

Optimización de la compensación reactiva en sistemas eléctricos por el método CRITIC

Reactive compensation optimization in electrical systems by the CRITIC method

- ¹ Alvaro Napoleón Chiguano Velasco  <https://orcid.org/0000-0002-7651-9728>
Maestría en Electricidad, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
alvaro.chiguano5954@utc.edu.ec
- ² Jessica Nataly Castillo Fiallos  <https://orcid.org/0000-0002-3120-7229>
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
jessica.castillo@utc.edu.ec
- ³ Carlos Iván Quinatoa Caiza  <https://orcid.org/0000-0001-6369-7480>
Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
carlos.quinatoa7864@utc.edu.ec
- ⁴ Edison Fabricio Guanochanga Collaguazo  <https://orcid.org/0000-0003-4397-9266>
Empresa Eléctrica Riobamba, Riobamba, Ecuador.
eguanochanga@eersa.com.ec



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 10/11/2022

Revisado: 15/12/2022

Aceptado: 23/01/2023

Publicado: 05/04/2023

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v7i2.2540>

Cítese:

Chiguano Velasco, A. N., Castillo Fiallos, J. N., Quinatoa Caiza, C. I., & Guanochanga Collaguazo, E. F. (2023). Optimización de la compensación reactiva en sistemas eléctricos por el método CRITIC . Ciencia Digital, 7(2), 64-81. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v7i2.2540>



CIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinaria, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://cienciadigital.org>
La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 International. Copia de la licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>.

Palabras claves:

Ubicación,
dimensionamiento,
método critic,
variable, pesos.

Resumen

Introducción. En los sistemas eléctricos AC la inyección de reactivos influye directamente al mejoramiento de parámetros eléctricos como factor de potencia, voltajes, reducción de pérdidas por transporte, cargabilidad de las líneas, etc. En los sistemas eléctricos de potencia los estudios de optimización de la compensación reactiva son llevados a cabo mediante diversos métodos heurísticos que se caracterizan por su complejidad de programación y por contar con un gran componente de criterio humano, lo cual influye en gran medida en la evaluación final de los resultados encontrados. **Objetivo.** Analizar los resultados de la aplicación del método Critic a la optimización de la compensación reactiva del sistema de subtransmisión de la Empresa Eléctrica Riobamba. **Metodología.** Inicialmente se propone un algoritmo para la obtención de la población de escenarios a ser evaluados y la obtención de los criterios de evaluación, finalmente el análisis estadístico es implementado mediante el uso del método Critic para la toma de decisión multicriterio. Los algoritmos propuestos y la posterior evaluación estadística fueron llevados a cabo en el sistema de 69kV de subtransmisión de la EERSA. **Resultados.** De los resultados de la aplicación de los métodos propuestos a la red de la EERSA se logra el mejoramiento de los perfiles de voltaje mientras se reducen las pérdidas del sistema, todo esto con los mínimos requerimientos de potencia reactiva inyectada en el sistema. **Área de estudio específica:** Sistemas Eléctricos.

Keywords:

Location, sizing,
critic method,
variable, weight.

Abstract

Introduction. In AC electric systems, the injection of reactive power directly influences the improvement of electrical parameters such as power factor, voltages, loose reduction, line chargeability, etc. In electrical power systems, reactive compensation optimization studies are carried out using various heuristic methods that are characterized by their programming complexity and by a large component of human judgment, which greatly influences the evaluation of the results found. **Objective.** Analyze the results of the application of the Critic method to the optimization of the reactive compensation of the sub-transmission system of the Riobamba Electric Company. **Methodology.** Initially, an

algorithm to obtain the population of scenarios to be evaluated and the evaluation criteria is proposed, finally the statistical analysis is implemented using the Critic method for multicriteria decision making. The proposed algorithms and the subsequent statistical evaluation were carried out in the EERSA 69kV sub transmission system. **Results.** From the results of the application of the proposed methods to the EERSA network, the improvement of the voltage profiles is achieved while the system losses are reduced, all this with the minimum requirements of reactive power injected into the system.

Introducción

En los sistemas eléctricos de distribución el flujo de potencia reactiva a través de las líneas de transmisión produce pérdidas de energía, caídas de voltaje, bajo factor de potencia, e incremento en la cargabilidad en líneas de transmisión provocando la insatisfacción del usuario final y el incremento de los costos de operación de las empresas distribuidoras (Okon & Wilkosz, 2018).

La tendencia actual dentro de los sistemas eléctricos es la implementación de las nuevas tecnologías y métodos en la búsqueda de la optimización de la operación. Indicadores como pérdidas, factor de potencia, caída de voltaje son los principales parámetros sujetos a estudio dentro de la operación de los sistemas en estado estable. En los sistemas de transmisión la compensación reactiva es uno de los métodos más efectivos para el control de los parámetros eléctricos antes indicados (Lakra et al., 2017). Por lo cual, se han desarrollado múltiples métodos para solventar el problema de la búsqueda de las óptimas ubicaciones y capacidades de las compensaciones requeridas en un sistema, donde la complejidad del método usado es relativo a la complejidad del sistema analizado (Li & Yin, 2019). Es por esto que se considera una evaluación multicriterio en la que se toma en cuenta diferentes criterios que dependiendo de su aplicación pueden ser minimizados o maximizados (Abdullahi et al., 2021), la ecuación 1 muestra la estructura básica de la función objetivo más comúnmente usada para la evaluación multicriterio.

$$FO = w_1.(Criterio_1) + w_2.(Criterio_2) + \dots + w_n.(Criterio_n) \quad (1)$$

Diversos trabajos de optimización para compensación de reactivos han sido presentados entorno al uso de métodos heurísticos como algoritmos genéticos (Arlenny et al., 2019), colonia de hormigas (Elkhidir et al., 2019), optimización por enjambre de partículas (Ramadan et al., 2017), entre otros (Bayat & Bagheri, 2019). Todos estos métodos de

optimización se basan en la evaluación de una función objetivo, la misma que será optimizada de acuerdo con las características de cada método, contando con diferentes niveles de complejidad para su programación e implementación, así como la aplicación directa sobre la problemática a ser solventada sin considerar los efectos que esta solución pueden conllevar al resto de las variables eléctricas del sistema eléctrico.

El resultado de la evaluación de la función objetivo puede presentar diferentes comportamientos para los mismos criterios analizados en dependencia del valor de los pesos que se le sean asignados. En otras palabras, para priorizar un criterio específico un mayor peso (w) se le debe ser asignado.

El método CRITIC para la toma de decisión multivariable provee una metodología para la determinación de los pesos que formaran parte de la función objetivo en donde cada criterio contará con un mayor peso mientras mayor sea la información que aporte un criterio con relación a los demás (Lamas et al., 2020). Por lo tanto, la aplicación del método permitirá eludir el uso del criterio personal y determinar matemáticamente los mejores pesos posibles que se le pueden ser asignados a una función de evaluación multicriterio para la búsqueda de la óptima ubicación y capacidad para bancos de capacitores en la red de 69 kV de la EERSA.

Metodología

En sistemas radiales la inyección de reactivos influye directamente sobre el mejoramiento de los perfiles de voltaje y sobre la inversión económica requerida, sin embargo, su efecto sobre la reducción de pérdidas y cargabilidad en las líneas de transporte puede llegar a presentar diversas características dependiendo tanto de las ubicaciones como de las capacidades (Kadom et al., 2020).

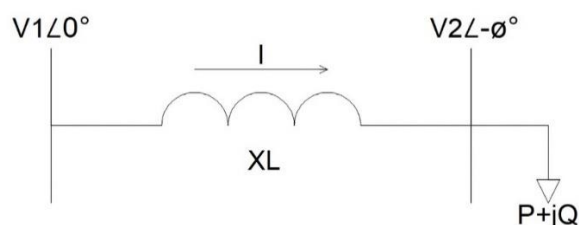
La problemática de la optimización de la compensación capacitiva en sistemas eléctricos puede ser dividido en dos subproblemas, la determinación de las óptimas ubicaciones en las cuales se inyectará potencia reactiva y la determinación de la cantidad óptima de reactivos a inyectar en cada barra (Kamel et al., 2019). En los sistemas de transmisión y subtransmisión el método más común de inyección de potencia reactiva consiste en la conexión de bancos de capacitores por lo que el análisis llevado a cabo a continuación toma en cuenta el uso de bancos de capacitores con un valor mínimo de 0.1MVAR disponible en el mercado.

Determinación de la ubicación de bancos de capacitores

En base al análisis de la operación de líneas de transmisión cortas mostrado en la figura 1, se puede deducir el comportamiento de los voltajes con modelos de carga de potencias constantes.

Figura 1

Modelo de línea de transmisión corta



Del análisis del sistema de una línea de transmisión corta se obtiene el valor de la potencia reactiva (Q) consumida en la barra 2 en función de los parámetros de la línea de transmisión (Kersting, 2012).

$$Q = \frac{1}{x} (V_1 V_2 \cos \phi - V_2^2) \quad (2)$$

Dado que:

$$\cos \phi \approx 1 \quad (3)$$

Entonces:

$$(V_1 - V_2) = \frac{x}{V_2} Q \quad (4)$$

De la ecuación anterior se puede concluir que el valor de la caída de voltaje encontrada al final de una línea es proporcional a la reactancia de la línea y al valor de la potencia reactiva requerida por la carga. Esto deriva en que el control de potencia reactiva (Q) sería la mejor opción que permitirá la regulación de voltaje en una barra que no cuente con generación. Dado el análisis anterior cabe indicar que durante el desarrollo de tomará en cuenta la heurística de que las barras con menor voltaje serán las principales candidatas para ubicar bancos de capacitores.

Teniendo en cuenta el enfoque de compensación capacitiva para el control de voltaje, las ubicaciones especificadas para la instalación de bancos de capacitores serán determinadas mediante el sondeo de la barra con menor voltaje. Sin embargo, tanto en la barra Slack como PV no es posible realizar el control de voltaje mediante compensación capacitiva dado que estas cuentan con un control propio el que por lo general ajusta su potencia reactiva generada (Q_{gen}) para llegar a un voltaje especificado (X. Li et al., 2017). Por lo tanto, el uso de compensación capacitiva para control de voltaje únicamente será usada en barras tipo PQ.

Determinación de la capacidad de bancos de capacitores

La búsqueda de las máximas capacidades a instalar en cada barra de un SEP puede ser analizado mediante una búsqueda discreta al incrementar sucesivamente la capacidad de los bancos de capacitores en las ubicaciones determinadas. Cada paso de incremento (ΔC) deberá ser evaluado por la función objetivo (FO) la cual permitirá determinar si se ha llegado o no a la mejor solución.

La función objetivo a maximizar corresponde a la ecuación indicada a continuación:

$$FO = w_1 \cdot V_{min} + w_2 \cdot P + w_3 \cdot C_{Total} \quad (5)$$

Donde:

w_1, w_2, w_3 : Peso de cada criterio.

V_{min} : Mínimo voltaje del sistema.

P : Pérdidas totales del sistema por transporte.

C_{Total} : Total de potencia reactiva instalada en el sistema ($C_{Total} = \sum_1^n C_i$).

Esta función objetivo será optimizada mediante la aplicación del método CRITIC mostrada en Yepes (2022), la cual se resume en 5 pasos:

1. Crear la matriz de decisión: Se crea una matriz con todos los posibles valores de ΔV , *pérdidas* y ΔC_{Total} obtenidos de cada uno de los posibles conjuntos de los bancos de capacitores a instalar.

Tabla 1

Ejemplo matriz de decisión

	V_{min}	<i>Pérdidas</i>	C_{Total}
C_1	X_{11}	X_{12}	X_{13}
C_2	X_{21}	X_{22}	X_{23}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
C_i	X_{i1}	X_{i2}	X_{i3}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
C_m	X_{m1}	X_{m2}	X_{m3}

- Normalizar por el rango los valores de cada uno de los criterios: En base a los valores de la matriz de decisión estos se transforman a p.u.

Tabla 2

Criterio para transformación a p.u. la matriz de decisión

Beneficio	Costo
$X_{i1\ pu} = \frac{X_{i1} - \min V}{\max V - \min V}$	$X_{i2\ pu} = \frac{\max P - X_{i2}}{\max P - \min P}$
	$X_{i3\ pu} = \frac{\max \Delta C_{Total} - X_{i3}}{\max \Delta C_{Total} - \min \Delta C_{Total}}$

- Calcular la desviación típica de cada criterio.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left[X_{i1\ pu} - \left(\frac{\sum_{i=1}^m X_{i1\ pu}}{m} \right) \right]^2}{m-1}} \quad (6)$$

- Calcular la correlación entre cada par de criterios.

$$r_{jk} = \frac{\text{cov}(j,k)}{\sigma_j \sigma_k} \quad (7)$$

- Calcular el peso de cada criterio.

$$w_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk}) \quad (8)$$

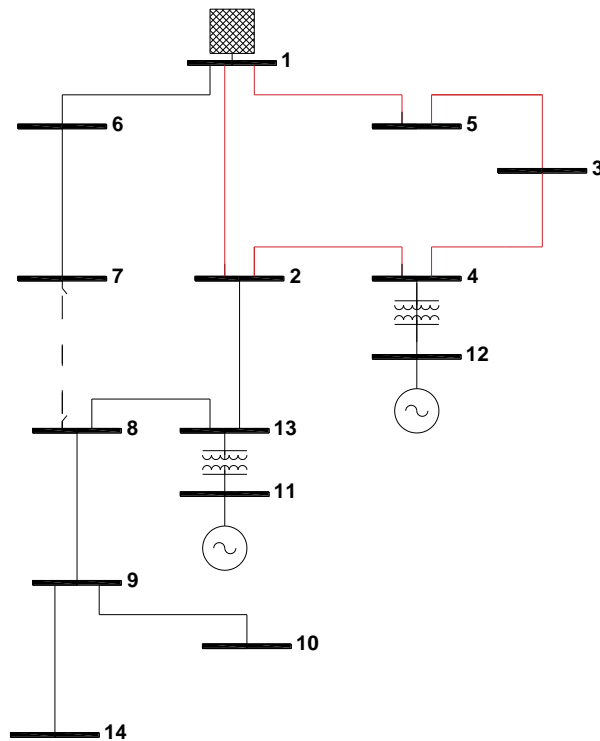
Resultados

En el presente trabajo primeramente se realizó el análisis de la metodología de búsqueda de la óptima compensación reactiva mediante bancos de capacitores para el mejoramiento de los perfiles de voltaje y la reducción de las pérdidas por transporte en la red de 69kV de la Empresa Eléctrica Riobamba (figura 2). La función de optimización fue valorada mediante el uso del método CRITIC para el análisis multivariable.

La red de Subtransmisión de 69kV de la EERSA está compuesta por 14 barras, la barra 1 representa la conexión al SNI, las barras 11 y 12 son barras de conexión a las centrales de generación Alao (10.2 MVA) y Rio Blanco (3MVA) respectivamente, mientras que las barras restantes corresponden a subestaciones de carga.

Figura 2

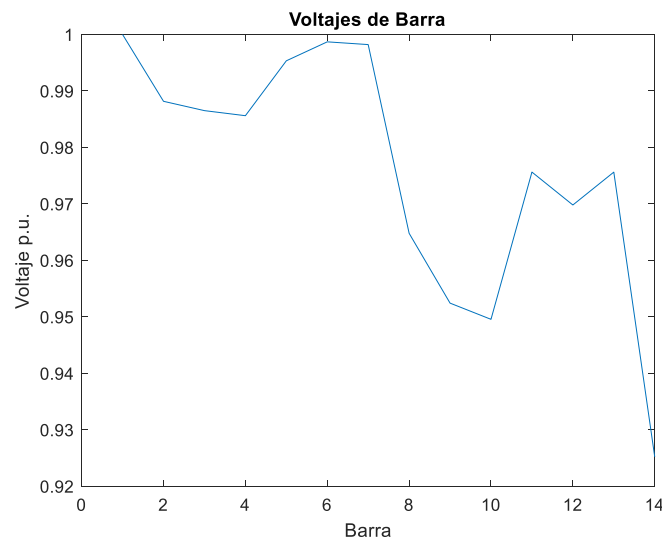
Red de 69kV de la EERSA



La figura 3 presenta los perfiles de voltaje a la hora pico (19:00 horas) en cada barra de la red presentada.

Figura 3

Perfil de voltajes de la red de subtransmisión de la EERSA a la hora pico



Según el criterio previamente indicado en el cual las ubicaciones de los bancos de capacitores serán determinadas de acuerdo con la barra que presente el menor voltaje, la ubicación inicial correspondería a la barra 14. Además, es importante notar que las barras de la EERSA que presentan equipamientos de generación operan a manera de barras de carga volviendo posible el control de voltaje mediante compensación capacitiva.

Por lo dicho anteriormente, se indica que la ubicación de bancos de capacitores será únicamente tomada en barras de carga, por lo que para el caso del sistema de la figura 2 se iniciaría la ubicación de capacitores en la barra 14.

Los criterios seleccionados para el análisis multivariable aplicado a la compensación de reactivos en el sistema analizado corresponden a voltaje mínimo, pérdidas por transporte y reactivos totales a inyectar, los valores numéricos de cada caso se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Matriz de decisión para compensación en la red de la EERSA

V min	Pérdidas MW	MVAr	V min	Pérdidas MW	MVAr
0.9668	8.32	0	0.9842	8.31	1.7
0.9677	8.31	0.1	0.9852	8.32	1.8
0.9688	8.30	0.2	0.9862	8.34	1.9
0.9698	8.29	0.3	0.9872	8.35	2
0.9709	8.28	0.4	0.9882	8.37	2.1
0.9719	8.27	0.5	0.9892	8.39	2.2
0.973	8.27	0.6	0.9902	8.41	2.3
0.974	8.26	0.7	0.9912	8.43	2.4
0.9751	8.26	0.8	0.9922	8.46	2.5
0.9761	8.26	0.9	0.9932	8.48	2.6
0.9771	8.26	1	0.9941	8.51	2.7
0.9781	8.26	1.1	0.9951	8.53	2.8
0.9791	8.26	1.2	0.9961	8.56	2.9
0.9802	8.27	1.3	0.9971	8.59	3
0.9812	8.28	1.4	0.9981	8.62	3.1
0.9822	8.29	1.5	0.999	8.65	3.2
0.9832	8.30	1.6	1	8.68	3.3

Las figuras 4 y 5 muestran las variaciones del voltaje p.u. en la barra 14 y las pérdidas por transporte del sistema de subtransmisión ante incrementos paulatinos de potencia reactiva capacitiva de 0.1 MVAr en la barra 14.

Figura 4

MVAr inyectados vs voltaje en la barra 14

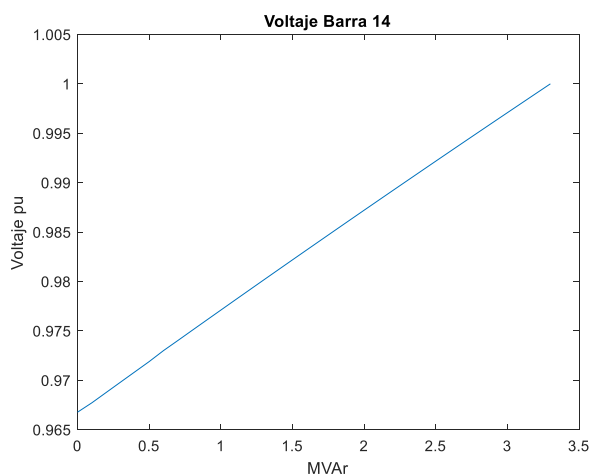
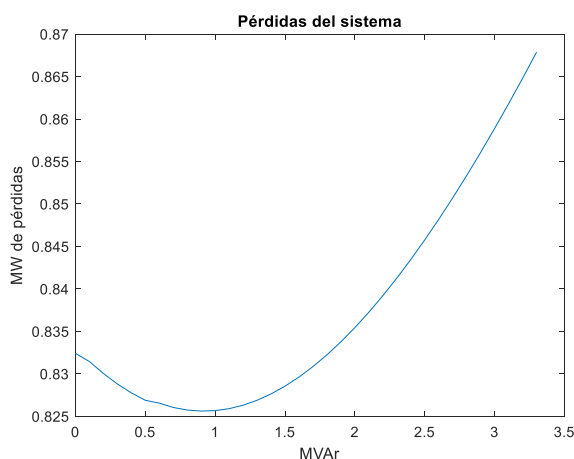


Figura 5

MVAr inyectados en la barra 14 vs pérdidas del sistema

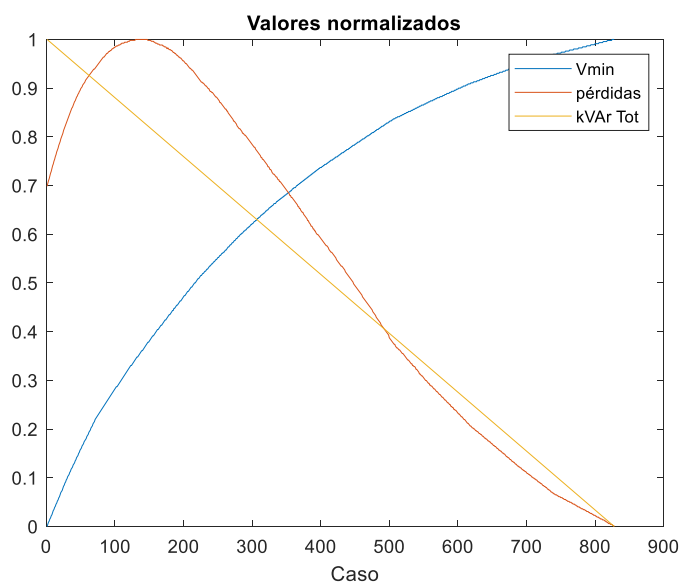


Como se observa en las figuras anteriores, la relación entre la potencia reactiva capacitiva y el voltaje en la barra 14 es directamente proporcional mientras que la relación entre la potencia reactiva inyectada y las pérdidas del sistema no es del todo clara. Si bien se observa que inicialmente la conexión de pequeños bancos de capacitores ayuda en elevación de voltajes y la reducción de pérdidas, se presenta un límite luego del cual las pérdidas del sistema se incrementan requiriéndose que se realice una evaluación entre la inyección de potencia reactiva capacitiva, sus beneficios sobre el control de voltaje y su perjuicio en el incremento de las pérdidas del sistema.

La figura 6 muestra los valores normalizados de la matriz de decisión, el cual corresponde al segundo paso del flujo de proceso para el cálculo de los pesos y sobre los cuales se realiza el análisis de selección del valor óptimo de inyección de reactivos.

Figura 6

Casos posibles vs valores normalizados



Las tablas 4 y 5 presentan los valores determinados de manera estadística para la desviación estándar y la correlación entre los criterios de decisión analizados.

Tabla 4

Desviación estándar de valores analizados

V min	Pérdidas	kVAr
0.3023	0.3054	0.3018

Tabla 5

Correlación entre valores analizados

	V min	Pérdidas	kVAr
V min	1	-0.8598	-0.9999
Pérdidas	-0.8598	1	0.8656
kVAr	-0.9999	0.8656	1

Finalmente se calcula los pesos de cada criterio relacionando los datos de las tablas 4 y 5 de acuerdo con lo mostrado en la ecuación 8. La tabla 6 muestra los pesos finales determinados para el caso de incremento de reactancia capacitiva en la barra 14.

Tabla 6

Pesos determinados para cada criterio analizado

W1	W2	W3
V min	Pérdidas	kVAr
1.1668	0.6091	0.6441

La relación matemática entre los valores normalizados y los pesos determinados es evaluada de acuerdo con lo mostrado en la ecuación 9.

$$FO = w_1 \cdot V_{min} + w_2 \cdot P + w_3 \cdot C_{Total} \quad (9)$$

Donde:

w_1, w_2, w_3 : Peso de cada criterio.

V_{min} : Mínimo voltaje del sistema.

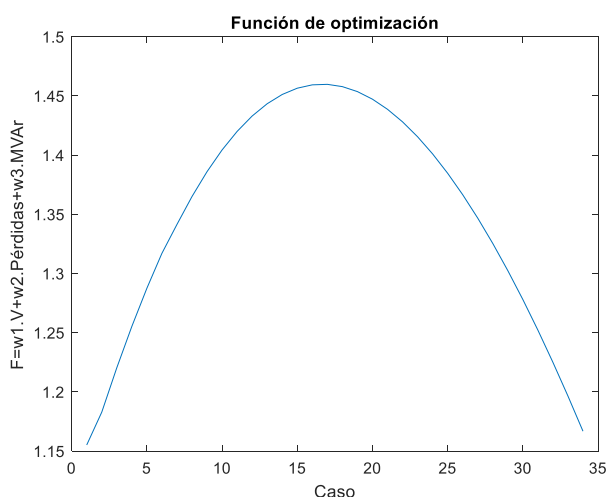
P : Pérdidas totales del sistema por transporte.

C_{Total} : Total de potencia reactiva instalada en el sistema ($C_{Total} = \sum_1^n C_i$).

La figura 7 muestra gráficamente los valores puntuales de la función de optimización ante cada caso de incremento de la potencia reactiva inyectada en la barra 14.

Figura 7

Casos posibles vs Función de optimización



La maximización de la función objetivo permite determinar la condición de operación que cuente con la mejor relación entre elevación de voltaje, reducción de pérdidas y menor requerimiento de potencia reactiva.

Para el ejemplo evaluado se determina que la mejor condición de operación se alcanza en el caso 17 en el cual se requiere la inyección de 1.6 MVar en la barra 14. La tabla 7 permite hacer una evaluación numérica entre los valores obtenidos a condiciones normales de operación de la red de 69kV de la EERSA y la condición óptima de compensación determinada mediante el método Critic.

Tabla 7

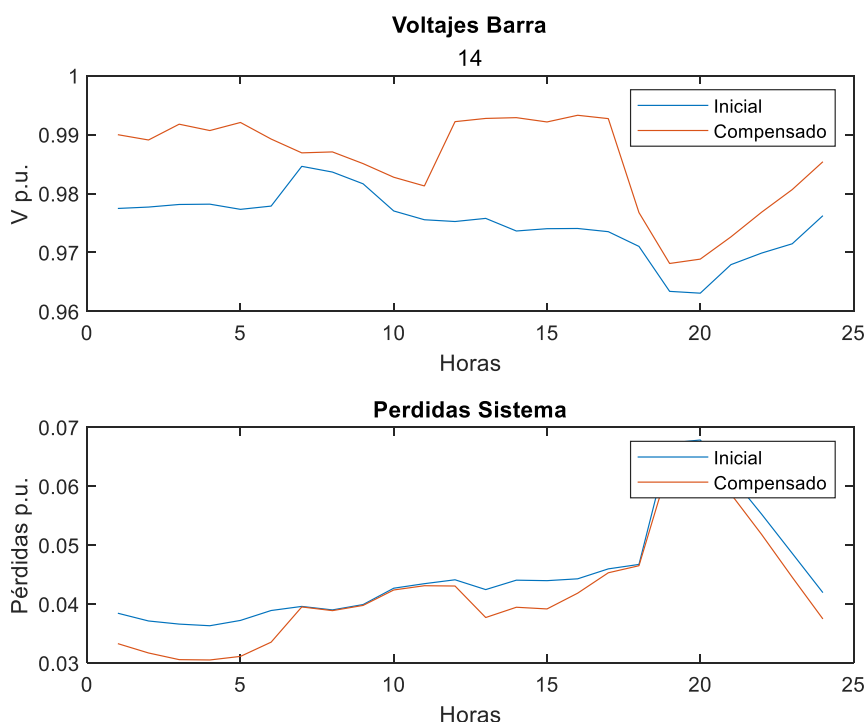
Condición y operación inicial y compensada

	V min p. u	Pérdidas MW	MVAr inyectados
inicial	0.9668	8.32	0
compensado	0.9832	8.29	1.6

Si bien el análisis anterior fue realizado para un instante particular de tiempo (19:00 horas), un análisis similar puede ser realizado para cualquier instante a lo largo del día. La figura 8 muestra los resultados del análisis para la óptima compensación de reactivos en la barra 14 para un rango de estudio de 24 horas.

Figura 8

Voltajes y pérdidas iniciales vs compensados



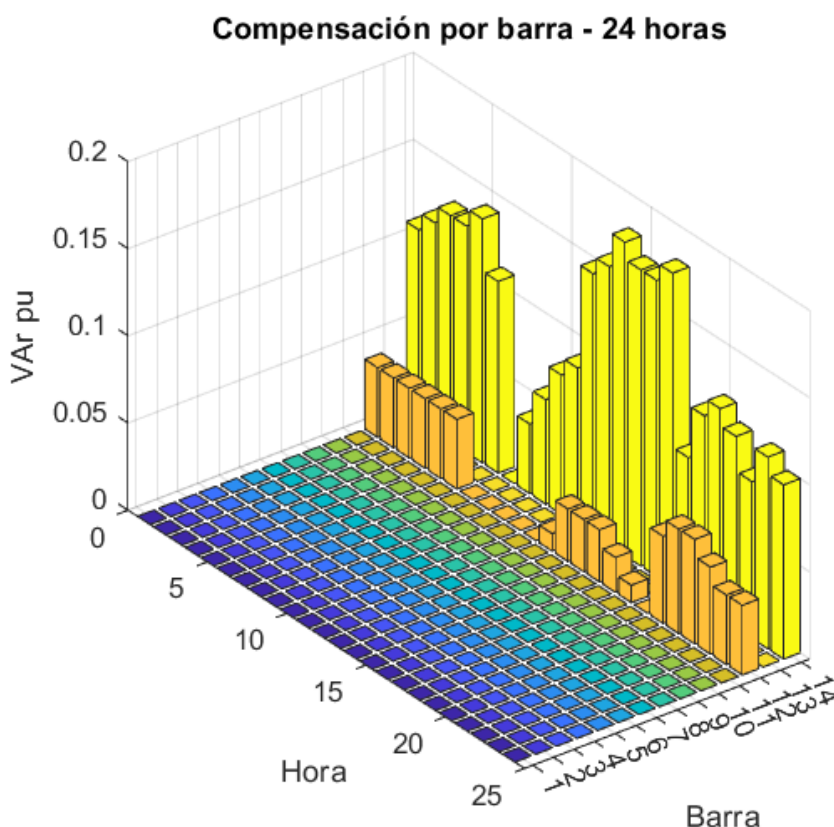
Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el método implementado logra un notorio mejoramiento de los perfiles de voltaje a la vez que se reduce las pérdidas por transporte del sistema. Por otro lado, se demuestran que el modelo de optimización implementado adapta su respuesta de forma dinámica ante las distintas condiciones de operación presentes en la red de la EERSA.

La aplicación del modelo de optimización propuesto aplicado a las 24 horas del día permitirá generar un cronograma de conexión y desconexión de los bancos de capacitores en la red de la EERSA. La figura 9 muestra gráficamente los valores horarios de inyección de reactivos requeridos para las barras del sistema. Los resultados demuestran que para la condición base de estudio únicamente se requiere compensación para las barras 12 y 14 de la red de la EERSA

Figura 9

Resultados compensación requerida



La metodología empleada demuestra ser de fácil programación e implementación, sin embargo, el tiempo de ejecución del algoritmo es proporcional al tamaño del sistema analizado e inversamente proporcional al tamaño del paso de VAR a inyectar utilizado.

Por otro lado, es importante notar que el éxito de los resultados al aplicar el método CRITIC depende en gran medida de los criterios utilizados para la evaluación. Esto le permite que pueda ser implementado para todo análisis en el cual se pueda crear un conjunto de eventos, como en el caso de ubicación de equipos de protección para redes de medio voltaje (Zeinalzadeh et al., 2019) cuyo algoritmo de validación podría ser simplificado mediante la técnica utilizada en el este trabajo.

Conclusiones

- Tal como se muestra en el apartado de compensación capacitiva, los criterios heurísticos para la ubicación de las localizaciones a instalar bancos de capacitores acompañados con la técnica estadística CRITIC para el análisis multivariable presentaría una nueva propuesta para la óptima compensación capacitiva en sistemas eléctricos, así como también la solución de diversos problemas de optimización en los que las posibles soluciones puedan ser divididas en escenarios finitos.
- La implementación del análisis estadístico permitirá determinar la correcta capacidad de reactivos a ser inyectados, la cual permitirá lograr la máxima corrección de los perfiles de voltaje sin incrementar las pérdidas por transporte en las líneas de transmisión.
- Se observa que el modelo de optimización para compensación reactiva aplicado al sistema de 69kV de la EERSA presenta muy buenos resultados para el control de local de voltaje, sin embargo, no se aprecian mejoras considerables en cuanto a reducción de pérdidas del sistema.

Conflicto de intereses

Los autores del presente artículo científico de revisión bibliográfica manifiestan que no poseen ningún tipo de conflicto de interés en relación con la presente investigación.

Referencias Bibliográficas

- Abdullahi, H., Reyes-Rubiano, L., Ouelhadj, D., Faulin, J., & Juan, A. A. (2021). Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 143–154. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2020.10.028>
- Arlenny, A., Zondra, E., & Zulfahri, Z. (2019). Optimization of Capacitor Bank Placement in Electric Network Using Genetic Algorithm. *Journal of Physics: Conference Series*, 1351(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1351/1/012005>

- Bayat, A., & Bagheri, A. (2019). Optimal active and reactive power allocation in distribution networks using a novel heuristic approach. *Applied Energy*, 233–234, 71–85. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2018.10.030>
- Elkhidir, L., Hassan, A., & Khalid, M. (2019). SVC-based controller design via ant colony optimization algorithm. *8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2019*, 301–308. <https://doi.org/10.1109/ICRERA47325.2019.8996883>
- Kadom, H. F., Hussain, A. N., & Al-Jubori, W. K. S. (2020). Optimal dual design based on capacitor placement and reconfiguration techniques for loss reduction and voltage enhancement. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 745(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/745/1/012003>
- Kamel, S., Mohamed, M., Selim, A., Nasrat, L. S., & Jurado, F. (2019). Power System Voltage Stability Based on Optimal Size and Location of Shunt Capacitor Using Analytical Technique. *2019 10th International Renewable Energy Congress, IREC 2019*. <https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754516>
- Kersting, W. H. (2012). Distribution system modeling and analysis. *Distribution System Modeling and Analysis*, 1–314. <https://doi.org/10.1201/9781315222424-27/DISTRIBUTION-SYSTEM-MODELING-ANALYSIS-WILLIAM-KERSTING>
- Lakra, N. S., Prakash, P., & Jha, R. C. (2017). Power quality improvement of distribution system by reactive power compensation. *International Conference on Power and Embedded Drive Control, ICPEDC 2017*, 415–420. <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081125>
- Lamas, M. I., Castro-Santos, L., & Rodriguez, C. G. (2020). Optimization of a Multiple Injection System in a Marine Diesel Engine through a Multiple-Criteria Decision-Making Approach. *Journal of Marine Science and Engineering 2020, Vol. 8, Page 946*, 8(11), 946. <https://doi.org/10.3390/JMSE8110946>
- Li, Q., & Yin, H. (2019). Research on reactive power compensation capacity allocation scheme of 110kV substation. *Proceedings of 2019 IEEE 2nd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering, AUTEEE 2019*, 241–244. <https://doi.org/10.1109/AUTEEE48671.2019.9033289>
- Li, X., Wang, Y., Li, N., Han, M., Tang, Y., & Liu, F. (2017). Optimal fractional order PID controller design for automatic voltage regulator system based on reference model using particle swarm optimization. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 8(5), 1595–1605. <https://doi.org/10.1007/S13042-016->

0530-2/METRICS

- Okon, T., & Wilkosz, K. (2018). Diagnostics of Reactive Power Flow in a Power Network. *2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, Diagnostika 2018*. <https://doi.org/10.1109/DIAGNOSTIKA.2018.8526090>
- Ramadan, H. S., Bendary, A. F., & Nagy, S. (2017). Particle swarm optimization algorithm for capacitor allocation problem in distribution systems with wind turbine generators. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 84, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.04.041>
- Yepes Piqueras, V. (2022, January). *Método CRITIC de toma de decisión multicriterio*. Poli blogs. Universidad Politécnica de Valencia. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2022/01/13/metodo-critic-de-toma-de-decision-multicriterio/>
- Zeinalzadeh, A., Estebansari, A., & Bahmanyar, A. (2019). Multi-Objective Optimal Placement of Recloser and Sectionalized in Electricity Distribution Feeders. *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC/I and CPS Europe 2019*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC.2019.8783430>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.



Indexaciones

