

Influencia de los Armónicos en el Factor de Potencia Verdadero y en las Pérdidas Energéticas: Estudio de Caso en un Motor Industrial de 150 HP

González-Vargas, L.A.¹ ; Alvarado-Tovar, N.²; Vidaña-Martínez, S.A..³

Datos de Adscripción:

¹ ✉ Luis Amado González Vargas. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. TecNM-Lerdo, Departamento de Posgrado, Luis.gv@lerdo.tecnm.mx.
<https://orcid.org/0009-0008-9094-6188>

² Noé Alvarado Tovar. Instituto Tecnológico de la Laguna / TecNM, Departamento de Posgrado, nalvarado@lalaguna.tecnm.mx.
<https://orcid.org/0000-0002-0218-0813>

³ Silvia Adriana Vidaña Martínez. Instituto Tecnológico Superior de Lerdo, Dgo. TecNM-Lerdo, División de Ingeniería Ambiental, silvia.vm@itslerdo.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0008-9633-1010>

Resumen - El impacto de los armónicos en el factor de potencia y las pérdidas de energía en sistemas eléctricos industriales es un problema crítico, especialmente con el uso generalizado de cargas no lineales como variadores de frecuencia, rectificadores y sistemas UPS. Estas cargas generan distorsiones armónicas que deterioran la eficiencia energética. Este estudio analiza un caso real en un motor industrial de 150 HP controlado por un variador de 18 pulsos, comparando el factor de potencia de desplazamiento (FPD) y el factor de potencia verdadero (FPreal), este último considerando la distorsión armónica.

Se realizaron 23 mediciones bajo distintas condiciones de carga utilizando un analizador de calidad de energía. Aunque el FPD se mantuvo constante alrededor de 0.97, el FPreal mostró valores significativamente más bajos (hasta 0.70), evidenciando pérdidas energéticas ocultas. Se observaron valores de THDI de hasta 95%, lo que incrementó la corriente RMS y generó mayores pérdidas por efecto Joule y caída de tensión. Se simuló una reducción del THDI al 5% mediante filtrado armónico, logrando una mejora del FPreal hasta 0.97 y reducciones de hasta un 48.6% en pérdidas. Estos resultados confirman que el uso exclusivo del FPD subestima las ineficiencias provocadas por los armónicos. El estudio subraya la importancia de aplicar indicadores integrales como el FPreal y sugiere la implementación de filtros armónicos para mejorar la calidad de energía, reducir pérdidas y optimizar el desempeño energético en entornos industriales.

Palabras clave: Armónicos, Cargas no Lineales, Calidad de Energía, Factor de Potencia Verdadero, Pérdidas de Energía.

Abstract - The impact of harmonics on power factor and energy losses in industrial electrical systems is a critical issue, particularly due to the widespread use of nonlinear loads such as variable frequency drives (VFDs), rectifiers, and UPS systems. These loads introduce harmonic distortion, degrading energy efficiency. This study presents a real-world case involving a 150 HP industrial motor controlled by an 18-pulse VFD, comparing the displacement

power factor (DPF) with the true power factor (TPF), the latter accounting for harmonic distortion. Twenty-three measurements were conducted under different load conditions using a power quality analyzer. While the DPF remained around 0.97, the TPF dropped significantly, reaching values as low as 0.70, revealing hidden energy losses. Harmonic distortion levels reached up to 95% THDI, resulting in increased RMS current, higher Joule losses, and more severe voltage drops. A harmonic filtering simulation reduced THDI to 5%, improving the TPF to 0.97 and reducing power losses by up to 48.6%. These findings demonstrate that relying solely on DPF underestimates the efficiency losses caused by harmonics. The study emphasizes the importance of using comprehensive indicators such as TPF and recommends implementing harmonic mitigation strategies, including active or passive filters, to enhance power quality, reduce energy losses, and optimize the performance of industrial electrical systems.

Keywords: Energy Losses, Harmonic Distortion, Harmonics, Nonlinear Loads, True Power Factor.

I. INTRODUCCIÓN

“La eficiencia energética representa un aspecto clave para la sostenibilidad y la competitividad en el entorno industrial actual. En particular, la industria moderna ha adoptado una creciente cantidad de equipos electrónicos de potencia, como variadores de frecuencia, rectificadores, fuentes de alimentación conmutadas y sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS), que permiten mejorar el control de procesos y aumentar la productividad. No obstante, estos dispositivos actúan como cargas no lineales, generando corrientes distorsionadas que introducen armónicos en la red eléctrica” (Blanco et al., 2020; IEEE Power & Energy Society, 2022).

“Los armónicos provocan una serie de efectos indeseables: sobrecalentamiento de transformadores y conductores, disparo errático de protecciones, interferencias en sistemas de comunicación y una disminución significativa de la eficiencia energética” (IEEE Std 3002.8-2022). Asimismo, la distorsión armónica afecta de manera directa el valor del factor de potencia, un indicador clave utilizado para evaluar el rendimiento energético de los sistemas eléctricos (Bollen & Hassan, 2011).

“El factor de potencia de desplazamiento ($\cos \phi$), válido únicamente en sistemas con ondas senoidales puras, resulta insuficiente en presencia de armónicos. Por ello, se hace necesario introducir el concepto de factor de potencia verdadero, que incluye tanto el desplazamiento como la distorsión armónica, proporcionando una evaluación más realista del desempeño eléctrico del sistema” (IEEE Std 1459-2010; Santos et al., 2023).

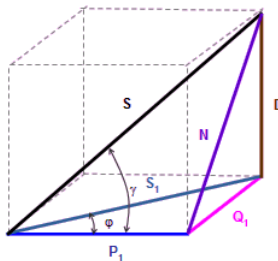
Este trabajo cuantifica el impacto de los armónicos en el FPreal y las pérdidas energéticas en un motor de 150 HP, proponiendo estrategias de mitigación. A partir de mediciones reales del sistema eléctrico, se analizó cómo los armónicos afectan el factor de potencia verdadero. Con base en estos datos, se estimó el impacto que tendría la instalación de filtros armónicos en la mejora de la eficiencia energética del sistema. Aunque no se implementaron físicamente los filtros, el análisis permitió proyectar reducciones importantes en las pérdidas de energía y en la corriente, así como una mejora significativa del factor de potencia verdadero de 0.75 a 0.97. Los resultados ponen en evidencia la importancia de considerar indicadores más completos que el factor de potencia tradicional al evaluar sistemas eléctricos industriales afectados por armónicos.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

“En el análisis de sistemas eléctricos en régimen estacionario no senoidal, es esencial comprender cómo los armónicos afectan la distribución de la potencia. Tradicionalmente, el triángulo de potencia en sistemas sinusoidales representa la relación entre la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q) y la potencia aparente (S). Sin embargo, en presencia de armónicos, este modelo se amplía a una representación tridimensional que incluye la potencia de distorsión (D)”, (Baggini, 2008).

Figura 1

Triángulo de potencias en régimen estacionario no senoidal (Emanuel, 1999)



2.1 Potencia en Régimen Estacionario no Senoidal.

“En sistemas eléctricos reales, especialmente aquellos con cargas no lineales las formas de onda de corriente se ven afectadas por armónicos, aun cuando la tensión permanezca cercana a una senoidal pura. Este fenómeno da lugar a un régimen estacionario no senoidal, el cual exige un enfoque más robusto para el análisis de potencia. A diferencia del régimen senoidal puro, en el que la potencia aparente S se descompone exclusivamente en componentes activa P y reactiva Q, los sistemas no sinusoidales requieren considerar una tercera componente: la potencia de distorsión D” (Baggini, 2008). Esta situación se modela mediante una representación tridimensional conocida como el cubo de potencias, en el cual se descompone la potencia aparente total en:

$S = V_1 I_1$ Potencia aparente total.

$S_1 = V_1 I_1$ Potencia aparente de la componente fundamental.

$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1$ Potencia activa fundamental.

$Q_1 = V_1 I_1 \sin \phi_1$ Potencia reactiva fundamental.

$D = V_1 I_h$ Potencia de distorsión, asociada a las componentes armónicas de la corriente I_h .

En régimen senoidal, la corriente no presenta armónicos ($I_h=0$), por lo tanto, la potencia de distorsión desaparece: $D = 0$. No

obstante, en presencia de distorsión armónica, esta componente adquiere relevancia, elevando la magnitud de la potencia aparente sin aportar trabajo útil, lo cual compromete la eficiencia del sistema y eleva la carga sobre los equipos de generación, transformación y conducción. La relación vectorial entre estas componentes se expresa mediante la expresión (1)

$$S^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D^2 \quad (1)$$

Toda señal periódica no senoidal de tensión o corriente puede expresarse como una serie de Fourier en (2) y (3).

$$I(t) = I_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (2)$$

$$V(t) = V_0 + \sqrt{2} \sum_{h \neq 0}^{\infty} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (3)$$

Sus valores eficaces pueden expresarse de acuerdo con (4) y (5)

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (4)$$

$$V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (5)$$

“Una métrica ampliamente utilizada para cuantificar el impacto de los armónicos en los sistemas eléctricos es la distorsión armónica total (THD), la cual se expresa tanto para la corriente (THDI) como para el voltaje (THDV)”, (Arrillaga et al., 2018). Estas métricas representan la relación entre el contenido armónico y la componente fundamental, permitiendo evaluar el grado de distorsión presente. Su formulación matemática es de acuerdo a (5) y (6).

$$TDHI = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (6)$$

$$TDHV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (7)$$

A partir de lo cual si sustituimos (6) en (4) y (7) en (5) tenemos

$$I_{rms} = I_{1rms} \sqrt{1 + THDI^2} \quad (8)$$

$$V_{rms} = V_{1rms} \sqrt{1 + THDV^2} \quad (9)$$

2.2 Factor de Potencia Verdadero, de Distorsión y de Desplazamiento

"El factor de potencia es uno de los indicadores más importantes para evaluar la eficiencia global de una red eléctrica. Su valor refleja qué tan eficientemente se utiliza la energía eléctrica suministrada" (Arrillaga et al., 2018). En sistemas con presencia de armónicos, su cálculo debe considerar no solo el desfaseamiento entre tensión y corriente, sino también la distorsión armónica presente. El factor de potencia verdadero se define mediante:

$$FP_{real} = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_h}{S} \quad (10)$$

El factor de potencia de desplazamiento (FPD) se refiere únicamente al desfaseamiento entre la tensión y la corriente de la componente fundamental, y se expresa como:

$$FPD = \cos(\theta_1) \quad (11)$$

Si sustituimos las ecuaciones (8) y (9) en (10) tendremos que el factor de potencia real o verdadero esta dado por:

$$FP_{real} = \frac{P}{V_{1rms} I_{1rms} \sqrt{1+THDV^2} \sqrt{1+THDI^2}} \quad (12)$$

Simplificando podemos expresar (12) como el producto de dos factores.

$$FP_{real} = \frac{P}{V_{1rms} I_{1rms}} * \frac{1}{\sqrt{1+THDV^2} \sqrt{1+THDI^2}} \quad (13)$$

De acuerdo con las referencias [4] y [5], se asumen las siguientes consideraciones para simplificar el cálculo del factor de potencia real (FP_{real})

- Dado que las contribuciones de las corrientes armónicas a la potencia activa son generalmente pequeñas, se aproxima $P = P_1$.
- Cuando el $THDV$ (Distorsión Armónica Total de Voltaje) es menor al 10%, la tensión eficaz puede aproximarse a su componente fundamental $V_{rms} = V_1$

Con estas simplificaciones, (13) se reduce a:

$$FP_{real} = \frac{P}{V_{1rms} I_{1rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+THDI^2}} \quad (14)$$

Esta expresión destaca que el factor de potencia real depende no solo del desplazamiento de fase entre la tensión y corriente fundamentales (primer término), sino también de la distorsión armónica introducida por la carga (segundo término).

Dado que el factor de desplazamiento FPD nunca puede exceder la unidad (es decir, $FPD \leq 1$), se deduce que el FP_{real} tiene un

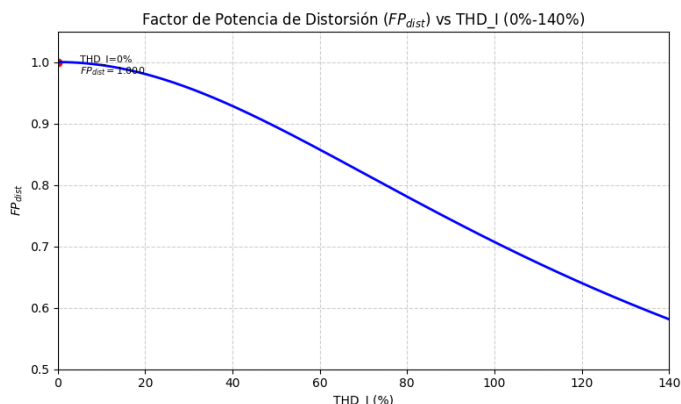
límite superior definido exclusivamente por la distorsión armónica de corriente (THDI) de acuerdo con (6).

$$FP_{real} \leq \frac{1}{\sqrt{1+THDI^2}} = FP_{dist} \quad (15)$$

- FP_{dist} , representa el factor de potencia de distorsión, que cuantifica el impacto de los armónicos de corriente en la reducción del factor de potencia total.
- Relación con THDI a mayor distorsión armónica (THDI), menor será el límite teórico del factor de potencia real, incluso si el FPD es 1.

Al representar gráficamente la ecuación (15) en la Figura 2, se puede observar la variación del factor de potencia real en sistemas con cargas no lineales que presentan elevados niveles de distorsión armónica. Si bien el factor de potencia de desplazamiento puede mantenerse próximo a uno, la presencia de armónicos provoca una disminución significativa del factor de potencia verdadero, reflejando así el impacto real de dichas distorsiones sobre la eficiencia energética del sistema.

Figura 2
Relación entre el THDI y el factor de potencia real máximo



- Con THDI = 140%, el FP_{dist} cae a 0.581, lo que significa que el factor de potencia real no puede superar este valor incluso con $FPD=1$.
- Esto implica que los armónicos reducen la eficiencia energética hasta en un 41.9% en casos extremos.
- THDI = 100%: $FP_{dist}=0.707$ (límite común en estándares de calidad de energía).
- Para mantener $FP_{real} > 0.9$, el THDI debe ser $<25\%$.
- "La distorsión armónica total de corriente THDI no debe exceder el 5% en puntos de acoplamiento común (PCC) para sistemas de baja tensión" (IEEE 519-2014, p. 10).

Lo anterior indica que, antes de implementar cualquier corrección con elementos reactivos, es fundamental realizar un análisis detallado de las características de las cargas y, en particular, de los niveles de distorsión armónica de corriente presentes en el sistema.

2.3 Reducción de pérdidas energéticas en el sistema

“Al filtrar las corrientes armónicas en un sistema eléctrico que no requiere compensación de potencia reactiva, pero presenta un alto índice de distorsión armónica de corriente (THDI), se mejora el uso eficiente de la energía al reducirse las pérdidas en distintos componentes del sistema, como se describe a continuación. Las pérdidas de potencia en un conductor eléctrico dependen de su resistencia y del cuadrado de la corriente que lo atraviesa. A igual potencia activa transmitida, un mayor factor de potencia implica una corriente más baja. Por lo tanto, al incrementarse el factor de potencia, disminuyen las pérdidas en los conductores ubicados aguas arriba del punto donde se realiza la corrección” (Arrillaga et al., 2018; IEEE, 2014).

La disminución de las pérdidas ΔP , tras realizar la corrección, se determina mediante la expresión (16).

$$\Delta P = P_1 \left[1 - \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \right] \quad (16)$$

P_1 Corresponde a las pérdidas energéticas registradas antes de corregir el factor de potencia.

$\cos \phi_1$ Representa el valor del factor de potencia inicial, previo a cualquier intervención.

$\cos \phi_2$ Indica el valor del factor de potencia alcanzado tras la corrección.

La Tabla 1 presenta las estimaciones de ahorro calculadas conforme a (16).

Tabla 1.
Ahorro de potencia activa (ΔP) tras la mejora del factor de potencia.

	$\cos \phi_1$					
	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95
$\cos \phi_1$ a 0.90						
	39.85	30.55	20.9	10.8	----	----
$\cos \phi_1$ a 0.95						
	45.7	37.67	29.1	19.94	10.9	----
$\cos \phi_1$ a 0.97						
	47.92	40.2	31.1	23.21	13.9	4.09

La expresión (17) representa la caída de voltaje en una línea trifásica debido a la impedancia de los conductores y la carga conectada de acuerdo a (Glover et al., 2012)

$$\Delta V = \sqrt{3} \cdot I(R \cos \theta + X \sin \theta) = \frac{P}{V_n} (R + X \cdot \tan \theta) \quad (17)$$

Donde:

R y X : son respectivamente la resistencia y la reactancia del conductor

P : Potencia activa entregada a la carga.

$\cos \theta$: Factor de potencia asociado a la carga

V_n Tensión nominal de la línea

I : Corriente de fase en la línea

“A igual potencia activa transmitida, un mayor factor de potencia implica una menor corriente en la línea, lo que a su vez reduce la caída de voltaje. Esto se debe a que la caída de tensión es proporcional a la corriente y a la combinación de la resistencia y reactancia de la línea. Por lo tanto, mejorar el factor de potencia no solo optimiza el uso de la energía, sino que también contribuye a mantener niveles de tensión más estables a lo largo del sistema eléctrico.” (IEEE, 2014)

2.4 Caso práctico basado en condiciones reales

Se realizó un análisis de la calidad de la energía con la finalidad de detectar posibles áreas de mejora y ahorro dentro del sistema eléctrico de potencia. Para ello, se empleó un analizador trifásico de energía y calidad eléctrica Fluke 435 II (ver Figura 3), con el cual se registraron variables fundamentales que describen el comportamiento eléctrico del sistema.

Las representaciones mediante osciloscopio y diagramas fasoriales constituyen herramientas fundamentales para confirmar que tanto las conexiones de los conductores de tensión como las pinzas de corriente han sido realizadas correctamente. En el gráfico de vectores, las tensiones de fase y las corrientes correspondientes a las líneas A (L1), B (L2) y C (L3) deben disponerse en orden secuencial, describiendo una rotación en sentido horario, como se observa en la Figura 4.

Figura 3

Conexión del analizador al sistema de potencia trifásico.

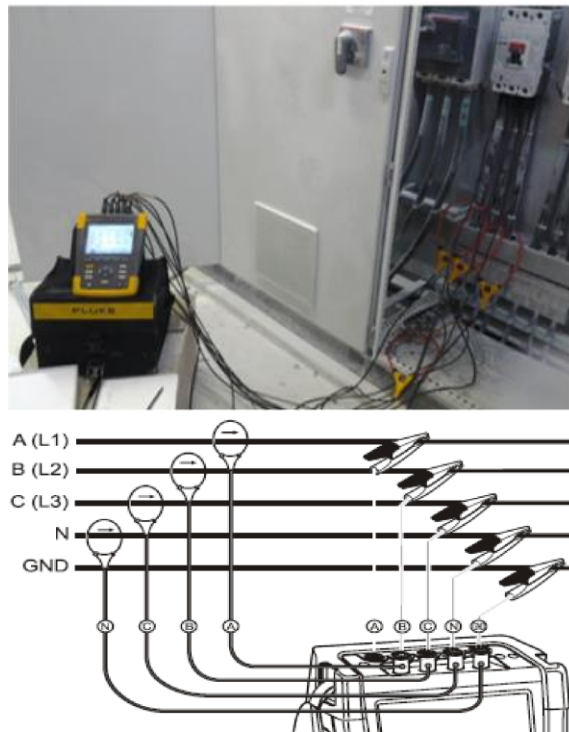
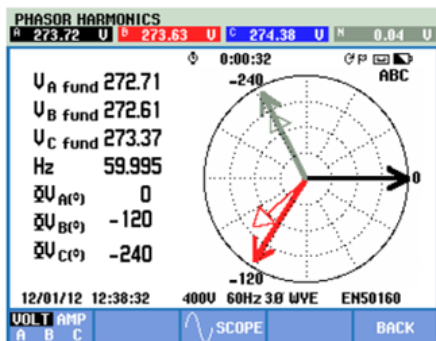


Figura 4

Diagrama de fasores correspondientes al analizador correctamente conectado.



El sistema en análisis está conformado por un motor de 150 HP operado mediante un variador de frecuencia ajustable de 18 pulsos (ver Figura 5 y 6).

Figura 5

Motor de 150 HP del molino Contraplex



A. Características del motor de 150 HP

El motor analizado en el estudio presenta las siguientes especificaciones técnicas:

- Potencia nominal: 150 HP
- Tensión de operación: 440 V
- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Factor de potencia ($\cos \phi$): 0.85
- Corriente nominal: 198 A
- Velocidad de rotación: 3580 rpm
- Salida del variador: Trifásica, con frecuencia ajustable de 0 a 320 Hz

Figura 6

Variadores de frecuencia Allen-Bradley PowerFlex 700 Hi Performance



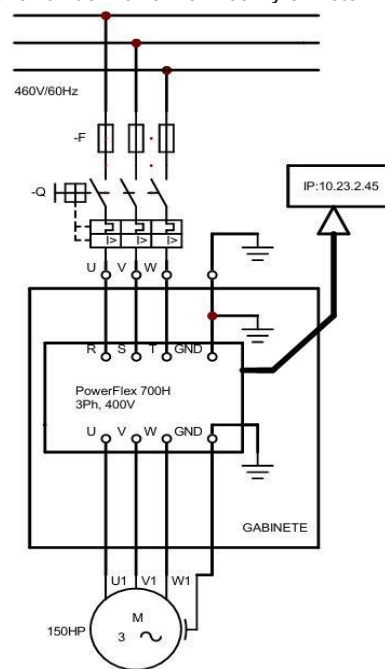
B. Variador de Frecuencia PowerFlex 700H – Datos Generales

Como parte del sistema de control de velocidad de motores de corriente alterna, se emplearon variadores de frecuencia de alto rendimiento, específicamente del modelo PowerFlex 700H de Allen-Bradley, los cuales se observan en la Figura 6.

- Fabricante: Allen-Bradley (Rockwell Automation)
- Serie: PowerFlex 700H (High Performance)
- Tipo: Variador de frecuencia de alto rendimiento para motores de corriente alterna
- Rango de potencia: Desde 125 HP hasta más de 1000 HP
- Tensión de alimentación: 400 V, 480 V, 600 V y versiones especiales hasta 690 V
- Frecuencia de salida: 0–400 Hz (en algunos modelos hasta 500 Hz o más)
- Tipo de control:
 - Control escalar (V/Hz)
 - Control vectorial sin sensor
 - Control vectorial con retroalimentación

Figura 7

Diagrama de conexión del PowerFlex 700H y el motor



El variador está diseñado para conectarse a una red trifásica de 400-460V/60Hz, con capacidad para controlar motores de 150HP, y permite integración en redes industriales mediante su dirección IP, Figura 7.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron mediciones en 23 condiciones distintas de operación, variando principalmente la velocidad de alimentación del molino y las revoluciones por minuto (RPM) del motor, sin que estas variables se registraran explícitamente en el artículo. El sistema analizado corresponde a un molino de piedra calcita,

cuyo motor de 150 HP es controlado mediante un variador de frecuencia de 18 pulsos.

Para la recolección de datos, véase la Tabla 2; se utilizó un analizador de calidad de energía Fluke 435 II, con el cual se monitorearon parámetros clave como la distorsión armónica de corriente (THDI), la potencia activa (kW), la potencia aparente (kVA), la potencia reactiva (kVAR), el factor de potencia verdadero (FPreal), la corriente RMS, y el factor de potencia de desplazamiento (FPD).

Al analizar los datos de la tabla 2, se observa una correlación inversa entre la carga activa (kW) y la distorsión armónica total de corriente (THDI). Por ejemplo, en la prueba 1, con una potencia activa de apenas 15.90 kW, el THDI alcanza un 80%, mientras que en la prueba 11, con 105.47 kW, el THDI disminuye a 34.5%. De manera similar, en la prueba 23, con 65.12 kW, el THDI se mantiene en un valor moderado de 46.3%. Este comportamiento se explica porque, al incrementarse la carga, el variador de frecuencia opera más cerca de su punto óptimo de funcionamiento, lo que reduce la proporción de armónicos respecto a la componente fundamental de la corriente. Asimismo, el variador de 18 pulsos utilizado en el sistema posee una topología que atenúa de manera efectiva los armónicos de bajo orden, como el 5° y 7°, especialmente cuando el equipo trabaja en condiciones de carga elevada. En contraste, cuando el sistema opera a cargas parciales, la corriente fundamental es menor y los armónicos representan un porcentaje mayor del total, lo que incrementa el THDI.

En todas las pruebas, el factor de potencia de desplazamiento (FPD) se mantuvo prácticamente constante en torno a 0.97. No obstante, el factor de potencia verdadero (FPreal) presentó variaciones significativas, lo cual refleja el impacto de los armónicos presentes en el sistema. Estos armónicos no son generados únicamente por el variador de frecuencia del motor, sino también por la variación de la carga mecánica del molino de piedra calcita y por las corrientes distorsionadas provenientes de otras cargas conectadas aguas abajo del Punto de Acoplamiento Común (PAC). Esta combinación de factores contribuye a una mayor distorsión armónica, que afecta directamente la eficiencia energética del sistema y subraya la importancia de evaluar el FPreal como indicador integral del desempeño eléctrico.

Tabla 2.
Lecturas correspondientes a las magnitudes eléctricas

N.º de Prueba	THDI %	KW	KVA	KVA _R	FPreal	I _{RMS}
1	80	15.9	20.9	2.86	0.76	28
2	55	31.66	36.9	6	0.86	47.2
3	51	39.29	44.8	6.98	0.88	57.5
4	54.2	41.33	47.2	7.87	0.87	66.32
5	94.7	11.27	15.8	1.28	0.7	26.31
6	73.6	22.02	27.5	3.3	0.8	33
7	75.8	13.5	18	1.8	0.76	22.04
8	68.3	21.5	26.9	3.87	0.8	34
9	47.9	50.3	56.2	9.18	0.89	73

10	40.5	57.3	63.7	10.82	0.89	80
11	34.5	105.4	114.	22.56	0.92	144
12	67.5	26.8	33.3	5.39	0.8	41
13	64.8	27.26	34.1	5.45	0.8	42
14	87	19.62	26.5	3.4	0.74	34
15	58.5	38.6	46.7	7.31	0.82	57
16	53	51.95	59.7	9.95	0.87	73.2
17	58.7	39.47	47.6	7.42	0.85	58.33
18	47.2	58.04	65.9	10.83	0.88	81
19	57	38.36	46.6	7.3	0.81	57
20	57.9	37.27	45.8	7.06	0.81	54.6
21	76.3	27.1	35.3	5.2	0.77	44
22	44	72	68.6	11.23	0.88	103
23	46.3	65.11	73.3	12.2	0.89	91.3

La Figura 8 muestra el espectro de armónicos correspondiente a la prueba 21, donde se evidencia una distorsión significativa, con un THDI del 76.3% y picos notables en los armónicos 5° y 7°. Esto confirma que, en condiciones de carga parcial, los armónicos representan una mayor proporción respecto a la componente fundamental, elevando el THDI y reduciendo el FPreal a 0.77, lo que refleja un bajo desempeño energético del sistema pese al uso de un variador de 18 pulsos.

Un sistema de alimentación alcanza su máximo rendimiento cuando las formas de onda de tensión y corriente son sinusoidales, están sincronizadas en fase y presentan equilibrio entre fases. Cualquier alteración respecto a estas condiciones óptimas conduce a una disminución en la eficiencia energética y, en consecuencia, a un aumento en el consumo de energía.

Figura 8
Medición del THDI y de armónicos 5th y 7th en la prueba 21

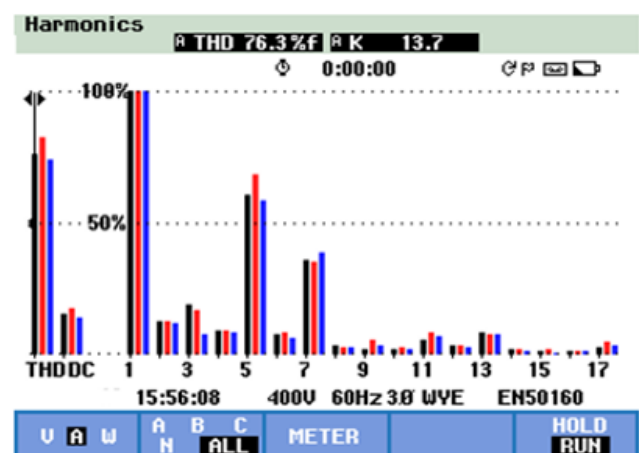
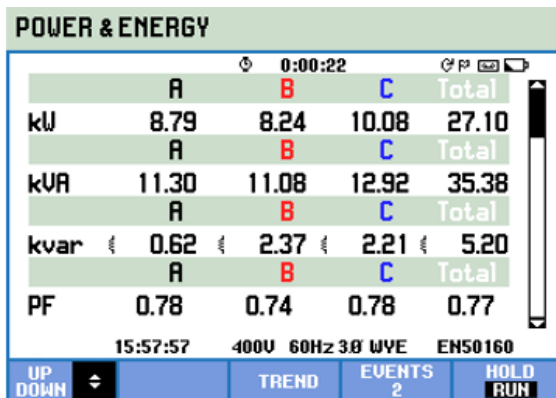


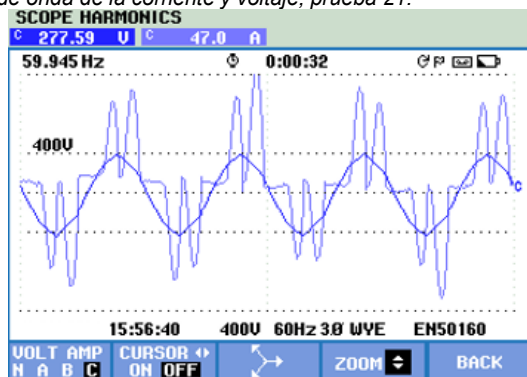
Figura 9
Mediciones de KW, KVA, KVAR y FPreal en la prueba 21



En la Figura 9 se presentan los valores medidos de potencia activa (kW), aparente (kVA), reactiva (kVAR) y el factor de potencia (PF) por fase, correspondientes a la prueba número 21. A pesar de que la potencia activa total registrada fue de 27.10 kW, la potencia aparente alcanzó los 35.38 kVA, lo cual indica un desempeño energético deficiente, evidenciado por un factor de potencia real (FPreal) global de solo 0.77. Esta diferencia señala una proporción considerable de componentes no activas, tanto reactivas como distorsionantes presentes en la corriente del sistema, lo que puede derivar en:

- Sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores (pérdidas por efecto Joule).
- Mal funcionamiento de equipos sensibles (ej. disparos intempestivos de protecciones).
- Resonancia en la red, amplificando distorsiones.
- Errores en mediciones de energía (los contadores convencionales pueden subestimar o sobrestimar).

Figura 10
Forma de onda de la corriente y voltaje, prueba 21.



Es importante señalar que el espectro de armónicos mostrado en la Figura 8, así como la forma de onda de corriente en la Figura 10, no corresponden directamente a la corriente del estator del motor de inducción, sino a la corriente total medida en el PAC del sistema. Esta corriente representa la combinación de todas las cargas conectadas aguas abajo del punto de medición, incluyendo la carga principal (motor de 150 HP) y cualquier otra carga activa durante la medición. Esta distinción es relevante

para interpretar correctamente el origen y magnitud de las distorsiones armónicas registradas.

Tabla 3.
Estimación del ahorro energético en cada prueba al reducir el THDI al 5% según (IEEE, 2014)

N.º de Prueba	Ahorro en I_{RMS} [%]	Ahorro en S KVA [%]	Ahorro en pérdidas ΔP [%]	Ahorro en caída de tensión ΔV [%]
1	23.7	22.4	39.4	24
2	13.77	12.2	22.42	16.39
3	12.27	10.44	18.96	15.20
4	20	10.56	20.8	22.62
5	44.98	26.94	48.6	43.85
6	14.22	18.11	32.86	15.77
7	19.82	21.9	38.16	19.41
8	18.5	18.08	32.86	20.02
9	11.4	8.44	16.9	14.27
10	8.36	8.39	16.9	11.32
11	5.96	5.45	11.43	8.90
12	15.9	17.66	32.86	17.4
13	16.56	18.3	32.87	18.06
14	25.82	24.17	42.5	25.6
15	13.05	15.61	29.64	15.19
16	8.84	10.95	20.795	11.83
17	13.12	15.33	27.90	15.44
18	8.0	9.9	18.96	11.07
19	13.59	15.84	29.63	15.71
20	12.36	16.85	31.34	14.3
21	20.92	21.64	37.95	21.71
22	10.51	9.96	18.96	13.5
23	8.42	9.23	17.11	11.5

La Tabla 3 consolida los resultados proyectados al simular una reducción del THDI al 5%, conforme a las recomendaciones del estándar IEEE Std 519-2014. Esta reducción fue evaluada en 23 condiciones distintas de operación, reflejando mejoras significativas en cuatro indicadores eléctricos fundamentales: corriente RMS, potencia aparente (kVA), pérdidas activas (ΔP) y caída de tensión (ΔV).

Uno de los hallazgos más relevantes es que los ahorros en corriente RMS (IRMS) alcanzan hasta un 44.98% (prueba 5), lo que implica una disminución notable en la exigencia de conducción para cables, transformadores y dispositivos de protección, mejorando la confiabilidad del sistema. Este valor coincide con la prueba de menor FPreal en condiciones de alta distorsión armónica (ver Tabla 2), lo cual valida la correlación entre armónicos y eficiencia operativa.

En cuanto a la potencia aparente (S), se observan reducciones de hasta el 26.94% en los casos más críticos. Esto tiene implicaciones económicas directas, ya que la demanda de potencia aparente impacta en la facturación eléctrica en sistemas industriales con cargos por demanda máxima. Esta disminución refleja una optimización en el uso del sistema de distribución, liberando capacidad útil para otras cargas o para expansión futura sin necesidad de sobredimensionamiento.

Respecto a las pérdidas de potencia activa (ΔP), el ahorro más alto registrado fue del 48.6% en la prueba 5, siendo este el indicador de mayor impacto económico. Una reducción de esta magnitud representa una mejora sustancial en la eficiencia energética, directamente traducible en menores consumos de energía y, por tanto, en una disminución de los costos operativos.

En el caso de la caída de tensión (ΔV), los valores proyectados muestran mejoras de hasta 43.85%, lo cual es particularmente relevante en sistemas donde la estabilidad del voltaje es crítica para la operación de equipos sensibles o de procesos automatizados. Reducir la caída de tensión contribuye a mantener dentro de especificaciones los niveles de voltaje entregados a las cargas, mejorando la calidad de servicio y prolongando la vida útil de los equipos.

Un aspecto notable es que, incluso en pruebas con menor distorsión inicial, como la 11 y 10, se obtienen mejoras modestas (por ejemplo, 5.96% en IRMS y 11.43% en ΔP para la prueba 11), lo cual demuestra que la instalación de sistemas de mitigación de armónicos puede ser beneficiosa en prácticamente cualquier condición de operación.

A. Discusión

El impacto de los armónicos en el factor de potencia y las pérdidas energéticas en sistemas eléctricos industriales se ha identificado como un problema crítico, especialmente con el uso extendido de cargas no lineales como variadores de frecuencia, rectificadores y sistemas UPS (Blanco et al., 2020; IEEE Std 3002.8-2022). En este estudio se analizó un caso real en el que se evaluó el comportamiento de un motor de 150 HP operado mediante un VFD de 18 pulsos, enfocando la comparación entre el factor de potencia de desplazamiento (FPD) y el factor de potencia verdadero (FPreal).

A pesar de que el FPD se mantuvo en torno a 0.98 durante todas las mediciones, el FPreal se vio significativamente reducido en presencia de distorsión armónica, evidenciando pérdidas de energía adicionales no detectables con un análisis tradicional. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Emanuel (1999) y Baggini (2008), quienes destacan que la potencia de distorsión afecta directamente la eficiencia del sistema y que el análisis del FPreal es esencial para una evaluación completa.

El incremento en la corriente RMS debido a armónicos también provocó un aumento en las pérdidas por efecto Joule y en la caída de tensión en líneas, lo que incrementa los costos operativos (Arrillaga et al., 2018; Glover et al., 2012). La simulación de una reducción del THDI al 5% mediante filtrado armónico —como lo recomienda el IEEE Std 519-2014— mostró una mejora proyectada del FPreal de hasta 0.97 y una reducción en las pérdidas energéticas superiores al 40% en ciertos escenarios. Estas observaciones refuerzan la necesidad de implementar estrategias de mitigación como filtros activos o pasivos (González, López & Martínez, 2021).

Los armónicos no solo disminuyen la eficiencia energética, sino que también limitan la capacidad de evaluación correcta del rendimiento energético si se emplean indicadores tradicionales. El uso del factor de potencia verdadero y el cumplimiento de normas como la IEEE Std 1459-2010 proporcionan un enfoque más adecuado para el análisis de calidad de la energía en entornos industriales.

IV. CONCLUSIONES

1. El factor de potencia verdadero (FPreal) es un indicador esencial para evaluar correctamente la eficiencia energética en sistemas industriales con cargas no lineales. En todos los escenarios evaluados, el factor de potencia de desplazamiento (FPD) se mantuvo cercano a 0.97, lo que podría sugerir un sistema eficiente. Sin embargo, el FPreal fue significativamente más bajo (hasta 0.70 en algunos

casos), revelando pérdidas ocultas causadas por distorsión armónica.

2. Los armónicos, medidos mediante el THDI, mostraron valores de hasta 95%, indicando una grave degradación en la calidad de la energía. Este nivel de distorsión no solo reduce el FPreal, sino que también incrementa considerablemente la corriente RMS, generando pérdidas por calentamiento en conductores, mayor caída de tensión y riesgos operativos en los equipos.
3. El análisis proyectado de mitigación, mediante la reducción del THDI al 5% (en línea con IEEE Std 519-2014), demostró una posible mejora del FPreal a valores superiores a 0.95, además de una reducción de hasta 48.6% en pérdidas energéticas, mejoras en la caída de tensión y disminución en la demanda de potencia aparente.
4. En términos económicos y operativos, estos resultados sugieren que la instalación de filtros armónicos (activos o pasivos) no solo mejora la calidad de la energía, sino que se traduce en ahorros energéticos cuantificables, una vida útil prolongada de los equipos, y una operación más estable del sistema eléctrico.
5. El estudio reafirma la importancia de aplicar un análisis completo de calidad de energía en plantas industriales, adoptando indicadores integrales de desempeño eléctrico, como el FPreal, implementando estrategias de mitigación de armónicos, y alineando el sistema con las normas internacionales (IEEE Std 1459-2010 y IEEE Std 519-2014).

V. AGRADECIMIENTOS

Queremos manifestar nuestro agradecimiento al TecNM, al Instituto Tecnológico Superior de Lerdo y al IT de La Laguna, cuyo apoyo institucional y académico fue clave para hacer posible esta investigación. La confianza depositada en nuestro trabajo, así como las condiciones brindadas para su desarrollo, fueron aspectos determinantes para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

Asimismo, hacemos extensivo nuestro reconocimiento a todas las personas que colaboraron activamente en la realización de este proyecto, en especial a la empresa que confió en nuestro equipo para llevar a cabo la investigación del sistema de potencia. Su colaboración y asesoría técnica fueron esenciales para el cumplimiento de los objetivos planteados.

También, agradecemos a nuestros colegas por sus valiosos aportes y retroalimentación a lo largo del proceso, así como al Departamento de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) del ITS de Lerdo por su continuo apoyo.

VI. REFERENCIAS

- Arrillaga, J., Watson, N. R., & Chen, S. (2018). Power system quality assessment (2nd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/en-us/Power%2BSystem%2BQuality%2BAssessment-p-9780471988656>
- Baggini, A. (2008). Handbook of power quality. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470754190>
- Blanco, A. M., Fernández, A., & García, J. (2020). Harmonic distortion in modern industrial power systems: Sources and impacts. IEEE Transactions on Industry Applications, 56(3), 2105-2114. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2979878>

- Bollen, M. H., & Hassan, F. (2011). Integration of distributed generation in the power system. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118029022>
- Emanuel, A. E. (1999). Apparent power definitions for three-phase systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 14(3), 767-772. <https://doi.org/10.1109/61.772313>
- González, R., López, C., & Martínez, P. (2021). Active harmonic filters for energy efficiency in industrial motors. Energy Conversion and Management, 231, 113876. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113876>
- Glover, J. D., Overbye, T. J., & Sarma, M. S. (2012). Power system analysis and design (5ª ed.). Cengage Learning. <https://faculty.cengage.com/titles/9780357676189>
- IEEE Power & Energy Society. (2022). IEEE Standard 3002.8-2022: Recommended practice for harmonic control in industrial power systems. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9853993>
- IEEE Standards Association. (2010). IEEE Std 1459-2010: Definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439143>
- IEEE. (2014). *IEEE Std 519-2014: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- Santos, D., Ribeiro, E., & Carvalho, A. (2023). True power factor in non-linear loads: A review of measurement methods. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 145, 108632. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108632>