



Técnicas para la elaboración de modelos de flujo de potencia óptimo reactivo en múltiples periodos de tiempo

Techniques for optimal reactive power flow modeling over multiple time periods

Daniel Camilo Londoño-Tamayo¹, Walter Mauricio Villa-Acevedo², Jesús María López-Lezama^{3*}

¹Magister en Ingeniería, dcamilo.londono@udea.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-3589-2622>, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

²Magister en Ingeniería, walter.villa@udea.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-1466-7266>, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

³Doctor en Ingeniería, jmaria.lopez@udea.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-2369-6173>, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

How to cite: D. C. Londoño-Tamayo, W. M. Villa-Acevedo, y J. M. López-Lezama, "Técnicas para la elaboración de modelos de flujo de potencia óptimo reactivo en múltiples periodos de tiempo", *Respuestas*, vol. 27, n.º 3, sep. 2022, pp. 6-21. <https://doi.org/10.22463/0122820X.2325>.

Received on April 23, 2022 - Approved on August 14, 2022

ABSTRACT

Keywords:

Optimal reactive power, Power systems, Optimization.

The problem of optimal reactive power dispatch (ORPD) is a classic challenge in power systems, which seeks to optimize reactive power management to minimize losses. Although it has been extensively studied, there are few works that address this problem from a multi-period perspective. One of the main challenges is how to model the ORPD over a longer time horizon, taking into account the constraints of reactive power compensation devices, such as transformers and capacitors, and minimize the number of taps in transformers and other devices. This paper provides a comprehensive review of the strategies that have been used in the literature to model multiperiod ORPD (MORPD), paying special attention to limiting the number of taps on reactive power compensation devices, such as capacitors, reactors and transformer taps. It was found that very few studies consider the modeling of intra-hour constraints and switching limits in reactors. Finally, this review article is intended as an input for researchers interested in proposing new models for MORPD.

RESUMEN

Palabras clave:

Flujo óptimo reactivo, Sistemas de potencia, Optimización.

El problema del despacho óptimo de potencia reactiva (DOPR) es un desafío clásico en sistemas de potencia, que busca optimizar la gestión de reactivos con el fin de minimizar pérdidas. Aunque ha sido ampliamente estudiado, hay pocos trabajos que abordan este problema desde una perspectiva multiperiodo. Uno de los principales desafíos es cómo modelar el DOPR en un horizonte de tiempo más amplio, teniendo en cuenta las restricciones de los dispositivos de compensación de potencia reactiva, como los transformadores y los capacitores, y minimizar el número de maniobras en los taps de los transformadores y otros dispositivos. Este artículo ofrece una revisión exhaustiva de las estrategias que se han utilizado en la literatura para modelar el DOPR multiperiodo (DOPRM), prestando especial atención a la limitación del número de maniobras en los dispositivos de compensación de potencia reactiva, como los capacitores, reactores y los taps de transformadores. Se pudo encontrar que muy pocos estudios consideran el modelado de restricciones intrahorarias y los límites de maniobras en reactores. Finalmente, este artículo de revisión tiene como objetivo servir de insumo a investigadores que estén interesados en proponer nuevos modelos para el DOPRM.

Introducción

El despacho óptimo de potencia reactiva (DOPR) se encarga de gestionar de forma óptima los recursos de generación de reactivos y control de tensión en un sistema de potencia. Este problema se aborda después de la programación de potencia activa, y debe realizarse sin alterar la programación previa de los generadores de potencia activa (a excepción del nodo de referencia, que debe compensar las pérdidas). Aunque el objetivo principal del DOPR es reducir las pérdidas, también se han considerado otros objetivos, como mejorar el perfil de tensiones, minimizar el desvío de tensiones con respecto a un valor dado y mejorar la estabilidad de la tensión [1]. El DOPR se puede interpretar como un subproblema del flujo de potencia óptimo, que tiene como objetivo administrar adecuadamente los recursos de

*Corresponding author.

E-mail Address: jmaria.lopez@udea.edu.co (Jesús María López-Lezama)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

potencia reactiva del sistema. Existen diferentes expresiones que se utilizan comúnmente como función objetivo del DOPR, que se presentan en [2][3]. Después de la reducción de pérdidas, el objetivo más comúnmente utilizado en el DOPR es mejorar el perfil de tensiones, según se informa en [4][5]. Por otra parte, con el DOPR también se ha buscado la mejora en estabilidad de la tensión, como se reporta en [6][7].

El DOPR se ha abordado a través de diferentes enfoques y técnicas, tanto deterministas como probabilísticos, y se han utilizado diversos índices técnicos para evaluar la gestión óptima de los recursos de generación de reactivos y control de tensión en un sistema de potencia. Estos índices incluyen la reducción de pérdidas de potencia activa [8][9], desviaciones y estabilidad de tensión, [10][11] y operación y mantenimiento[1]. En la literatura, el problema ha sido tratado desde una perspectiva monobjetivo o multiobjetivo [12]-[15], y se han utilizado metodologías clásicas como programación lineal y cuadrática [16]-[19], así como métodos de descomposición [20][21]. También se han aplicado técnicas metaheurísticas, incluyendo algoritmos evolutivos [22][23], algoritmos de inteligencia de enjambres [24], algoritmos basados en fenómenos físicos [25], algoritmos no inspirados en la naturaleza [26] y algoritmos inmunes [27]. El DOPR puede abordarse de forma monopериодо o multipериодо, siendo este último conocido como DOPRM, en el cual se considera la variación en el tiempo de las fuentes de generación y las cargas conectadas al sistema al realizar el despacho de los recursos de potencia reactiva de manera multihoraria.

En el DOPRM es importante tener en cuenta restricciones intrahorarias. Estas se encargan de minimizar el número de maniobras en los elementos, evitando costos adicionales por mantenimiento y envejecimiento o desgaste prematuro de los elementos de maniobra. Por otra parte, estas restricciones permiten establecer un límite de la cantidad de pasos de maniobra entre una hora y la siguiente para que no haya cambios súbitos en la operación del equipo. Es de tener en cuenta que un número de cambios de paso excesivos en los equipos de maniobra pueden no ser viables en la operación del sistema. Por otro lado, para el problema del DOPRM se tienen en cuenta como elementos de control inicialmente los taps de maniobra de los transformadores y los elementos que inyectan potencia reactiva al sistema. Los anteriores controles se usan normalmente en sistemas con alta demanda. Sin embargo, para situaciones de baja demanda, se pueden producir sobretensiones en algunas barras (debido a exceso de potencia reactiva), para lo cual es necesario la conexión de reactores con el objetivo de mantener las tensiones dentro de los límites establecidos.

La literatura técnica indica que hay pocos estudios sobre el DOPRM, por lo que es importante revisar las características técnicas y estrategias de limitación de maniobras propuestas en el modelado matemático del DOPRM. En este problema, la reducción de pérdidas es el beneficio más utilizado, como se ha demostrado en varios estudios. Algunos estudios se han enfocado en minimizar las pérdidas de potencia activa en una central eólica [28], mientras que otros han buscado optimizar la diferencia entre la potencia total generada y la potencia total demandada en el sistema de transmisión para un horizonte de tiempo dado [29][30]. En algunos estudios se han considerado áreas descentralizadas en el DOPRM para reducir las pérdidas de potencia [30], y en otros se ha propuesto una coordinación entre las fuentes de generación distribuida conectadas a un sistema y la inyección de potencia reactiva discreta [31]. Además, se han empleado subfunciones que involucran los pasos y cambios de taps de bancos de capacitores y reactores, así como la potencia reactiva y activa inyectada en los nodos del sistema, para analizar y reducir las pérdidas de energía.

En este artículo se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se proporciona una descripción general de los modelos utilizados para el DOPR y el DOPRM. Luego, en la sección 3, se detallan las características técnicas a tener en cuenta en los equipos involucrados en el DOPRM. En la sección 4 se explican las estrategias de modelado relacionadas con la limitación del número de maniobras en la función objetivo y mediante restricciones. Finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones obtenidas a partir de la revisión realizada.

Modelamiento de despacho óptimo reactivo

En esta sección se presentan de forma compacta los modelos monopериодо y multipериодо del DOPR. Las estrategias de modelado empleadas para el DOPRM son detalladas en la próxima sección.

Modelo de un solo periodo

La expresión matemática general del DOPR, para un solo periodo de tiempo está dada por las ecuaciones (1)-(3) [34].

$$\text{Min}F(x,u) \quad (1)$$

Sujeto a:

$$g(x,u) = 0 \quad (2)$$

$$h(x,u) \leq 0 \quad (3)$$

En esta formulación, se utiliza la función objetivo $F(x,u)$ para maximizar o minimizar ciertas variables dependientes x , que corresponden a las magnitudes y ángulos de las tensiones en las barras de carga, mientras se ajustan las variables de control u , que corresponden a las magnitudes de tensión en las barras de generación (barras PV), las posiciones de las tomas de los transformadores y la potencia suministrada por bancos de reactivos. El conjunto de restricciones $g(x,u)$ garantiza el balance de potencia activa y reactiva en todas las barras del sistema, mientras que $h(x,u)$ impone límites operacionales en los componentes de la red, como los transformadores y los bancos de reactivos. Estas limitaciones son:

- (a) Restricciones de voltaje máximo y mínimo en generadores y cargas
- (b) Restricciones en la cantidad de potencia reactiva que los generadores pueden suministrar
- (c) Restricciones en la cantidad de potencia reactiva que los elementos de compensación pueden inyectar
- (d) Restricciones en la capacidad de carga de las líneas de transmisión.
- (e) Restricciones en las conexiones de transformadores y las etapas de ajuste de bancos de capacitores y reactores.

Modelo Multiperiodo

Las ecuaciones (4)-(6) presentan el modelo del DOPRM de manera concisa y general.

$$\text{Min}F(x,u,t) \quad (4)$$

Sujeto a:

$$g(x,u,t) = 0 \quad (5)$$

$$h(x,u,t) \leq 0 \quad (6)$$

En el caso del modelo multiperiodo, se deben satisfacer las mismas condiciones del modelo monoperiodo descrito anteriormente para cada período de tiempo, junto con restricciones intertemporales que se relacionan con la reducción de la operación de los taps y bancos de reactivos. Una de las características distintivas del modelo multiperiodo es que la función objetivo y las restricciones tienen en cuenta las maniobras en los bancos de capacitores y reactores y la disminución del número de cambios de taps en los transformadores.

Consideraciones técnicas relevantes para el modelado de los equipos

En los sistemas de transmisión, hay una variedad de equipos, como transformadores de potencia, bancos de capacitores y bancos de reactores, que se manipulan para cumplir con el DOPRM. Es importante registrar todas las maniobras realizadas en cada equipo para identificar aspectos relevantes, como la vida útil, los ciclos de mantenimiento y las inversiones necesarias en nuevas tecnologías. En las Tablas I y II se detallan las fallas más comunes que ocurren en los cambiadores de taps de transformadores, bancos de capacitores y bancos de reactores, así como las características técnicas relevantes para cuantificar el costo que genera la realización de maniobras en estos equipos [35-38].

Tabla I. Problemas encontrados en equipos de compensación de potencia reactiva.

Cambiadores de tomas de los transformadores	Reactores y capacitores
Mecánicos (resortes, cojinetes, ejes y mecanismos de accionamiento para cambiadores de tomas).	Espacios de aire del núcleo del reactor.
Eléctricos (daños en el devanado de regulación).	Desgaste causado por las corrientes de arranque al conectar o desconectar bancos de reactores o capacitores
Dieléctricos (daños en la rigidez dieléctrica del aceite).	Fenómeno de histéresis en el núcleo de un reactor
	Componentes armónicos principales
	Desactivación del reactor derivacion o compensador capacitivo.
	Disipación de energía en reactores en derivación o compensadores capacitivos

Tabla II. Características técnicas a tener en cuenta sobre el efecto de maniobras en equipos.

Concepto	Equipo		
	Transformadores	Reactor	Capacitor
Máximo número de operaciones según el diseño.	X	X	X
Número máximo de operaciones diarias establecido por el operador.	X	X	X
Restricciones temporales específicas por hora establecidas por el operador.	X	X	X
Tiempo de vida útil durante la operación del equipo (en años).	X	X	X
Tiempo de vida útil cuando el equipo está inactivo (en años).	X	X	X
Intervalos de revisión del equipo.	X	X	X
Monto de la inversión en OLTC (On-Load Tap Changer).	X		
Costo de revisión del OLTC.	X		
Monto de la inversión en el transformador.	X		
Monto de la inversión en el compensador shunt o reactor.		X	X
Monto de la inversión en interruptores y equipos operativos de los compensadores shunt.		X	X
Costo de revisión de un compensador.		X	X
Costo de mano de obra requerido para llevar a cabo el mantenimiento.	X	X	X
Costo de mano de obra debido a la realización de diferentes maniobras operativas.	X	X	X

Estrategias de modelado para el DOPRM

En la sección previa se destacó la importancia de modelar apropiadamente las maniobras necesarias en el DOPRM con el fin de prolongar la vida útil de los equipos y aumentar la confiabilidad del sistema de potencia. En esta sección, se realiza una revisión del modelado de restricciones en el número máximo de maniobras permitidas, que pueden ser incorporadas ya sea en la función objetivo o como restricciones en el modelo de optimización del DOPRM. Este tipo de expresiones representan la forma canónica del problema abordado. Vale la pena mencionar que para el DOPRM no existen soluciones patrón o estándar con las cuales hacer comparaciones, como si las hay para otro tipo de problemas como por ejemplo el flujo de potencia convencional en los sistemas de prueba IEEE.

Inclusión de límite de maniobras en la función objetivo

En [39] se utiliza una función objetivo que restringe la cantidad de maniobras realizadas por los dispositivos de compensación de potencia reactiva, como se describe en la ecuación (7).

$$\min F = \sum_{d=1}^{N_c} \frac{Q_{cap} * IC_{cap}}{Lifespan * usage} * \left(\sum_{K=2}^{24} |Q_c^K - Q_c^{K-1}| \right) \quad (7)$$

La expresión presentada en la que intervienen Q_{cap} , IC_{cap} , $Lifespan$ y $usage$, representa la capacidad y costo de inversión de un capacitor en derivación, así como su vida útil y uso. Por otro lado, Q_c^K se refiere a la potencia reactiva de los capacitores en el intervalo k -ésimo. Es importante destacar que en este enfoque no se considera la variación de los taps en los transformadores.

Los autores en [33] y [40] utilizan una función objetivo que restringe la cantidad de maniobras que se realizan en los transformadores (variación de taps), así como la inyección de potencia reactiva de fuentes eólicas, según se indica en las ecuaciones (8) y (9). En [41] se introduce una penalización expresada en la ecuación (10), que depende de la diferencia entre los taps en dos instantes de tiempo consecutivos ($tap_{t,T}$ y $tap_{t-1,T}$); y se busca minimizar el número de cambios de taps.

$$\min F = \sum_{t=1}^{24} w_2 * w_3 * |tap_t - tap_{t-1}| \quad (8)$$

$$\min F = \sum_{i,j \in \beta, G_{ij} \neq 0} \sum_{t \in T} |\alpha_{i,j,t} - \alpha_{i,j,t-1}| \quad (9)$$

$$\min F = W_c \sum_{t=1}^{t=N} \sum_{T=1}^{T=N_{tr}} |tap_{t,T} - tap_{t-1,T}| + W_r \sum_{t=1}^{t=N} |P_t| \quad (10)$$

$$P_t \geq 0 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \text{Penalización1: } P_t \geq p_1 Tap_t + p_2, \\ & \text{por debajo del límite inferior establecido.} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \text{Penalización2: } P_t \geq p_3 Tap_t + p_4, \\ & \text{por encima del límite superior establecido.} \end{aligned} \quad (13)$$

La ecuación (8) utiliza w_2 como un factor de ponderación para representar la importancia de los cambios de taps del transformador, según se reporta en [33]. Por otro lado, w_3 se utiliza como un factor de ponderación para calcular el costo asociado con los cambios de taps.

En la ecuación (9), el estado del tap del transformador en el tiempo t se representa con $\alpha_{i,j,t}$, donde i y j corresponden a los taps de referencia y seleccionados, respectivamente, y se refleja en cambios de impedancia entre los puntos i -ésimos y j -ésimos, β y G_{ij} representan el conjunto de barras i y j , y las admitancias entre los puntos i y j , respectivamente. La ecuación (10) utiliza $tap_{t,T}$ para indicar la posición del tap del transformador T en el momento t , mientras que W_c es el factor de peso para los cambios de taps realizados del periodo $t-1$ al periodo t . Por otro lado, W_r es el factor de peso dado a una función de penalización P_t que penaliza los taps de los transformadores que estén por fuera de un rango determinado, según su ubicación. Los valores de las pendientes e interceptos de la función de penalización se denotan como P_1, P_2, P_3 y P_4 , tal como se muestra en (12) y (13).

En [42] se emplea una función objetivo que busca disminuir el número de maniobras en los compensadores capacitivos y reactivos, según se describe en la ecuación (14). La variable $I_{b,tk}$ representa el estado de conexión o desconexión de los bancos de capacitores o reactores en el sistema de energía.

$$\min F = \sum_{k=1}^m \sum_{b \in N_C} (I_{b,t_k} - I_{b,t_{k-1}})^2 \quad (14)$$

En los artículos [31] y [43], se utilizan funciones de minimización cuadrática similares. En [31], se convierten valores discretos en valores continuos y luego se aplica la función objetivo expresada en (15) para minimizar la diferencia entre el valor continuo y el valor discreto más cercano para el transformador y el compensador. En [43], se presenta la función objetivo en (16) para reducir el número de maniobras realizadas por bancos de capacitores y reguladores de tensión.

$$\sum_{t \in \Gamma} \left[\sum_{C \in \Gamma_a^C} (Q_{c,t}^C - Q_{c,t}^{C*})^2 + \sum_{C \in \Gamma_a^T} (K_{r,t}^T - K_{r,t}^{T*})^2 \right] \quad (15)$$

$$= \sum_{K \in N^{swC}} (Q_k^{swC} - Q_k^{swC*})^2 + \sum_{(k,j) \in N^T} (t_{kj} - t_{kj}^*)^2 \quad (16)$$

En la ecuación (15), $Q_{c,t}^C$ y $Q_{c,t}^{C*}$ se refieren respectivamente a la potencia reactiva continua y la potencia reactiva capacitiva aproximada a un nuevo valor discreto de los compensadores capacitivos, que se obtienen después de relajar y aproximar el problema. $K_{r,t}^T$ y $K_{r,t}^{T*}$ se refieren a los valores continuos de los taps de los transformadores hallados después de relajar el problema y los valores aproximados a nuevos valores discretos. Por último, Γ_a^C y Γ_a^T son los capacitores y transformadores que pertenecen a un área determinada del sistema. La ecuación (15) tiene como objetivo minimizar la desviación de los valores continuos a los valores discretos más cercanos posibles para los transformadores y los compensadores capacitivos.

En la ecuación (16), Q_k^{swC} y Q_k^{swC*} representan el estado de inyección de potencia reactiva de los bancos de capacitores antes y después de la optimización. Por otro lado, t_{kj} y t_{kj}^* indican el estado de la posición del tap del regulador antes y después de la optimización entre las barras k y j . N^{swC} y N^T , se refieren al número de compensadores en conectados en paralelo y transformadores respectivamente

$$\min F \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^n (C_s * |k_s^t - k_s^{t-1}|) \right\} \quad (17)$$

Donde C_{loss} y C_s , corresponden a los costos de las pérdidas de potencia activa y los costos de operación de conexión para compensadores en derivación, respectivamente; P_{loss}^t , corresponde a las pérdidas de potencia activa en el periodo t ; k_s^t , indica la posición del capacitor en el tiempo t ; T corresponde al número de periodos (24 horas) y Δt corresponde a 1 hora.

Los autores en [44] proponen un método que no solo minimiza las pérdidas de potencia activa, sino también reduce el número de operaciones realizadas en los equipos de control de los bancos de capacitores y reactores, así como en los ajustes de los taps de los transformadores. Este enfoque utiliza la función objetivo dada por la ecuación (18).

$$\min F = C_A * \Delta U \quad (18)$$

El vector C_A indica los costos de mantenimiento en dólares por maniobra para cada equipo compensador, mientras que el vector columna ΔU representa las desviaciones de las variables de control discretas de la posición antes y

después de la optimización

En [45] y [46], se incorporan penalizaciones para limitar el número de maniobras realizadas en transformadores y bancos de capacitores. Estas penalizaciones se establecen mediante las expresiones (19) y (20), respectivamente. El objetivo de ambas funciones es reducir el número de maniobras que se realizan en el banco de capacitores principal y en un transformador principal. En [45], además, se aplica una gestión para reducir las maniobras en los bancos de capacitores distribuidos en varios alimentadores de distribución. Por otro lado, en [46] se presenta un proceso para maximizar una función que limita la desviación del número de maniobras en bancos de capacitores y transformadores con respecto a un valor máximo permitido.

$$\min F \mu_{tap} + \mu_{s-cap} + \sum_{k=1}^{10} \mu_{f-cap(k)} \quad (19)$$

$$\max F \mu_{Ntap} + \mu_{NC} \quad (20)$$

La expresión (19) incluye los valores unitarios μ_{tap} , μ_{s-cap} , y $\mu_{f-cap(k)}$, los cuales se asignan según el número de operaciones realizadas en el transformador principal, el banco de capacitores principal de todos los alimentadores, y los bancos de capacitores que compensan cada alimentador. Por otro lado, la expresión (20) utiliza μ_{Ntap} que es una función de asignación unitaria que depende del número de operaciones realizadas en el cambiador de taps del transformador, y μ_{NC} que es una función de asignación unitaria que depende del número de operaciones realizadas en el interruptor del banco de capacitores.

El trabajo [47] utiliza la función objetivo dada por la expresión (21), la cual tiene como propósito minimizar el número de maniobras realizadas en un transformador principal, así como en los bancos de capacitores distribuidos y el principal banco de capacitores.

$$\min F \sum_{h=1}^N C_{Tap} |tap^{h+1} - tap^h| + C_S |K_S^{h+1} - K_S^h| + C_F |K_F^{h+1} - K_F^h| \quad (21)$$

En la expresión anterior, se utiliza tap^h para representar la posición del tap del transformador en la hora h . Además, se utilizan K_S^h y $k_{S,max}$ para representar el cambio operativo del banco de capacitores principal ante la entrada o salida de unidades de compensación y el número máximo de unidades de compensación, respectivamente. Del mismo modo, K_F^h y $k_{F,max}$ se utilizan para representar el cambio operativo de cada banco de capacitores en cada alimentador ante la entrada o salida de unidades de compensación, y el número máximo de unidades de compensación en cada alimentador, respectivamente. Finalmente, se utilizan C_{Tap} , C_S y C_F para representar los factores de costo de las pérdidas de potencia, cambio de taps y cambio de compensación por entrada del banco de capacitores principal y los bancos de capacitores de los alimentadores.

El objetivo de los autores en [48] es minimizar el costo resultante de las pérdidas de potencia activa, la operación, el costo acumulado y la transición de fuentes de compensación capacitiva. Para lograr esto, se utiliza la función objetivo expresada en (22).

$$\min F = [O(i,j) + T(i-1,l;i,j) + C(i-1,l)] \quad (22)$$

En la expresión, $O(i,j)$ es el costo de operación de la j -ésima combinación o arreglo de capacitores en la hora i . Además, $T(i-1,l;i,j)$ es el costo acumulado de la transición de la l -ésima combinación en la hora $i-1$ a la j -ésima combinación en la hora i , mientras que $C(i-1,l)$ es el costo acumulado de la l -ésima combinación en la hora i .

Restricciones basadas en límites de maniobras

En esta sección se muestra que, además de aplicar una penalización por el número de maniobras en la función objetivo, también se pueden controlar estas maniobras mediante restricciones en el problema de optimización.

Restricciones en el número de maniobras en los taps de los transformadores

Restricciones en el número máximo de maniobras permitidas por día

La literatura frecuentemente utiliza las ecuaciones (23) a (28) para representar la capacidad máxima de maniobra de los taps de transformadores.

$$\sum_{t \in \Gamma} u_{r,t}^T \leq T_r^{adj} \forall r \in \Gamma_a^T, a \in \Gamma^{area} \quad (23)$$

La variable $u_{r,t}^T$ se utiliza para registrar el cambio de estado del transformador en un período de tiempo determinado, mientras que T_r^{adj} se refiere al número máximo de operaciones permitidas para el cambiador de taps en un día. La variable Γ_a^T representa los transformadores considerados en el análisis y Γ^{area} indica el conjunto de áreas bajo estudio.

$$\sum_{t=1}^{N_T} (K_i^t \oplus K_i^{t-1}) \leq S_{K,i,max} \quad i = 1, \dots, N_K \quad (24)$$

La variable K_i^t representa la posición del i -ésimo tap del transformador en el tiempo t . $S_{K,i,max}$ es el número máximo de operaciones permitidas para ese transformador. El símbolo \oplus indica que se cuenta como una maniobra solo si la posición del tap ha cambiado en el tiempo t en comparación con el tiempo $t-1$. N_K es el número total de transformadores en el sistema.

$$\sum_{i=1}^{24} |TAP_{k,i} - TAP_{k,i-1}| \leq MK_T \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |x_{T,t+1} - x_{T,t}| \leq S_{xT} * C_{xT} \quad (26)$$

En la ecuación (25), la variable $TAP_{k,i}$ corresponde a la ubicación del tap del transformador k -ésimo en la hora i -ésima, mientras que MK_T se refiere al número máximo de operaciones permitidas en un día [49][50]. Por otro lado, en la ecuación (26), la variable $x_{T,t}$ indica la posición del tap del transformador T -ésimo en la hora t , y S_{xT} es una matriz diagonal que contiene los tamaños de los pasos de los taps de los transformadores. Además, C_{xT} es un vector que contiene el número máximo de operaciones permitidas para los transformadores de potencia, también conocido como MADSON (Maximum Allowable Daily Switching Operations) según se describe en [51].

$$\alpha_i = \sum_{t=h}^T (u_{i,t} - u_{i,t-h})^2 \leq \alpha_{i,max} \quad (27)$$

La variable $u_{i,t} \in \{0,1\}$, toma el valor de 1 si hay un cambio en el estado de la unidad i durante el intervalo de tiempo entre $t-h$ y t , y toma el valor de 0 en caso contrario. Por otro lado, α_i representa el número de operaciones realizadas por la unidad i durante el periodo de tiempo considerado, mientras que $\alpha_{i,max}$ indica el máximo número de operaciones permitidas [52].

$$S_{Ti} \leq S_{Tmax} \quad (28)$$

En donde S_{Ti} es un vector que indica el número de veces que cada transformador ha sido operado durante un período de tiempo específico, así como el número máximo de operaciones permitidas para cada transformador durante ese período de tiempo [53].

Límites de operación entre periodos consecutivos

En [30] se considera, el límite máximo de operaciones permitidas para cambiar los taps de transformadores entre periodos consecutivos, según se indica en la ecuación (29)

$$|K_i^t - K_i^{t-1}| \leq S_{K,i,\Delta} K_{i,step} \quad i = 1, \dots, N_K, t = 1, \dots, N_T \quad (29)$$

En particular, K_i^t indica la posición del i -ésimo tap del transformador en el tiempo t . $S_{K,i,\Delta}$ se refiere al límite de maniobras permitidas entre intervalos sucesivos, y $K_{i,step}$ es el tamaño del paso del i -ésimo transformador en el intervalo t . Por último, N_K se refiere al número total de transformadores considerados.

Límite en el número de maniobras en bancos de capacitores y reactores

Límites por día

Se emplean comúnmente en la literatura técnica las ecuaciones (30) a (33) para expresar la capacidad máxima de maniobra de pasos en bancos de capacitores y reactores.

$$\sum_{t \in \Gamma} u_{x,t}^x \leq X_x^{adj} \quad \forall c \in \Gamma_a^x, a \in \Gamma^{area} \quad (30)$$

La variable $u_{x,t}^c$ se refiere al cambio de estado de un banco en un período t , mientras que X_x^{adj} corresponde al número máximo de operaciones permitidas durante el día. La variable Γ_a^x representa el banco de capacitores o reactores en el área estudiada, mientras que Γ^{area} se refiere al conjunto de áreas bajo estudio [31]

$$\sum_{t=1}^{N_T} (Q_{x,i}^t \oplus Q_{x,i}^{t-1}) \leq S_{Q_{x,i,max}} \quad i = 1, \dots, N_x \quad (31)$$

Donde, $Q_{x,i}^t$ se refiere a la posición i -ésima en la que se encuentra el banco de capacitores o reactores en un momento dado, t . $S_{Q_{x,i,max}}$ representa el límite máximo de operaciones permitidas para los bancos de capacitores o reactores. La operación \oplus denota una maniobra realizada si $Q_{x,i}^t \neq Q_{x,i}^{(t-1)}$, mientras que su valor es cero en caso contrario. Finalmente, N_x se refiere al número total de bancos de capacitores o reactores disponibles. [49][54].

$$s - cap \equiv \sum_{i=1}^{24} |X_{s,i} - X_{s,i-1}| \leq N_{max} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (32)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |x_{s,t+1} - x_{s,t}| \leq S_{xS} * C_{xS} \quad (33)$$

En la ecuación (32), $X_{s,i}$ representa el estado de encendido o apagado de los bancos de capacitores o reactores, mientras que N_{max} indica el número máximo de operaciones permitidas durante el día. En la ecuación (33), $x_{s,t}$ se refiere a la posición del banco de capacitores o reactores en la hora t para el banco S -ésimo. Por otro lado, S_{xS} es una matriz diagonal que contiene los tamaños de paso de los bancos de capacitores o reactores correspondientes al banco S -ésimo. Además, C_{xS} es un vector que contiene el número máximo de operaciones permitidas para cada banco de capacitores o reactores. [51].

Límites entre periodos consecutivos

El artículo [30] establece una restricción relacionada con la capacidad máxima de operación de los bancos de capacitores entre periodos consecutivos, tal como se indica en la ecuación (34).

$$|Q_{x,i}^t - Q_{x,i}^{t-1}| \leq S_{Q_{x,i,\Delta}} Q_{x,i,step}^l \quad l = 1, \dots, N_x, t = 1, \dots, N_T \quad (34)$$

En esta expresión, $Q_{x,i}^t$ representa la posición i -ésima del banco de capacitores o reactores en un momento dado, t . $S_{Q_{x,i,\Delta}}$ se refiere al límite máximo de operaciones permitidas entre intervalos sucesivos, y $Q_{x,i,step}$ indica el tamaño del paso del banco de capacitores o reactores en el intervalo de tiempo t .

La Tabla III presenta un resumen de las fuentes que utilizan límites diarios y sucesivos en las operaciones de transformadores y bancos de capacitores o reactores. Por otro lado, la Tabla IV muestra un resumen de las fuentes que utilizan dispositivos considerados, así como el enfoque adoptado para las operaciones en función del objetivo, las restricciones y ambos aspectos combinados.

Tabla III. Referencias empleadas por cada uno de los dispositivos y enfoques de DOPRM en las restricciones en el límite de maniobras.

Dispositivo	Límite de maniobras	Enfoque	Referencia
Transformador	Diario	(23)	[31]
		(24)	[30]
		(25)	[45][46][49][50][52]
		(26)	[51]
		(27)	[52]
		(28)	[53]
	Interhorario	(29)	[30][55]
Capacitor ó reactor	Diario	(30)	[31]
		(31)	[30][49][50][54]
		(32)	[45][46]
		(33)	[51]
	Interhorario	(34)	[30][55]

Tabla IV. Tipo de dispositivo bajo estudio en cada referencia y resumen de enfoques para límite de maniobras.

Elementos modelados a través de despacho de potencia reactiva multiperiodo			
Referencia	Capacitores	Reactores	Transformadores
[28][39][54]	X		
[33][40][41][52][53]			X
[42]	X	X	
[30][31][43][45][46][47][48][49][50][51][55]	X		X
[44]	X	X	X
Restricción en el número de maniobras en la función objetivo	[28][33][39][40][42][43][44][48]		
Límite de maniobras en las restricciones	[30][49][51][50][52][53][54][55]		
Límite de maniobras en ambas	[31][45][46]		

Conclusiones

Este artículo proporciona una revisión exhaustiva del estado actual del DOPRM (Despacho Óptimo de Potencia Reactiva Multiperiodo) y sus estrategias para gestionar los límites de operación de compensadores de potencia reactiva y reguladores de transformadores (utilizando penalizaciones en la función objetivo y ecuaciones

de restricciones). El objetivo es modelar el límite de operaciones con el fin de reducir el desgaste debido a mantenimientos, así como mejorar la confiabilidad y vida útil de estos dispositivos. En la literatura se encontró que la mayor parte de las estrategias de modelado han estado centradas en transformadores de potencia y bancos de capacitores, por lo que es importante ofrecer nuevos estudios que involucren otros dispositivos, como los reactores, para los cuales se puede realizar una cuantificación de las maniobras, similar a las que se han realizado con bancos de capacitores. Además, en relación al límite de operaciones mediante restricciones, se observó que la mayoría de los estudios abordan este aspecto a nivel diario, mientras que son escasos los que consideran los límites interhorarios de operación. Por lo tanto, es crucial desarrollar nuevos modelos matemáticos que incorporen los límites de operación a nivel interhorario. Se encontró que existen relativamente pocos estudios realizados sobre el DOPRM, lo que indica que es un tema de investigación abierto con oportunidades para brindar nuevas estrategias de modelado y solución. Como trabajo futuro, se propone utilizar esta revisión como base para el desarrollo de nuevos modelos matemáticos que cuantifiquen la reducción de operaciones con el objetivo de minimizar el desgaste de los equipos involucrados en el DOPRM, mediante la disminución de las operaciones a nivel interhorario y diario, así como la implementación de este problema desde una perspectiva multi-área.

Referencias

- [1] S. M. Mohseni-Bonab y A. Rabiee, “Optimal reactive power dispatch: a review, and a new stochastic voltage stability constrained multi-objective model at the presence of uncertain wind power generation”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, n.o 4, pp. 815-829, mar. 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1545.
- [2] C.M. Huang, S.-J. Chen, Y.-C. Huang, y H.-T. Yang, “Comparative study of evolutionary computation methods for active-reactive power dispatch”, *Transm. Distrib. IET Gener.*, vol. 6, n.o 7, pp. 636-645, jul. 2012, doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0559.
- [3] M. Ettappan, V. Vimala, S. Ramesh, y V. Thirupath “Optimal reactive power dispatch for real power loss minimization and voltage stability enhancement using Artificial Bee Colony Algorithm”, *Microprocess. Microsyst.*, vol. 76, p. 103085, jul. 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.103085.
- [4] P. Subbaraj y P. N. Rajnarayanan, “Optimal reactive power dispatch using self-adaptive real coded genetic algorithm”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, n.o 2, pp. 374-381, feb. 2009, doi: 10.1016/j.epr.2008.07.008.
- [5] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, y. Nakanishi, “A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment”, en *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, USA, 2001, vol. 2, p. 498, doi: 10.1109/PESW.2001.916897.
- [6] D. Devaraj y J. P. Roselyn, “Genetic algorithm based reactive power dispatch for voltage stability improvement”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, n.o 10, pp. 1151-1156, dic. 2010, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.06.014.
- [7] H. Xiong, H. Cheng, y H. Li, “Optimal reactive power flow incorporating static voltage stability based on multi-objective adaptive immune algorithm”, *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, n.o 5, pp. 1175-1181, may 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.09.005.

- [8] B. Zhao, C. X. Guo, y J. Cao, "A multiagent-based particle swarm optimization approach for optimal reactive power dispatch", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, n.o 2, pp. 1070-1078, may 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846064.
- [9] C. Dai, W. Chen, Y. Zhu, y X. Zhang, "Reactive power dispatch considering voltage stability with seeker optimization algorithm", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, n.o 10, pp. 1462-1471, oct. 2009, doi: 10.1016/j.epwr.2009.04.020.
- [10] A. H. Khazali y M. Kalantar, "Optimal reactive power dispatch based on harmony search algorithm", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, n.o 3, pp. 684-692, mar. 2011, doi: 10.1016/j.ijepes.2010.11.018.
- [11] A. A. A. El Ela, M. A. Abido, y S. R. Spea, "Differential evolution algorithm for optimal reactive power dispatch", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, n.o 2, pp. 458-464, feb. 2011, doi: 10.1016/j.epwr.2010.10.005.
- [12] A. Rabiee and M. Parniani, "Optimal reactive power dispatch using the concept of dynamic VAR source value," *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1-5, doi: 10.1109/PES.2009.5275726.
- [13] A. Rabiee, M. Vanouni, y M. Parniani, "Optimal reactive power dispatch for improving voltage stability margin using a local voltage stability index", *Energy Convers. Manag.*, vol. 59, pp. 66-73, jul. 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2012.02.017.
- [14] S. Duman, Y. Sönmez, U. Güvenç, y N. Yörükeren, "Optimal reactive power dispatch using a gravitational search algorithm", *Transm. Distrib. IET Gener.*, vol. 6, n.o 6, pp. 563-576, jun. 2012, doi: 10.1049/iet-gtd.2011.0681.
- [15] B. Mandal y P. K. Roy, "Optimal reactive power dispatch using quasi-oppositional teaching learning based optimization", *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 123-134, dic. 2013, doi: 10.1016/j.ijepes.2013.04.011.
- [16] V. Ajjarapu, J. Carr, y R. S. Ramshaw, "Security constrained optimal reactive power dispatch", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 16, n.o 3, pp. 209-216, may 1989, doi: 10.1016/0378-7796(89)90013-8.
- [17] K. Rayudu, G. Yesuratnam and A. Jayalaxmi, "Improving voltage stability by optimal reactive power dispatch based on genetic algorithm and linear programming technique," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, 2016, pp. 1357-1362, doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7754904.
- [18] V. H. Quintana y M. Santos-Nieto, "Reactive-power dispatch by successive quadratic programming", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 4, n.o 3, pp. 425-435, sep. 1989, doi: 10.1109/60.43245.
- [19] J. Radosavljevic and M. Jevtic, "Solution of Optimal Reactive Power Dispatch by a Hybrid GSA-SQP Algorithm", *ELEKTRON ELEKTROTECH*, vol. 22, no. 3, pp. 3 - 6, Jun. 2016, doi: 10.5755/j01.eie.22.3.15306.

- [20] M. Granada, Marcos J. Rider, J.R.S. Mantovani, y M. Shahidehpour, “A decentralized approach for optimal reactive power dispatch using a Lagrangian decomposition method”, *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 89, pp. 148-156, ago. 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2012.02.015.
- [21] A. Murray, A. Engelmann, V. Hagenmeyer, y T. Faulwasser, “Hierarchical Distributed Mixed-Integer Optimization for Reactive Power Dispatch”, *IFAC-Pap.*, vol. 51, n.o 28, pp. 368-373, ene. 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.11.730.
- [22] B. Venkatesh, M. K. George, y H. B. Gooi, “Fuzzy OPF incorporating UPFC”, *Transm. Distrib. IEE Proc. - Gener.*, vol. 151, n.o 5, pp. 625-629, sep. 2004, doi: 10.1049/ip-gtd:20040611.
- [23] Wei Yan, Shuai Lu, y D. C. Yu, “A novel optimal reactive power dispatch method based on an improved hybrid evolutionary programming technique”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, n.o 2, pp. 913-918, may 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.826716.
- [24] R. P. Singh, V. Mukherjee, y S. P. Ghoshal, “Optimal reactive power dispatch by particle swarm optimization with an aging leader and challengers”, *Appl. Soft Comput.*, vol. 29, pp. 298-309, abr. 2015, doi: 10.1016/j.asoc.2015.01.006.
- [25] U. Can y B. Alatas, "Physics Based Metaheuristic Algorithms for Global Optimization", *Am. J. Inf. Sci. Comput. Eng.*, vol. 1, n.º 3, sep. 2015.
- [26] B. Bhattacharya, K. K. Mandal and N. Chakraborty, "Real and reactive power optimization using hybrid cultural algorithm," *Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC)*, 2014, pp. 441-445, doi: 10.1109/CIEC.2014.6959127.
- [27] K.LENIN, B.RAVINDRANATH REDDY, y M.SURYA KALAVATHI, «An Artificial Immune System Algorithm for Solving Optimal Reactive Power Dispatch Problem», *Conf. Adv. Commun. Control Syst. 2013(CAC2S 2013)*, pp. 51-59, 2013.
- [28] L. Zhang, W. Tang, J. Liang, P. Cong, y. Cai, “Coordinated Day-Ahead Reactive Power Dispatch in Distribution Network Based on Real Power Forecast Errors”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, n.o 3, pp. 2472-2480, may 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2466435.
- [29] N. Yang, C. W. Yu, F. Wen, y C. Y. Chung, “An investigation of reactive power planning based on chance constrained programming”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 29, n.o 9, pp. 650-656, nov. 2007, doi: 10.1016/j.ijepes.2006.09.008.
- [30] J. Zhao, L. Ju, Z. Dai, y G. Chen, “Voltage stability constrained dynamic optimal reactive power flow based on branch-bound and primal–dual interior point method”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 601-607, dic. 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.05.038.
- [31] J. Huang, Z. Li, y Q. H. Wu, “Fully decentralized multiarea reactive power optimization considering practical regulation constraints of devices”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 105, pp. 351-364, feb. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.08.045.

- [32] J. López, J. Contreras, y J. R. S. Mantovani, “Reactive power planning under conditional-value-at-risk assessment using chance-constrained optimisation”, *Transm. Distrib. IET Gener.*, vol. 9, n.o 3, pp. 231-240, 2015, doi: 10.1049/iet-gtd.2014.0224.
- [33] A. M. Theologi, M. Ndreko, J. L. Rueda, M. A. M. M. van der Meijden, y F. González-Longatt, “Optimal management of reactive power sources in far-offshore wind power plants”, en *2017 IEEE Manchester PowerTech*, jun. 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/PTC.2017.7980833.
- [34] D. Gutierrez Rojas, J. Lopez Lezama, y W. Villa, “Metaheuristic Techniques Applied to the Optimal Reactive Power Dispatch: a Review”, *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, n.o 5, pp. 2253-2263, may 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7530421.
- [35] M. Foata, C. Rajotte, y A. Jolicoeur, "On-Load Tap Changer Reliability And Maintenance Strategy", in Proceedings CIGRE Session 2006, France, 2006.
- [36] D. F. Peelo, B. R. Sunga, y P. P. Smeets, "Stresses on Shunt Reactors due to Switching", in Proceedings CIGRE Session 2008, Paris, 2008.
- [37] Working Group B5.37, "Protection, Monitoring and Control of Shunt Reactors", Cigre, Paris, France, Technical Brochures 546, ago. 2013.
- [38] J. F. Reid, "Controlled Switching Issues and the National Grid Company's Experience of Switching Shunt Capacitor Banks and Shunt Reactors", in Proceedings CIGRE Session 1998, Paris, France, 1998.
- [39] T. Malakar, A. Rajan, K. Jeevan, y P. Dhar, “A day ahead price sensitive reactive power dispatch with minimum control”, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 81, pp. 427-443, oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.02.035.
- [40] Mahzouni-Sani, Mahdi; Hamidi, Amir; Nazarpour, Daryoush; Golshannavaz, Sajjad: “Multi-objective linearised optimal reactive power dispatch of wind-integrated transmission networks”, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13, (13), p. 2686-2696, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.6669.
- [41] Y. P. Agalgaonkar, B. C. Pal, y R. A. Jabr, “Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, n.o 1, pp. 182-192, ene. 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2279721.
- [42] A. Rabiee y M. Parniani, “Voltage security constrained multi-period optimal reactive power flow using benders and optimality condition decompositions”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, n.o 2, pp. 696-708, may 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2211085.
- [43] Q. Nguyen, K. -W. Lao, S. Santoso and P. Chirapongsananurak, "A Hierarchical Volt-var Optimization with Discrete Variables in Unbalanced Distribution Systems," *2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESGM40551.2019.8973834.
- [44] Yong-jun Zhang y Zhen Ren, “Optimal reactive power dispatch considering costs of adjusting the

- control devices”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, n.o 3, pp. 1349-1356, ago. 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.851920.
- [45] Ruey-Hsun Liang y Yung-Shuen Wang, “Fuzzy-based reactive power and voltage control in a distribution system”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 18, n.o 2, pp. 610-618, abr. 2003, doi: 10.1109/TPWRD.2003.809740.
- [46] Feng-Chang Lu y Yuan-Yih Hsu, “Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 12, n.o 2, pp. 681-688, may 1997, doi: 10.1109/59.589651.
- [47] Y.-J. Kim, S.-J. Ahn, P.-I. Hwang, G.-C. Pyo, y S.-I. Moon, “Coordinated Control of a DG and Voltage Control Devices Using a Dynamic Programming Algorithm”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, n.o 1, pp. 42-51, feb. 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2188819.
- [48] Yuan-Yih Hsu y Chien-Chuen Yang, “A hybrid artificial neural network-dynamic programming approach for feeder capacitor scheduling”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, n.o 2, pp. 1069-1075, may 1994, doi: 10.1109/59.317624.
- [49] Z. Hu, X. Wang, H. Chen, y G. A. Taylor, “Volt/VAr control in distribution systems using a time-interval based approach”, *Transm. Distrib. IEE Proc. - Gener.*, vol. 150, n.o 5, pp. 548-554, sep. 2003, doi: 10.1049/ip-gtd:20030562.
- [50] Ruey-Hsun Liang y Chen-Kuo Cheng, “Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in a distribution system”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, n.o 4, pp. 625-630, oct. 2001, doi: 10.1109/61.956748.
- [51] M. B. Liu, C. A. Canizares, y W. Huang, “Reactive Power and Voltage Control in Distribution Systems With Limited Switching Operations”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, n.o 2, pp. 889-899, may 2009, doi: 10.1109/TPWRS.2009.2016362.
- [52] H. Ahmadi, J. R. Martí, y H. W. Dommel, “A Framework for Volt-VAR Optimization in Distribution Systems”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, n.o 3, pp. 1473-1483, may 2015, doi: 10.1109/TSG.2014.2374613.
- [53] Youman Deng, Xiaojuan Ren, Changcheng Zhao, y Dapu Zhao, “A heuristic and algorithmic combined approach for reactive power optimization with time-varying load demand in distribution systems”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, n.o 4, pp. 1068-1072, nov. 2002, doi: 10.1109/TPWRS.2002.804973.
- [54] Y.-Y. Hsu y H.-C. Kuo, “Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming”, *Transm. Distrib. IEE Proc. C - Gener.*, vol. 140, n.o 6, pp. 433-438, nov. 1993, doi: 10.1049/ip-c.1993.0063.
- [55] C. F. Ionescu, C. Bulac, F. Capitanescu and L. Wehenkel, "Multi-period power loss optimization with limited number of switching actions for enhanced continuous power supply," *2014 16th*

International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014, pp. 34-38, doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842830.