IECAR S.A. de C.V.
Ingeniería, Energía, Calidad, Ambiente y Riesgo

“ Diseño optimo de una instalación eléctrica mediante simulaciones y herramientas de gestión de mantenimiento para mitigar resonancias eléctricas“

Facilitador: MIIMC, MER Rubén Joaquín Cetina Abreu
rubencetinaabreu@hotmail.com

Rubén J. Cetina Abreu
rubencetinaabreu@hotmail.com
Cel. (+52) 4435275647

Formación profesional

Maestro en Ingeniería Industrial, Mantenimiento y Confiabilidad
Maestro en Energías Renovables
Especialidad en Instalaciones Eléctricas Industriales
Certificaciones en Ingeniería de Confiabilidad y Riesgo
Certificaciones en Metodologías Análisis-Causa-Raíz
Cursos de Mantenimiento por Condición: Termografía Infrarroja y Análisis de Vibraciones Mecánicas
Ingeniero electricista de profesión

Experiencia laboral

Ingeniero Consultor Capacitador IECAR.
Ingeniero de Mantenimiento de plantas residuales en plataformas marinas costa afuera
Ingeniero de Mantenimiento de Sistemas Contra Incendios y Riesgos
Ingeniero Control de Obra y Supervisión Costa Afuera
Ingeniero Electricista en proyectos de Iluminación y Mantenimiento
Universidad Tecnológica de Campeche (Docente)
Universidad Autónoma del Carmen (Docente)

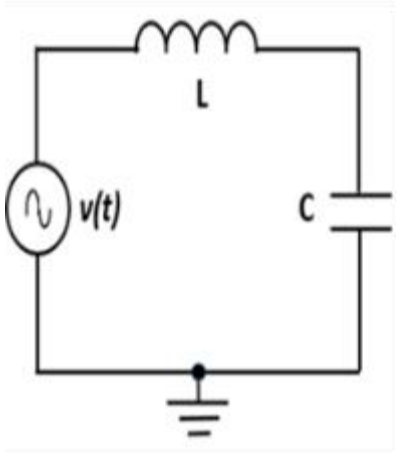
1.- Introducción

El crecimiento de uso de tecnologías basadas en la electrónica para los procesos industriales, ha marcado una transformación en el uso de la energía eléctrica, observando nuevos eventos de fallo en el área de la calidad de la energía. El crecimiento de cargas, cambios de equipos con tecnología moderna para optimizar procesos de producción, modificaciones en las instalaciones eléctricas por crecimiento y otras situaciones, han generado nuevos contextos operacionales, en donde el diseño de la instalación eléctrica no tiene los requerimientos técnicos para enfrentar nuevos eventos y modos de fallos relacionados con la calidad de la energía eléctrica. Problemas como son; armónicas, resonancias eléctricas, flickers, sags, swells y otros son mas frecuentes de encontrarlos en los sistemas eléctricos. Por lo anterior, surge la necesidad de evaluar los diseños actuales con respecto a reingenierías del mismo considerando aspectos técnicos, de riesgos y de costos.

1.- Introducción

Las problemáticas en el área de calidad de la energía en los sistemas eléctricos impactan de una manera significativa en las plantas industriales, lo que conlleva a paros de producción, altos costos en mantenimiento y penalizaciones en el consumo. Uno de los eventos de falla más comunes que se puede encontrar en las plantas, es la ***penalización por un bajo factor de potencia***; en donde es común solucionar el problema mediante la instalación de bancos de capacitores, sin considerar nuevos eventos y modos de fallo que pudieran suscitarse en la planta, tales como, ***la resonancia eléctrica***. En el presente trabajo se analiza un problema de resonancia eléctrica, en donde utilizando herramientas de metodologías de optimización de mantenimiento, se selecciona la solución mas óptima para la planta. Cabe mencionar que al realizar este tipo de análisis se contribuye a una ***gestión de mantenimiento*** y por ende a una ***gestión de activos*** debido a que se obtienen reducción de costos, riesgos y mejora de desempeño de la planta.

1.- Introducción



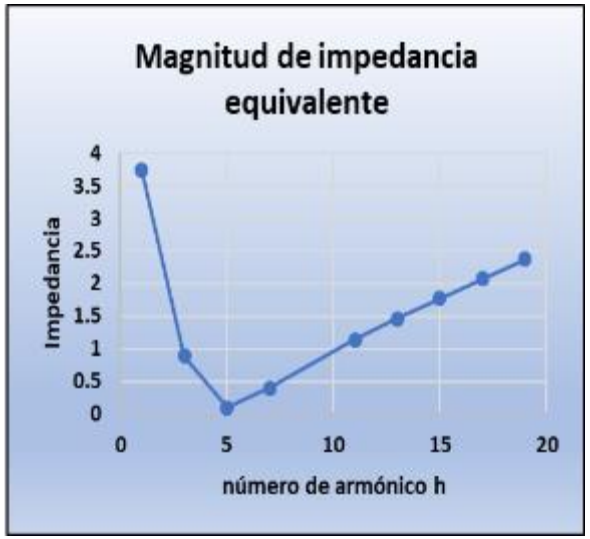


Fig. 1 Escenario de una resonancia serie

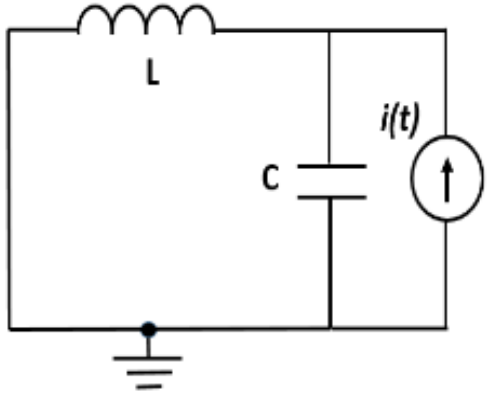


Fig. 2 Escenario de una resonancia en paralelo

2.- Caso de análisis

Ejemplo 1.1.-En una planta se desea corregir el factor de potencia como propuesta de mejora continua para una reducción de costos en una planta, se evalúa el diseño actual del sistema mediante una matriz **HAZOP,** y se analizan las posibles soluciones. En dicha planta se tiene instalado un transformador de 1000 kVA con una impedancia de Z=10% el cual suministra una potencia de 933 kW, con una corriente de 1406 Amperes a un voltaje 480 Volts. Como información adicional se tiene que la carga está compuesta por rectificadores de 6 pulsos, dando lugar a una inyección de una corriente de 5ta armónica de magnitud igual al 30% de la corriente fundamental [4,8].

Se procede a iniciar analizando el problema mediante una evaluación de los parámetros de la instalación involucrados con la problemática, en este caso un bajo factor de potencia. Una herramienta que permite analizar este tipo de análisis es una matriz HAZOP. Posteriormente se propone realizar un ACR para comprender la raíz del problema y proponer la mejor solución.

3.- Matriz HAZOP

Tabla 1.- Matriz HAZOP del sistema radial de distribución en estudio

Variable de Proceso Subsistema: Calidad de la energía	Palabra Guía	Deviaciones	Causas (Externas (E), Físicas (F), Humanas (H), y Latentes (L)	Consecuencias (Seguridad (S), Ambiente (A), Operaciones (O),	Salvaguardas existentes	Recomendaciones Preeliminares
1.-Distorción Armónica	Mas	1.1. Distorción de voltajes armónicas (THD) en el bus de interconexión transformador - carga, teniendo una lectura de 22.62%	1.1.1 .-Distorción de armónicas en el bus de conexión transformador-carga, existiendo una carga con un rectificador de 6 pulsos. (F)	.- Degradación operativa de los equipos (Evejecimiento de aislamientos en el transformador y equipos) debido a calentamientos anormales (O)	.- Realizar mediciones de calidad de la energía en la planta	.- Realizar simulaciones del sistema para ver si existe la posibilidad de implementar un filtro
				.- Disparo de protecciones, generando indisponibilidad del servicio (O)		
			1.1.2 .- No existe conocimiento sobre las armónicas (H, L)	.- Personal inexperto en la situación (O)		
			1.1.3 .- No existen procedimientos ni políticas para mitigar las	.- Altos costos de operación y mantenimiento (O)		
2.- Bajo Factor de Potencia	Menos	2.1 Factor de potencia bajo de 79.9% medido en el lado de alta tensión en el transformador, teniendo penalizaciones en la planta.	2.1.1 .- Consumo excesivo de potencia reactiva por la carga no	.- Altos costos de operación y mantenimiento (O)	.- Revisión de facturación por parte de la empresa suministradora, mediciones de f.p.	.- Realizar simulaciones del sistema, para ver si existe la posibilidad de instalar un banco de capacitores
			2.1.2 .- No existe conocimiento sobre factor de potencia (H , L)	.- Personal inexperto en la situación (O)		
			2.1.3 .- No existen procedimientos ni políticas para mitigar problemas de factor de potencia en la planta (L)	.- Altos costos de operación y mantenimiento (O)		
3.- Exceso de demanda de KVA	Mas	3.1 Sobre carga en el transformador, un consumo mayor a 1000 kVA, midiendo 1045 kVA.	3.1.1 Daño al aislamiento del transformador (F)	.- Daños al transformador (O)	.- Mediciones de KVA, simulaciones del sistema	.- Realizar simulaciones del sistema, para ver si existe la posibilidad de reducir carga (kVA) al sistema
			3.1.2 Capacidad del transformador erronea (H,)	.- Altos costos de operación y mantenimiento (O)		
			3.1.3 No existen procedimientos ni politicas para puesta y operación de un transformador (L)	.- Altos costos de operación y mantenimiento (O)		

4.- Criticidad de modos de fallo debido a eventos de fallo

Las variables de proceso de la matriz HAZOP se determinan como eventos de fallo del sistema, por lo cual a manera de justificar el análisis de bajo factor de potencia, se utiliza la metodología ***riesgo total anualizado*** en donde se relacionan modos de fallo con los eventos de fallo.

Tabla 2- Cálculos de la criticidad de los modos de fallo mediante la metodología RTA.

	FF	CMO	CM	CAR	TR	IP	PE	PAF	PABFP	RTA
Modo de fallo	fallos/año	$/fallo	$/fallo	$/año	horas	$/hora	$/fallo	$/año	$/año	$/año
Daño en equipos por THD	0.025	100000	25000	3125	20	1000	20000	500	0	3625
Daño del transformador por sobrecarga	0.05	50000	20000	3500	10	1000	10000	500	0	4000
Daños por bajo factor de potencia	0.05	100000	25000	6250	20	1000	20000	1000	15000	22250

$$\mathrm{RTA} = \mathrm{CAR} + \mathrm{PAF} + \mathrm{PABFP}$$

$$\mathrm{CAR} = \mathrm{FF} * (\mathrm{CMO} + \mathrm{CM})$$

$$\mathrm{PAF} = \mathrm{FF} * \mathrm{PE}$$

$$\mathrm{PE} = \mathrm{TR} * \mathrm{IP}$$

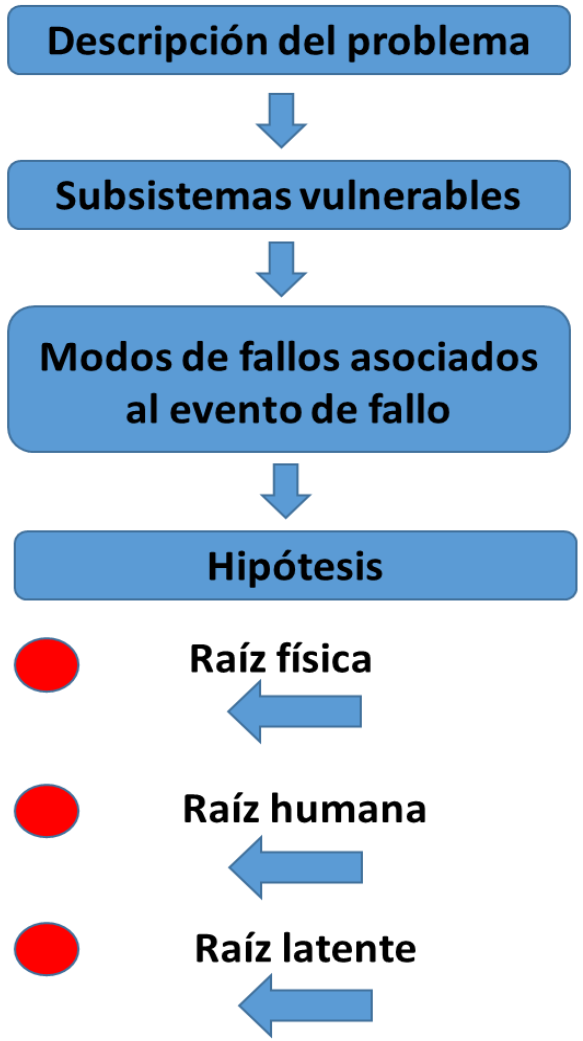
5.- Análisis – Causa – Raíz del problema

¿ Como puede ocurrir? , evento del fallo, modos de fallo y síntomas

Zona, área

Equipos críticos que fallan

¿ Por que?



Definición del problema

Un problema recurrente son los costos asociados al bajo factor de potencia de la planta.

Fig. 3 Diagrama de proceso de la metodología ACR

5.- Análisis – Causa – Raíz del problema

Bajo factor de potencia existente en la facturación de la planta, ocasionando multas al cliente.

Descripción del problema (Evento de fallo)

Mayor consumo de corriente, perdidas en conductores, transformadores sobrecargados, caídas de voltajes

Sintomas

Cantidad grande de equipos inductivos (motores, transformadores, rectificadores)

Soldadoras X

Hornos de inducción X

Variadores de frecuencia X

Evidencia física del evento de fallo (¿Por qué?)

Exceso de carga inductiva en el sistema

Validación de la hipótesis mediante simulaciones realizadas por especialistas en el evento de fallo. Debido a ser un evento de fallo en modo estacionario, se realiza la búsqueda de un software adecuado para simular el evento.

Hipótesis

Fig. 4 Ejemplo de la metodología ACR

5.- Análisis – Causa – Raíz del problema

Carga inductiva en el sistema (transformador y rectificador)

No existe cultura en el diseño de instalaciones eléctricas que considere un bajo factor de potencia

No existen políticas y procedimientos en la planta que consideren el evento de bajo factor de potencia

Raíz física

Raíz humana

Raíz latente

Solución

Analizar las posibles soluciones técnicas, requieren el uso de las simulaciones, para observar los comportamientos en relación al evento de fallo.

Se propone hacer una investigación exhaustiva sobre las siguientes preguntas:

¿ Existe algún estándar que regule a las plantas para mejora de un factor de potencia?

¿ Existen nuevos eventos de fallo que pueden surgir al solucionar un evento de fallo inicial?

¿ Existe relación en los eventos de fallos actuales en el sistema analizado ?

Fig. 5 Ejemplo de la metodología ACR continuación

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

A. Análisis del contexto actual.

Analizando los requerimientos de potencia entregada por el transformador, donde S es la potencia aparente, VLL el voltaje de línea y IL la corriente de línea, tenemos:

$$\mathrm{S}_T = \sqrt{3} * \mathrm{V}_{\mathrm{LL}} * \mathrm{I}_{\mathrm{L}}$$

$$\mathrm{S}_{\mathrm{T}} = \sqrt{3} * 0.480 * 1405 = 1168\ \mathrm{kVA}$$

Calculando la potencia reactiva QT , donde PT es la potencia activa, y posteriormente el factor de potencia f.p. tenemos:

$$Q_T = \sqrt{{S_T}^2 - {P_T}^2}$$

$$\mathrm{Q}_{\mathrm{T}} = \sqrt{1168^2 - 933^2} = 702.82\ \mathrm{kVAR}$$

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

$$\text{f. p.} = \frac{P_T}{S_T}$$

$$\text{f. p.} = \frac{933}{1168} = 0.798$$

Se puede observar que en el contexto actual, se tiene un transformador sobrecargado y un factor de potencia bajo ocasionando penalizaciones a la planta. Esto permite un panorama de los posibles resultados en la simulación.

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

Deseando mejorar el f.p. del transformador a 0.95, se calcula el banco de potencia reactiva necesario para mejorar este factor de potencia, donde θ_1 corresponde al ángulo del factor de potencia inicial y θ_2 al ángulo de factor de potencia propuesto :

$$Q_{\text{var capacitor}} = P_{act}[\tan\theta_1 - \tan\theta_2]$$

$$Q_{\text{var capacitor}} = 933[\tan(37.06) - \tan(18.19)] = 398.02\ kVAr$$

Por el cálculo se propone un banco de 350 kVAr por fines comerciales, se puede observar que el transformador entrega una corriente menor al sistema. La potencia reactiva entregada por el transformador ahora es de:

$$Q_T = 702.82 - 350 = 352.82\ \text{kVAR}$$

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

y la potencia aparente entregada por el transformador con la instalación del banco de capacitores de 350 kVAr, es:

$$S = \sqrt{933^2 + 352.82^2} = 997.5 \text{ kvA}$$

La nueva corriente que suministra el transformador con esta nueva potencia es:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V} = \frac{997.5 \text{ kVA}}{\sqrt{3} * 0.48 \text{ kV}} = 1199.8 \text{ Amperes}$$

Y el factor de potencia para el transformador con la conexión del banco de capacitores es:

$$\text{f. p.} = \frac{933}{997.5} = 0.935$$

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

Pudiera darse la idea de que de esta manera ya se ha solucionado el problema, ya que se ha mejorado el factor de potencia y mitigado la sobrecarga en el transformador al instalarse el banco de capacitores, sin embargo debido a que alimenta una carga no lineal que genera armónicas (rectificador de 6 pulsos) pudiera existir el evento de fallo denominado ***resonancia***. Para el análisis de la conveniencia de la instalación de un banco de capacitores a una red eléctrica sin que exista resonancias, se aplica el estándar ANSI/IEEE 18 -2002, en donde se consideran ciertos criterios para evitar este evento de fallo.

Tabla 3.- Estándares ANSI/IEEE 18-2002, para el filtro

VALORES LIMITES DE UN BANCO	
I_{rms}	180 % del nominal
V_{rms}	110 % del nominal
V_{pico}	120% del nominal
Q	135% del nominal

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

Para predecir los problemas de resonancia en paralelo entre el transformador y el banco de capacitores, se calcula el orden de la frecuencia de resonancia h y la razón de corto circuito SCR existente en el bus donde es conectado el transformador y el banco de capacitores, en donde se puede apreciar que los valores no cumplen con los criterios mencionados por el estándar.

$$\mathrm{SCR} = \frac{\mathrm{MVA_{CC}}}{\mathrm{MW_{carga\ no\ lineal}}} < 20$$

$$\mathrm{h} = 5.3452 \quad , \quad \mathrm{SCR} = 10.718$$

Por los resultados anteriores, entonces se propone aumentar la capacidad del banco de capacitores y que sea parte de un filtro de quinta armónica, se propone un banco de 500 kVAr.

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

$$X_C = 0.4608\ \Omega\ ;\ X_L = 0.0208601\ \Omega$$

$$Q_{filtro} = 523.7\ kVAr$$

$$I_c = \frac{500}{\sqrt{3}*(0.480)} = 601.406\ Amperes$$

$$I_f = \frac{523.7}{\sqrt{3}*0.480} = 629.9\ Amperes$$

$$I_5 = (0.30) * (1406.296) = 421.888\ \ Amperes$$

$$I_{rms\ filtro} = \sqrt{421.88^2 + 629.9^2} = 758.127\ Amperes$$

$$I_{pico\ filtro} = 421.88 + 629.9 = 1051.78\ Amperes$$

$$V_c = \sqrt{3} * (629.9) * 0.4608 = 502.7414\ Volts$$

$$V_{c5} = \sqrt{3} * 421.88 * \frac{.4608}{5} = 67.342\ Volts$$

$$V_{cap\ rms} = \sqrt{502.7414^2 + 67.34^2} = 507.231\ Volts$$

$$V_{cap\ pico} = \sqrt{2} * (502.7414 + 67.34) = \sqrt{2} * 570.08\ Volts$$

$$kVAr_{cap} = \sqrt{3} * 758.127 * 507.231 = 666.052\ kVAr$$

6.- Solución (Aplicación de estándares y cálculos matemáticos)

Donde observando los valores calculados se aprecia que cumplen con los criterios establecidos por la ANSI/IEEE 18-2002 para el filtro propuesto.

$$I_{rms} = \frac{758.127}{601.46} = 126.21\% \text{ (si cumple)}$$

$$V_{rms} = \frac{507.231}{480} = 105.67\% \text{ (si cumple)}$$

$$V_{pico} = \frac{\sqrt{2} * 570.08}{\sqrt{2} * 480} = 118.766\% \text{ (si cumple)}$$

$$kVAr = \frac{666.052}{500} = 133.21\% \text{(si cumple)}$$

7.- Simulaciones en ETAP “Contexto Actual”

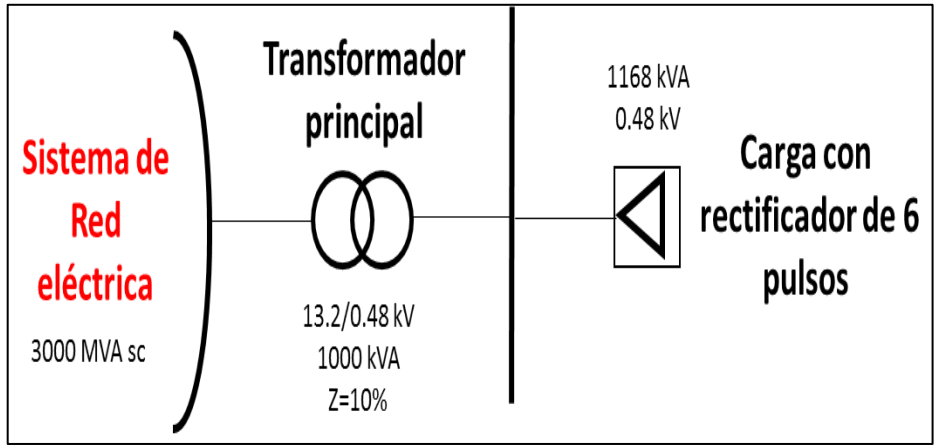


Fig. 6 Diseño del sistema eléctrico en estudio

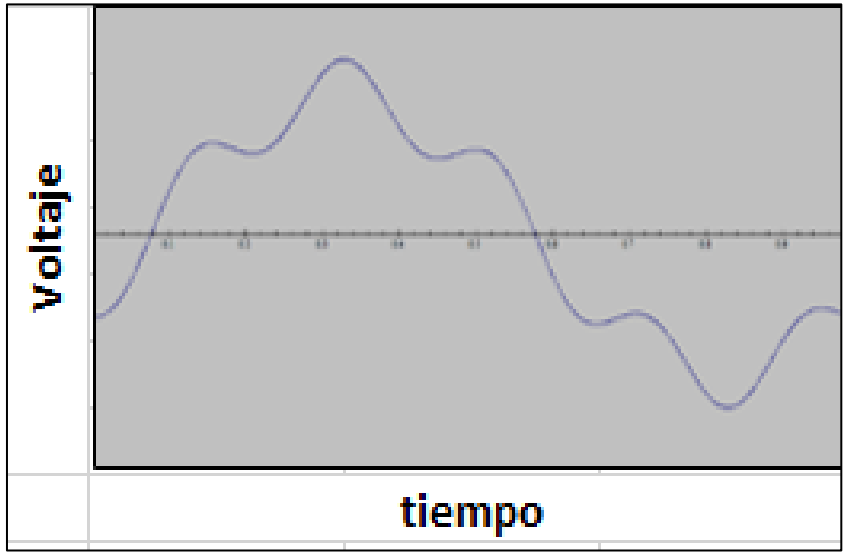


Fig. 7 voltaje en el bus sin banco de capacitores

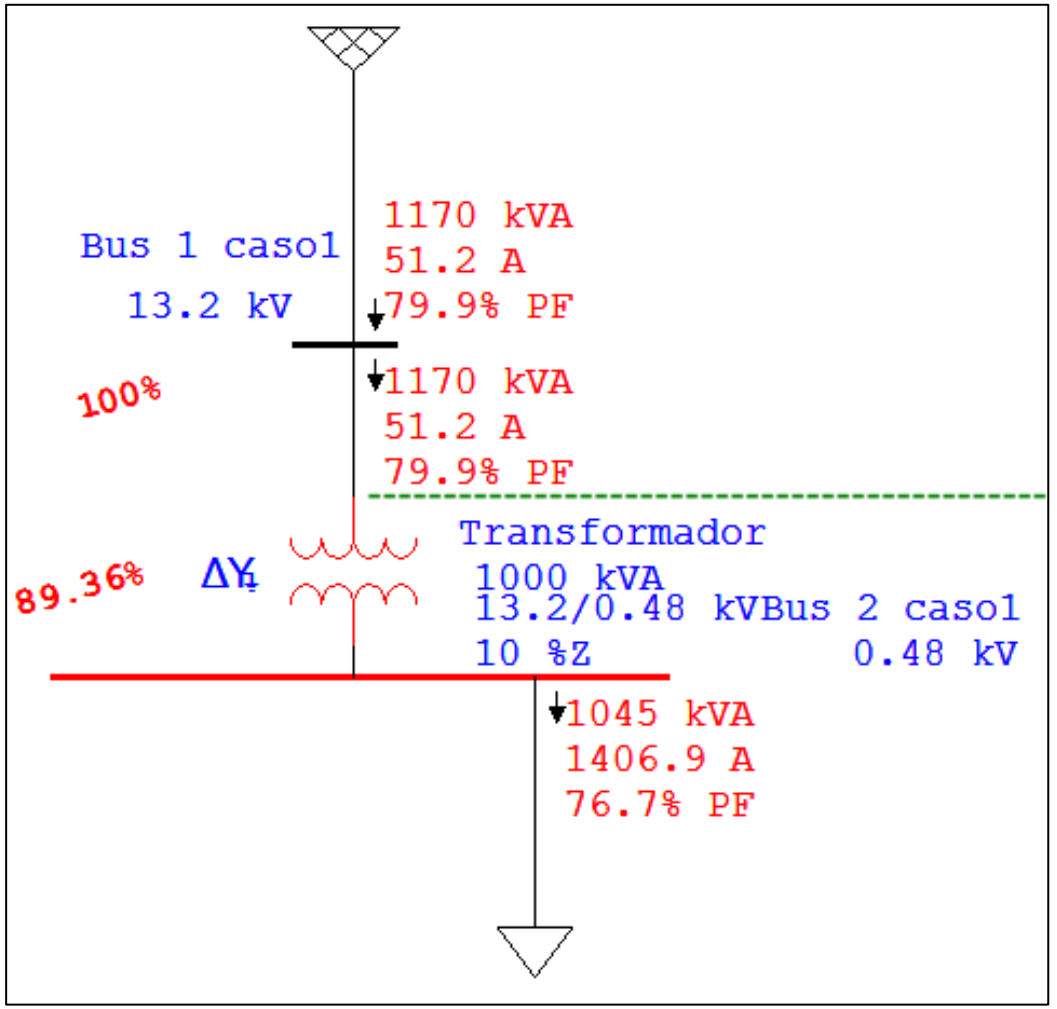


Fig. 8 Corrida de flujo en ETAP 12.6 inicialmente

7.- Simulaciones en ETAP “Contexto Actual”

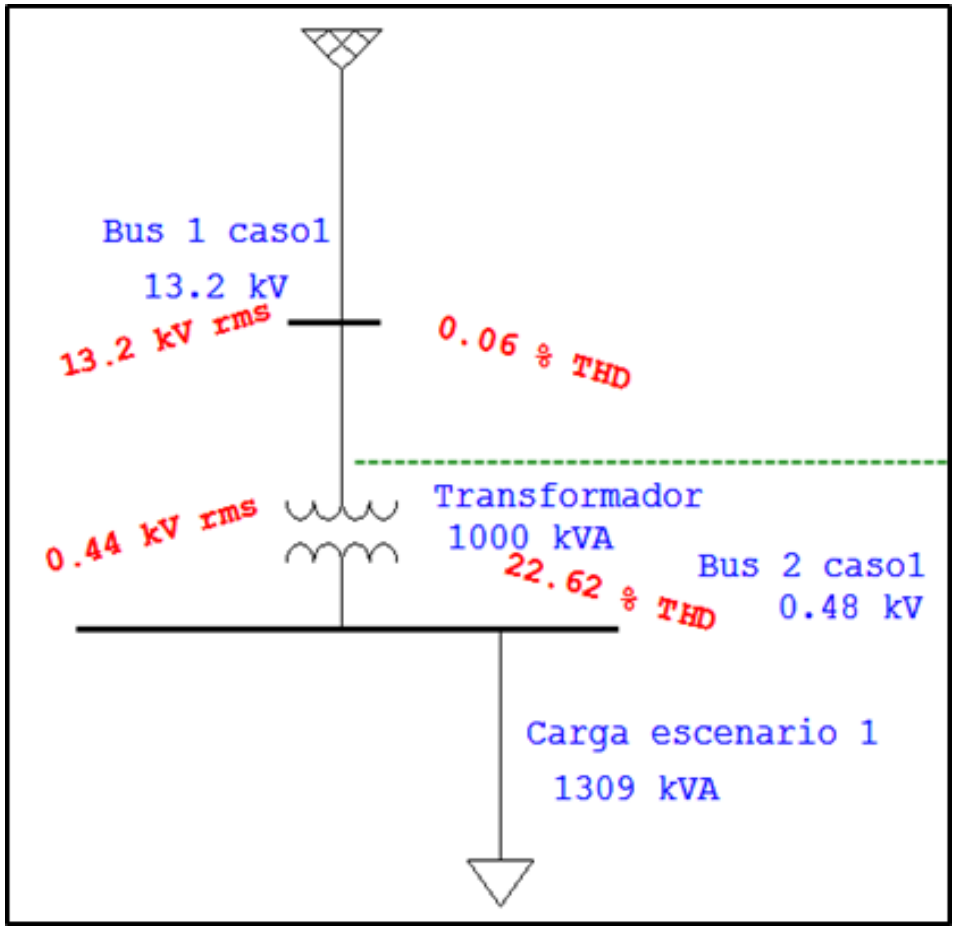


Fig. 9 ETAP 12.6, valores de THD inicialmente

Problemas del contexto

.- Bajo factor de potencia (penalizaciones en la facturación)

.- Alto valor de THD (Total harmonic distortion), causa degradación en los aislamientos de los equipos

.- Transformador sobrecargado

8.- Simulaciones en ETAP “Contexto con el banco de 350 kVAr”

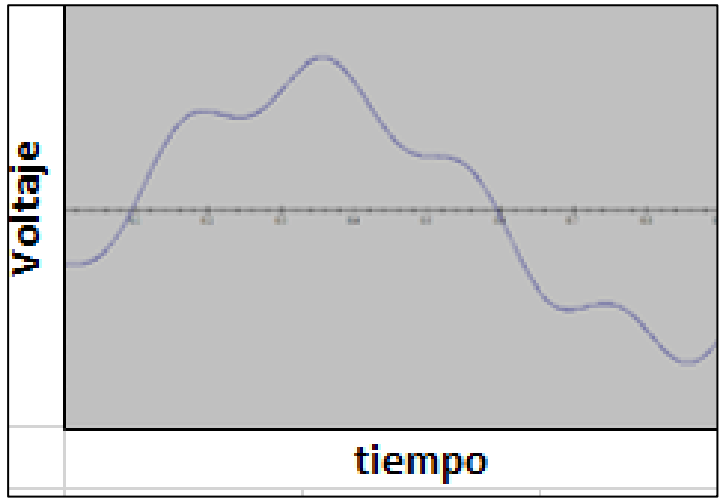


Fig. 10 voltaje en el bus después de instalar el banco 350 kVAr.

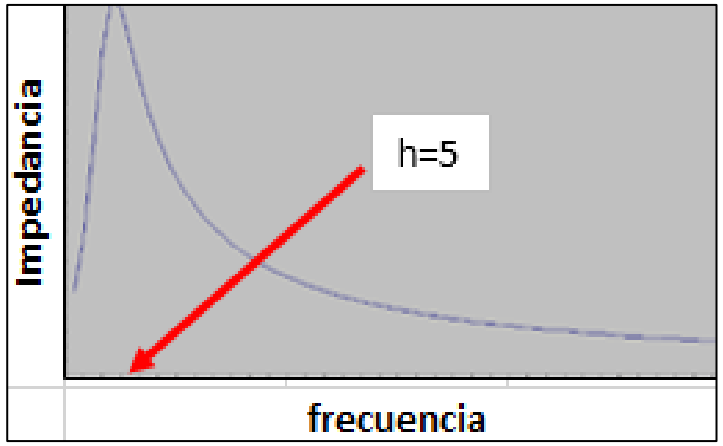


Fig. 11 Incremento significativo de la magnitud de la impedancia en la frecuencia de 5ta armónica, al instalar el banco de 350 kVAr

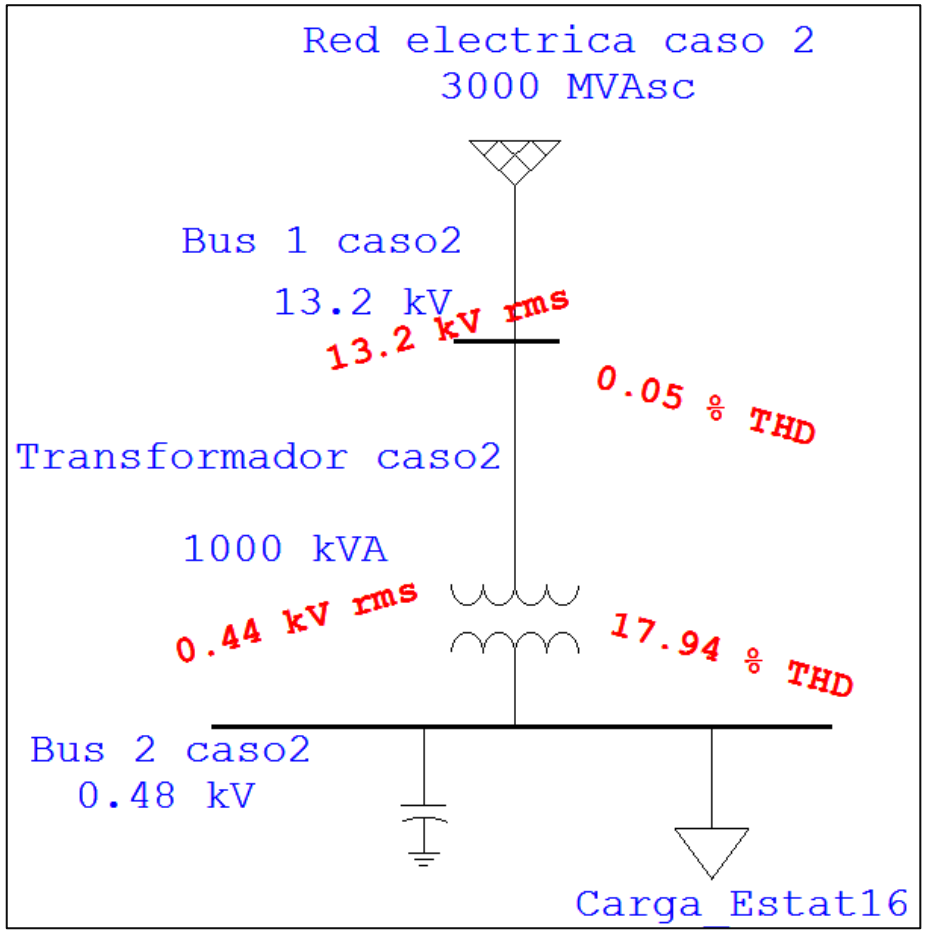


Fig. 12 Condición con un banco de 350 kVAr

8.- Simulaciones en ETAP "Contexto con el banco de 350 kVAr"

$$SCR = \frac{MVA_{CC}}{MW_{carga\ no\ lineal}} < 20$$

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{cc}}{MVAR_{cap}}}$$

$$h = 5.3452 \quad , \quad SCR = 10.718$$

Problemas del contexto

.- Condiciones para una resonancia (5ta armónica)

.- Alto valor de THD (Total harmonic distortion), causa degradación en los aislamientos de los equipos

9.- Simulaciones en ETAP “Contexto con el filtro de 5ta armónica”

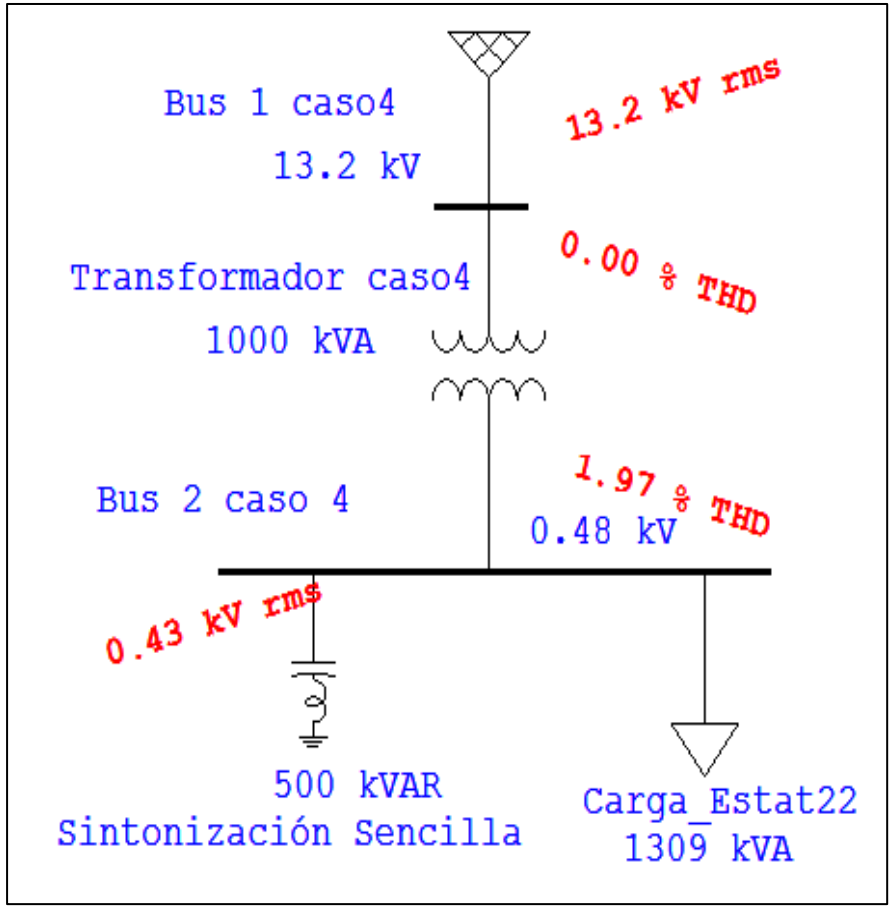


Fig. 13 Disminución del THD con el filtro de 5ta armónica

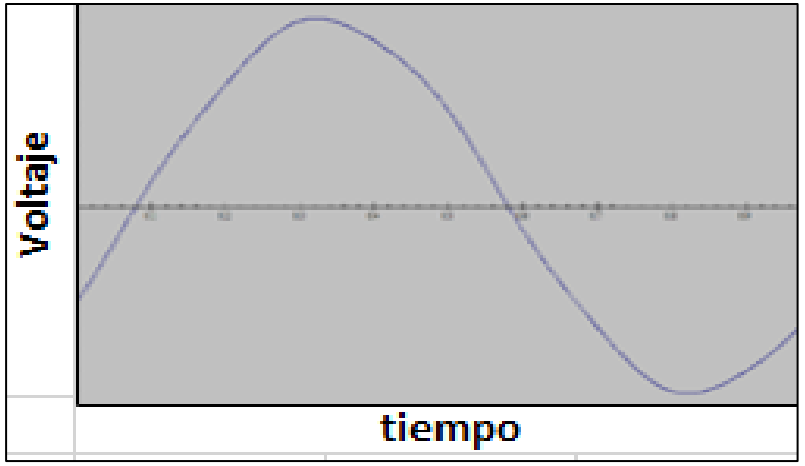


Fig. 14 Voltaje en el bus instalado el filtro de 5ta armónica

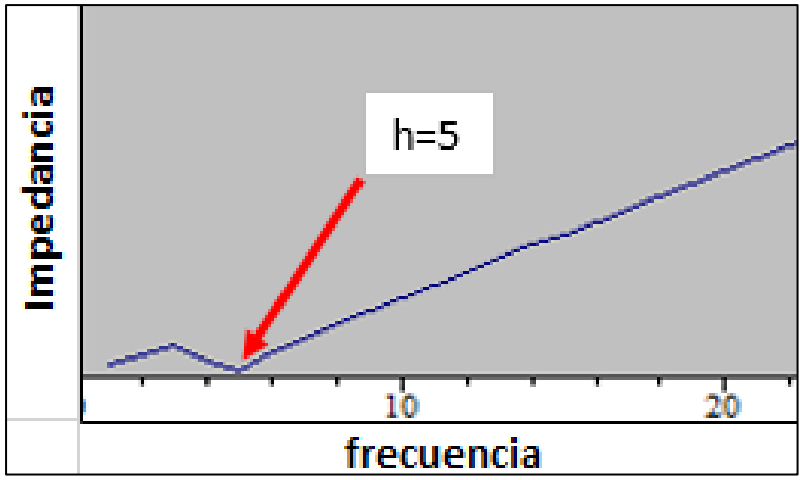


Fig. 15 Disminución de la magnitud de la impedancia en la 5ta armónica

10.- Análisis - Costo – Riesgo – Beneficio de los tres escenarios

Tabla 4.- Comparación de los tres escenarios

	Evento actual	Sistema con solamente instalado el banco de 350 kVAr	Sistema instalado con el banco de 500 kVAr como parte de un filtro de 5ta armónica
Evento de fallo existente o posible	Bajo factor de potencia	Resonancias en paralelo	Resonancia en paralelo y bajo factor de potencia
ff (evento de fallos al año)	1	1	0.083333333
PE ($ por evento de fallo)	25000	500000	1020000
TR (Horas)	10	20	30
IP ($ por evento de fallo por hora)	2500	25000	34000
CMO ($ costos de mano de obra)	30000	60000	90000
CM ($ costos del material)	60000	120000	200000
PABFP ($)	15037.97468		
BAFP ($)	No aplica	-1451.612903	-3673.469388
Facturación mensual ($)	15000	15000	15000
Factor de potencia	0.79	0.93	0.98

10.- Análisis - Costo – Riesgo – Beneficio de los tres escenarios

Tabla 5.- Comparación mediante el indicador RTA

	Evento actual	Sistema con solamente instalado el banco de 350 kVAr	Sistema instalado con el banco de 500 kVAr como parte de un filtro de 5ta armónica
RTA	**130,038**	**678,548**	**105,493**
CAR	90,000	180,000	24,167
PAF	25,000	500,000	85,000
PABFP / BAFP	15,038	-1,451.61	-3,673.47

11.- Conclusiones

.- Problemas debido a cambios de contexto operacional en los sistemas eléctricos pueden analizarse mediante simulaciones adecuadas de los eventos de fallos

.- Herramientas de optimización en la gestión de mantenimiento complementan los estudios de calidad de la energía, permitiendo un panorama mas amplio para posibles decisiones de reingeniería en un sistema eléctrico

.- El estudio realizado contribuye a una gestión de mantenimiento y por ende a una gestión de activos, ya que se generan beneficios en costos, riesgos y mejora del desempeño

.- La resonancia eléctrica analizada, es un fenómeno del tipo estacionario, lo cual determinó la selección del software ETAP 12.0 para realizar la simulación

11.- Conclusiones

.- Problemas de diseño en una instalación pueden ser analizados de una manera conveniente mediante la metodología HAZOP

.- Mediante el AC se determina cual es el evento de fallo mas prioritario para la planta

.- Mediante el desarrollo del ACR, se logran proponer políticas y procedimientos de mejora para la planta

.- Mediante las simulaciones, se pudo analizar los tres diversos contextos y apreciar los comportamientos para los posibles eventos de falla

.- Mediante el desarrollo del ACRB, se obtiene un criterio para la solución mas óptima para la planta en relación al diseño de la instalación eléctrica debido a la resonancia

12.- Bibliografía

1.- Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra S. Sengupta, **"***Electric Power Quality***",** Edit. Springer, 2010, Pag.30.

2.- Procobre, Notas del seminario" *Gestión de Activos en Generación, Transmisión y Distribución del sector eléctrico en México*", México, 2017.

3.- Ruimin Zheng, Math H. J. Bollen, Jin Zhong, "Harmonic Resonances due to a Grid-connected Wind Farm", Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Pag1 – 7.

4.- R.J. Latino, K. C. Latino," *ROOT CAUSE ANALYSIS Improving Performance for Bottom-Line Results",* Edit. CRC. Press, 2002, Chapter 4, Pag.33.

5.- Parra C., "*Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad aplicada en la Gestión de Activos*", 2da edición edit. Ingeman, España, 2015.

6.- Acha E. Madrigal M. "*Power System Harmonics, Computer Modelling and Analysis",* Edit. John Wiley & Sons, University of Glasgow, UK. 2001, Pag. 65-70.

12.- Bibliografía

7.- Zamora I., Sainz A., Fernández E., Sagastabeitia K., Albizu I., Eguía P., Torres E., Valverde V., "*Simulación de sistemas eléctricos*", Edit. Pearson, España, 2005, pag.56.

8.- Notas del cuso "*Certificación en la metodología Análisis-Causa-Raíz "*, Ingeman, México, 2016.

9.- Notas del curso "*Simulación de sistemas eléctricos de potencia en ETAP 14.0"*, Instituto Tecnológico de Morelia, México D.F. 2016.

10.- Alexander Ch., Sadiku M. "*Fundamentos de Circuitos Eléctricos",* Edit. Mc. Graw Hill, 3era edición, México, 2006, Pag.481, 629.

11.- Sánchez A. M., Romero A.A. "Consideraciones para la gestión de interruptores de alta tensión en el marco de la ISO 55000", 2014 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)

Gracias por su tiempo y comprensión

MER, MIIMC Rubén Joaquín Cetina Abreu
Cel 44355275647
rubencetinaabreu@hotmail.com