

# Multiobjective Optimization of the Active and Reactive Power to PQ curve of the Power System Bus

## Optimización Multi-objetivo de Potencia Activa y Reactiva para crear la Curva PQ en las Barras del SEP

D. A. Arias <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Facultad de Postgrado, Departamento de Maestría en Gestión de Energías Renovables, San Pedro Sula, Honduras  
Agencia de Regulación y Control de Electricidad – ARCONEL.  
E-mail: [diego.arias@unitec.edu](mailto:diego.arias@unitec.edu); [diego.arias@regulacioneolica.gov.ec](mailto:diego.arias@regulacioneolica.gov.ec)

### Abstract

In this work, a problem of multi-objective optimization of active and reactive power in the bus of the system is proposed, which considers the operating limits, the generation capacity, the reactive power reserves, the active power capacity, the transmission restrictions, and the voltage limits of the electric power system (SEP).

The proposed multi-objective optimization problem is based on a combination of the objective function 1: reactive power margin and the objective function 2: the active power capacity in the load bus subject to analysis. From the multi-objective problem the Pareto front is obtained, which represents the PQ curve (projection of the PV and QV curve on the plane) in the bar under analysis. The optimization problem model is applied to a test system for its validation and analysis of results. In this way, a methodology is provided to evaluate the load capacity of the bus and the safety of the system in electrical networks, considering the maximum operating limits of the SEP.

**Index terms**— PQ curve, Bus Loadability limits, multi-objective optimization, active and reactive power margin, chargeability curve, Pareto Front.

### Resumen

En este trabajo, se propone un problema de optimización multiobjetivo de potencia activa y reactiva en las barras del sistema, el cual considera los límites operativos, la capacidad de generación, las reservas de potencia reactiva, las restricciones de transmisión, y los límites de voltaje del sistema eléctrico de potencia (SEP).

El problema de optimización multiobjetivo propuesto se basa en una combinación de la función objetivo 1: margen de potencia reactiva y la función objetivo 2: la capacidad de potencia activa en la barra de carga sujeta a análisis. Del problema multiobjetivo se obtiene la Frontera de Pareto, que representa la curva PQ (proyección de la curva PV y QV sobre el plano) en la barra en análisis. El modelo del problema de optimización es aplicado a un sistema de prueba para su validación y análisis de resultados. De esta manera se proporciona una metodología para evaluar la capacidad de carga en la barra y la seguridad del sistema en redes eléctricas considerando los límites máximos de operación del SEP.

**Palabras clave**— Curva PQ, Límites cargabilidad en barras, Optimización Multi-objetivo, Margen de Potencia Activa y Reactiva, Curva de cargabilidad, Frontera de Pareto.

Recibido: 09-05-2020, Aprobado tras revisión: 02-07-2020

Forma sugerida de citación: Arias, D. (2020). "Optimización Multi-objetivo de potencia activa y reactiva para crear la Curva PQ en las Barras del SEP". Revista Técnica "*energía*". No. 17, Issue I, Pp. 11-17

ISSN On-line: 2602-8492 - ISSN Impreso: 1390-5074

© 2020 Operador Nacional de Electricidad, CENACE



## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia se caracterizan por operar cerca de sus límites operacionales, bajo condiciones de alto estrés, cubriendo una demanda que incrementa cada año con una infraestructura cada vez más ajustada.

Desde hace varios años, la asignación de recurso de potencia reactiva en los sistemas eléctricos, para mantener la estabilidad de voltaje, tiene un papel relevante dentro de las perturbaciones que ponen en riesgo la seguridad del SEP [1]–[4]. En este contexto, diversos trabajos han mostrado las ventajas de disponer herramientas o metodologías que determinen márgenes de potencia o cargabilidad del sistema y que permitan gestionar dichos recursos evitando llevar al sistema al colapso de voltaje [5]–[7]. La potencia activa (P), potencia reactiva (Q), voltaje de las barras, están relacionadas en el comportamiento del sistema y en los márgenes de potencia en las barras. En ese marco, los investigadores a lo largo de los años han relacionado estas variables en la curva nariz PV, curva QV y la proyección en la curva PQ para evaluar la estabilidad del sistema o la cercanía al punto del colapso.

Una revisión del estado del arte en relación con los márgenes de potencia activa y reactiva, muestran varias metodologías y softwares para crear las curvas PV, curvas QV, pero existen escasos trabajos relacionados a la curva PQ, para evaluar la cargabilidad en barras del SEP. Algunos autores usan técnicas de modelamiento con problemas multi-objetivo para crear la frontera de Pareto para representar la potencia reactiva versus el voltaje o las pérdidas del sistema[8]. Así por ejemplo, en [9] los autores proponen tres funciones objetivo: recurso de potencia reactiva, pérdidas del sistema y potencia activa; y por medio de un optimizador a dos niveles, usando el algoritmo: Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) y el algoritmo de punto interior, obtienen la frontera de Pareto y se planifica el recurso de potencia reactiva.

Los autores en [10] realizan una optimización multi-objetivo para abordar la compensación de potencia reactiva al sistema eléctrico Paraguay, considerando restricciones operativas. El método optimiza independientemente varias características relacionadas con la operación de los sistemas de energía: cantidad de equipos compensadores de energía reactiva, pérdidas de transmisión, desviación de voltaje promedio, desviación de voltaje máximo y seguridad de voltaje medida por un índice de margen de carga. Sin embargo, no se grafica la frontera de Pareto en relación con los márgenes de potencia.

En [11] utilizan un problema multi-objetivo para planificar la potencia reactiva, basado en el dominio de Pareto, y usando Particle Swarm Optimization (PSO) para establecer un problema multi-objetivo, en el cual minimizan pérdidas de potencia activa (MW) y el costo total de ubicación de recurso de potencia reactiva.

Los artículos [12]–[18] obtienen la frontera de Pareto de un problema multi-objetivo, minimizando pérdidas de potencia, y la desviación en el perfil de voltaje, aplicando algoritmos como (NSGA-II), Normal Boundary Intersection (NBI), Strength Pareto Multi-group Search Optimizer (SPMGSO), PSO, Tabu Search y herramientas computacionales como GAMS (General Algebraic Modeling System), Matlab, CPLEX, entre otros.

En [19] la frontera de Pareto es formada con funciones objetivo que minimizan pérdidas de potencia activa (MW) y potencia reactiva (MVARs).

En [20] proponen un problema multi-objetivo que dispone como funciones objetivo maximizar la generación de potencia activa, y minimizan el consumo de potencia reactiva en un despacho centralizado en una red de distribución con sistemas fotovoltaicos.

Los trabajos descritos han estimulado a que, en los últimos años, el OPF podría cambiar de un problema de optimización de un solo objetivo a múltiples objetivos; y como resultado se podría obtener varios indicadores para el operador del SEP o herramientas de planificación para la toma de decisiones. Sin embargo, en los trabajos revisados en el no existe problemas multi-objetivo que relacionen la potencia activa y reactiva en la frontera de Pareto.

Por otra parte, la evaluación de estabilidad de voltaje, usando la curva PV, en la punta de la curva de la nariz (punto del colapso) pueden llevar a determinar márgenes de potencia elevados, ya este es el punto de máxima transferencia de potencia y los niveles de voltaje llegan a valores muy inferiores a los límites operacionales reales de los sistemas de potencia [21]. Adicional, las curvas PV y QV analizan los márgenes de potencia considerando únicamente la capacidad de la red, sin considerar las reservas y límites del recurso de generadores. En tal sentido, es necesario evaluar los márgenes de potencia activa y reactiva en las barras del sistema considerando restricciones operativas y límites operacionales reales de los SEP, obteniendo márgenes más conservadores.

El presente trabajo propone una metodología basada en un problema de optimización multi-objetivo para condiciones normales de operación, considerando como objetivo 1: el margen de potencia reactiva, y como objetivo 2: la capacidad de potencia activa en la barra de carga, con el fin de graficar la frontera de Pareto, que representa la curva PQ. La metodología considera los límites reales de operación del sistema incluyendo reservas de potencia reactiva, restricciones de flujos de potencia, límites de las unidades generadoras y límites superiores e inferiores de voltaje en barras. El problema multi-objetivo propuesto usa el algoritmo Multiobjective Genetic Algorithm Solver, del software MATLAB.

En la Sección II se analiza el uso del margen de

potencia activa y reactiva en los sistemas eléctricos de potencia. En la Sección III se presenta la metodología propuesta para la obtención de la frontera de Pareto. La Sección IV muestra el desempeño de la metodología propuesta en base a un sistema eléctrico de 5 barras. Finalmente, las conclusiones son presentadas en la Sección V.

## 2. MARGEN DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN LOS SEP

El margen de potencia reactiva refleja el stress del sistema establecido por las transferencias de potencia activa [5][22] [23]; por tal razón, es necesario relacionar estas variables en el problema de optimización.

### 2.1. Relación entre voltaje y potencia activa

El margen de potencia reactiva se define como la diferencia entre la carga máxima reactiva que puede ser consumida en una zona determinada (respetando los límites de operación normal), y la carga correspondiente al punto de operación. La Fig. 1 muestra en línea punteada la potencia máxima de una barra de carga considerando las restricciones operativas del sistema, mientras que la línea continua representa el límite teórico sin considerar dichas restricciones.

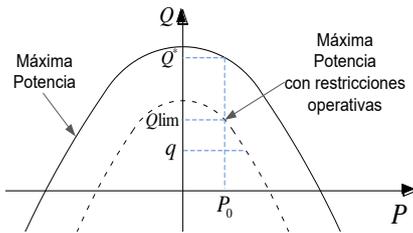


Figura 1: Curva PQ [21][23].

La ecuación (1) corresponde a la parábola en el Plano PQ, mostrada en la Figura 1 [23].

$$-P^2 - \frac{E^2}{2}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (1)$$

En donde, “E” es el voltaje de la fuente, “X” es la reactancia de la línea, y “V” es el voltaje en la carga, considerando la Fig. 2.

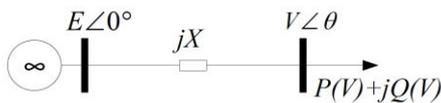


Figura 2: Sistema simplificado de 2 barras (Barra infinita-Carga)

En la Fig. 3 se muestra una gráfica en 3 dimensiones que representa el voltaje en función de la carga activa (P) y carga reactiva (Q) en la barra del sistema eléctrico, considerando diferentes factores de potencia y diferentes puntos de operación. En el plano  $\left(\frac{PX}{E^2}, \frac{QX}{E^2}\right)$  se proyecta la curva PQ (proyección de la curva PV y QV sobre el plano PQ) que indica la capacidad de carga

[23]. La curva de la Fig. 3 se representa con la ecuación (2) [23]:

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q}} \quad (2)$$

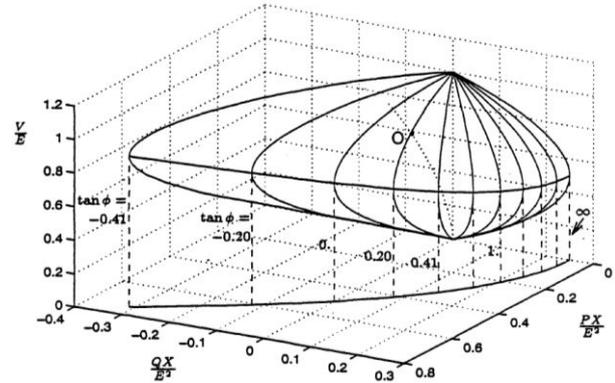


Figura 3: El voltaje en función de la carga activa y reactiva [23].

Para plantear el modelo propuesto, se requiere relacionar la potencia reactiva y activa en una sola ecuación para ser considerado en el modelo de optimización propuesto.

### 2.2. Relación entre potencia activa y reactiva en una única ecuación

Para relacionar la potencia activa y reactiva en una única expresión matemática, que contemple todos los parámetros y variables de las ecuaciones de flujo de potencia que intervienen en el fenómeno de colapso de tensión, se usa la formulación del artículo [24] y aplicada en [21] en un problema de optimización de una sola función objetivo. Considérese el sistema de la Fig. 4, y su equivalente  $\pi$  mostrado en Fig. 5.

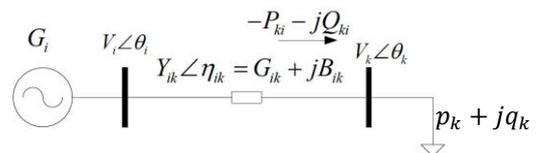


Figura 4: Sistema de 2 barras [21]

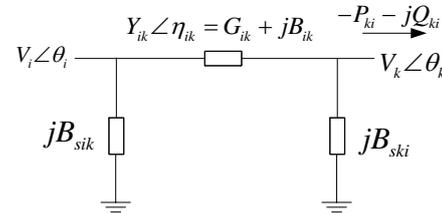


Figura 5: Equivalente  $\pi$  [21]

Mediante las ecuaciones de flujo de potencia se define la potencia activa inyectada a la barra “k” (3) y potencia reactiva transmitida (4).

$$-P_{ki} = G_{ik}V_k^2 - V_iV_kY_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k - \eta_{ik}) \quad (3)$$

$$-Q_{ki} = -B_{ski}V_k^2 - B_{ik}V_k^2 - V_iV_kY_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k - \eta_{ik}) \quad (4)$$

A partir de la identidad:

$$\sin(\theta_i - \theta_k - \eta_{ik}) = \sqrt{1 - \cos^2(\theta_i - \theta_k - \eta_{ik})} \quad (5)$$

y usando las ecuaciones (3) y (4) se obtiene:

$$\sin(\theta_i - \theta_k - \eta_{ik}) = \pm \frac{\sqrt{Y_{ik}^2 V_i^2 V_k^2 - (G_{ik} V_i^2 - P_{ki})^2}}{Y_{ik} V_i V_k} \quad (6)$$

Al sustituir (6) en (4), se obtiene la potencia reactiva en la barra "k" en función de la potencia activa inyectada en dicha barra "k",  $P_{ki}$  y el voltaje en la misma barra [24]:

$$Q_k(V) = -Q_{ki} = -(B_{ski} + B_{ik})V_k^2 - \sqrt{Y_{ik}^2 V_i^2 V_k^2 - (G_{ik} V_i^2 - P_{ki})^2} \quad (7)$$

### 3. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN MULTI-OBJETIVO

#### 3.1. Estructura del Problema de Optimización Multi-objetivo

El problema de optimización multi-objetivo se establece con la Función Objetivo 1: Margen de potencia reactiva ( $MQ_k$ ) de la carga conectada a la barra "k", definida por la ecuación (8); y la Función Objetivo 2: capacidad de potencia activa ( $MP_k$ ) de la carga conectada a la barra "k", definida por la ecuación (9); que al maximizar estas dos variables representa el margen de cargabilidad de potencia en diferentes puntos de operación. El proceso de optimización multi-objetivo en cada barra de carga se realiza secuencialmente de forma independiente.

**Función Multi-objetivo:**

$$\max fO 1: MQ_k \quad (8)$$

$$\max fO 2: MP_k \quad (9)$$

**Sujeto a:**

$$Q_k(V) - q_k - MQ_k = 0 \quad (10)$$

$$Q_{in}(V) - Q_{out}(V) = 0 \quad (11)$$

$$P_{ki} - p_k - MP_k = 0 \quad (12)$$

$$Q_g^{min} \leq Q_g \leq Q_g^{max} \quad (13)$$

$$V^{min} \leq V \leq V^{max} \quad (14)$$

La ecuación (10) establece las restricciones de igualdad considerando el balance de potencia reactiva en la barra, considerando en cada ramal el flujo la potencia activa dentro de  $Q_k(V)$ . Adicional, en dicho balance se considera la carga activa ( $q_k$ ) y el margen de potencia reactiva ( $MQ_k$ ) en la barra. Las restricciones de igualdad definidas en la ecuación (11) expresan el balance de reactivos que debe cumplirse en barras intermedias, sin carga, utilizando la ecuación (7) para los flujos entrantes y salientes (en barras con más ramales, se tendrá:  $Q_k(V) = -\sum_{i=1}^{n_k} Q_{ki}$  donde  $n_k$  representa el número de

elementos). La ecuación (12) establece la restricción de igualdad de flujo de potencia activa en las barras. Los límites de potencia reactiva de los generadores están definidos en la ecuación (13), donde "g" es el número de generador. La ecuación (14) establece los límites de voltajes (V) en barras del sistema eléctrico.

#### 3.2. Procedimiento para el cálculo

El procedimiento de resolución se presenta en la Tabla 1, en la cual se utiliza Digsilent Power Factory, Optimizador KNITRO de Artelys [25] y MATLAB. Se utiliza el software Digsilent para validar el modelo eléctrico del sistema mediante un flujo de potencia. Se usa KNITRO con MATLAB para desarrollar el OPF con una sola función objetivo y obtener soluciones factibles para posterior validación del problema multiobjetivo. Para la resolución del problema de optimización multiobjetivo propuesto se usa el algoritmo *Multiobjective Genetic Algorithm Solver*, de MATLAB.

Tabla 1: Procedimiento

Algoritmo de Problema de Optimización Multi-Objetivo de Potencia Activa y Reactiva	
Paso 1	<b>Datos de entrada:</b> Datos del SEP
Paso 2	Validar el modelo eléctrico con DIGSILENT
Paso 3	<b>Programar:</b> Problema de Optimización Multiobjetivo en MATLAB usando algoritmos genéticos:  $\Rightarrow$ <b>Fijar</b> Condiciones iniciales y #variables  $\Rightarrow$ <b>Fijar F.O. MultiObjetivo</b> $\max fO 1: MQ_k$ $\max fO 2: MP_k$  $\Rightarrow$ <b>Fijar Restricciones de igualdad</b>  $\Rightarrow$ <b>Fijar Restricciones de desigualdad</b>
Paso 4	Sintonizar el algoritmo Multi-objective Genetic Algorithm Solver hasta obtener frontera de Pareto.
Paso 5	Con el Optimizador KNITRO de Artelys y MATLAB, y la metodología de [19], obtener los márgenes de potencia reactiva para un punto de operación usando una función de simple objetivo.
Paso 6	Validar si los valores obtenidos en el paso [5], se encuentran en la región o espacio de la frontera de Pareto.
Paso 7	Análisis de resultados
Paso 8	Fin

### 4. SISTEMA DE PRUEBA

#### 4.1. Datos del Sistema Eléctrico

Para probar el modelo de optimización multiobjetivo, se modela el sistema de cinco barras que es utilizado en [21], del cual, se muestra los datos y detalles del sistema eléctrico en la Fig. 6. El sistema dispone de 2 barras de carga, 2 barras con control de tensión (barras PV) y una barra intermedia. Las restricciones del problema de optimización se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Restricciones de Desigualdad

Límites de voltaje	$0.93 \leq V_B$	Restricciones de potencia reactiva	$Q_A - 1.8$
	$\leq 1.07$		$\leq 0$
	$0.93 \leq V_C$		$Q_A + 0.9$
	$\leq 1.07$		$\geq 0$
	$0.93 \leq V_E$		$Q_D - 2.4$
	$\leq 1.07$		$\leq 0$
			$Q_D + 1.2$
			$\geq 0$

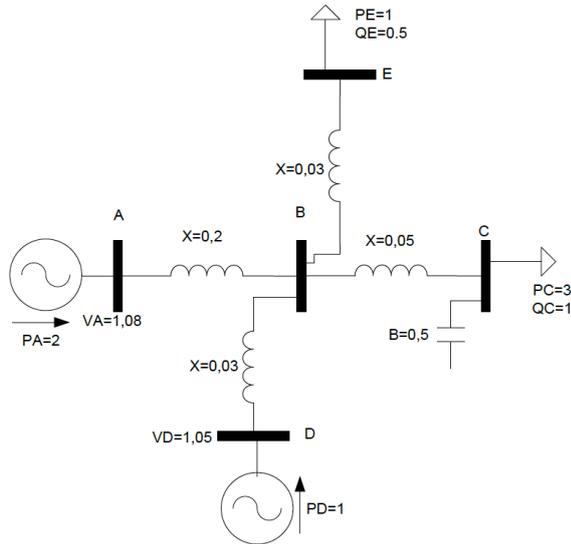


Figura 6: Sistema ilustrativo de 5 barras [21]

Las funciones objetivo del problema de optimización se plantea en cada una de las barras de carga (barra C y barra E), definidas en la Tabla 3.

Tabla 3: Funciones Objetivo

Barra C:	$fO 1: MQ_C$	Margen de Potencia Reactiva en barra C
	$fO 2: MP_C$	Capacidad de carga activa en barra C
Barra E:	$fO 1: MQ_E$	Margen de Potencia Reactiva en barra E
	$fO 2: MP_E$	Capacidad de carga activa en barra E

El proceso de optimización multi-objetivo en la barra C y E se realiza de forma independiente.

#### 4.2. Resultados

La curva PQ de la Fig. 7 representa la capacidad de carga en la barra C, tanto en potencia activa como en potencia reactiva en “pu”.

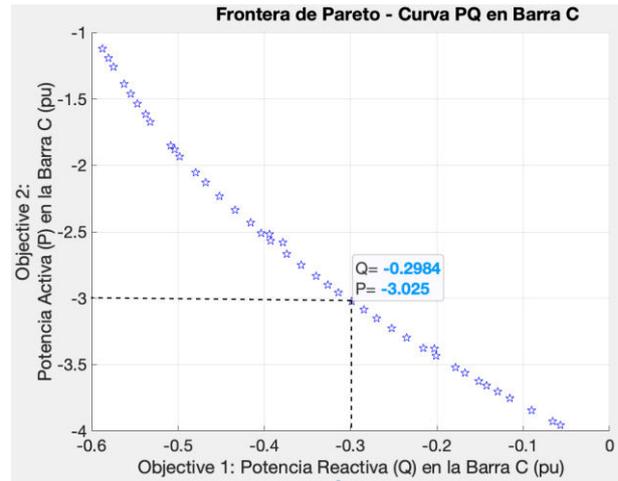


Figura 7: Curva PQ – Capacidad de Carga en Barra C

En la Fig. 8 se muestra la curva PQ que representa la capacidad de carga en la barra E, tanto en potencia activa como en potencia reactiva en “pu”.

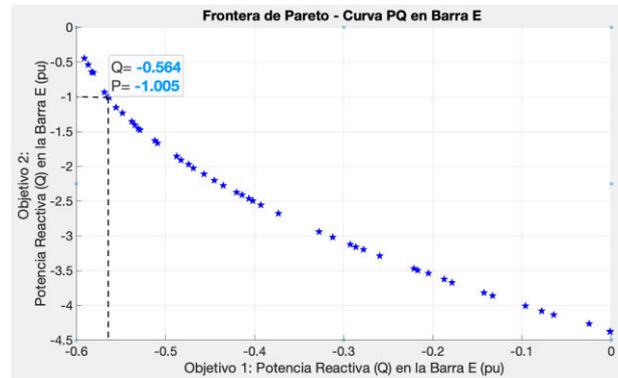


Figura 8: Curva PQ - Capacidad de Carga en Barra E

**Observación:** Los valores obtenidos en los ejes de la frontera de Pareto disponen signos opuestos a los valores de las variables, debido a que el algoritmo requiere anteponer el signo negativo para maximizar las variables de la función objetivo.

Para validar el modelo, se verifica que los márgenes de potencia reactiva en la barra C y barra E obtenidos mediante OPF en el mismo sistema de 5 barras, en [21], se encuentren dentro de la región o espacio de la frontera de Pareto en un punto de operación. Los márgenes de potencia obtenidos para un punto de operación en el OPF con el optimizador KNITRO de Artelys se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4: Márgenes de Potencia en la barra “C” y “E” en un punto de operación [21]

	Barra C	Barra E
Margen de Potencia Reactiva	0,3045 pu	0,564 pu
Capacidad de Potencia Activa	3 pu	1 pu

Se verifica estos valores de la Tabla 4 en la frontera de Pareto de la Fig. 7 y Fig. 8, y se puede validar que dichos puntos de operación (líneas entrecortadas de las

Fig. 7 y Fig. 8), pertenecen a las soluciones factibles de la frontera de Pareto.

Los márgenes definidos por la frontera de Pareto son capaces de identificar la cargabilidad en cada barra considerando las restricciones operativas del SEP.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se presenta una metodología basada en un problema de optimización multi-objetivo para generar la frontera de Pareto que representa la curva PQ de la barra sujeta a análisis del SEP. La metodología propuesta considera límites operacionales tales como reserva de potencia activa y reactiva del sistema, capacidad de los generadores, así como límites inferiores y superiores de los niveles de voltaje.

Las fronteras de Pareto de cada barra representan los márgenes operativos tanto en potencia activa como en potencia reactiva, el cual puede ser usado como una herramienta complementaria de análisis a las curvas PV y curvas QV, cuando se considere límites y restricciones del sistema en dichas curvas. Los resultados del modelo de optimización multi-objetivo indican que la metodología propuesta cumple con el objetivo planteado, permitiendo identificar la capacidad de carga activa y reactiva con base a los límites del sistema. Se concluye, que con la metodología propuesta se posee una herramienta que le permite a los analistas de los SEP gestionar recursos de potencia reactiva con base a la potencia activa.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la *Campus Beauchef - Universidad de Chile*, por los conocimientos impartidos durante los estudios de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Eléctrica (2010-2012), y a la *Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC)* de San Pedro Sula - Honduras por la apertura a las cátedras y al desarrollo a la investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. A. Ruiz and P. W. Sauer, "Reactive power reserve issues," in 2006 38th Annual North American Power Symposium, NAPS-2006 Proceedings, 2006, pp. 439–445.
- [2] V. Ajarapu, P. L. Lau, and S. Battula, "An Optimal Reactive Power Planning Strategy Against Voltage Collapse," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 906–917, 1994.
- [3] H. Barot and K. Bhattacharya, "Optimal Reactive Power Planning and Compensation Effects on Transmission Loss Components," in Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2007, pp. 1–7.
- [4] N. Granda and H. Arcos, "Estudio De

Estabilidad De Voltaje Para El Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano," *Rev. Técnica "Energía,"* vol. 3, no. 1, pp. 86–96, 2007.

- [5] T. Van Cutsem, "A Method to compute Reactive Power Margins with respect to Voltage Collapse," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 145–156, 1991.
- [6] Q. Liu, J. Liu, J. Shi, and Y. Huang, "A New Method to Compute Reactive Power Margin," in IEEE International Conference on Industrial Technology. ICIT 2008., 2008, pp. 0–5.
- [7] J. Cepeda, P. Verdugo, and G. Argüello, "Monitoreo de la Estabilidad de Voltaje de Corredores de Transmisión en Tiempo Real a partir de Mediciones Sincrofásicas," *Rev. EPN*, vol. 33, no. 3, 2014.
- [8] X. He, X. Pang, D. R. Zhu, and C. X. Liu, "Multi-objective reactive power optimization based on chaos particle swarm optimization algorithm," in Proceedings - 2013 2nd International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation, IMSNA 2013, 2013, no. 1, pp. 1014–1017.
- [9] Z. Li, M. M. Begovic, and X. Duan, "Reactive power planning using a two-level optimizer based on multi-objective algorithms," in 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISAP '09, 2009, pp. 1–6.
- [10] J. Vallejos, U. Fernández, and R. Ramos, "Multiobjective reactive power compensation applied to the Paraguayan power system," in 2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, TDC'06, 2006, vol. 00, pp. 1–6.
- [11] N. Krami, M. A. El-Sharkawi, and M. Akherraz, "Pareto multiobjective optimization technique for reactive power planning," in IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES, 2008, pp. 1–6.
- [12] H. Singh and L. Srivastava, "Recurrent multi-objective differential evolution approach for reactive power management," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 1, pp. 192–204, 2016.
- [13] P. Dong, L. Xu, Y. Lin, and M. Liu, "Multi-Objective Coordinated Control of Reactive Compensation Devices Among Multiple Substations," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 3, pp. 2395–2403, 2018.

- [14] M. Mohsen and H. Siahkali, "Multi-objective optimization of reactive power dispatch in power systems via SPMGSO algorithm," in IEEE Proceedings 2017 Smart Grid Conference, SGC 2017, 2018, vol. 2018-Janua, pp. 1–9.
- [15] J. Wu, N. Li, L. He, B. Yin, J. Guo, and Y. Liu, "Research on multi-objective reactive power optimization based on modified particle swarm optimization algorithm," in 2010 Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2010, 2010, pp. 477–480.
- [16] W. Zheng et al., "Multi-objective reactive power and voltage optimization for distribution network," in 2018 International Conference on Power System Technology, POWERCON 2018 - Proceedings, 2019, no. 201806150000008, pp. 2216–2221.
- [17] B. Song, Y. Cao, X. Zhang, Y. Wang, and N. Li, "Multi-objective reactive power optimization in power system based on improved PSO-OSA algorithm," in 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2019, vol. 3, pp. 1514–1519.
- [18] M. Zhang and Y. Li, "Multi-Objective Optimal Reactive Power Dispatch of Power Systems by Combining Classification-Based Multi-Objective Evolutionary Algorithm and Integrated Decision Making," IEEE Access, vol. 8, pp. 38198–38209, 2020.
- [19] M. Belazzoug and M. Boudour, "FACTS placement multiobjective optimization for reactive power system compensation," in 2010 7th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD-10, 2010, pp. 1–6.
- [20] C. Levis, C. T. Phan-Tan, and M. Hill, "Multi-Objective Optimal Active and Reactive Power Dispatch for Centrally Controlled Distributed PV Systems," in Proceedings - 2018 53rd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2018, 2018, pp. 1–6.
- [21] D. Arias, L. Vargas, and C. Rahmann, "WAMS-Based Voltage Stability Indicator Considering Real Time Operation," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 5, pp. 1421–1428, 2015.
- [22] D. Chavez, S. Espinosa, and D. Arias Cazco, "Reactive Power Optimization of the Electric System based on Minimization of Losses," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 14, no. 11, pp. 4540–4546, 2016.
- [23] C. Cutsem, Thierry Van; Vournas, Voltage Stability of Electric Power Systems, Publishers. 1998.
- [24] T. Van Cutsem, "A method to compute reactive power margins with respect to voltage collapse," IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 1, pp. 145–156, 1991.
- [25] "ARTELYS," 2020. [Online]. Available: <https://www.artelys.com>.



**Diego A. Arias Cazco.-** Nació en Riobamba, Ecuador, el 12 de septiembre de 1980. Recibió el título de Ingeniero en Electromecánica en la Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2006. Obtuvo un Diplomado en Redes Digitales Industriales en Ecuador, 2008. Recibió el grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Eléctrica, en la Universidad de Chile, Chile, 2012. Trabajó como profesor-investigador en la Universidad Politécnica Salesiana, durante 5 años. Actualmente trabaja en la Agencia de Regulación y Control de Electricidad – ARCONEL, en la Dirección Nacional De Regulación Técnica, Quito – Ecuador. Adicional, trabaja como profesor-investigador a tiempo parcial en la Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), Laureate International Universities, en San Pedro Sula – Honduras, en la Facultad de Postgrado, Departamento de Maestría en Gestión de Energías Renovables. Sus temas de interés incluyen: Estabilidad de voltaje, OPF, WAMS, Optimización, SmartGrids y Planificación de SEP.