

Optimización Multiobjetivo de Filtros Pasivos

Jandecy Cabral Leite, Ignacio Pérez Abril, Maria Emilia de Lima Tostes, Roberto Celio Limão de Oliveira

Resumen— Diferentes acercamientos se han empleado para formular el problema del diseño de filtros pasivos. Estas formulaciones puede clasificarse en: formulaciones de uno o varios objetivos (multiobjetivo). Mientras las contribuciones previas resuelven el problema multiobjetivo mediante la minimización de una sola función objetivo compuesta por la suma ponderada de varios sub-objetivos, el presente trabajo utiliza el Algoritmo Genético por Ordenamiento No-dominado (NSGA-II) para resolver este problema. El programa de optimización desarrollado es capaz de determinar el número, ubicación, configuración y parámetros de los filtros pasivos necesarios para obtener las soluciones óptimas no-dominadas para el problema de optimización multiobjetivo. El programa puede escoger entre cuatro tipos de configuraciones predefinidas de filtros para cada una de las barras candidatas para compensar. La solución de un ejemplo práctico muestra la efectividad del procedimiento propuesto.

Palabras clave— Diseño de filtros pasivos, Compensación de potencia reactiva, Algoritmos Genéticos

I. INTRODUCCIÓN

LOS filtros pasivos de armónicos son un medio adecuado para la preservación de la calidad de la energía, al mismo tiempo que se convierten en medios compensadores de la potencia reactiva.

Varios autores han tratado la optimización de filtros pasivos. Métodos de optimización como: programación cuadrática secuencial [1], simulación del recocido [2], procedimiento interactivo fuzzy [3], evolución diferencial [4], redes neuronales [5], calentamiento de partículas [6], algoritmo genético [7][8][9] han sido empleados para la optimización de ciertas configuraciones de filtros pasivos: filtros sintonizados, filtros sintonizados y paso-alto amortiguados, etc.

Diferentes acercamientos se han empleado para formular el problema del diseño de filtros pasivos. Estas formulaciones puede clasificarse en: formulaciones de uno o varios objetivos (multiobjetivo)

La minimización del costo de los filtros [2], o la maximización del Valor Presente Neto (VPN) resultante de los beneficios obtenidos con los filtros como compensadores de reactivo [1], son formulaciones de un objetivo. A pesar de que las restricciones consideradas en estas formulaciones produzcan soluciones que cumplen los límites de distorsión de tensión y corriente de las normas de calidad de la energía, estas formulaciones no buscan una reducción de la distorsión más allá de estos límites.

Varios objetivos de minimización se consideran por las formulaciones multiobjetivo:

- a) La Distorsión Total de la Demanda (TDD) de la corriente en el Punto de Conexión Común (PCC) [3, 4, 5, 6, 7, 8].
- b) La Distorsión Armónica Total (THD) de la tensión en cada barra del sistema [3, 4, 5, 7, 10].
- c) El costo de inversión en los filtros [3, 6, 10].
- d) Las pérdidas en los filtros [4, 5, 7].

Sin embargo, ninguna de las formulaciones multiobjetivo consideran los beneficios de la compensación de potencia reactiva como un objetivo, y la magnitud de la potencia reactiva fundamental de los filtros se trata normalmente como una restricción a cumplir.

En una empresa industrial, la mínima potencia reactiva requerida a la fundamental está impuesta por el gran efecto de la cláusula de factor de potencia en la factura eléctrica [11][12]. Sin embargo, una mayor cantidad de potencia reactiva pudiera reducir las pérdidas de potencia y energía en transformadores, cables, etc.

Por otra parte, cuando se consideran varias barras para la compensación de potencia reactiva, la determinación de la cantidad de compensación en cada barra no es un problema trivial.

Los beneficios de la compensación de potencia reactiva en la factura eléctrica consideran: el incremento del factor de potencia, la disminución de la demanda máxima y la reducción de las pérdidas de energía en el sistema (que incluyen las pérdidas en los compensadores). El valor presente de estos beneficios evaluados en N años, menos el costo de inversión en los compensadores es el VPN del proyecto de compensación de potencia reactiva.

Por lo tanto, el presente trabajo considera una nueva formulación multiobjetivo para la selección y ubicación de múltiples filtros pasivos que incluye la maximización de los beneficios por la compensación de la potencia reactiva VPN provocada por los filtros en su capacidad de compensadores

Jandecy Cabral Leite is with Institute of Technology and Education Galileo of Amazonia (ITEGAM), Manaus, Brazil. (e-mail: jandecycabral@hotmail.com). Ignacio Pérez Abril is with the Central University of Las Villas (UCLV), Cuba (e-mail: iperez@uclv.edu.cu). Maria Emilia de Lima Tostes is with the Universidad Federal do Pará, Brazil (e-mail: tostes@ufpa.br). Roberto Celio Limão de Oliveira, is with the Universidad Federal do Pará, Brazil (e-mail: limao@ufpa.br).

de potencia reactiva.

Mientras las contribuciones previas [4, 5, 7, 8, 10] resuelven el problema multiobjetivo mediante la minimización de una sola función objetivo compuesta por la suma ponderada de varios sub-objetivos, el presente trabajo utiliza el Algoritmo Genético por Ordenamiento No-dominado (NSGA-II) [13] para resolver este problema.

El programa de optimización desarrollado es capaz de determinar el número, ubicación, configuración y parámetros de los filtros pasivos necesarios para obtener las soluciones óptimas no-dominadas para el problema de optimización multiobjetivo. El programa puede escoger entre cuatro tipos de configuraciones predefinidas de filtros para cada una de las barras candidatas para compensar. La solución de un ejemplo práctico muestra la efectividad del procedimiento propuesto.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Un filtro pasivo en derivación puede estar formado por múltiples ramas, donde cada rama puede ser sintonizada o paso-alto amortiguada de 2^{do} orden.

Para permitir la selección de la configuración de filtro más apropiada para cada barra seleccionada, y siguiendo las recomendaciones de Arrillaga [14] para el diseño convencional de filtros, se han predefinido cuatro configuraciones típicas.

1. Tipo A: Varias ramas sintonizadas para eliminar los armónicos de orden bajo.
2. Tipo B: Una sola rama paso-alto de 2^{do} orden para filtrar todo el espectro de armónicos.
3. Tipo C: Varias ramas sintonizadas para eliminar los armónicos de orden bajo y una rama paso-alto de 2^{do} orden para filtrar los armónicos de orden alto.
4. Tipo D: Dos ramas paso-alto de 2^{do} orden para filtrar los armónicos de orden bajo y alto respectivamente.

La configuración tipo A (fig. 1) está compuesta por un arreglo de ($m \leq 4$) ramas sintonizadas para eliminar los armónicos de tensión de bajo orden ($h \leq 13$) más importantes en la barra considerada. El factor de calidad de cada rama es alto ($10 \leq Q \leq 50$).

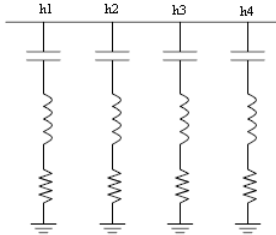


Fig. 1. Configuración tipo A

Los filtros sintonizados no se sintonizan exactamente a la frecuencia del armónico h . En su lugar, ellos se sintonizan a una frecuencia más baja de $0.95h$. Esto puede prevenir la amplificación de los armónicos de las frecuencias inferiores cercanas a la de sintonía [14][15].

La configuración tipo B (fig. 2) está compuesta por una rama única paso-alto de 2^{do} orden para reducir una banda ancha de armónicos. Esta rama se sintoniza a una frecuencia entre las existentes en las fuentes de armónicos del circuito. El factor de calidad es bajo ($0.5 \leq Q \leq 10$).

La configuración tipo C (fig. 3) una configuración tipo A para eliminar las frecuencias de bajo orden y una rama paso-alto de 2^{do} orden para filtrar las frecuencias superiores.

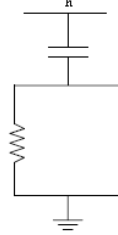


Fig. 2. Configuración tipo B

La rama paso-alto de 2^{do} orden se sintoniza a una frecuencia sobre el máximo orden filtrado por las ramas sintonizadas. El factor de calidad de la rama de 2^{do} orden es bajo ($0.5 \leq Q \leq 10$).

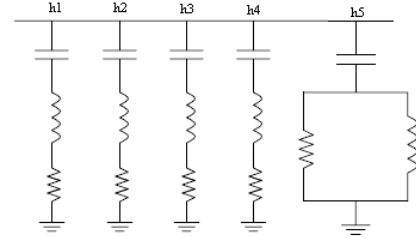


Fig. 3. Configuración tipo C

La configuración tipo D está compuesta por dos ramas paso-alto de 2^{do} orden. La primera rama se sintoniza a una frecuencia de bajo orden ($h \leq 13$) con un factor de calidad alto ($10 \leq Q \leq 40$). La segunda rama se sintoniza a una frecuencia de orden alto ($h > 13$) con un factor de calidad bajo ($0.5 \leq Q \leq 10$).

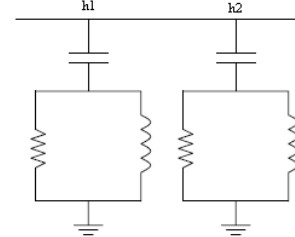


Fig. 4. Configuración tipo D

Los parámetros del filtro pasivo a ubicar en una de las barras candidatas se representan en la Tabla I:

TABLA I: DESCRIPCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE UN FILTRO

Parámetro	Descripción
Estado	Estado del filtro (0, 1)
Tipo	Tipo de configuración y número de ramas
Frecuencia	Frecuencia de sintonía de las ramas
Unidad	Unidades estándar de condensadores de las ramas
Número	Número de unidades de las ramas.
Q	Factor de calidad de las ramas

Si $Estado = 0$, significa que el filtro no existe y el resto de los parámetros no se consideran.

Por otra parte, la Tabla II muestra los tipos de configuraciones de filtro y el número de ramas sintonizadas y de 2^{do} orden para cada valor del parámetro *Tipo*.

Cada *Unidad* de condensador se selecciona de un arreglo de unidades estándar para cada nivel de tensión, mientras que el *Número* de unidades se selecciona en el intervalo de 1 al número máximo de unidades para compensar el factor de potencia de la carga a la unidad.

TABLA II: TIPOS DE FILTRO

Tipo	Configuración	Número de ramas	
		Sintonizadas	2 ^{do} orden
1	1	1	
2	1	2	
3	1	3	
4	1	4	
5	2		1
6	3	1	1
7	3	2	1
8	3	3	1
9	3	4	1
10	4		2

El número máximo de ramas sintonizadas y su frecuencia de sintonía se predefinen antes de la optimización, por lo que estos parámetros no son incluidos en el vector solución s_k de n elementos que representa las variables a ser optimizadas para el filtro k .

Considerando que hay K barras candidatas para ubicar filtros, el vector x que incluye los sub-vectores $s_1, s_2, \dots, s_K$ de los posibles K filtros seleccionados, representa las $n \cdot K$ variables independientes del problema de optimización.

De esta manera, la determinación del valor óptimo de los elementos de x implica la selección del número, ubicación, configuración y parámetros de diseño de todos los filtros.

A. Funciones objetivo

El presente trabajo considera una nueva formulación multiobjetivo que se basa en tres funciones objetivo:

1. El objetivo de la compensación de potencia reactiva.
2. Los objetivos del control de armónicos sobre:
 - a. La distorsión total de la demanda TDD en el PCC.
 - b. La distorsión total de la tensión THD en todas las barras del sistema.

A.1 Objetivo de la compensación de potencia reactiva

Debido al efecto compensador de la potencia reactiva de los filtros, una vez que estos se instalan en el sistema, se produce un incremento sustancial del factor de potencia y al mismo tiempo se reducen las pérdidas de potencia y energía en los elementos del circuito de distribución.

Para determinar el efecto económico de la compensación de potencia reactiva, todos los (L) escenarios característicos de la carga diaria deben ser considerados para calcular el consumo de energía y el factor de potencia de la instalación.

En una empresa industrial, la factura eléctrica es un medio conveniente para medir el costo anual del consumo de

energía de la instalación ($Cost$).

Para cada escenario de carga diaria, la potencia activa total (P_T) y la potencia reactiva total (Q_T) suministradas por la fuente, así como las pérdidas de potencia activa y reactiva en cada elemento del circuito (incluyendo los filtros) pueden ser calculadas mediante un programa de flujo de potencia a frecuencia fundamental y un programa de penetración de armónicos [14].

Usando los valores calculados P_T y Q_T , la máxima demanda de potencia activa y reactiva, así como el consumo de energía activa y reactiva de la instalación puede estimarse para un día de trabajo característico. Por lo tanto, la factura mensual y anual de la energía puede estimarse si se considera un número de días característicos de trabajo al año.

Este método de agregación puede ser más o menos exacto en la medida en que se caracterice mejor la carga de la instalación.

De esta forma, los beneficios de la compensación de la potencia reactiva para los L escenarios característicos se determinan como la diferencia entre el costo anual de la factura eléctrica $Cost(0)$ antes y $Cost(x)$ después de la instalación de los filtros de armónicos.

El costo de inversión de los filtros $I(x)$ está compuesto de: los costos del condensador, reactor y resistor, los costos de los desconectivos y la protección, así como el costo del chasis, etc.

Los costos del condensador, reactor y resistor dependen linealmente de su potencia para cada nivel de tensión [16]. Otros componentes del costo pueden suponerse proporcionales a la potencia reactiva del filtro.

Considerando un período de evaluación de N años con una razón de interés i , el VPN del proyecto de compensación de potencia reactiva se calcula como:

$$VPN(x) = -I(x) + \sum_{k=1}^N (Cost(0) - Cost(x)) / (1+i)^k \quad (1)$$

Como objetivo de la compensación de potencia reactiva del proyecto de instalación de filtros, el $VPN(x)$ debe ser maximizado. Sin embargo, el primer objetivo se expresará como la minimización de la función dual:

$$\min f_1(x) = -VPN(x) \quad (2)$$

A.2 Objetivos de control de armónicos

Los filtros pasivos de armónicos son primariamente dispositivos de control de armónicos cuya función es evitar la circulación de corrientes distorsionadas a través de los elementos del sistema y reducir la distorsión armónicos de la tensión en las barras.

Para evaluar el efecto de los filtros en los índices de distorsión, todos los W posibles escenarios del sistema deben ser evaluados, lo cual incluye los L escenarios característicos de carga considerados y otro conjunto de condiciones especiales del sistema y la carga.

Estas condiciones especiales pueden incluir variaciones en la impedancia de la fuente de suministro, diferentes modos de

operación de las cargas productoras de armónicos, asintonía de los filtros, etc.

Para cada escenario k considerado, la distorsión total de la corriente en el PCC (TDD_k) y la distorsión total de la tensión en cada i ($THD_{k,i}$) pueden calcularse mediante un programa de penetración de armónicos [14, 17].

$$TDD_k = \sqrt{\sum_{h \in H} I_{k,h}^2} / I_L \quad (3)$$

$$THD_{k,i} = \sqrt{\sum_{h \in H} V_{k,i,h}^2} / Vnom_i \quad (4)$$

Donde H es el conjunto de los armónicos considerados, I_L es la corriente de máxima demanda en el PCC [17] y $Vnom_i$ es la tensión nominal en la barra i .

Como objetivos de la compensación de armónicos del proyecto de instalación de filtros, se considera la minimización de:

$$\min f_2(x) = \max_{k \in W} \{TDD_k(x)\} \quad (5)$$

$$\min f_3(x) = \max_{\substack{k \in W \\ i \in U}} \{THD_{k,i}(x)\} \quad (6)$$

Donde el conjunto U representa todas las barras del sistema.

B. Cuerpo de restricciones

El cuerpo de restricciones del problema de optimización de la instalación de filtros considera:

1. Las restricciones de calidad de la tensión en todas las barras del sistema industrial:
 - a. Límites máximo y mínimo para la magnitud de la tensión rms.
 - b. Límite máximo de la IEEE 519 para la distorsión total de la tensión THD.
 - c. Límites máximos de la IEEE 519 para la distorsión individual de cada armónico de tensión.
2. Las restricciones de calidad de la corriente en el PCC:
 - a. Límite máximo de la IEEE 519 para la distorsión total de la demanda TDD.
 - b. Límites máximos de la IEEE 519 para la distorsión individual de cada armónico de corriente.
3. Las restricciones de máximo estrés de las componentes del filtro.

B.1 Restricciones de calidad de la tensión

La tensión rms en todas las barras del sistema de distribución para cualquier escenario posible debe estar entre los límites máximo y mínimo:

$$V \min_i \leq \left\{ \sqrt{\sum_{h \in H} V_{k,i,h}^2} \right\}_{\substack{k \in W \\ i \in U}} \leq V \max_i \quad (7)$$

La distorsión total de la tensión THD respecto a la tensión nominal debe ser inferior al límite de la IEEE 519 para todas las barras y escenarios posibles:

$$\{THD_{k,i}\}_{\substack{k \in W \\ i \in U}} \leq THD_{LIMIT} \quad (8)$$

La distorsión individual de tensión IHD de cada armónico h respecto a la tensión nominal debe ser menor que el

límite de la IEEE 519 para todas las barras y escenarios posibles:

$$\{V_{k,i,h}/Vnom_i\}_{\substack{k \in W \\ i \in U \\ h \in H}} \leq IHD_{LIMIT}(h) \quad (9)$$

B.2 Restricciones de calidad de la demanda de corriente

La distorsión total de la demanda TDD respecto a la demanda máxima de corriente I_L debe ser menor que el límite de la IEEE 519 para todo escenario probable:

$$\{TDD_k\}_{k \in W} \leq TDD_{LIMIT} \quad (10)$$

La distorsión individual de la demanda de corriente IDD de cada armónico h respecto a la corriente de máxima demanda I_L debe ser menor que el límite de la IEEE 519 para todo escenario probable:

$$\{I_{k,h}/I_L\}_{\substack{k \in W \\ h \in H}} \leq IDD_{LIMIT}(h) \quad (11)$$

B.3 Restricciones de estrés de los filtros

La norma IEEE Std. 18 [18] establece los límites máximos para la potencia reactiva, la tensión y la corriente en un condensador de potencia. Por lo tanto, debe incluirse un conjunto de restricciones que aseguren que el estrés de los condensadores sea inferior a estos límites.

La tensión rms en cualquier condensador c debe ser inferior que el 110% de su tensión nominal $Vnom_c$ para cualquier escenario probable:

$$\left\{ \sqrt{\sum_{h \in H} V_{k,c,h}^2} \right\}_{\substack{k \in W \\ c \in C}} \leq 1.1Vnom_c \quad (12)$$

Donde C representa el conjunto de los condensadores de los filtros.

La tensión pico de cada condensador debe ser inferior al 120% de su tensión pico nominal para cualquier escenario probable:

$$\{V_{peak,k,c}\}_{\substack{k \in W \\ c \in C}} \leq 1.2\sqrt{2}Vnom_c \quad (13)$$

La corriente rms en cada condensador debe ser inferior al 180% de su corriente nominal $Inom_c$ para cualquier escenario probable:

$$\left\{ \sqrt{\sum_{h \in H} I_{k,c,h}^2} \right\}_{\substack{k \in W \\ c \in C}} \leq 1.8Inom_c \quad (14)$$

La potencia reactiva generada por cada condensador debe ser inferior al 135% de la potencia reactiva nominal del condensador $Qnom_c$ para cada escenario probable:

$$\left\{ \sum_{h \in H} Q_{k,c,h} \right\}_{\substack{k \in W \\ c \in C}} \leq 1.35Qnom_c \quad (15)$$

III. PROGRAMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema formulado es altamente no-lineal y discreto, cuya solución requiere un algoritmo de optimización especial.

El hecho es que en la mayoría de los problemas de optimización multiobjetivo, es imposible optimizar al mismo tiempo todos los objetivos, pues la naturaleza conflictiva de los diferentes objetivos impide encontrar una sola solución óptima.

Como resultado, se requiere el concepto de dominación para definir una solución óptima respecto a un problema multiobjetivo.

Una solución es no-dominada si es estrictamente mejor en todos sus objetivos que el resto de las soluciones. Estas soluciones se conocen como soluciones óptimas de Pareto. El conjunto de todas las soluciones no-dominadas, forma la frontera de Pareto y describe el intercambio óptimo entre los distintos objetivos en competencia. [19]

El NSGA-II es una versión mejorada del Algoritmo Genético por Ordenamiento No-dominado NSGA empleado para optimizar problemas multiobjetivo. El código fuente del NSGA-II está disponible en [20] y ha sido utilizado para resolver el presente problema.

Como es común a los algoritmos genéticos, solo es necesario implementar una función para evaluar los objetivos para una solución determinada.

A. Función Evaluate-objectives

La función evaluate-objectives del NSGA-II, evalúa todos los f_i objetivos declarados para un cierto individuo (vector solución x) de la población.

$$\text{function } f = \text{evaluate_objectives}(x, \text{data}); \quad (16)$$

El parámetro *data* representa todos los datos para evaluar la operación del sistema para una cierta solución.

El algoritmo principal de la función referida es:

- 1) Decodifica el vector solución x y crea el correspondiente conjunto de filtros a ubicar en el sistema de distribución.
- 2) Calcula el costo de inversión de los filtros.
- 3) Para todos los W escenarios posibles, se analiza la operación del sistema eléctrico industrial mediante un programa de flujo de potencia a la frecuencia fundamental y un programa de penetración de armónicos.
- 4) Con los resultados calculados para los L escenarios característicos, se calcula la factura eléctrica, incluyendo las pérdidas en todos los elementos y en los filtros. Con estos datos se evalúa el objetivo de la compensación de potencia reactiva (2).
- 5) Los índices de distorsión de tensiones y corrientes se calculan para todo escenario posible y los objetivos de compensación de armónicos (5, 6) son evaluados.
- 6) Las restricciones de calidad de la energía (7-11) y de estrés en los condensadores (12-15) se chequean.

B. Algoritmo principal de optimización

El algoritmo principal de optimización para resolver el problema presentado es el siguiente:

- 1) Analizar el caso base del sistema industrial (evalúa el costo inicial y todos los índices de armónicos).
- 2) Optimiza x mediante el NSGA-II.
- 3) Selecciona una solución de la población final del NSGA-II.

IV. RESULTADOS DEL EJEMPLO DE PRUEBA

Como ejemplo de prueba (ver Apéndice) para la presente metodología se ha utilizado el siguiente circuito.

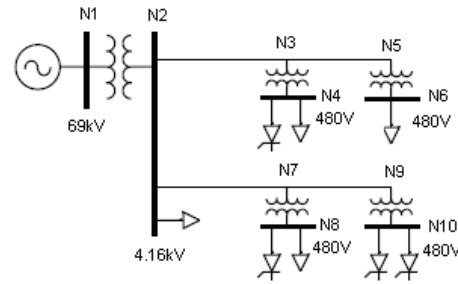


Fig.5. Sistema de ejemplo

Tres escenarios característicos de carga (1, 2, 3) de 6, 10, y 8 horas/día respectivamente se consideraron para evaluar la factura anual de 12 meses de 30 días.

Los escenarios 4, 5 son condiciones pesimistas con mínima carga lineal, máximas inyecciones de armónicos y capacidad de cortocircuito reducida en el PCC.

Además, ambos escenarios añaden una desvalorización de la capacitancia (C) y la inductancia (L) para todos los filtros de: +5% C y +2.5% L en el escenario 4 y +10% C y +5% L en el escenario 5.

Las barras (N2, N4, N8 y N10) fueron seleccionadas candidatas para la instalación de filtros.

El proyecto de compensación de potencia reactiva se evaluó para cinco años con un 10% de interés.

A. Resultados iniciales (caso base)

Se estimaron los costos iniciales y se determinaron los máximos TDD y THD (Tabl1 III).

TABLA III: RESULTADOS INICIALES

Parámetro	Valor
Costo de la energía (\$/año)	981781
Máximo TDD (%)	6.98
Máximo THD (%)	6.44
Factor de potencia	0.83

Por otra parte, se encontraron en varias barras violaciones de los límites de la IEEE 519 para el THD y los armónicos individuales de tensión.

B. Resultados del NSGA-II

Después de 100 generaciones, el algoritmo genético produce una población de 200 soluciones para el ejemplo (fig. 6).

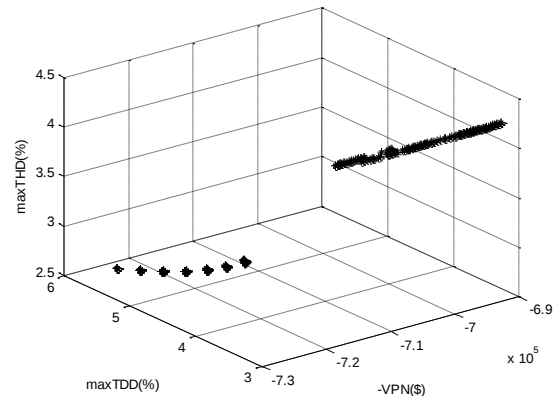


Fig. 6. Espacio de las soluciones.

Buscando en la población una solución que produzca una buena reducción de los máximos TDD y THD, se seleccionó la solución 21 (Tabla IV).

TABLA IV: PARÁMETROS DE LOS FILTROS SELECCIONADOS

Barra	Parámetro	Rama 1	Rama 2
N2	Tipo	2 ^{do} orden	2 ^{do} orden
	Condensador	11x100 kvar	10x100 kvar
	Frecuencia	6.0	19.5
	Q	10.0	6.0

Una vez que se instalan los filtros seleccionados (Tabla V), los máximos TDD y THD se reducen al 59% y 47% respectivamente y se obtiene un buen VPN.

TABLA V: RESULTADOS DE LA SOLUCIÓN 21

Parámetro	Valor
Costo de la energía (\$/año)	780250
Costo de inversión (\$)	42830
VPN (\$)	721129
Máximo TDD (%)	4.13
Máximo THD (%)	3.05
Factor de potencia	1.00

Evaluando el efecto de la solución obtenida, se realizó un análisis de sensibilidad para todos los escenarios, cuyos resultados se muestran (fig. 7).

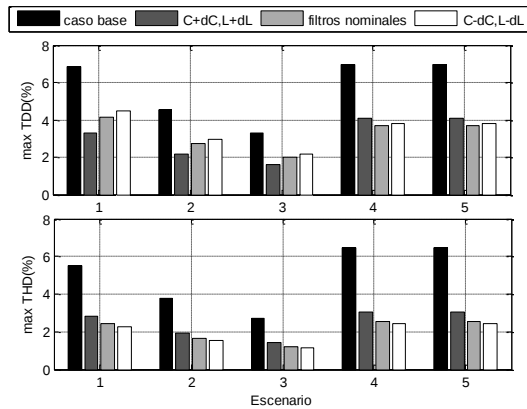


Fig. 7. Máximos TDD y THD.

La comparación está hecha entre el caso base (sin filtros) y los resultados para la variante seleccionada en tres condiciones: (filtros nominales) valores nominales para L y C, (C+dC,L+dL) +10% y +5% de variación para C y L respectivamente, (C-dC,L-dL) -5% variación para L.

Como puede verse, el filtro reduce los valores máximos de TDD y THD para todos los escenarios, incluyendo las condiciones (C+dC,L+dL) y (C-dC,L-dL). En general, el TDD se reduce a (48% - 66%) y el THD se reduce a (38% - 52%) con respecto al caso base.

Finalmente, el barrido de frecuencia de la impedancia en la barra N2 (fig. 8), muestra que el primer pico de impedancia ocurre a una frecuencia no presente en el espectro de armónicos de las cargas. Además, el Segundo pico cercano al 9^{no} armónico es muy reducido, así como las inyecciones de este armónico, por lo que no presenta problemas para el sistema.

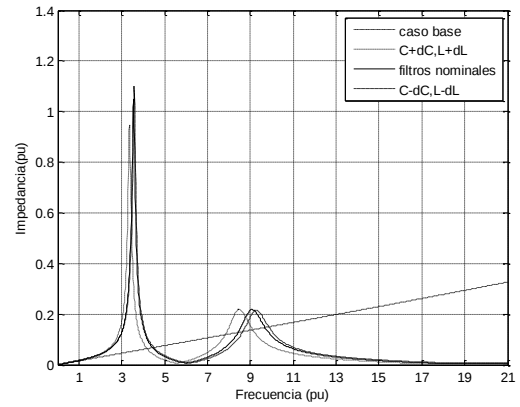


Fig. 8. Impedancia en la barra N2 (escenario 4).

V. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un aplicación del NSGA-II para obtener el número, ubicación configuración y parámetros de los filtros pasivos necesarios para un sistema eléctrico industrial.

En lugar de utilizar configuraciones predeterminadas de filtro, el presente algoritmo es capaz de seleccionar la configuración apropiada para cada barra.

Varios escenarios característicos y no-característicos pueden analizarse para obtener la solución. El método permite evaluar las restricciones necesarias de calidad de la energía y de estrés de los elementos de los filtros.

El procedimiento de solución propuesto ha probado ser altamente convergente en varias pruebas.

Agradecimientos: El Instituto de Tecnología y Educación Galileo Amazon (ITEGAM) y la Fundación de Apoyo a la Investigación del Estado de Amazonas (FAPEAM) apoyo financiero a la universidad a través de esta investigación.

VI. APÉNDICE

Tabla A.1: MVA de cortocircuito en el PCC

Parámetro	Escenarios				
	1	2	3	4	5
MVA _{sc}	150	150	150	75	75
Razón x/r	10	10	10	10	10
SCR*	50	50	50	25	25

*Razón de corto circuito (IEEE-519 [17])

Tabla A.2: Datos de transformadores

Trf.	Barra1	Barra2	Devanado	kV ₁	kV ₂	kVA	%R	%X
1	N1	N2	Δ-Y	69.0	4.16	7500	1.0	12.0
2	N3	N4	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5
3	N5	N6	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5
4	N7	N8	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5
5	N9	N10	Δ-Y	4.16	0.48	1000	1.0	5.5

Tabla A.3: Datos de conductores*

Cond.	Barra1	Barra2	Calibre	Long(m)
1	N2	N3	500 MCM	100
2	N3	N5	500 MCM	100
3	N2	N7	500 MCM	100
4	N7	N9	500 MCM	100

*5 kV-tres conductores apantallados en conducto magnético

Tabla A.4: Datos de cargas lineales*

Carga	Barra	Escenarios									
		1		2		3		4		5	
		kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar
1	N2	800	400	480	240	160	80	160	80	160	80
2	N4	280	140	224	112	84	42	84	42	84	42
3	N6	480	240	288	144	144	72	144	72	144	72
4	N8	420	210	252	126	0	0	0	0	0	0

*Se representan por el modelo serie [14] a frecuencias armónicas.

Tabla A.5: Datos de las cargas no-lineales*

Carga	Barra	Tipo	Escenarios									
			1		2		3		4		5	
			kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar	kW	kvar
1	N4	2	260	300	182	210	130	150	260	300	260	300
2	N8	2	130	150	91	105	52	60	130	150	130	150
3	N10	1	350	200	175	100	175	100	350	200	350	200
4	N10	2	225	260	135	156	112	130	225	260	225	260

*Los espectros de armónicos se muestran en la Tabla A.6

Tabla A.6: Espectro de armónicos de convertidores

orden	Angulo de disparo 30 grados					
	Corrientes (%)			Angulo (grados)		
	A	B	C	A	B	C
1	97.5	100.0	99.7	-40.4	-159.8	78.7
3	0.3	1.0	1.3	100.4	125.7	-60.4
5	20.8	20.2	20.3	-24.7	96.1	-145.8
7	7.7	8.3	8.4	-97.2	146.0	21.1
9	0.5	0.0	0.4	-2.3	154.9	179.0
11	3.9	3.6	3.5	-88.3	36.0	149.4
13	2.8	3.1	3.1	-162.6	80.8	-46.0
15	0.2	0.2	0.3	-75.6	-154.6	66.6
17	0.4	0.2	0.3	139.7	-92.8	1.3
19	0.5	0.6	0.5	122.8	-0.4	-127.6
21	0.1	0.1	0.2	97.8	152.6	-45.1
Orden	Angulo de disparo 50 grados.					
	Corrientes (%)			Angulo (grados)		
	A	B	C	A	B	C
1	90.3	95.7	100.0	-49.9	-164.9	70.0
3	4.5	8.2	3.8	-78.9	109.9	-59.6
5	51.7	51.0	53.9	-60.1	56.6	177.6
7	23.6	25.3	24.0	21.5	-99.6	137.4
9	1.4	2.2	0.8	-144.9	29.5	-160.4
11	6.6	6.5	7.9	-154.4	-48.3	77.8
13	6.9	7.9	7.5	-80.9	159.5	32.8
15	0.8	1.2	0.4	130.2	-61.0	97.4
17	1.4	1.5	2.3	121.0	-165.8	-21.7
19	2.9	3.6	3.5	173.5	58.2	-73.7
21	0.5	0.7	0.3	45.7	-149.7	-4.1

Tabla A.7: Datos de la facture eléctrica [12]

Costo de la demanda (\$/kW)	10.2
Costo de la energía (\$/MWh)	25.7
Factor de potencia mínimo	0.92

Tabla A.8: Costo de los condensadores

480 V		4160 V	
kvar	\$/kvar	kvar	\$/kvar
25	19	50	15
50	17	100	14
		150	13

Tabla A.9: Costo de los reactores

480 V	4160 V
300 \$/kvar	250 \$/kvar

Tabla A.10: Costo de los resistores

480 V	4160 V
100 \$/kW	100 \$/kW

VII. REFERENCIAS

- [1] Pérez Abril, I., González Quintero, J. A., "VAR Compensation by Sequential Quadratic Programming," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.18, No.1, pp. 36-41, February 2003.
- [2] Hsiao, Ying-Tung, "Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems", Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 193-199 (2001).
- [3] Chen, Yuan-Lin, "Optimal Multi-Objective Single-Tuned Harmonic Filter Planning", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, April 2005, pp. 1191-1197.
- [4] Chang, Y.-P. and Wu, C.-J., "Design of Harmonic Filters Using Combined Feasible Direction Method and Differential Evolution", presented at the 2004 International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004, Singapore, Nov. 2004.
- [5] Chang, Y.-P.; Low, C.; Wu, C.-J., "Optimal Design of Discrete-Value Passive Harmonic Filters Using Sequential Neural-Network Approximation and Orthogonal Array", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2007, pp. 1813-1821.
- [6] Lina Huang, Na He and Dianguo Xu, "Optimal Design for Passive Power Filters in Hybrid Power Filter Based on Particle Swarm Optimization", Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Aug. 2007, Jinan, China.
- [7] Chang, Y.-P.; Tseng, W.-K.; Tsao, T.-F. "Application of combined feasible-direction method and genetic algorithm to optimal planning of harmonic filters considering uncertainty conditions", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 5, Sept. 2005, pp. 729 – 736.
- [8] Vishal Verma and Bhim Singh, "Genetic-Algorithm-Based Design of Passive Filters for Offshore Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 4, July/Aug. 2010, pp. 1295-1303.
- [9] Zhang Ruihua, Liu Yuhong, Li Yaohua, "Optimal Parameters for Filter Using Improved Genetic Algorithms", presented at the 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '09, April 2009, China.
- [10] Ahmed Faheem Zobaa, "Cost-Effective Applications of Power Factor Correction for Nonlinear Loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January. 2005, pp. 359-365.
- [11] IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, IEEE Std 141-1993, NY, 1993.
- [12] ANEEL RES. 456. Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Resolução ANEEL N° 456 de 29 de novembro de 2000, available in: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2000456.pdf>.
- [13] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6, No. 2, pp 182 – 197, 2002.
- [14] J. Arrillaga and N.R. Watson, Power Systems Harmonic, 2nd ed, New York: Wiley, 2003.
- [15] Alexandre B. Nassif and Wilsun Xu, Passive Harmonic Filters for Medium-Voltage Industrial Systems: Practical Considerations and Topology Analysis IEEE 2007 39th North American Power Symposium (NAPS 2007), pp. 301-307
- [16] C. Kawann and A. E. Emanuel, "Passive Shunt Harmonic Filters for Low and Medium Voltage: A Cost Comparison Study", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1825-1831, November 1996.
- [17] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1992, IEEE, New York, NY, 1993.
- [18] IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Standard 18-1992, IEEE, NY, 1993.
- [19] Steven M. Small, and Benjamin Jeyasurya, Multi-Objective Reactive Power Planning: A Pareto Optimization Approach, Intelligent Systems Applications to Power Systems, 2007. ISAP 2007, pp. 1 - 6
- [20] Aravind Seshadri, NSGA-II source code available in <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm/content/NSGA-II/>

VIII. BIOGRAPHIES



Jandecy Cabral Leite is President Director and researcher at the Institute of Technology and Education Galileo of Amazonia (ITEGAM), Manaus, Brazil. His area of interest includes power quality and analysis, design and optimization of power systems and Mathematical Modeling using tools of Computational Intelligence in Power Systems (Power Quality).



Ignacio Pérez Abril is Director of the Electric Power Research Center and Industrial Power Systems professor at the Universidad Central de Las Villas, Cuba. His area of interest includes power quality and analysis, design and optimization of power systems.



Maria Emilia de Lima Tostes is Electrical Engineering professor at the Universidad Federal do Pará – UFPA, Brazil. She works with research on the area of Electric Power Quality Systems.



Roberto Célio Limão de Oliveira is Electrical Engineering professor at the Universidad Federal do Pará – UFPA, Brazil. He works with research on the area of Electric Power Quality Systems and computational intelligence through genetic algorithms processes.