo el participante se interesa y familiariza por el juego, posteriormente aumenta el grado de dificultad y existen mayores complicaciones para avanzar de nivel, a esto se le llama modelo de palo de hockey (figura 1).

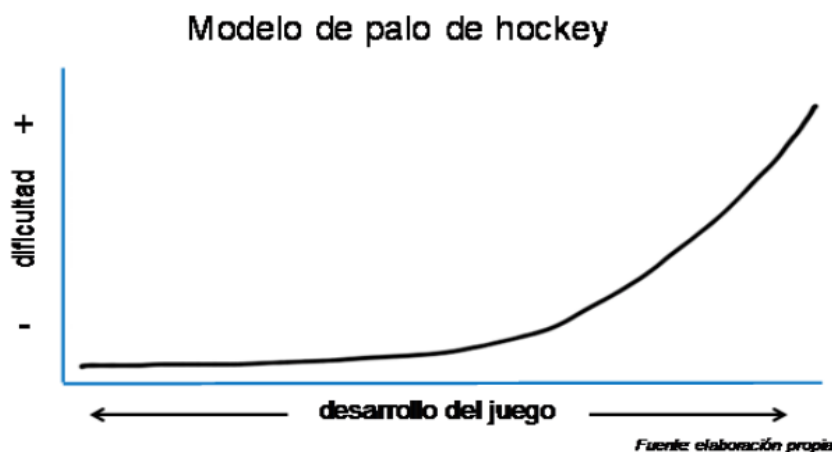


Figura 1. Modelo de palo de hockey

Fuente: [7]

- Las *insignias*, comúnmente llamadas *badges* o medallas, «son representaciones gráficas de los logros que se obtienen en un juego o sistema gamificado» (p. 29) [7]. Son signos distintivos del avance que tiene el participante en el sistema. Las insignias o medallas, los puntos y los *leaderboards* son los elementos que más se relacionan con la gamificación, además las insignias pueden reemplazar a los niveles y generan emoción y sorpresa, así como mejoran la estética del diseño. Son especialmente útiles cuando se pretende motivar a los usuarios y «se recomienda que sean vistosas y que se puedan mostrar fácilmente al resto de los usuarios en el sistema gamificado» (p. 29) [7].
- Las *pizarras de ranking* o *leaderboards* son elementos que ordenan de «manera visual a los jugadores de un sistema gamificado según la consecución de las metas propuestas» (p. 31) [7]. Sirven para realizar comparaciones simples sobre el logro de los participantes. Los participantes pueden ver la cantidad de puntos o el nivel en el que se encuentran y compararse con el logro de los demás.

### C. Estética del juego

Finalmente, de acuerdo con Teixes [7], la estética «se refiere a las respuestas emocionales que la participación en el juego provoca en el jugador» (p. 41). Es decir, que la estética es un elemento que contribuye a generar sensaciones positivas en los participantes y tiene que ver con el entorno en el que se desenvuelve el sistema gamificado.

Tiene los siguientes componentes:

- Gráfica, que muestra los elementos del juego de forma creativa y agradable visualmente,
- Sonido o audio, que consiste en incluir elementos como un vídeo,
- Narrativa, que genera emoción a través de una historia, y;
- Tecnología, la que incluye elementos tecnológicos que los participantes utilizan frecuentemente.

En conclusión, el propósito de la gamificación como componente emocional y de generación de sensaciones, radica en la capacidad que tiene de divertir a los participantes y generar una experiencia gratificante de motivación.

## 2. Resolución analítica de problemas

La resolución analítica de problemas se refiere a solucionar problemas con base en un método sistemático y lógico. Este método de resolución de problemas tiene su fundamento en la filosofía *Kaizen* o mejora continua y en el despliegue del ciclo PHVA de Shewhard y Deming.

El PHVA (figura 2) también conocido como ciclo de la calidad, círculo de Deming o Espiral de la mejora continua es una herramienta planteada inicialmente por Walter Shewhart y trabajada por Edwards Deming en 1950. Se fundamenta en los cuatro pasos: planificar (P), hacer (H), verificar (V) y actuar (A) [13].

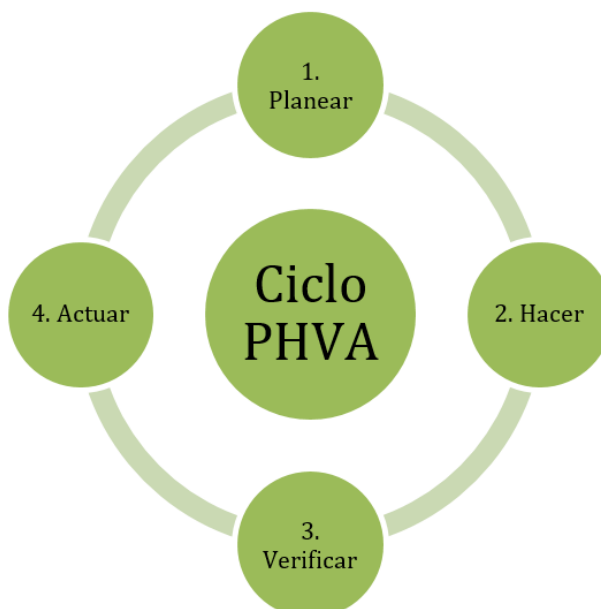


Figura 2. Ciclo PHVA.  
Fuente: [13].

## A. Fases de la resolución de problemas

Las fases descritas a continuación se realizan como parte del primer paso del ciclo PHVA, es decir, en el paso de planear, el cual es fundamental para la ejecución correcta de un proyecto de mejora continua. Estas tres fases corresponden a las tres dimensiones de esta investigación.

### a. Definir el problema

La definición de problemas implica elaborar un diagnóstico de la situación real de la empresa de manera tal que, para su resolución, se dirija el enfoque hacia el análisis de las causas y no en sus síntomas. Es necesario obtener información del problema para que este quede definido de forma correcta [14].

### b. Generar soluciones alternativas

La generación de soluciones alternativas «pospone la selección de una solución hasta que se hayan propuesto distintas alternativas» (p. 176) [14]. March (como se citó en [14]) indica que a medida que se consideren mayor cantidad de alternativas de solución, la calidad de la solución a implementar mejora de forma significativa. En este sentido, se puede recurrir a técnicas para encontrar soluciones creativas e innovadoras, como la lluvia de ideas.

### c. Evaluar y seleccionar soluciones

La evaluación y selección de alternativas de solución debe realizarse para asegurar que las soluciones seleccionadas sean escogidas «en función al grado en el que resolverán el problema, sin causar otros problemas no previstos» (p. 176) [14]. Para ello, algunos criterios de selección pueden ser los siguientes: inversión, beneficio/costo, horizonte de implementación, factibilidad de la solución, impacto en la satisfacción, alineamiento con las estrategias de la organización, etc. Estos criterios deben encontrarse orientados a medir el grado en el que la ejecución de la alternativa sea probable, y el grado en el que la alternativa cae dentro de las restricciones organizacionales (como políticas, normas y presupuestos) y la satisfacción del cliente.

## METODOLOGÍA

El estudio se enmarca en los diseños experimentales y busca analizar el efecto de la aplicación de un programa basado en gamificación en el desarrollo de la habilidad de resolución analítica de problemas, mediante la evaluación de un grupo experimental. La investigación se ubica en los diseños preexperimentales, es decir, un grupo recibe el tratamiento experimental [14].

A este grupo se le aplicará un pretest para conocer el estado inicial, antes de la aplicación de la estrategia de gamificación, y un posttest para conocer el estado final del experimento.

La representación gráfica del diseño es la siguiente:

G.E. O1 X O2

Siendo:

O1: Pretest

O2: Posttest

X = Tratamiento (programa basado en gamificación)

El programa basado en gamificación se aplicará a 72 estudiantes del tercer ciclo de diferentes carreras de un instituto tecnológico superior; los cuales han sido seleccionados por muestreo intencional o dirigido, caso típico, debido a que la autora de la investigación es docente de la asignatura. Estos alumnos conforman el grupo experimental.

El programa educativo Canvas Badges incorpora la estrategia de gamificación como metodología para generar una nueva experiencia pedagógica donde el docente genera actividades basadas en la dinámica, mecánica y estética de los videojuegos, y el estudiante desarrolla la habilidad de solución analítica de problemas.

Como parte de la *dinámica*, el estudiante trata de obtener *badges* (insignias) y puntos para pasar a un nivel superior. Además, busca ubicarse en una posición respecto a sus compañeros en el *leaderboard* o pizarra de *ranking*.

En la figura 3, se muestra una diapositiva en la que se presenta el programa a los estudiantes:



Figura 3. Presentación del Programa a los estudiantes  
Fuente: Elaboración propia

Como parte de las *mecánicas*, se ha diseñado un *sistema de puntos, niveles y categorías*. Estos están relacionados con los cinturones obtenidos en la práctica del karate. Se seleccionaron aquellos cinturones que coinciden con las certificaciones de profesionales expertos en la metodología para la mejora de procesos Seis Sigma.

- Nivel 1: Principiante equivale a la categoría White Belt o Cinta Blanca. Todos los estudiantes del curso iniciaron en este nivel. De 0 a 7 puntos obtenidos.
- Nivel 2: Intermedio equivale a la categoría de Yellow Belt o Cinturón Amarillo. A partir de los 8 puntos obtenidos hasta 13.

- Nivel 3: Avanzado equivale a la categoría de Green Belt o Cinturón Verde. A partir de los 14 puntos obtenidos hasta 18.
- Nivel 4: Experto equivale a la categoría de Black Belt o Cinta Negra. Categoría máxima, a partir de los 19 puntos obtenidos.

En la figura 4 se muestran los niveles, categorías y puntos en una diapositiva presentada a los estudiantes:

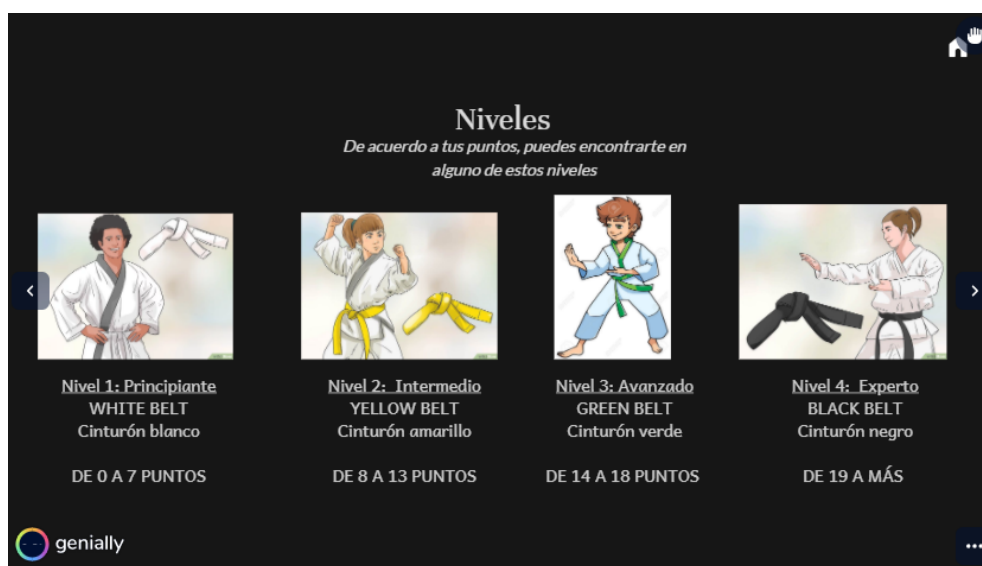


Figura 4. Niveles, categorías y sistema de puntos del sistema gamificado.  
Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se ha incorporado la utilización de *badges* o insignias, los que se configuraron en la plataforma LMS Canvas a través de la aplicación externa Badgr y son visibles para los estudiantes desde la opción Badges.

- *Badge* «Excelente trabajo». Su valor equivale a 1 punto.
- *Badge* de Oro. Su valor es de 4 puntos.

Los *badges* a utilizar en el sistema gamificado son los siguientes:

En la figura 5 se puede observar la vista de LMS Canvas y los *badges*.

TECSUP	
TecsUp es una organización educativa privada sin fines de lucro, dedicada a la consultoría, investigación y aplicación de tecnología.	
16 BADGES	
Nombre	Badge
Introducción	
SEMANA 1: Principios y bases de la calidad.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 2: Bases de la gestión de la calidad.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 3: Gestión por procesos.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 4: Serie de Normas ISO 9000.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 5: Sistemas integrados de gestión.	¡Excelente trabajo!
PRÁCTICA CALIFICADA 1	BADGE DE ORO
SEMANA 6: Calidad en el Servicio	¡Excelente trabajo!

SEMANA 7: Mejora continua Kaizen.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 8: Mejora Continua Kaizen II	¡Excelente trabajo!
SEMANA 9: PRACTICA CALIFICADA 2 e identificación de problemas y oportunidades de mejora.	BADGE DE ORO
SEMANA 10: Herramientas de calidad.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 11: Herramientas de calidad.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 12: Herramientas de calidad.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 13-1: Metodología de resolución de problemas I.	¡Excelente trabajo!
PRÁCTICA CALIFICADA 3	BADGE DE ORO
SEMANA 14: Generación de soluciones.	¡Excelente trabajo!
SEMANA 15-1: Herramientas de calidad.	¡Excelente trabajo!

Figura 5. Vista del LMS Canvas.  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como parte de las mecánicas, también se ha considerado el uso de *leaderboards* o pizarras de *ranking* (figura

6); a través de estas, los participantes pueden ubicarse en un puesto específico según la cantidad de *badges* obtenidos.

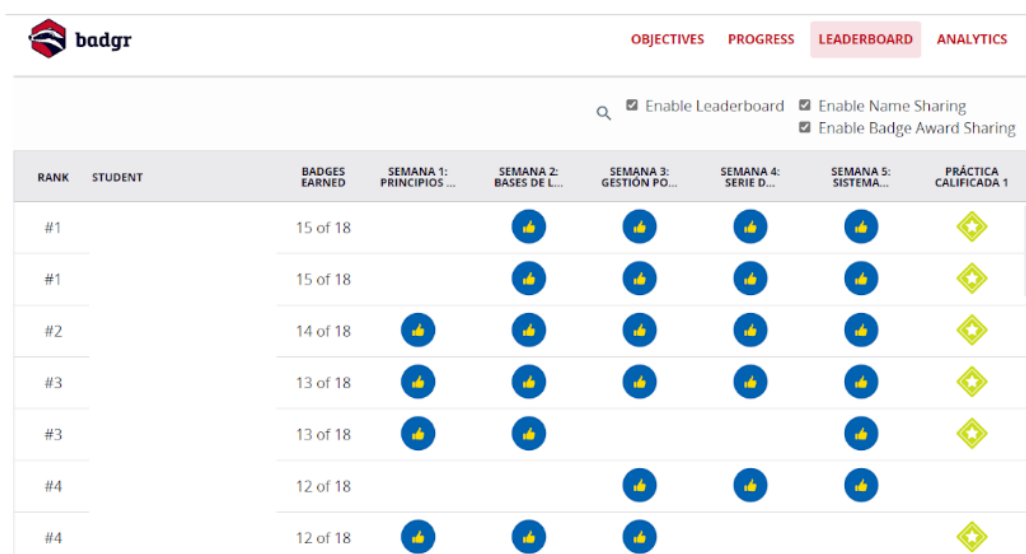


Figura 6. Leaderboard.  
Fuente: Elaboración propia

Como parte de la *estética*, el sistema gamificado utiliza elementos tecnológicos en la plataforma LMS Canvas, la cual es utilizada frecuentemente por los participantes para el desarrollo de sus actividades académicas.

### TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Siendo la presente investigación de enfoque cuantitativo, el método empleado para recoger los resultados de la aplicación del programa educativo Canvas Badges, fue también el cuantitativo, bajo la técnica de la encuesta.

La técnica de la encuesta es una técnica cuantitativa habitual en la recolección de datos y utiliza como instrumento de recolección de datos, al cuestionario, el cual, a través de una serie de preguntas

cerradas, permite obtener información de una población a través de una muestra.

El cuestionario elegido a efectos de esta investigación es el titulado «Cuestionario de diagnóstico para la solución de problemas», de libre disposición, el cual fue adaptado para su aplicación. Las preguntas presentadas fueron cerradas (múltiples) y están relacionadas con las dimensiones del estudio.

A este cuestionario se le aplicó el Índice de Congruencia de Osterlind sobre los resultados de la validación del juicio de 5 expertos determinándose la eliminación de 2 ítems por obtener un puntaje inferior a 0.5.

A continuación, en la tabla 1 se presenta a los ítems organizados según la dimensión relacionada:

Tabla 1  
Dimensiones e ítems del cuestionario

Dimensiones	Ítem (aspecto que mide)
Definición del problema	1.1 Claridad en la definición del problema sin mencionar aún las soluciones.
	1.2 Utilizar múltiples formas para definir un problema.
	1.3 Pensamiento sobre el problema desde la lógica y la intuición.
	1.4 Cantidad de información utilizada para comprender el problema.
	1.5 División del problema en componentes para un análisis más profundo y una adecuada comprensión de las dimensiones de este.
	1.6 Flexibilidad en la comprensión del problema utilizando varios métodos para este fin.
	1.7 Comprender el problema haciendo muchas preguntas sobre la naturaleza del problema antes de considerar resolverlo.
	1.8 Estimular a los compañeros del trabajo en equipo a comprender el problema de múltiples formas.
Generación de soluciones alternativas	1.1 Generación de múltiples soluciones, en lugar de generar solo una solución evidente.
	1.2 Desarrollo de técnicas para encontrar soluciones creativas e innovadoras.
	1.3 Disposición de un tiempo separado de la rutina diaria para los compañeros de equipo, en el que puedan generar las soluciones.
	1.4 Reconocer el aporte de soluciones creativas y, asimismo, reconocer el apoyo que los miembros del equipo puedan manifestar a estas soluciones.
	1.5 Asegurar puntos de vista divergentes en el trabajo en equipo.
	1.6 Alentar la ruptura de paradigmas en la generación de soluciones creativas.

Dimensiones	Ítem (aspecto que mide)
Evaluación y selección de soluciones	3.1 Desarrollar el método de solución de problemas paso a paso, iniciando con la definición del problema para luego generar las soluciones.
	3.2 Selección de una solución desde varias alternativas. No seleccionar la solución, sino que se han pensado en varias alternativas para solucionar el problema.
	3.3 Evaluar las alternativas considerando las consecuencias de su implantación a corto y largo plazo.
	3.4 Valorar el aporte de personas externas en la evaluación de las soluciones.
	3.5 Valorar el aporte de las personas externas que serán impactadas por la solución para determinar sus preferencias y expectativas.

Fuente: Elaboración propia.

## 1. Confiabilidad del instrumento

Con la finalidad de medir la confiabilidad del instrumento, se realizó el análisis de fiabilidad en el software SPSS, con la información de las respuestas del pretest y del postest. El criterio general, para evaluar los coeficientes de Alfa de Cronbach, considera el siguiente resultado de 0.959 mayor a 0.9 entonces la estabilidad interna del instrumento es excelente.

En la tabla 2 se muestran los resultados de la confiabilidad del instrumento según Alfa de Cronbach.

Tabla 2  
Confiabilidad de instrumento según Alfa de Cronbach

Estadísticos de fiabilidad	
Alfa de Cronbach	Número de elementos
0.959	144

Fuente: Elaboración propia.

## ANÁLISIS DE DATOS

El procesamiento y el análisis de datos se realizó empleando el programa estadístico SPSS, en el cual se ingresó la data recolectada en la hoja de cálculo del formulario entregado a los estudiantes. Se codificaron los resultados de las encuestas y, a partir de estos, se realizaron los análisis posteriores.

## ANÁLISIS DE NORMALIDAD

Según los principios de la estadística descriptiva y la estadística inferencial, se realizó un análisis de la normalidad, para identificar si los datos siguen una distribución normal y el nivel de dispersión de estos.

Como resultado, el parámetro Sig., o p-valor es inferior a 0.05 en las tres dimensiones del estudio, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula. Es decir, los resultados no corresponden a una distribución normal, por lo cual se aplicarán las pruebas no paramétricas para el contraste de hipótesis.

En la tabla 3, se presenta el análisis de normalidad según la distribución de Kolmogorov - Smirnov, debido a que la muestra presenta más de cincuenta respuestas.

Tabla 3  
Prueba de normalidad de los datos

Dimensión	Kolmogorov-Smirnov(a)			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
Definición del problema	0.083	144	0.017	0.965	144	0.001
Generación de soluciones alternativas	0.086	144	0.011	0.973	144	0.006
Evaluación y selección de soluciones	0.121	144	0.000	0.971	144	0.004

(a) Corrección de la significación de Lilliefors  
Fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS

Es de interés de este estudio identificar el efecto de la gamificación en las dimensiones: definición del problema, generación de soluciones, evaluación y selección de soluciones, así como en la variable resolución analítica de problemas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, los que se presentan en la tabla 4 y figura 7, el programa basado en la gamificación afectó positiva y significativamente las tres dimensiones del estudio, así como a la variable de resolución analítica de problemas, lo que se confirma con los porcentajes de nivel de logro en el postest.

Además, las tablas 5 y 6 corroboran este resultado con el test de Wilcoxon que determina la diferencia significativa entre los puntajes del pretest y postest con un p-valor «Sig. Asintótica (bilateral)» de 0.000 menor al nivel de significancia de 0.05. Esto quiere decir que existe diferencia significativa a favor del post test en cada uno de los casos presentados.

Algo similar obtuvo Pérez-López, Rivera y Delgado-Fernández [12] al aplicar un programa basado en gamificación. Tuvieron

una mejora de los hábitos de vida saludable del alumnado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, con mejoras obtenidas en el desayuno (53.4 %), en la actividad física (12.3 %) y la reducción del consumo de refrescos (19.2 %). Asimismo, Beltrán [11] tras implementar estrategias de gamificación sobre la plataforma virtual de aprendizaje concluyó que el programa influyó en la motivación de los estudiantes para desarrollar tareas autónomas y mejorar su rendimiento académico. Finalmente, Macías [10] comprobó que la aplicación de la gamificación a través del LMS Rezzly mejora la competencia de plantear y resolver problemas matemáticos.

Estos resultados tienen relación con lo que sostiene Bunchball (como se citó en [16]) cuando expresa que la meta principal de la gamificación es generar participación y cambios en el comportamiento de las personas a través de la motivación que ofrecen la dinámica y mecánica del juego.

A continuación, se presenta la tabla 4, en la que se describen los valores obtenidos en la aplicación del instrumento antes y después de la ejecución del programa de gamificación.

Tabla 4

Valores obtenidos de la aplicación del instrumento «Cuestionario de diagnóstico para la solución de problemas», antes y después de la ejecución del programa de gamificación

Dimensión	Tipo de Test	Resultados					
		N (a)	M (b)	Md (c)	Mo (d)	DE (e)	% Logro (f)
Definición del problema	Pretest	72	18.00	18	20	4.09	59.9
	Postest	72	25.11	25	28	3.24	83.7
Generación de soluciones alternativas	Pretest	72	19.20	19	18	3.69	64.1
	Postest	72	25.20	25	24	3.16	83.9
Evaluación y selección de soluciones	Pretest	72	15.10	15	15	3.69	60.4
	Postest	72	20.40	20	20	3.20	81.6
Resolución analítica de problemas	Pretest	72	52.30	51.5	49	9.85	61.6
	Postest	72	70.10	71.0	65	8.54	83.2

(a) Número de encuestados

(b) Media

(c) Mediana

(d) Moda

(e) Desviación estándar

(f) Relación entre la media obtenida y el puntaje máximo deseado

Fuente: Elaboración propia.

La visión gráfica de los resultados del porcentaje de logro de la gamificación en el grupo experimental se aprecia en la figura 7.

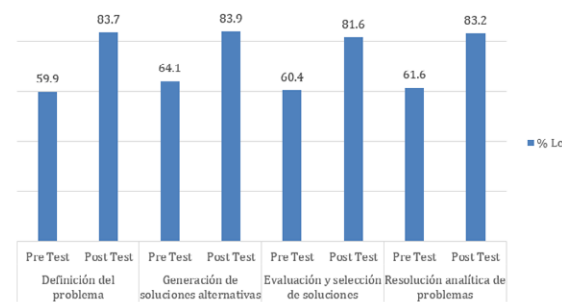


Figura 7. Resultados del porcentaje de logro en pretest y postest.

Fuente: Elaboración propia.

Para corroborar los resultados, se realizó el test de Wilcoxon, en la tabla 5 se muestran los resultados de la prueba de rangos con signo de Wilcoxon.

Tabla 5  
Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Dimensión	Test evaluados	Rangos	Resultados	Rango promedio	Suma de Rangos Sig.
Definición del problema	Postest - Pretest	Rangos negativos	1 (a)	7.00	7.00
		Rangos positivos	68 (b)	35.41	2408.00
		Empates	3 (c)		
		Total	72		
Generación de soluciones alternativas	Postest - Pretest	Rangos negativos	2(a)	3.75	7.50
		Rangos positivos	65 (b)	34.93	2270.50
		Empates	5 (c)		
		Total	72		
Evaluación y selección de soluciones	Postest - Pretest	Rangos negativos	1 (a)	3.50	3.50
		Rangos positivos	65 (b)	33.96	2207.50
		Empates	6 (c)		
		Total	72		
Resolución analítica de problemas	Postest - Pretest	Rangos negativos	1(a)	2.00	2.00
		Rangos positivos	69 (b)	35.99	2483.00
		Empates	2 (c)		
		Total	72		

(a) Postest < Pretest  
(b) Postest > Pretest  
(c) Postest = Pretest  
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tabla 6 se presenta la prueba de hipótesis y los valores de Z y la Sig. asintótica (bilateral) obtenida en el

test de Wilcoxon de las tres dimensiones y variable de este estudio.

Tabla 6  
Prueba de hipótesis de test de Wilcoxon.

Dimensión	Estadísticos de contraste (a)	
	Postest - pretest	
Definición del problema	Z	-7.191 (b)
	Sig. asintótica (bilateral)	.000
Generación de soluciones alternativas	Z	-7.080 (b)
	Sig. asintótica (bilateral)	.000
Evaluación y selección de soluciones	Z	-7.051 (b)
	Sig. asintótica (bilateral)	.000
Resolución analítica de problemas	Z	-7.262 (b)
	Sig. asintótica (bilateral)	.000

(a) Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon  
(b) Basado en los rangos negativos  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

De la presente investigación aplicada se concluye lo siguiente:

- Se evidenció que el programa basado en la gamificación para fortalecer las dimensiones de la habilidad de
- Los resultados estadísticos de las tablas 5 y 6 muestran que existe diferencia significativa entre los puntajes del

resolución de problemas logra un efecto positivo en el desarrollo de esta habilidad. Esto se comprueba con los resultados del porcentaje de logro en el postest, los que se muestran en la tabla 4 y figura 7.



pretest y el posttest, lo que permite inferir que existe diferencia significativa a favor del post test en las tres dimensiones y en la variable de resolución analítica de problemas.

- La plataforma LMS Canvas presenta aplicaciones externas desde la opción Configuraciones, entre ellas, la aplicación externa Badgr, la que hace posible incorporar elementos de gamificación en los cursos.
- Se logró identificar el efecto del programa basado en gamificación sobre la base de resultados cuantitativos y análisis estadísticos confirmando el efecto positivo de este programa en el desarrollo de la habilidad resolución analítica de problemas.

## REFERENCIAS

- [1] Inacal (2017). ¡Impresionante! Conoce cuántas empresas en el Perú producen con calidad. RPP. [Artículo de periódico web]. <https://rpp.pe/seamos-peruanos-de-calidad/impresionante-conoce-cuantas-empresas-en-el-peru-producen-con-calidad-noticia-1091508>
- [2] Asociación Española para la Calidad (2007). *8D El método eficaz para la mejora continua*. Editorial AEC.
- [3] Doyle, A. (2018). Problem-Solving Examples and Skills List [Artículo web]. <https://www.thebalancecareers.com/problem-solving-skills-with-examples-2063764>
- [4] Naciones Unidas (2017). *Informe World Population Ageing. USA: Departamento de Economía y Asuntos Sociales*. <http://www.un.org/en/development/desa/population/theme/ageing/WPA2017.shtml>
- [5] Villanueva, R., y Fowks, C. (2017). *¿En qué se diferencian los Millennials del Perú?*. Datum Internacional. [http://www.datum.com.pe/new\\_web\\_files/files/pdf/En%20qu%20se%20diferencian%20los%20millennials%20del%20Per%20v2.pdf](http://www.datum.com.pe/new_web_files/files/pdf/En%20qu%20se%20diferencian%20los%20millennials%20del%20Per%20v2.pdf)
- [6] Moreno, A., Trujillo, J., y Aznar, I. (2021). *Metodologías activas para la enseñanza universitaria*. Editorial GRAÓ.
- [7] Teixes, F. (2015). *Gamificación. Motivar jugando*. Editorial UOC.
- [8] Seijo, M. (2017). Gamificación y el aprendizaje lúdico en el siglo 21. [Artículo web]. Forward Learning. <https://forwardteacher.com/2017/09/gamificacion-aprendizaje-ludico-siglo-21/>
- [9] Rodríguez, F., y Santiago, R. (ed.) (2015).

*Gamificación: Cómo motivar a tu alumnado y mejorar el clima en el aula*. Editorial Océano.

- [10] Macías, A. (2017), La Gamificación como estrategia para el desarrollo de la competencia matemática: plantear y resolver problemas [Tesis de maestría, Universidad de Casa Grande, Ecuador]. <http://dspace.casagrande.edu.ec:8080/handle/ucasagrande/1171>
- [11] Beltrán, J. (2017) E-learning y gamificación como apoyo al aprendizaje de programación [Tesis doctoral, Universidad de Extremadura, España]. <http://dehesa.unex.es/handle/10662/6429>
- [12] Pérez-López, R. y Delgado-Fernández, E. (2016). *Mejora de hábitos de vida saludables en alumnos universitarios mediante una propuesta de gamificación* [Tesis de maestría, Universidad de Granada, España]. [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112017000400026&lang=pt](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112017000400026&lang=pt)
- [13] Zapata, A. (2015). *Ciclo de la calidad PHVA*. Universidad Nacional de Colombia.
- [14] Whetten, D. y Cameron K. (ed.) (2016). *Desarrollo de Habilidades Directivas* (9.a ed.). Pearson.
- [15] Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (ed.) (2017). *Metodología de la Investigación*. McGraw-Hill.
- [16] Mendieta, J. D. (2016). *Gamification: Strategic tool in organizational learning* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55850>

## ACERCA DEL AUTOR

### Luisa Turkowsky

Ingeniera industrial y de sistemas. Titulada de la Universidad de Piura, maestra en Educación por Unifé. Apasionada por la docencia superior y por el estudio de nuevas estrategias de enseñanza. Docente de Tecsup desde el año 2017, perteneciente al Departamento de Diseño y Producción Industrial.

 [lturkowsky@tecsup.edu.pe](mailto:lturkowsky@tecsup.edu.pe)

Recibido: 05-07-22  
Revisado: 04-08-22  
Aceptado: 11-08-22



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

# Capacítate con Nuestras Especializaciones, Programas Integrales y Cursos Cortos

## Modalidades:



Online **• EN VIVO**



Semipresencial



Presencial

*Conoce nuestras áreas de formación*

**Escanea el código QR  
para mayor información**

ó comunícate al:

☎ 992 079 621 - 984 879 904



## INSTRUCCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

La revista Investigación Aplicada e Innovación I+i se publica anualmente y tiene como objetivo principal difundir trabajos de investigación aplicados a la ingeniería y tecnología, con el fin de apoyar al sector productivo en la mejora de sus procesos, eficiencia de sus procedimientos e incorporación nuevas técnicas para fortalecer su competitividad. Las principales áreas temática son: Tecnología, Gestión, Procesos y Educación, teniendo subtemas en cada una de ellas.

### Quienes pueden publicar:

Profesionales en ingeniería y tecnología, investigadores, docentes de educación superior, directivos académicos y especialistas en cualquiera de las temáticas que aborda la revista.

### Convocatoria:

Los interesados en publicar en la revista I+i de Tecsup, deben enviar sus artículos de investigación al correo: [investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe](mailto:investigacioneinnovacion@tecsup.edu.pe)

## REQUISITOS PARA LA PUBLICACIÓN

### 1.- Formato de presentación:

- Se aceptarán artículo escritos en idioma español, portugués o inglés.
- El artículo debe tener una extensión entre 7 y 14 páginas escritos a una sola columna.
- El interlineado será sencillo, fuente Tahoma o Arial, tamaño 11 puntos.
- Todos los márgenes son de 2,5 cm en tamaño de página A4.
- El artículo debe enviarse en formato Word, además de la versión en pdf.
- Las tablas, figuras y gráficas deberán incluirse con buena resolución y presentarse según los lineamientos de las Normas APA.
- Las ecuaciones deben estar bien definidas, digitadas y no presentadas como imágenes.

### 2.- Estructura del artículo:

- TÍTULO: Se colocará el título de la investigación en el idioma original y en inglés. El título no debe exceder de 12 palabras y debe dar cuenta del objeto de investigación.
- AUTORES: Es necesario nombres y apellidos completos de los autores y su afiliación académica e institucional.
- RESUMEN: Contenido breve del artículo en el idioma original e inglés, no debe exceder las 300 palabras. Evitar el uso de siglas, ecuaciones, tablas y fórmulas.
- PALABRAS CLAVES: Debe identificar los temas principales del artículo redactados en el idioma original e inglés, y presentados en orden de prioridad, no exceder de 08 palabras claves.
- INTRODUCCIÓN: Debe explicar el problema general, definir el tema investigado, definir los objetivos del estudio y generar interés al lector.
- FUNDAMENTOS: Presentar los antecedentes que fundamentan el estudio haciendo uso de citas. También debe describir el estudio de la investigación incluyendo premisas y limitaciones.
- METODOLOGÍA: Debe explicar cómo se llevó a la práctica el trabajo, justificando la elección de procedimientos y técnicas.
- RESULTADOS: Debe resumir la contribución del autor; presentar la información hallada y pertinente que se relaciona con los objetivos del estudio en forma comprensible y coherente; y debe mencionar todos los hallazgos relevantes, incluso aquellos contrarios a la hipótesis.
- CONCLUSIONES: Deben estar acorde a los objetivos del trabajo, responden a la(s) pregunta(s) de investigación planteadas en la introducción y a las interrogantes que condujeron a la realización de la investigación.
- REFERENCIAS: Incluir todas las fuentes mencionadas en el artículo. Es necesario el uso de referencias de autoridad, de carácter académico y de actualidad, incluidos en bases de datos especializadas. Su presentación es bajo el formato de una adaptación de las Normas APA para la revista I+i.
- ACERCA DEL AUTOR(ES): Incluir información profesional breve de cada autor (institución, labor que desempeña y correo electrónico).

### 3.- Proceso editorial de la revista:

- Recepción de resúmenes para evaluar si se aborda alguna de área temática de la revista.
- Recepción de artículo completo previamente seleccionados, el Comité Editorial realiza la revisión del cumplimiento del formato y estructura de presentación. Y se valida si el trabajo es inédito.
- Se verifica la originalidad del artículo a través de la herramienta Turnitin.
- Evaluación de artículos completos o arbitraje de artículos, consiste en la validación a cargo de dos especialistas en el tema, quienes recomendarán o no la publicación y opinan si el artículo es:
  - o *Publicable sin modificaciones*: El documento no tiene ningún tipo de observación de fondo y se publica como fue recibido.
  - o *Publicable con ligeras modificaciones*: El documento amerita fundamentalmente modificaciones de forma.
  - o *Publicable con modificaciones sustanciales*: El documento amerita algunas modificaciones de fondo corregibles.
  - o *No publicable*: el documento no es recomendado para su publicación.
- Los artículos aceptados para publicación pasan por un proceso de corrección de estilo y ortografía en coordinación con los autores dentro de los plazos que se estimen.
- Concluidos todos los procesos de revisión y aceptación se procede con la diagramación e impresión de la revista.

Para más información puede revisar el sitio web de la Revista I+i en <https://www.tecsup.edu.pe/revista>



## Tecsup

### Sede Norte

Mz. A Sub lote 1 Urbanización Tecsup  
Víctor Larco Herrera, Trujillo - Perú  
informestrujillo@tecsup.edu.pe

T. (044) 485420

### Sede Centro

Av. Cascanueces 2221  
Santa Anita, Lima - Perú  
informeslima@tecsup.edu.pe

T. (51-1) 317-3900

### Sede Sur

Urb. Monterrey Lote D-8  
José Luis Bustamante y Rivero,  
Arequipa - Perú  
informesarequipa@tecsup.edu.pe

T. (54) 426610

F. (54) 426654

[www.tecsup.edu.pe](http://www.tecsup.edu.pe)

