

MODELADO DE UNA RED ELÉCTRICA Y SU ESTUDIO DE CALIDAD DE LA ENERGÍA BASADO EN DIAGRAMAS UNIFILARES DE CFE.

MODELING AN ELECTRICAL NETWORK AND ITS STUDY OF QUALITY OF ENERGY BASED ON CFE UNIFIL DIAGRAMS.

Bernardo Villanueva Soto¹
Martín Hiram Salinas Mejía²
Luis Alonso Trujillo Guajardo³
Paz Vicente Cantú Gutiérrez⁴

RESUMEN

La calidad de la energía eléctrica es un factor que es considerado en la generación y transmisión de dicha energía, los aspectos en los cuales afecta la calidad y las formas en la que lo hace nos deben llevar a realizar este tipo de análisis para determinar el uso adecuado de la electricidad y como obtener un mayor beneficio. En este documento se analizará un diagrama unifilar que está basado en la Central de Generación “Gral. Francisco Villa” ubicada en Cd. Delicias, Chihuahua; siendo propiedad de la Comisión Federal de Electricidad, el cual será referencia para realizar análisis de armónicos en el sistema y el impacto que tienen en las diferentes variables eléctricas e índices de medición, así como su corrección utilizando las recomendaciones del std IEEE 519.

Palabras Clave: Calidad de la energía, armónicos en el sistema, IEEE.

Fecha de recepción: 04 de julio, 2018.

Fecha de aceptación: 05 de septiembre, 2018.

¹ Recién egresado de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, bernavisoto@hotmail.com

² Recién egresado de la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista, FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, hiram_10.95@hotmail.com

³ Doctor en Ingeniería Eléctrica, Profesor-Investigador, FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA, Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66451, luis.trujilloqjr@uanl.edu.mx. Líneas de investigación: Diseño de algoritmos de protección de sistemas eléctricos de potencia. Análisis y operación de motores eléctricos.

⁴ Egresado de la FIME-UANL, de la carrera de Ingeniero Electricista en 1977 y en Maestría en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con Especialidad en Potencia en 1992. Cuenta con 40 años de labor docente en la FIME. vcantugtz@yahoo.com. Jefe del Departamento de Iluminación y Alta Tensión, Perito en el Tribunal Superior de Justicia en el Estado de Nuevo León en la Especialidad de Ingeniería Eléctrica.

ABSTRACT

The quality of the electrical energy is a factor that is considered in the generation and transmission of this energy, the aspects in which it affects the quality and the ways in which it does it must lead us to carry out this type of analysis to determine the use adequate electricity and how to obtain a greater benefit. In this document we will analyze a single-line diagram that is based on the Generation Plant "Gral. Francisco Villa "located in Cd. Delicias, Chihuahua; being owned by the Comisión federal de electricidad, which will be a reference to perform harmonic analysis in the system and the impact they have on the different electrical variables and measurement indices, as well as their correction using the recommendations of std IEEE 519.

Keywords: Energy quality, harmonics in the system, IEEE.

INTRODUCCIÓN

Un Sistema Eléctrico de Potencia, es una red eléctrica de grandes dimensiones en los cuales el voltaje es de alta tensión, pudiendo tener variaciones entre 440 kv, 230 kv o 115 kv, dependiendo de diversos factores. El sistema eléctrico de potencia consta de diversos elementos o equipos, que su objetivo es generar, transformar, distribuir y también consumir cierta cantidad de energía, para lograr con el menor costo posible, la mayor cantidad de energía a la mejor calidad posible. El SEP consta de plantas generadoras que, como su nombre lo indica, genera la energía eléctrica requerida y consumida por los tipos de cargas existentes en el sistema, también cuenta con transformadores específicos para cada caso requerido y con redes de transmisión y distribución encargadas de transportar la energía de la planta generadora, hasta las cargas o puntos de consumo.

Los sistemas eléctricos cuentan con el equipo necesario para poder tener la calidad de energía requerida y asegurar las condiciones más ideales para el funcionamiento de las cargas. La calidad de la energía se puede definir desde dos perspectivas diferentes, dependiendo si se suministra o consume electricidad.

La calidad de la energía en el generador generalmente se refiere a la capacidad del generador para suministrar potencia a 60 Hz con poca variación, mientras que la calidad de la energía en el nivel de transmisión y distribución se refiere a la permanencia de la tensión dentro de un rango de más o menos 5%. Gerry Heydt en "Electric Power" define la calidad de la energía como "la medida, el análisis y la mejora de la tensión del bus, generalmente un voltaje del bus de carga, para mantener ese voltaje en forma sinusoidal a la tensión y frecuencia nominales", sin embargo, de acuerdo al libro esmeralda de la IEEE "Calidad de energía" (power quality) es "El concepto de alimentación y de puesta a tierra de equipo electrónico sensible en una manera que sea adecuado para su operación." La energía eléctrica es uno de los insumos de más valor en nuestra vida cotidiana, desde nuestros hogares, trabajos y de manera consecuente en la industria.

La dependencia del consumo de energía eléctrica hace que se requiera de forma continua, en gran volumen y con buena calidad para satisfacer los diferentes requerimientos de uso.

JUSTIFICACIÓN

La energía eléctrica se ha convertido en el principal insumo industrial y residencial, así mismo uno de los principales desperdicios de energía eléctrica se debe a la calidad de esta. Podemos decir que existe un problema de calidad de la energía eléctrica cuando ocurre cualquier desviación de la tensión, la corriente o la frecuencia que provoque la mala operación de los equipos de uso final y deteriore la economía o el bienestar de los usuarios; asimismo cuando ocurre alguna interrupción del flujo de energía eléctrica.

Existen diversos efectos asociados a problemas con la calidad de energía como el incremento en las pérdidas de energía, deterioro prematuro y mal funcionamiento de equipos, incremento de costo de la energía y posibles daños a equipo crítico de producción, entre otros. Cabe mencionar que un estudio sobre calidad de la energía no solo está enfocado a resolver problemas, también se logra mejorar el desempeño de los procesos, al mismo tiempo que se reducen gastos por consumo. Por lo antes mencionado podemos asegurar que en la actualidad un estudio de calidad de la energía no solo es algo conveniente si no también necesario.

El propósito de este trabajo es presentar los aspectos y consideraciones técnicas de un estudio de calidad de energía en un sistema eléctrico, haciendo énfasis en considerar las normativas vigentes y en base a esto se presenta una solución para cumplir con los requisitos establecidos en la normativa vigente de calidad de energía.

METODOLOGÍA

Consideraciones básicas para el estudio de calidad de energía.

Preparación del Diagrama Unifilar

En el diagrama unifilar del sistema [figura 1], deberán indicarse todos los elementos que lo integran, tales como generadores, transformadores, líneas de transmisión o distribución, buses, cuarto de motores, etc., con sus potencias y voltajes nominales, entre otras referidas a sus características eléctricas nominales.

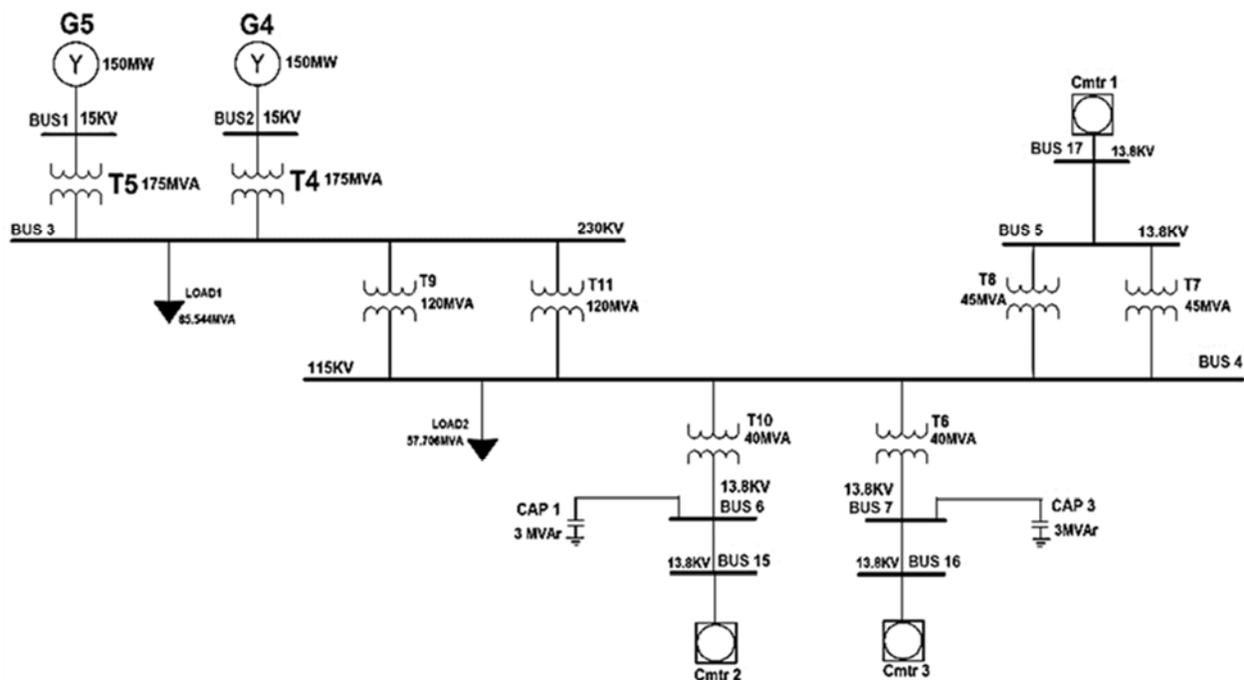


Figura 1. Diagrama Unifilar de la instalación eléctrica a estudiar

Elementos principales:

- Generadores:
 - G4: S = 176.2 MVA, Voltaje = 15 Kv, RPM = 3600, f = 60 Hz, Np = 2, F.P. = .9.
 - G5: S = 176.2 MVA, Voltaje = 15 Kv, RPM = 3600, f = 60 Hz, Np = 2, F.P. = .9.

- Transformadores:
 - T4: S = 175 MVA, Vbaja = 15 kv, Valta= 230 Kv, Z = 12.07%.
 - T5: S = 175 MVA, Vbaja = 15 kv, Valta= 230 Kv, Z = 11.7%.
 - T6: S = 40 MVA, Vbaja = 13.8 kv, Valta= 115 Kv. Z = 13%.
 - T7: S = 45 MVA, Vbaja = 13.8 kv, Valta= 115 Kv. Z = 8.5%.
 - T8: S = 45 MVA, Vbaja = 13.8 kv, Valta= 115 Kv, Z = 8.5%.
 - T9: S = 120 MVA, Vbaja = 115 kv, Valta= 230 Kv, Z = 10%.
 - T10: S = 40 MVA, Vbaja = 13.8 kv, Valta= 115 Kv, Z = 13%.
 - T11: S = 120 MVA, Vbaja = 115 kv, Valta= 230 Kv, Z = 10%.
- Motores: en cada CCM se utilizaron motores con un voltaje nominal de 13.8 Kv, variando en su potencia real:
 - 8 motores de 4000 HP.
 - 6 motores de 3500 HP.
 - 6 motores de 6000 HP.
 - 2 motores de 10000 HP.

Centro de Control de Motores bus 5, 6 y 7.

Como se puede observar en nuestro diagrama unifilar, cada uno de los buses antes mencionados en el título de este apartado, tiene un CCM (Centro de Control de Motores), cada uno de ellos con un voltaje nominal de 13 KV y con distinta capacidad de potencia (HP). A continuación [Figura 2, 3 y 4] se muestran los diagramas de cada CCM por bus.

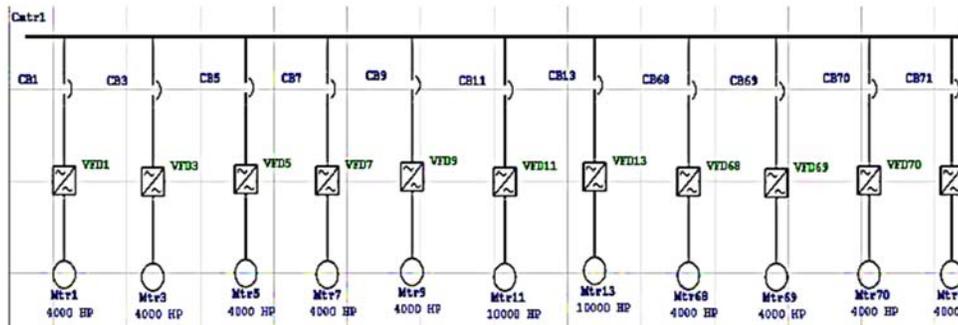


Figura 2. CCM1 correspondiente a bus 5.

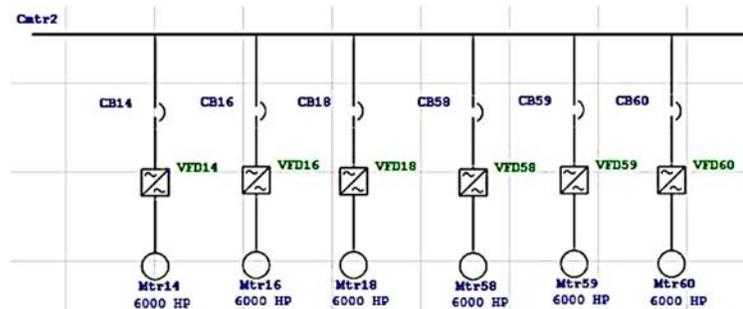


Figura 3. CCM2 correspondiente a bus 6.

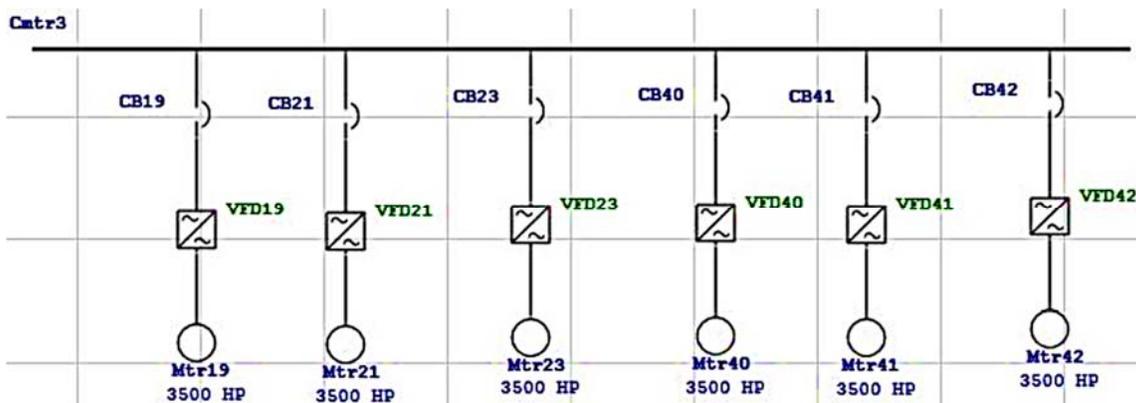


Figura 4. CCM3 correspondiente a bus 7.

Cada uno de los motores mostrados en los diagramas anteriores tiene un drive para controlar la frecuencia a la que operan; dichos drives tienen características similares, coinciden en que todos son de 12 pulsos, lo diferente entre ellos son la marca y las frecuencias de distorsión que generan. Los 3 diferentes drives utilizados fueron:

- Rockwell 12 pulse VFD.
- ABB AC5600 12P.
- Typical IEEE 12 Pulse.

Recordemos que los drives o cualquier otro componente/dispositivo electrónico, distorsiona la señal resultante de corriente alterna, por lo que dichas distorsiones provocan irregularidades en la calidad de energía del sistema eléctrico de potencia (SEP).

Estudio de calidad de energía del SEP a carga máxima.

Simulación en Software ETAP.

Una vez teniendo completo nuestro diagrama unifilar en ETAP, se realiza la simulación de armónicos en el diagrama en el apartado "Harmonic" permitiéndonos observar voltajes, corrientes, distorsiones armónicas y factor de potencia por bus. A continuación [Figura 5] se muestran cada uno de los parámetros antes mencionados.

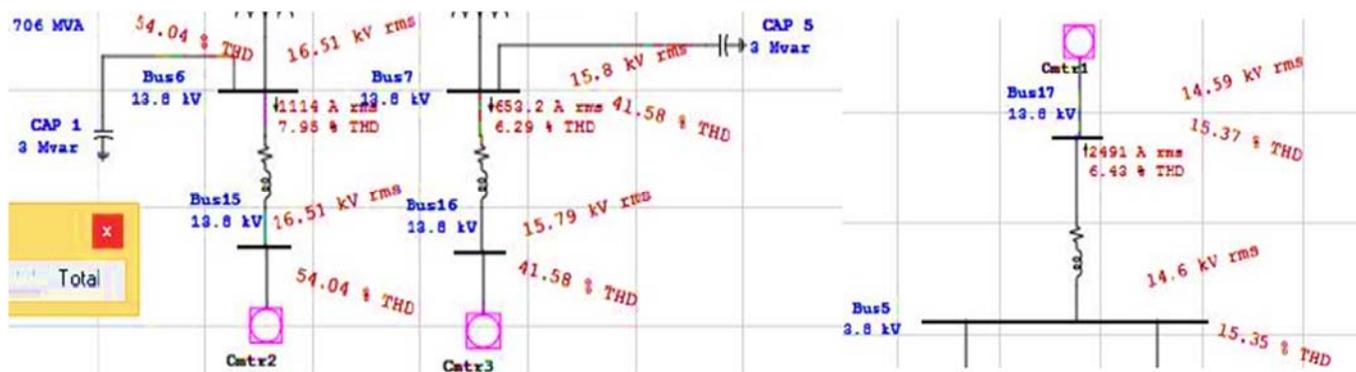


Figura 5. Fragmentos de diagrama unifilar mostrando buses 4, 5 y 6.

Tabla 1. Comparación de distorsiones armónicas entre buses.

		Bus 5	Bus 6	Bus 7
Carga máxima	Variables a calcular	Simulado ETAP	Simulado ETAP	Simulado ETAP
	RMSv total	14.59 KV	16.51 KV	15.79 KV
	RMSi total	2491 A	1114 A	653.2 A
	THDv	15.37%	54.04%	41.58%
	THDi	6.43%	7.95%	6.29%
	Factor de Potencia	0.998	0.997	0.998
	Factor K	1	1	1

Cálculos analíticos.

a) Distorsiones armónicas.

Una vez obtenidos los resultados simulados por ETAP, procedemos a obtener dichas distorsiones armónicas de forma numérica analítica para comprender mejor como este tipo de herramientas computacionales realizan dicho cálculo o método. Para ello procedemos a plasmar los valores por armónico de voltaje, corriente y ángulo de voltaje para cada bus.

Tabla 2. Valores de voltaje, corriente y ángulo de voltaje generador por armónicos de correspondientes a bus 5, 6 y 7.

Bus 5				Bus 6				Bus 7			
Armonico	Voltaje	Angulo	Corriente	Armonico	Voltaje	Angulo	Corriente	Armonico	Voltaje	Angulo	Corriente
1	14.43	-42.16	2486	1	14.53	-43.91	1110	1	14.58	-41.86	651.9
2	0.122	-136.35	15.9	2	0.124	-138.6	7.6	2	0.131	-138.69	4.7
3	0.1	8.48	0	3	0	0	0.002	3	0.197	-72.52	4.7
4	0.029	149.17	1.8	4	0.033	149.09	1	4	0.036	148.96	0.632
5	0.671	151.83	50.9	5	0.89	155.55	21.7	5	0.95	155.37	13.5
6	0.005	-20.05	0	6	0	0	0	6	0.014	-1.11	0.161
7	0.478	-163.84	37.9	7	0.876	-166.65	15.3	7	0.959	-167.12	9.8
8	0.042	61.76	1.2	8	0.094	60.34	1.4	8	0.106	59.43	0.946
9	0.036	47.43	0	9	0	0	0	9	0.26	165.69	2.1
10	0.006	45.26	0.083	10	0.036	25.64	0.437	10	0.051	10.18	0.362
11	0.67	110.64	114.4	11	7.02	-63.68	77.9	11	5.08	-78.08	32.9
12	0.003	-110.1	0	12	0	0	0	12	0.018	-70.77	0.107
13	1.83	41.33	84	13	3.29	-133.73	30.8	13	3	-134.59	16.4
14	0.024	109.19	0.124	14	0.031	-71.32	0.267	14	0.029	-71.76	0.147
15	0.034	-109.62	0	15	0	0	0	15	0.056	29.05	0.264
17	0.103	-66.25	5.6	17	0.039	153.56	0.282	17	0.038	153.44	0.159
19	0.033	94.63	4.2	19	0.018	-81.16	0.114	19	0.017	-81.23	0.065
23	0.336	-25.52	20.3	23	0.077	138.82	0.41	23	0.072	129.12	0.206
25	0.469	-63.09	21.2	25	0.073	129.14	0.358	25	0.073	127.06	0.921
29	0.06	-88.78	0.425	29	0.009	113.27	0.037	29	0.009	113.26	0.021
31	0.03	-156.53	0.129	31	0.002	59.16	0.009	31	0.002	59.15	0.005
35	0.129	-146.66	9.3	35	0.003	13.71	0.009	35	0.003	13.7	0.005
37	0.122	128.55	8.3	37	0.002	-70.78	0.007	37	0.002	-70.78	0.004
41	0.001	0	0.068	41	0	0	0	41	0	0	0
43	0.001	0	0.068	43	0	0	0	43	0	0	0
47	0.106	64.59	5.8	47	0.001	0	0.002	47	0.001	0	0.001
49	0.105	-20.21	5.5	49	0.001	0	0.002	49	0.001	0	0.001

Una vez que se recolectaron los valores para cada armónico en el sistema, se puede comenzar con la obtención de los valores RMS [1], tanto para voltaje como para corriente. Algo importante que se debe conocer es que ETAP no muestra el ángulo de corriente para los armónicos, solo es posible observar el de voltaje, esto es una limitante para el estudio de método analítico, ya que nos hará trabajar con fórmulas que no utilicen los ángulos como variable, por lo cual los valores obtenidos serán de ángulos desconocidos.

Bus 5.

El valor RMS para voltaje se obtiene de la ecuación 1:

$$\text{RMSv} = \sqrt{(V_{h1}^2) + (V_{h2}^2) + (V_{h3}^2) + (V_{h4}^2) + (V_{hn}^2)} \quad [\text{Ec. 1}]$$

RMSv = 14.5991388 kv

El valor RMS para corriente se obtiene de la ecuación 2:

$$\text{RMSi} = \sqrt{(I_{h1}^2) + (I_{h2}^2) + (I_{h3}^2) + (I_{h4}^2) + (I_{hn}^2)} \quad [\text{Ec. 2}]$$

RMSi = 2491.1351 A

Una vez obtenidos los valores RMS del Bus 5, seguiremos con el porcentaje de distorsión armónica total (THD) para los voltajes y corrientes. El valor THD [2] para voltaje se obtiene de la ecuación 3:

$$\text{THDv} = \left[\frac{\sqrt{(V_{h2}^2) + (V_{h3}^2) + (V_{h4}^2) + (V_{h5}^2) + (V_{hn}^2)}}{V_{h1}} \right] (100) \quad [\text{Ec. 3}]$$

THDv = 15.3557%

El valor THD para corriente se obtiene de la ecuación 4:

$$\text{THDi} = \left[\frac{\sqrt{(I_{h2}^2) + (I_{h3}^2) + (I_{h4}^2) + (I_{h5}^2) + (I_{hn}^2)}}{I_{h1}} \right] (100) \quad [\text{Ec. 4}]$$

THDi = 6.4307%

Como sabemos, el cálculo o la obtención del factor de potencia [3], comúnmente se dan por medio de los valores de potencias y ángulos respectivos, como ya se menciona el software ETAP no proporciona ángulos de corriente, así que se trabajará con otra ecuación para la obtención del factor de potencia, la cual involucra el THDi y se puede observar a continuación en ecuación 5:

$$\text{FP} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THDi}^2}} \quad [\text{Ec. 5}]$$

FP = 0.99793865

Por último, se realizará el cálculo para el factor K [4] para dimensionamiento de los transformadores, donde se utiliza la ecuación 6:

$$\text{Factor K} = \sum I_n^2 h^2 = (I_{h1}^2)(1^2) + (I_{h2}^2)(2^2) + (I_{h3}^2)(3^2) + (I_{h4}^2)(4^2) + (I_{hn}^2)(n^2) \quad [\text{Ec. 6}]$$

Para conocer el valor de I individual, que será multiplicado por su número armónico, se tiene que tener el valor RMS para la corriente, dividiéndolo entre el valor de corriente por armónico. A continuación, en la siguiente formula 7 se mostrará la manera de obtener la corriente por armónico:

$$I_{hm} = \frac{I_h}{RMS_i} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Factor K = 1.60403655

Bus 6.

Tomando como referencia ecuaciones 1 a 7, se obtienen los siguientes resultados para el bus 6:

RMSv = 16.517 KV	THDv = 54.62%
RMSi = 1113 A	THDi = 7.948%
F. P. = .996856	Factor K = 1.734

Bus 7.

Al igual que en el bus 6, solo se tomó como referencia ecuaciones 1 a 7 para obtener distorsiones armónicas.

RMSv = 15.791 KV	THDv = 41.598%
RMSi = 653.187 A	THDi = 6.288%
F. P. = .99803	Factor K = 1.434

b) Filtros para armónicos

Bus 5.

Proseguimos con el cálculo de filtros para erradicar la distorsión de energía provocada por los armónicos en el bus 5 (este método aplica para el resto de los buses). Se seleccionó uno de los armónicos de mayor magnitud para mostrar el procedimiento de cálculo.

En la siguiente formula 8 se puede observar la manera de obtener potencia reactiva:

$$MVAR = MW [\text{Tan} (\text{Cos}^{-1})(\text{FPa}) - \text{Tan} (\text{Cos}^{-1})(\text{FPn})] \quad [\text{Ec. 8}]$$

MVAR = 4.95314

$$C_{\text{banco}} = \frac{MVAR}{W (KV_L^2)} \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$X_{\text{efect}} = \frac{(KV_L^2)}{MVAR} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Cbanco = 0.00006928 f

Xefect = 38.282 Ω

$$X_c = \left[\frac{h^2}{h^2 - 1} \right] (X_{\text{efect}}) \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$X_L = \frac{X_c}{h^2} \quad [\text{Ec. 12}]$$

Xc = 38.5406053 Ω

XL = 0.25809294 Ω

XL se utilizó para poder parametrizar el arreglo del filtro en el software. En apartado de resultados se encuentra la reactancia Inductiva (XL) para cada uno de los armónicos a los cuales se dimensionó un filtro para bus 5, 6 y 7 (Tabla 4).

RESULTADOS

En la tabla 3 se muestran los resultados antes de implementar una mejora en calidad de la energía de los buses 5, 6 y 7, tanto analíticos como simulados.

Tabla 3. Resultados de software y analíticos de distorsiones por bus.

Carga completa	Variables a calcular	Bus 5		Bus 6		Bus 7	
		Numerico analítico	Simulado ETAP	Numerico analítico	Simulado ETAP	Numerico analítico	Simulado ETAP
	RMSv total	14.599 KV	14.59 KV	16.517 KV	16.51 KV	15.791 KV	15.8 KV
	RMSi total	2491.135 A	2491 A	1113.5 A	1114 A	653.187 A	653.2 A
	THDv	15.355%	15.37%	54.062%	54.04%	41.598%	41.58%
	THDi	6.43%	6.43%	7.948%	7.95%	6.288%	6.29%
	Factor de Potencia	0.99793	0.998	0.996856	0.997	0.99803	0.998
	Factor K	1.604	1	1.734	1	1.434	1

En la Figura 6 se muestran las señales de voltaje con filtro y sin filtro de armónicos del sistema eléctrico de estudio de Figura 1, en ellas podemos observar que en cada bus analizado (Bus, 5, 6 y 7) en la línea roja (Sin filtro) se observa toda la distorsión generada por los equipos utilizados; la línea azul (Con filtro) muestra el resultado de la señal de voltaje erradicando los armónicos presentes en la red eléctrica.

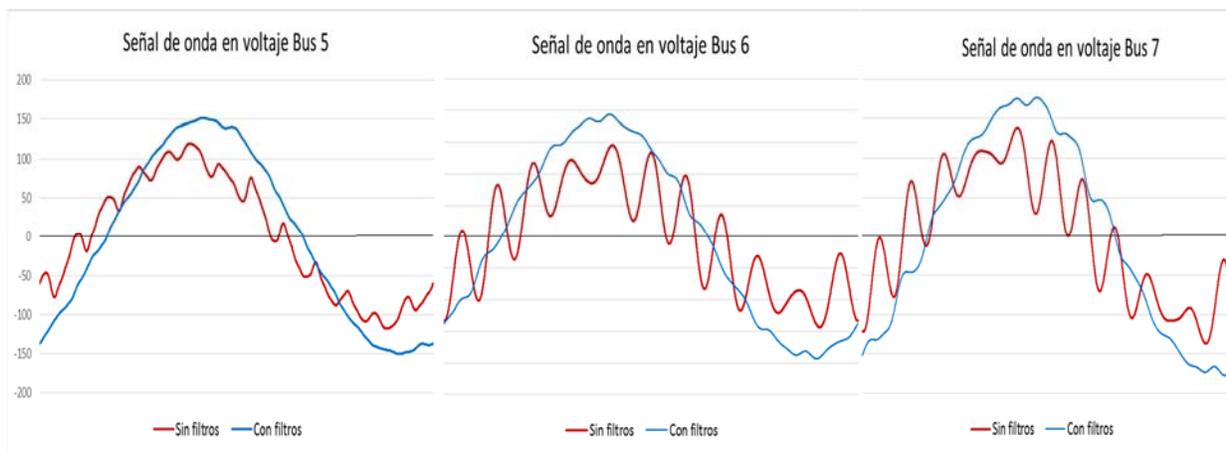


Figura 6. Señales de onda de voltaje para bus 5, 6 y 7 con filtro y sin filtro de armónico

En la Tabla 4, se muestran los parámetros necesarios para erradicar cada armónico presente en nuestro sistema eléctrico (Reactancia inductiva y capacitiva); mostrando por bus como se reduce el THD corriente y el THD voltaje cuando tienes un filtro de armónicos y por consiguiente se cumple con el estándar IEEE 519; además muestra la cantidad de filtros y número de armónico para erradicar o reducir el porcentaje de distorsión armónica de corriente y voltaje

Tabla 4. Resultados de distorsión armónica por bus y reactancia inductiva para cada armónico erradicado.

Carga Máxima		THD corriente	THD voltaje	Cantidad de filtros		
Bus 5	Sin filtro	6.43%	15.37%		XL de filtro	Xc de filtro
	Con filtro	2.17%	2.32%	3		
	Filtro para Armónico 11				0.3614 Ω	38.64 Ω
	Filtro para Armónico 13				0.258 Ω	38.54 Ω
Filtro para Armónico 5				1.815 Ω	40.09 Ω	
Bus 6	Sin filtro	7.95%	54.40%		XL de filtro	Xc de filtro
	Con filtro	3.03%	4.57%	3		
	Filtro para Armónico 11				0.669 Ω	71.53 Ω
	Filtro para Armónico 13				0.477 Ω	71.34 Ω
Filtro para Armónico 5				3.36 Ω	74.22 Ω	
Bus 7	Sin filtro	6.29%	41.58%		XL de filtro	Xc de filtro
	Con filtro	4.08%	4.63%	4		
	Filtro para Armónico 11				1.41 Ω	150.87 Ω
	Filtro para Armónico 13				1.007 Ω	150.47 Ω
	Filtro para Armónico 5				7.087 Ω	156.55 Ω
Filtro para Armónico 7				3.533 Ω	152.99 Ω	

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este documento se presenta el análisis de un diagrama unifilar utilizando el software ETAP donde calculamos las distorsiones armónicas por cada uno de los buses que comprende el diagrama unifilar anteriormente presentado. Además de esta simulación se realizaron cálculos analíticos de dichas distorsiones cumpliendo con el objetivo planteado: cumplir con las recomendaciones presentadas por la IEEE 519 (Figura 7 y 8) [5]. En todo sistema eléctrico de potencia existen este tipo de variaciones en la señal eléctrica, las cuales afectan la calidad de energía. Para erradicar este tipo de problemas eléctricos se utilizan distintas soluciones, entre ellos la más común es el filtro pasivo de armónicos, el cual calculamos para reducir la distorsión en la señal resultante de nuestro sistema (observar figura 6 y 7).

Es importante que se reduzca la distorsión armónica que una instalación eléctrica puede producir, cuanto más bajo sea la magnitud de las corrientes armónicas producidas en un sistema eléctrico industrial, menor será el impacto negativo en el desempeño de los equipos conectados al mismo sistema.

Máxima distorsión de corriente armónica en porcentaje de IL						
Isc/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
<20c	4.0	2.0	1.5	.6	.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Figura 7. Límites de corriente armónica para sistemas generales de distribución (120 – 69,000 V) recomendados por la IEEE 519

Voltaje de bus	Armónico individual (%)	Distorsión armonica total THD (%)
$V \leq 1.0 \text{ KV}$	5.0	8.0
$1 \text{ KV} < V \leq 69 \text{ KV}$	3.0	5.0
$69 \text{ KV} < V \leq 161 \text{ KV}$	1.5	2.5
$161 \text{ KV} < V$	1.0	1.5a

Figura 8. Límites de distorsión armónica en voltajes recomendados por la IEEE 519

BIBLIOGRAFÍA

J.C. Das, 2015, Power System Harmonics and passive filter designs, p. 9

Barry W. Kennedy, 2000, Power Quality Primer, p. 48

J.C. Das, 2015, Power System Harmonics and passive filter designs, p. 132

C. Sankaran, 2002, Power Quality CRC PRESS, p. 101

IEEE STD 519 – 2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, p. 6 y 7.