

METODOLOGÍA PARA ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE PRESUPUESTO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL SERVICIO

L.F. Rojas Ríos¹, J.M. Lopez-Lezama², Nicolás MuñozGaleano²

Se presenta un modelo multiobjetivo para minimizar el costo de mantenimiento en sistemas de distribución y maximizar la reducción de la tasa de fallas. Este último objetivo se evalúa a través del indicador SAIFI (Frecuencia Media de Interrupción por cliente/año del Sistema). Para resolver el modelo propuesto se utiliza el algoritmo NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II).

Se realizan pruebas con dos sistemas reales de Empresas Públicas de Medellín (EPM) que muestran la aplicabilidad del algoritmo implementado. Los frentes de Pareto obtenidos en la solución, muestran un set de posibles soluciones que representan un compromiso entre la reducción de la tasa de fallas y el costo de mantenimiento.

Con esta información el operador de la red de distribución puede tomar una decisión sobre cuánto dinero invertir para tener un nivel de SAIFI deseado.

Palabras Clave: Sistemas de distribución, mantenimiento, calidad del servicio.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis del desempeño de los activos de distribución se enmarca en tres conceptos definidos en el contexto de ingeniería: disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad. Disponibilidad se define como la probabilidad de que un componente o sistema cumpla su función en las con-

diciones operativas especificadas en el momento que sea requerido, después del comienzo de su operación. La mantenibilidad es la probabilidad de que una acción de mantenimiento pueda ser realizada en un intervalo de tiempo dado. La confiabilidad se define como la probabilidad de que un componente o sistema pueda cumplir su función satisfactoriamente, en las condiciones operativas especificadas durante un intervalo de tiempo dado. La confiabilidad se puede expresar como: vida media, tasa de fallas por año, indisponibilidad, tiempos medios de reparación, entre otros [1]-[3].

La regulación colombiana establece el uso de indicadores internacionales de calidad, denominados SAIFI y SAIDI, que son calculados para la vigencia de un periodo tarifario con base en la información suministrada a la CREG, por parte de las empresas de distribución[4]. El efecto que producen las interrupciones del suministro sobre los consumidores está relacionado, principalmente, con la frecuencia de las interrupciones y con su duración. Existen dos métodos para calcular los índices de confiabilidad: uno, basado en el número de clientes afectados y el otro, basado en la cantidad de carga dejada de atender.

El primero es el más usado en las empresas de distribución y se caracteriza porque los clientes no son diferenciados y se tratan de forma idéntica. En el segundo caso se considera la cantidad relativa de los clientes y, por tanto, estos índices permiten evaluar con mayor precisión el efecto

¹ Ingeniero Electricista Magister en Ingeniería. Empresas Públicas de Medellín (EPM), Medellín – Colombia.luis.rojas@epm.com.co.

² Grupo de Investigación GIMEL, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.jmaria.lopez@udea.edu.co; nicolasm@udea.edu.co.

sobre la potencia interrumpida y el efecto económico de las interrupciones.

Con el fin de lograr la mejor relación costo / beneficio de las intervenciones realizadas sobre la red, los ingenieros de planeación de mantenimiento deben contar con herramientas que permitan identificar los tramos de red a intervenir. Como alternativa para esta necesidad se propone un algoritmo multiobjetivo que al mismo tiempo considera la maximización en la reducción de la tasa de fallas y la minimización del costo de mantenimiento.

El algoritmo seleccionado es el NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II). Este algoritmo ha sido implementado y documentado ampliamente en aplicaciones en redes de distribución, que incluyen: restauración del servicio [5]-[6], ubicación óptima de interruptores [7] y ubicación de generación distribuida [8], entre otros. La solución del problema de optimización propuesto, consiste en un frente de Pareto que permite seleccionar al operador de la red de distribución la relación más conveniente entre costo de mantenimiento y reducción en la tasa esperada de fallas.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El modelo propuesto involucra dos funciones objetivo: i) la minimización del costo de mantenimiento de la red de distribución y ii) la maximización de la reducción de la tasa de fallas. La reducción de la tasa de fallas se evalúa a través del indicador SAIFI (Frecuencia Media de Interrupción del Sistema), que indica el número promedio de veces que un cliente del sistema sufre una interrupción durante el periodo de tiempo analizado, como se indica en la ecuación (1). Por otro lado, el costo de mantenimiento está dado por la ecuación (2). La descripción de las variables contenidas en las ecuaciones (1) y (2) se presentan en las tablas 1 y 2, respectivamente.

$$Max \Delta SAIFI = \frac{\sum_{i \in \text{Nodos}} \lambda_i * c_i \prod_{K=i+1}^n x_i}{Ct} \quad (1)$$

$$Min \text{ costo} = \sum_{i \in \text{Nodos}} d_i * l_i \prod_{K=i+1}^n x_i \quad (2)$$

Inicialmente se considera un problema sin restricciones donde se pretende conocer el Frente de Pareto de la solución, con el fin de identificar el potencial de mejora del SAIFI y el costo necesario. Una vez se defina una meta de costo k , o mejora del SAIFI e , se pueden incluir las restricciones dadas por (3) y (4).

$$\frac{\sum_{i \in \text{Nodos}} \lambda_i * c_i \prod_{K=i+1}^n x_i}{Ct} \leq e \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \text{Nodos}} d_i * l_i \prod_{K=i+1}^n x_i \leq k \quad (4)$$

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES CONTENIDAS EN ECUACIÓN (1)

Variable	Unidades	Descripción
c_i	Clientes afectados	Cantidad de clientes afectado por una interrupción del servicio
λ_i	Número de fallas por año	Número de interrupciones del elemento por año
Ct	Clientes	Número de clientes del sistema eléctrico al final del periodo
x_i	Variable de decisión	Define si el tramo de red es propuesta para ser intervenida con acciones de mantenimiento

TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE VARIABLES CONTENIDAS EN ECUACIÓN (2)

Variable	Unidades	Descripción
d_i	Miles de pesos	Costo de intervenir un kilómetro de red
l_i	Kilómetros	Kilómetros de red aguas abajo del elementos de seccionamiento
x_i	Variable binaria decisión	Define si el tramo de red es propuesta para ser intervenida con acciones de mantenimiento

La variable de decisión del problema está dada por la variable binaria $x_i = \{0,1\}$; Si esta variable toma el valor 1, indica que el tramo correspondiente es candidato a ser intervenido o

mantenido, aportando a la reducción de la tasa de fallas; si el valor es 0 indica que el tramo no es intervenido.

La codificación del problema se realiza por punto de corte, seccionamiento o protección del circuito. De esta forma, cada punto se representa como un nodo a lo largo del circuito. A cada nodo n se le asigna la longitud de red acumulada aguas abajo y los clientes alimentados por éste. Esta información es usada para calcular las funciones objetivo durante la ejecución de los algoritmos de optimización. En la tabla 3 se ilustra un ejemplo de la codificación utilizada, además de la información para solucionar el problema de optimización.

TABLA 3. EJEMPLO DE INFORMACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Nodo	1	2	3	4	5
Longitud [km]	45	32	2,5	3,8	1,8
Clientes	2838	338	17	20	25
Tasa falla	4,6	1,2	1,2	1,2	1,2
Costo mto. [millones]	464,4	63,0	3,7	5,6	2,6

III. ALGORITMO DE SOLUCIÓN

Cuando en un problema de optimización se tienen varias funciones objetivo, la tarea de encontrar las soluciones óptimas de este problema se denomina optimización multiobjetivo. En este caso, la atención no se debe centrar en el cumplimiento de un objetivo determinado dejando de lado el cumplimiento de los otros. Diferentes propuestas de solución pueden generar conflicto entre los objetivos. Una solución que es óptima con respecto a un objetivo puede no serlo con respecto al resto, por lo que sería impropio seleccionar dicha solución como óptimo del problema. Se crea entonces la necesidad de establecer un compromiso (trade-off) entre cada uno de los objetivos.

Un ejemplo muy común para entender el concepto de optimización multiobjetivo es la compra de un vehículo. Suponga que se quiere adquirir un vehículo que cumpla con dos condiciones: ser confortable y económico. Sin lugar a dudas ambos objetivos están en conflicto, los vehículos de más confort no son los más económicos y viceversa. Se debe establecer, entonces, un compromiso entre el nivel de confort que se desea obtener y el precio que se está dispuesto a pagar por el bien. El problema abordado en este artículo presenta la misma dicotomía: se desea reducir al máximo la tasa de fallas, pero al mismo tiempo se desea minimizar el costo de mantenimiento.

En la solución de problemas de optimización multiobjetivo se utiliza el concepto de dominancia. Se dice que una solución x_1 domina a otra solución x_2 cuando: a) la solución x_1 no es peor que x_2 en ninguno de los objetivos y b) la solución x_1 es estrictamente mejor que x_2 en, al menos, un objetivo. Si alguna de estas dos condiciones no se cumple, entonces x_1 no domina a x_2 .

El concepto de dominancia se utiliza para encontrar un conjunto de soluciones no dominadas, denominadas frente de Pareto. El NSGAI pertenece a la gama de algoritmos evolutivos que permite encontrar este set de soluciones. Dado que ninguna de las soluciones en el conjunto no dominado es absolutamente mejor que las otras, entonces cualquiera de estas constituye una solución aceptable.

La versión inicial de este algoritmo fue desarrollado en 1994; posteriormente, en 2002, se introdujeron mejoras en la eficiencia y diversidad del algoritmo, denominándolo NSGAI [9]. En este algoritmo, a partir de una población de padres P_t (N individuos) se crea una población descendiente Q_t (N individuos). Las dos poblaciones constituyen el conjunto R_t de tamaño

2N. Posteriormente, mediante ordenamiento no dominado se clasifica la población R_t en diferentes frentes de Pareto. La nueva población es generada a partir de configuraciones de frentes no dominados. La población empieza a ser construida con el mejor frente no dominado (F1), continuando con las soluciones del segundo frente (F2) y así sucesivamente. Como R_t es de tamaño 2N y solo se necesitan N individuos para la población descendiente, se deben descartar N configuraciones. Se prefieren los individuos que pertenezcan al menor frente, si ambos pertenecen al mismo frente se prefiere la solución con menos soluciones alrededor.

La idea es que se promuevan las configuraciones que aseguren diversidad dentro del mismo frente de Pareto. Cuando la población en su totalidad converge al frente de Pareto óptimo, el algoritmo asegura que las soluciones están distanciadas unas de las otras. En la Figura 1 se ilustra el proceso de selección de individuos del NSGAI. Una descripción detallada del NSGAI puede ser consultada en [9] y [10].

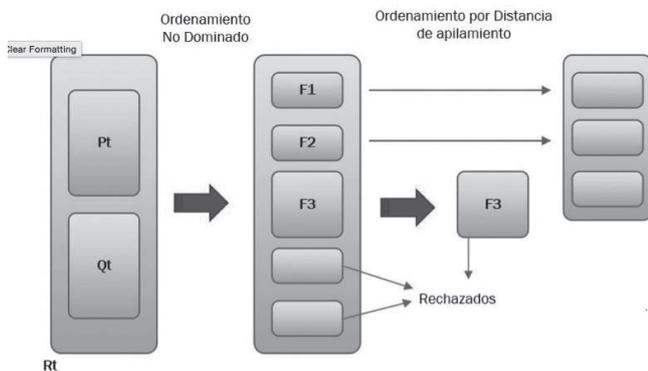


Figura 1. Selección de individuos del NSGAI.

IV. PRUEBAS Y RESULTADOS

El NSGAI fue probado con dos sistemas reales pertenecientes al sistema de distribución rural de energía eléctrica del departamento de Antioquia. Dichos circuitos suministran energía a clientes ubicados en zonas con características geográficas y contexto operacional similares. El código propuesto por Kalami en [10], fue adaptado y utilizado para todas las pruebas. En la Tabla 4 se muestran los datos de los circuitos que conforman los casos de prueba.

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA

	Sistema 1	Sistema 2
Tamaño del caso [nodos]	25	75
Longitud red [km]	423	749
Número de Clientes	4506	10197
Costo mantenimiento [millones]	620	1,097
Máxima mejora SAIFI	3,726	5,440

Para ajustar el NSGAI se realizaron diferentes pruebas, variando el tamaño de la población inicial y el número de iteraciones. En la Tabla 5 se ilustran los detalles de ajuste del algoritmo. En ambos sistemas las mejores soluciones se obtuvieron con poblaciones de 25 individuos y 50 iteraciones. Los tiempos de cálculo para las diferentes pruebas se ilustran en las Figuras 2 y 3.

TABLA 5. DETALLES DE AJUSTE DEL NSGAI – MEJORES RESULTADOS OBTENIDOS

Número nodos	Población - iteraciones	FO1 Mejora SAIFI	FO2 Costo mto.	Porcentaje desviación		Tiempo [s]
				FO1	FO2	
25	25-50	3.746	613	-1%	1%	27
75	25-50	5.343	1002	2%	9%	37

En las Figuras 2 y 3 se puede observar que al aumentar el número de individuos e iteraciones, el tiempo de cálculo del algoritmo aumenta. Sin embargo, la obtención de mejores resultados no necesariamente implica poblaciones grandes o mayor número de iteraciones, como se reporta en la Tabla 5.

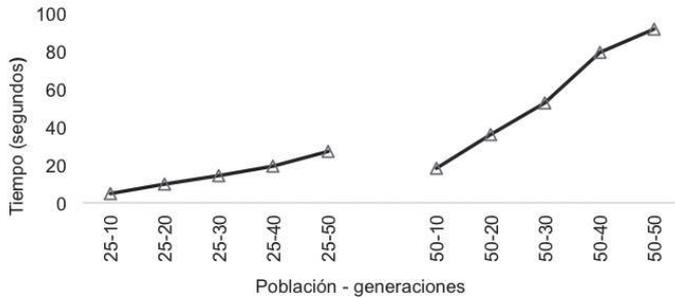


Figura 2. Tiempo de cálculo para el sistema de 25 barras variando población y número de iteraciones

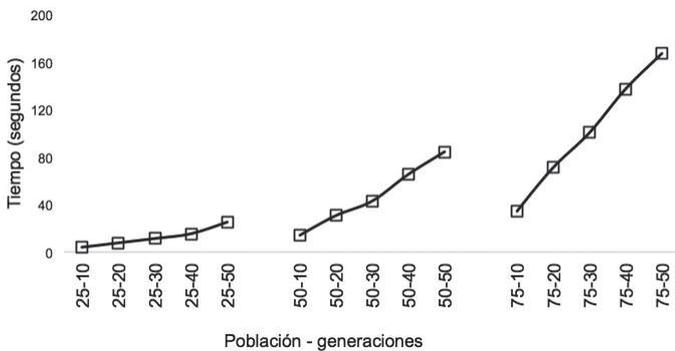


Figura 3. Tiempo de cálculo para el sistema de 75 barras variando población y número de iteraciones

En las Figuras 4 y 5 se ilustran los frentes óptimos de Pareto para los sistemas de 25 y 75 nodos, respectivamente. En ambos casos es evidente que una disminución en el SAIFI implica un aumento en el presupuesto de mantenimiento. En la Figura 4 se puede observar que inversiones en el presupuesto de mantenimiento, entre 450 y 500 millones de pesos garantizan

la mayor reducción en la tasa de fallas. Por otro lado, inversiones menores a 100 millones de pesos impactan muy poco en el SAIFI. Para este sistema no se encontraron soluciones intermedias.

En la Figura 5 se pueden identificar tres conjuntos de soluciones en el frente óptimo de Pareto. Las soluciones que garantizan una mejora significativa en el SAIFI implican presupuesto de mantenimiento entre 800 y 1000 millones de pesos; las que garantizan una mejora intermedia requieren presupuesto de mantenimiento de alrededor de 400 millones de pesos. Finalmente, inversiones en mantenimiento menores de 200 millones de pesos no impactan, de forma significativa, el SAIFI.

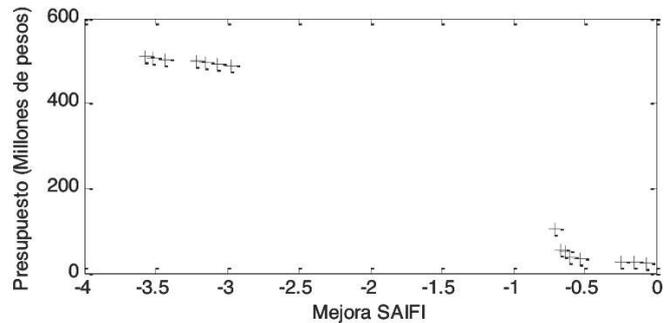


Figura 4. Frente óptimo de Pareto para el sistema de 25 nodos

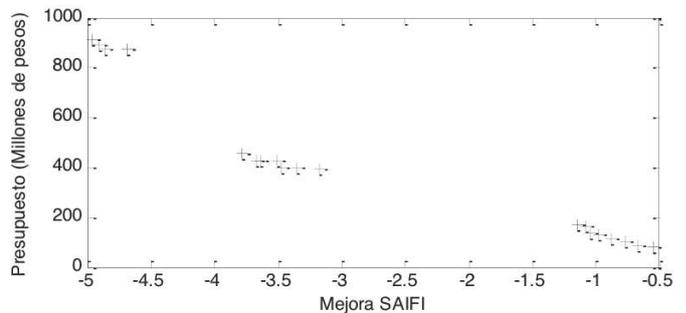


Figura 5. Frente óptimo de Pareto para el sistema de 75 nodos

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una metodología para asignación óptima de presupuesto en sistemas de distribución, con el objetivo de mejorar el indicador SAIFI (Frecuencia Media de Interrupción del Sistema). Para solucionar el problema se utilizó el algoritmo NSGAI.

Dada la naturaleza multiobjetivo del problema, el algoritmo implementado permite identificar el nivel de presupuesto que debe ser destinado para alcanzar una mejora especificada en el SAIFI.

Las pruebas realizadas en sistemas reales de 25 y 75 nodos muestran la aplicabilidad y robustez del algoritmo propuesto. La principal ventaja de la metodología presentada en este artículo consiste en obtener un conjunto de soluciones que representan un compromiso entre los dos objetivos bajo estudio. Esto le permite, al planeador de la red de distribución, poder comparar entre diferentes alternativas y estimar a qué niveles del indicador SAIFI puede llegar con determinado presupuesto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Billinton and P. Wang, "Teaching Distribution Systems Reliability Evaluation Using Monte Carlo Simulation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 397-403, 1999.
- [2] R. Gono, S. Rusek, and M. Kratky, "Reliability analysis of electric distribution system," *Int. Conf. Environ. Electr. Eng. (EEEIC)*, 2011 10th, pp. 5-8, 2011.
- [3] R. Baeza, J. Hernández, and J. Rodríguez, "Evaluación de Confiabilidad De Sistemas de Distribución Eléctrica en Desregulación," *Rev. Fac. Ing. U.T.A, Chile*, vol. 11, pp. 33-39, 2003.
- [4] CREG, Comisión de Regulación de Energía y Gas Resolución 097. 2008.
- [5] Huang Xianchao, and Taylo, G.A. "Service restoration of distribution systems based on NSGAI" 45th International Universities Power Engineering Conference, pp. 1-6, 2010.
- [6] Kumar, Y., Das, B., and Sharma Jaydev., "Multiobjective multiconstraint service restoration of electric power distribution systems with priority customers". *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23 No 1, pp. 261-270, 2008.
- [7] Caetao A.P.P.T., Pereira K., Amorim E.A., and Carreño E.M., "Switch and tie lines allocation in distribution systems using NSGA II", *IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV)*, pp. 1-6, 2014
- [8] Dehghani-Arani, A., and Maddahi, R, "Introduction of a multi-objective function in unbalanced and unsymmetrical distribution networks for optimal placement and sizing of distributed generation", 18th Conference on Electrical Power Distribution Networks (EPDC), PP 1-9, 2013.
- [9] K. Deb and A. Pratap, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, 2002.
- [10] M. Kalam, "A version of the NSGA-II in MatLab," 2010. [Online]. Available: <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/EMOO/EMOO-software.html>. [Accessed: 18-Nov-2013].