

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

Behavior of power quality employing industrial electric motor drives.

Luis Gerardo Garza Reyes¹
Luis Alonso Trujillo Guajardo²
Paz Vicente Cantú Gutiérrez³

RESUMEN

Los variadores de frecuencia han traído consigo una serie de ventajas en el control de motores eléctricos para solventar las actividades humanas en el sector industrial. Sin embargo, los variadores de frecuencia son considerados dispositivos de electrónica de potencia en el que, por su construcción, inyectan armónicos distorsionando las señales instantáneas en la red. Se realiza el estudio de la calidad de la energía eléctrica en una instalación tipo industrial utilizando un variador de frecuencia marca weg a un motor eléctrico de baja tensión ac empleando la herramienta de simulación “easy power” y, siguiendo el estándar de calidad ieee estándar 519 – 2014, se determina la afectación a la red eléctrica y las posibles soluciones.

PALABRAS CLAVES: Variadores de frecuencia, Calidad de la energía, Armónicos, Easypower, señales instantáneas.

Fecha de recepción: 30 de noviembre, 2022.

Fecha de aceptación: 27 de junio, 2023.

¹ Estudiante de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. gerardo.garzarays@uanl.edu.mx

² Profesor Investigador de la Maestría en Ingeniería con Orientación en Eléctrica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. luis.trujillojgr@uanl.edu.mx

³ Jefe de Departamento de Iluminación y Alta Tensión de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, 66455 San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. paz.cantugt@uanl.edu.mx

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

ABSTRACT

The variable frequency drives have brought a series of advantages in the control of electric motors to solve and make easy some human activities in the industrial sector. However, the frequency converters are power electronics devices in which, due to their construction and operation, inject harmonics to the electric network, distorting the instantaneous voltage and current signals. The study of the quality of electrical energy in an industrial type installation is carried out using a weg brand frequency inverter to a low voltage ac electric motor using the "easy power" simulation tool and following the ieee standard 519 quality standard. – 2014, the affectation to the electrical network and the possible solutions are determined.

KEYWORDS: Variable Frequency Drive, Power Quality, Harmonics, Easypower, instantaneous signals.

INTRODUCCIÓN

A través de los años, la demanda eléctrica ha ido en incremento permitiendo satisfacer las actividades humanas en cualquier ámbito a nivel mundial. En cambio, el sector industrial, ha requerido de la demanda eléctrica y de la continuidad del suministro para solventar las actividades laborales. No sólo la demanda, sino también en el control eléctrico, con el fin de adaptar la energía a las necesidades de distintos tipos de cargas empleadas.

Por otro lado, los motores eléctricos, han sido de gran importancia en los últimos años, dando un gran impacto de ese sector permitiendo un sostenimiento en la productividad y crecimiento económico. En dicho sector, someten a estos motores eléctricos a velocidades variables, provocando así su corta vida de operación, así como también en el consumo de energía. Es por eso que se aplican los variadores de frecuencia o de velocidad.

Los variadores de frecuencia (Variable Frequency Drive, VFD) o velocidad son precisamente aquellos dispositivos de electrónica de potencia que permiten dar un control de velocidad, torque y la dirección de giro de los motores eléctricos, además, de permitir un adecuado funcionamiento del proceso donde es aplicado este tipo de sistemas.

Sin embargo, a pesar de las ventajas que se obtienen en relación operativa de la máquina eléctrica, su diseño y operación es el causante de la alteración de las señales instantáneas de voltaje y corriente en el lado de suministro de energía hacia el VFD.

Principio de funcionamiento.

Estos dispositivos electrónicos son denominados variadores de velocidad (o de frecuencia) debido a que ambos parámetros están muy ligados respecto a la operación de un motor eléctrico de corriente alterna (AC). El autor Arana (2017) menciona que “La frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que, al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje” [1].

Explica que, los variadores “mantienen la razón Voltaje / frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimos y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de la salida del motor” [1].



Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

Estructura.

Todos los variadores de frecuencia o de velocidad, tienen un circuito interno, en el que consiste en transformar la señal AC a DC (empleando un puente rectificador de diodos y filtros capacitivos que permiten suavizar la señal) y a su vez una transformación de esa señal rectificada a una señal sinusoidal (empleando un inversor con transistores llamados “IGBT’s”) [1]. En la siguiente imagen (Figura #1) se muestra la estructura interna de un variador de frecuencia (drive).

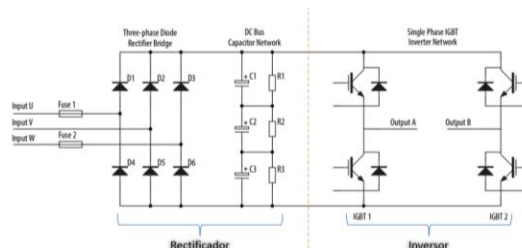


Figura #1. Estructura interna de un variador de frecuencia de media tensión del modelo PowerFlex 6000 [7].

Los VFD's tienen una gran amplia gama de variedades en las que se emplean dependiendo de la aplicación que se le dé al motor eléctrico.

Tipos de variadores.

Existen variadores que se aplican en motores de corriente alterna (AC) en media y baja tensión, así como también en motores de corriente directa (DC). Se emplean dependiendo de las aplicaciones que se deseen operar y de las características (placa de datos) que posea el motor.

a. VFD's de AC: Controlan los parámetros exclusivamente a motores de AC, se categorizan principalmente por dos tipos: Variador de frecuencia de voltaje de entrada (Permite transformar una nueva tensión AC mediante la introducción de una serie de onda cuadrática a diferentes voltajes [2]) y el Variador de frecuencia de fuentes de entrada (Tipo de variador de frecuencia en el que fuerzan una onda cuadrática de corriente en oposición a la tensión. Este tipo de variadores requieren de un gran inversor para mantener constante la corriente [2])

b. VFD's de DC: La diferencia que se tiene ante un Variador de AC es que los circuitos de derivación y los inductores se encuentran por separado, además de que en este tipo de variador en DC se adapta a cualquier aplicación, el detalle que se tiene es debido al gran presupuesto que se requiere invertir para su implementación, sin nombrar el mantenimiento costoso que se le debe de dar a los motores de DC. Son los primeros variadores que se han aplicado en el sector industrial [2].

c. VFD's de ancho pulso modulado (PWM): Los PWM son los más empleados debido a que permite al motor ser más eficiente, ya que permite controlar la frecuencia de la tensión de salida. Rihuae explica que se compone de transistores que conmutan la corriente directa a diferentes frecuencias y por lo tanto ofrecen una serie de pulsos voltaje al motor. [2]

Ventajas y Desventajas.

Se tienen más ventajas en el empleo de estos variadores en los motores, Arana menciona las siguientes ventajas refiriéndonos a los variadores en AC: Arranques suaves, progresivos y sin saltos; Limita la corriente de arranque; Protege al motor en la detección y control de la falta de fase a la entrada y salida de un equipo; Permite el control de rampas de aceleración y desaceleración regulables del equipo; Permite dar un ahorro de energía cuando el motor esté en funcionamiento parcialmente cargado, con acción directa sobre el factor de potencia; Puede controlarse directamente a través de un autómata o microprocesador; Permite ver las variables de tensión, velocidad, frecuencia, etcétera. [1]

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

Las desventajas en el uso de estos variadores en los motores, por lo general, es demasiado costoso y se requiere de la revisión de la ficha técnica de la máquina eléctrica para la selección adecuada del variador. Tales como: tensión nominal, corriente nominal, tipo de aislamiento, factor de servicio, eficiencia, velocidad y frecuencia, así como también del estudio de las especificaciones del fabricante. A pesar de que en DC se tiene las mismas ventajas, su funcionamiento es lo que lo diferencia de la corriente alterna, ya que en DC lo que se controla es la velocidad, voltaje en terminales y la manipulación de las corrientes de campo.

En conclusión, los Drives modifican la relación de voltaje/frecuencia del motor, son empleados debido a las necesidades de control hacia la máquina y forman parte de la electrónica de potencia, capaces de dosificar correctamente la energía suministrada al proceso industrial [5]. Sin embargo, como se ha mencionado, el empleo de los variadores de frecuencia provoca distorsiones en las señales instantáneas en la red, debido a su construcción. Aplicarlos implica un impacto significativo en la calidad de la energía debido a que los drives son considerados como cargas no lineales por la modificación de éste parámetro, además en la calidad del suministro.

FUNDAMENTOS TEORICOS

Calidad de la energía.

Diversos autores han determinado que el concepto de "Calidad de la energía" no existe una definición como tal. Harpez (1999) menciona en su libro *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica* como "una ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltaje rms suministrado al usuario" [3]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) menciona dos definiciones al concepto de la calidad de la energía: Haciendo énfasis a las señales instantáneas.

1.- "El concepto de mantener formas de onda y frecuencia de voltaje y corriente apropiadas en sistemas de transmisión, distribución y generación, y generalmente se entiende como formas de onda distorsionadas y balanceadas" [6].

2.- "Una medida de un suministro eléctrico para satisfacer las necesidades de una determinada aplicación de equipo eléctrico. Tal como lo entrega la empresa de servicios públicos, la calidad de la energía es la fidelidad del voltaje de línea para mantener una forma de onda sinusoidal en el voltaje y la frecuencia nominales" [6].

Otra definición es la que menciona Kennedy en su libro *Calidad de la energía (Power Quality)*, que nos presenta el concepto de "problema de calidad de la energía" y lo define como: "cuando la onda sinusoidal en 60 Hz de la fuente de energía de voltaje alterno está distorsionada" [4]

Armónicos

Parámetro que genera inestabilidad en las señales instantáneas en la red, y esto es debido al suministro eléctrico que se les da hacia los dispositivos electrónicos por ser cargas no lineales. Precisamente los dispositivos electrónicos o también denominados cargas no lineales, son la principal causa de las distorsiones que ocurren en las señales instantáneas de voltaje y corriente. Por su diseño, estos provocan la inyección de armónicos dando como resultado la perturbación de las señales que da el suministro y hacia las cargas. (Figura #2). Es entonces que todo equipo que tenga fuentes conmutadas, rectificadores, inversores, etc., se caracterizan como cargas no lineales. Los armónicos son aquellos voltajes y corrientes sinusoidales que tienen frecuencias que son múltiplos de la frecuencia fundamental del sistema eléctrico (Figura #3). Estos se originan por las características no lineales de los dispositivos y cargas no lineales en la red eléctrica. [8]

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

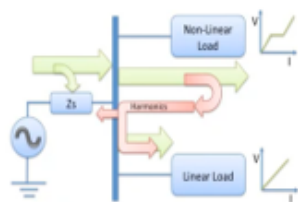


Figura #2. Dibujo esquemático de la inyección de armónicos de una carga no lineal hacia el suministro y a otras cargas [8]

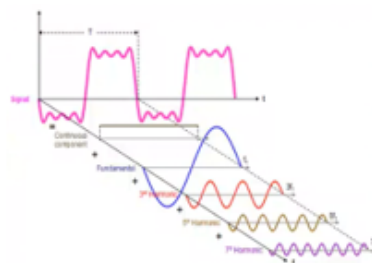


Figura #3. Ejemplo de una señal distorsionada medida con armónicos y su descomposición [8]

Estos múltiplos de la frecuencia fundamental pueden representarse mediante gráficos y, por ende, posible de obtenerlos mediante la aplicación de la Serie de Fourier (Ecuación #1). Como menciona Pinyol: "Cualquier señal periódica compleja, regulares e integrables, se puede obtener de la suma de diferentes ondas sinusoidales "puras" de diferentes frecuencias y amplitudes, múltiplos de la frecuencia fundamental" [8]. Y se puede representar como:

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^N A * \sin(hwt + \theta)$$

Ecuación 1. Serie de Fourier [8]

Índices de calidad de la energía.

Dentro del estudio de armónicos en la calidad de la energía existen índices en el que permiten determinar qué tan mala es la señal en el suministro que pueden afectar a los equipos, esto empleando equipos de monitoreos que lo determinan. Todos los índices de la calidad de la energía y los equipos de monitoreo se rigen bajo la normatividad "Código de red de interconexión" (Standard IEEE – 519 - 2014) para calidad de la energía. A continuación, se clasifican ciertos tipos de índices de calidad de la energía que más destacan regidos por el Estándar IEEE – 519 – 2014 sección "Calidad de la energía":

Distorsión Armónica Total (% THD): Índice más utilizado que permite describir los problemas de calidad de la energía en sistemas de transmisión y distribución. Aquí se considera la contribución de cada armónico individual en la señal. Se definen tanto para señales de voltaje y corriente (Ecuación #2) [10]. Se define como la relación entre el valor eficaz de todos los armónicos y el valor eficaz de la frecuencia fundamental [10].

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad THD = \frac{\text{Valor rms de la distorsión}}{\text{Valor rms de la fundamental}}$$

Ecuación 2. Distorsión Armónica Total de corriente y voltaje, ecuaciones representativas [10]

Espectro Armónico: En el estudio de armónicos en la calidad de la energía es posible obtener información denominados "espectros de magnitud armónica" (Figura #4), y pueden ser de tipo voltaje y corriente. La obtención de la señal de este tipo es por medio de una transformada rápida de Fourier y los equipos de monitoreo que miden la calidad de la energía traen consigo esta programación. La Transformada rápida de Fourier permite transformar de una señal sinusoidal fundamental y sus múltiplos (dominio del tiempo) en un gráfico de barras representativo denominado espectro de frecuencia (dominio de la frecuencia).



Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

Hablar sobre la calidad de la energía es de gran importancia debido a que los usuarios de alrededor del mundo emplean dispositivos electrónicos. Kennedy expone que desde la década de los 70's ha ido en incremento de los costos ocasionados por la calidad de la energía (Figura #5) y es "por causa de las distorsiones armónicas que inyectan los dispositivos electrónicos" [4].

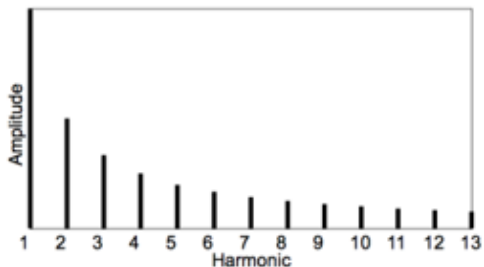


Figura #4. Espectro armónico de las amplitudes de los armónicos normalizados. [11]

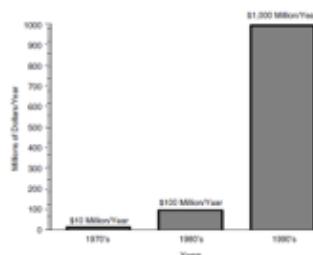


Figura #5. Incremento en el costo de la calidad de la energía entre las décadas 70's & 90's en Estados Unidos. [4]

JUSTIFICACIÓN

Los variadores de frecuencia son considerados cargas no lineales por su construcción. Estos inyectan armónicos provocando una perturbación de las señales instantáneas.

El propósito de este tema de investigación es demostrar qué tanto se mejora o afecta la calidad de la energía en el suministro eléctrico empleando un variador de frecuencia de la marca WEG con el fin de determinar si, los valores de armónicos obtenidos, se encuentran dentro de la estandarización IEEE 519, configurándolo acorde a la ficha de datos del fabricante.

METODOLOGÍA

Se llevará a cabo un caso de estudio utilizando un diagrama eléctrico industrial (Figura #6) en que en él se analizará la calidad de la energía de la red, utilizando la herramienta computacional llamada EASY POWER. [13].

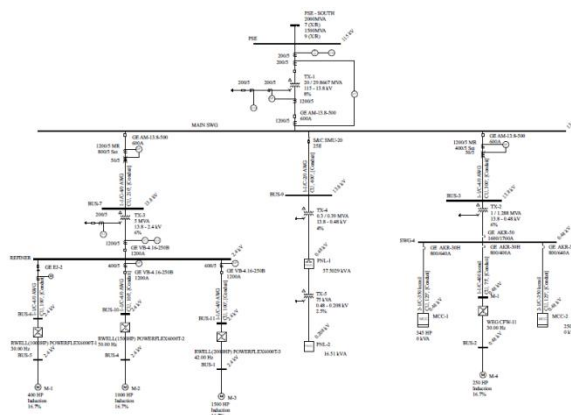


Figura #6 Diagrama eléctrico industrial a analizar los armónicos [13]

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

Consistirá la simulación de un escenario en baja tensión configurando el drive a un PWM del 75% de carga, con la finalidad de demostrar la alteración de los parámetros de la frecuencia de salida del variador, además, de modificar el porcentaje de carga PWM que configurará el drive al motor. Todo acoplándolo a su nivel de tensión y parámetros nominales. Por temas de simulación, se realizará la modificación de la carga (motor) al escenario definido. Además, de demostrar qué tanto se perturba la red eléctrica sometiendo al drive a cambios constantes de la frecuencia de salida. Se utilizará, además, la herramienta computacional “MATLAB” para el sencillo empleo de cálculos y la obtención de gráficos de las señales armónicas.

Definición del escenario de análisis.

El sistema eléctrico tomado de la librería de EASY POWER está configurado a un sistema nominal a 60 Hz, teniendo un sistema base de 10 MVA. La acometida de la red está definido a un valor de 115 kV, transformando la tensión a 13.8 kV y posteriormente a una baja/media tensión en la carga hasta los 0.48 kV y los 2.4 kV. Se enfocará el estudio de la calidad de la energía empleando un variador de frecuencia al motor de baja tensión (0.48 kV). Para el estudio de armónicos no es necesario tomar en cuenta el sistema de protección del sistema, debido a que los armónicos no infieren o alteran a los elementos de protección. El motor que se aplicará en el escenario tendrá los parámetros mencionados en la Tabla #1 [13].

Tabla 1. Placa de datos del motor a baja tensión [13]

Motores BUS SWG-4 @ 480 V	Potencia (HP)	FLA (A)	KVA	PF	Eff
M4	250	310	246.99	0.82	0.91

Se empleará el variador de frecuencia marca WEG (Figura #7) definida a su nivel de tensión. Adaptada de acuerdo con el nivel de tensión del motor (Tabla #2).

Tabla 2. Placa de datos WEG modelo CFW11-0370 T 4 [9]

Marca	WEG
Modelo	CFW11-0370 T 4
Tipo	Variador de frecuencia de seis pulsos
Rangos	480 V (Tensión máxima) No más del -15% & +10% de la nominal como tolerancia.
Potencia (Hp)	300
Aplicación típica	Para motores de inducción. Uso con régimen de sobrecarga nominal (ND)
Frecuencias (Hz)	50/60
Factor de potencia (%)	94
Eficiencia (%)	97



Figura #7. Variador AC de baja tensión modelo CFW11-0370 T 4, marca WEG [9]

El caso de estudio tendrá las siguientes especificaciones, mostradas en la Tabla #3 [13].

Tabla 3. Escenario. Parámetros al drive de baja tensión [13]

DRIVE OPERANDO			
Motor	Potencia del drive (Hp)	Frecuencia de salida (Hz)	PWM (% load)
M4	300	30	75

Modificando las cargas por debajo del 100% (condiciones nominales) se consigue un bajo factor de potencia, pero manteniendo la eficiencia. (basándose en las curvas de % Eficiencia vs. % Carga exclusivamente al 75% Figura #8). Por ende, se realizarán modificaciones a la carga y al factor de potencia @ 75% como indica la Tabla #4. [12]



Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

- CONFIGURACIÓN DE LA CARGA (MOTOR) @ 75%

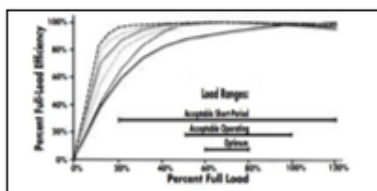


Figura #8. Curvas de porcentaje de eficiencia contra porcentaje de carga [12]

Tabla 4. Asignación de parámetros @ 75% de carga [12]

MOTOR	FLA @ 75% LOAD	kVA @ 75% LOAD	PF @ 75% LOAD	Eff @ 75% LOAD
M4	232.5	185.2425	0.615	0.91

Se insertan los variadores de frecuencia entre el alimentador y la carga (motor) y se procede a insertar las especificaciones de datos. En EASY POWER se determina el número de armónico para el drive de 6 pulsos y, además, el porcentaje de corriente armónica. Para definir el porcentaje de corriente armónica al sistema se aplicará desde la librería de EASY POWER PWM's al 100% y 65% de carga (Tabla #5) para lograr determinar el PWM al 75% de carga. Esto con el propósito de definir al escenario a un caso a lo más fidedigno posible. [13]

Tabla 5. Valores de drives tipo industrial. PWM del 100% hasta el 14% de carga, obtenido de la librería de EASY POWER [13]

PWM %load / n	1	2	3	4	5	6
100	37	22	11	8	5	4
65	39	20	10	9	5	5
42	47	19	7	11	5	5
37	48	27	12	8	7	6
26	60	33	9	9	6	5
14	70	44	10	9	9	5

Se requiere obtener los valores de PWM @ 75% de carga. Por ello se aplican la interpolación entre los valores del 100% y 65% de carga (Tabla #6).

Tabla 6. Valores de PWM del 75% de carga para el escenario.

PWM %load / n	1	2	3	4	5	6
100	37	22	11	8	5	4
75	38.42	20.57	10.28	8.71	5	4.71
65	39	20	10	9	5	5

Para determinar el número de armónicos es importante determinar el número de pulsos que tienen los drives. Se sabe que el drive a implementar para baja tensión es de la marca WEG del modelo CFW-11-0370 T 4 de 6 pulsos. Se implementa una ecuación en que determina dichos números:

$$\text{Número de armónico} = (P) * n \pm 1$$

Donde P es el número de pulsos del drive y n es el orden del armónico (1, 2, 3...). En cada operación contiene dos resultados, por lo tanto, se aplicará tres veces la ecuación para obtener los seis resultados (Tabla #7), esto acorde al porcentaje de corriente armónica previamente obtenida.



Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

Tabla 7. Número de armónicos pertenecientes al drive WEG de 6 pulsos

# Pulsos / n	1	2	3	4	5	6
6	5	7	11	13	17	19

Por lo tanto, se procede a insertar los valores obtenidos al drive de 6 pulsos acorde al escenario (Figura #9) definido con su respectivo porcentaje de corriente armónica.

	Harmonic Number	Harmonic Current%	Current Angle
1	5	38.42857	0
2	7	20.57143	0
3	11	10.28571	0
4	13	8.714286	0
5	17	5	0
6	19	4.714286	0

Figura #9. Configuración de armónicos al drive de 6 pulsos.

Finalmente, se modificará el parámetro de la corriente fundamental para el drive. De los datos insertados muestra al 100% de carga acorde a la potencia definida en el drive, por ende, hay que modificarlos para el 75% (empleando regla de tres simple). Con los datos y parámetros definidos para cada Escenario, se procede a utilizar una función del Easy Power llamada "Harmonics" en la que analizará la inyección de armónicos del VFD a la red. Se llevará a cabo el análisis de corriente (conductor del M4) y voltaje (bus SWG-4). Se obtiene el espectro armónico del BUS SWG-4 y del conductor que alimenta al Motor (Figura #10).

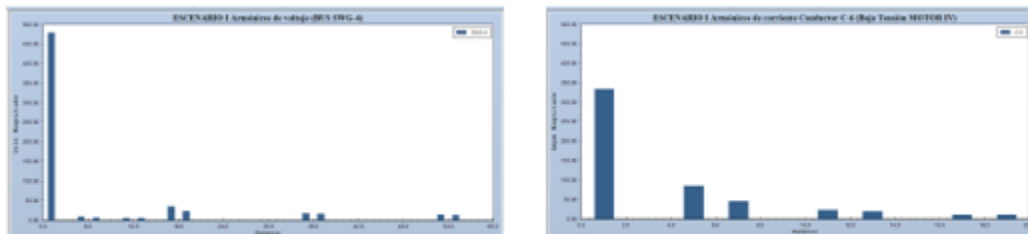


Figura #10. Espectro armónico de voltaje obtenido en Easy Power medido en el BUS SWG-4 y de corriente del conductor C-6 [13]

Inyección de armónicos obtenidos.

Tabla 8. Inyección de armónicos que recibe el BUS SWG-4 (Voltaje) y del Conductor de baja tensión C-6 (Corriente) [13]

HARMONIC	VOLTAGE	AMPS
1	480	335
5	8.71764	85.08981
7	6.52834	45.55019
11	5.12649	22.77548
13	5.13258	19.29612
17	35.36714	11.07739
19	22.95427	10.44306
35	17.86432	0.00645
37	16.07084	0.00614
50	13.82033	0.00756

Empleando la herramienta de cálculo computacional MATLAB se grafican los armónicos obtenidos en el caso de estudio previamente expuestos (espectros armónicos) [Tabla #8]. Se insertan los datos



Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

de las amplitudes (Voltaje y corriente) y, además, la fórmula de la Serie de Fourier para llevar a cabo la obtención de la señal al dominio del tiempo. Se define la frecuencia nominal a 60 Hz y posteriormente se inserta el valor de ω_0 , que por definición es: $\omega_0 = 2\pi f$

Donde ω_0 es la frecuencia angular y f es el valor de la frecuencia del sistema (nominal).

Se definen los ángulos a 0° , ya que no se considerará los desbalances que puedan existir en el sistema. Después se inserta el valor de los armónicos de 6 pulsos definido como vector. En MATLAB, definir vectores es insertar los valores entre corchetes, como se muestra en lo siguiente:

$$h = [1 \ 5 \ 7 \ 11 \ 13 \ 17 \ 19 \ 35 \ 37 \ 50]$$

En seguida, se programa la cantidad de número de ciclos que se desean simular para determinar el comportamiento de la onda a un determinado número de ciclos y la resolución de la señal.

```
%% Valores por ciclos
c=input('¿Ciclos totales de la señal?: ');
res=input('Resolución de la señal: '); %256 muestras por ciclo
```

Posteriormente se define las muestras totales por señal, la frecuencia de muestreo, el periodo de muestreo mediante la siguiente codificación.

```
mx=res*c; %Muestras totales por señal
Fsr=res*f; %Frecuencia de muestreo
Tsr= 1/Fsr; %Periodo de muestreo
%% Cantidad de ciclos de la señal
%x=; %Número de ciclos
Lx = mx; %Longitud de la señal
%t=0: Tsr: ((c/60));
t = (0:Lx-1)*Tsr;
```

Se aplica la ecuación de la Serie de Fourier para cada armónico insertado en el MATLAB. Como en el sistema no hay ningún componente de DC, entonces $C_0 = 0$. Por ende la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$f(t) = \sum_{n=1}^N A * \sin(hwt + \theta)$$

Quedando en el MATLAB lo siguiente:

$$f1(t) = A_1 * \sin(h(1,1) * \omega_0 * t + ang1); f5(t) = A_5 * \sin(h(1,2) * \omega_0 * t + ang5); \dots; f50(t) = A_{50} * \sin(h(1,10) * \omega_0 * t + ang50);$$

Donde h se inserta el valor del vector a la ecuación (para el armónico 1 se inserta el valor de la fila 1 columna 1, para el armónico 5 se inserta el valor de la fila 1 columna 2...) refiriéndose al armónico. Aplicada la Serie de Fourier para cada armónico a analizar se procede a realizar la sumatoria del resultado de cada armónico.

$$f(t) = \sum f1(t) + f5(t) + f7(t) + \dots + f50(t)$$

Por temas de resolución, se insertarán los datos a 3 ciclos y a 256 muestras por ciclo para obtener la señal armónica lo más visible posible.

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

OBTENCIÓN DE GRÁFICOS AL DOMINIO DEL TIEMPO.

Armónicos de voltaje BUS SWG-4

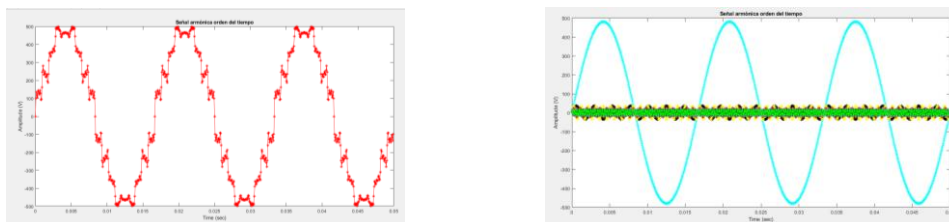


Figura #11. Señal general y armónicas obtenidas del BUS SWG-4 [13]

Armónicos de corriente. CONDUCTOR BAJA TENSIÓN.

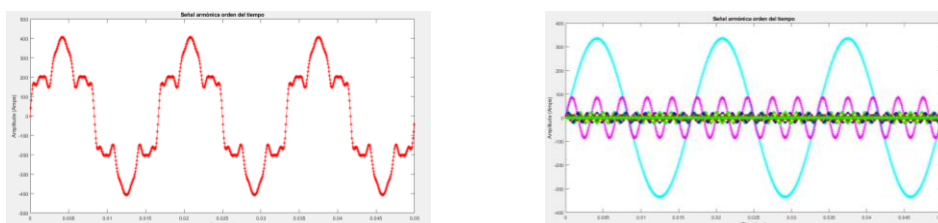


Figura #12. Señal general y armónicas del conductor del motor de baja tensión [13]

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con la obtención de las señales armónicas al dominio del tiempo (Figuras #11 y #12) se puede observar que sí existe una distorsión armónica en la red en la que se ven perturbadas las señales instantáneas de corriente (conductor) y voltaje (bus). Además, que, en la red, hubo un cambio en el nivel de tensión en el que si disminuimos la frecuencia de salida del drive existe una disminución en el nivel de tensión y un aumento en el nivel de corriente y viceversa (Tabla #9), manteniendo así la potencia en la flecha del motor (carga) [Figura #13].

Escenario – baja tensión.

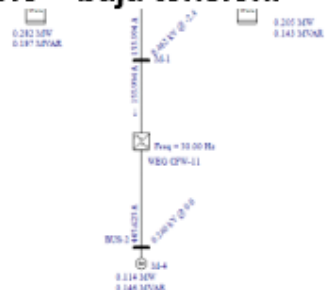


Figura #13 Comportamiento de la carga en baja tensión [13]

Resultados.

Motor	Frecuencia de salida (Hz)	Corriente (A)	Voltaje (kV)	Potencia (MW)	Potencia (MVAR)
M4	30	445.625	0.240	0.114	0.146



Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

- Informe de espectro de armónicos. Valor de VTHD y ITHD obtenidos en Easy Power. Implementando el variador de frecuencia a su parámetro definido, obtenemos los siguientes valores de VTHD e ITHD.

Tabla 10. Valor de VTHD e ITHD obtenidos [13]

Bus Summation Results Summary Report						Branch Summation Report				
BUS		VOLTAGES				Name	From BUS	h (1)	ITHD (%)	ITHD (Amps)
Name	Base(V)	VTHD (%)	VTHD(V)	VRSS(V)	VSUM(V)	C-6	SWG-4	335	30.50	102.2
SWG-4	480.0	11.22	53.9	483.0	625.2					

Los resultados obtenidos (Tabla #10) son los ITHD de los armónicos totales, por lo que se debe de obtener la relación de corriente de cortocircuito en los puntos de conexión común ($I_{CC_{PCC}}$) respecto a la corriente de demanda máxima. ($I_{demanda\ máxima}$) en el escenario. La corriente de corto circuito en los PCC se refiere al " I_{CC} " en todos los buses. La corriente de demanda máxima se refiere al conductor que suministrará a los buses. Acorde a los datos obtenidos, se consulta a la IEEE Estándar 519 – 2014, en la sección número cinco "Límite armónico recomendado" y se determina que, los valores obtenidos de VTHD, no cumplen con la normativa, concluyendo también que los ITHD obtenidos tampoco cumplan dentro del estándar IEEE 519-2014 debido a que ambos parámetros están muy ligados al comportamiento de las señales instantáneas. El método de solución recomendado de la mala calidad en la red es aplicando la "Metodología de cálculo y sintonización de filtros pasivos de armónicos", puesto que se encuentra ya instalado el variador de frecuencia a la red y, además, se detectó que existe un bajo factor de potencia, pudiendo afectar a la carga.

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

A pesar de que los variadores de frecuencia presentan un descontrol en la red en las señales instantáneas debido a la inyección de armónicos a dicha red, estos dispositivos de control han jugado un papel importante en la mejora del desempeño operativo de los motores, permitiendo así mejora en los procesos de producción en las empresas manufactureras. En el caso de estudio se pudo detectar que, el variador a implementar en esa red no es viable, por lo que se debería de rediseñar la red eléctrica o bien seleccionar otro variador de frecuencia adaptada a dicha red. Sin embargo, puede darse la opción de implementar la técnica de mitigación (filtros de armónicos), para así asegurar que la compañía eléctrica no aplique cargos en la tarifa, así como en el daño que se puede presentar a sus equipos eléctricos, evitando así el redimensionamiento del sistema eléctrico y, además, evitar el paro total de las operaciones de la industria.

REFERENCIAS

- [10] Blooming T., Carnovale D. (s.f.) *Application of IEEE Std. 519-1992 Harmonic Limits*. Sitio web: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/backup-power-ups-surge-it-power-distribution/power-conditioners/harmonic-correction-unit/IEEE-std-519-1992-harmonic-limits.pdf>
- [13] *Easy Power* (1985) Version 10.5 [Computer software] Bentley Systems. <https://www.easypower.com/>
- [3] Harpez E. (1999) *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrica*. México. Editorial LIMUSA NORIEGA.

Comportamiento de la calidad de la energía empleando drives de motores eléctricos industriales

- [6] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Sitio web: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1589263/mod_resource/content/1/IEE%20Std%20519-2014.pdf
- [4] Kennedy B. (2000) *Power Quality Primer*. Estados Unidos. Editorial McGraw-Hill.
- [1] L. Arana (2017) *Variadores de Frecuencia para el Control de Motores Asíncronos Jaula de Ardilla*. [Trabajo de investigación previo a la obtención del Título de Tecnológico Superior en Electromecánica, Universidad Central de Ecuador]. Repositorio institucional de la Universidad Central de Ecuador. Recuperado el 22 de Enero del 2022 de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/12956/1/T-UCE-0010-002-2017.pdf>
- [11] Narayanan, M., Vidhya, R., & Yuvaraj, P. (2015b). *Phase Angle Control Method of Speed Control of Single Phase Induction Motor* [Imagen]. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Phase-Angle-Control-Method-of-Speed-Control-of-Narayanan-Vidhya/07c7311977be411f1a44eed95988e2b739263d99>
- [8] Pinyol R. (2016) *Armónicos: Causas, Efectos y Minimización*. Salicru White Papers. Recuperado el 2 de Mayo del 2022 de: https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf
- [5] Piqué R. Ballester E. (2012) *Electrónica de potencia. Principios Fundamentales y Estructuras básicas*. España. Editorial Alfaomega.
- [7] Rockwell Automation (2014) *PowerFlex 6000 Medium Voltage Variable Frequency Drive*. Sitio web: <https://www.vfds.com/manuals/allenbradley/allenbradley-powerflex6000.pdf>
- [2] Ruhiane H. (2015) *Estudio del variador de frecuencia Mitsubishi Electric FR-A720 para aplicaciones de control en motores trifásicos*. [Tesis de titulación, Facultad de Ingeniería Eléctrica]. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Recuperado el 28 de Enero del 2022 de: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4501/Ruhiane%20Herrera%20Acosta.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [12] Tate, T. (2012). Why is an electric motor more efficient at higher loads? [Imagen]. Recuperado de <https://physics.stackexchange.com/questions/46113/why-is-an-electric-motor-more-efficient-at-higher-loads>
- [9] WEG (2016) *Manual del Convertidor de Frecuencia CFW-11*. Sitio web: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h43/h92/WEG-cfw11-manual-del-usuario-400v-tallas-f-y-g-10000784338-manual-espanol.pdf>