

Evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable conectada a las redes de distribución para minimizar las emisiones de CO₂ utilizando metodología basada en flujo de potencia óptimo

Evaluation of the maximum capacity of renewable distributed generation connected to distribution networks to minimize CO₂ emissions using methodology based on optimal power flow

Jose Luis Mejia Olivas^{1,a} , Luis Mark Rudy Ponce Martinez^{1,b} 

Resumen— En este artículo se presenta una evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable que puede ser conectada a las redes de distribución modernas (redes activas), que incluyen generación y demanda variable en el tiempo, actuación de dispositivos de control en tiempo real y flujo bidireccional de potencia en las líneas, para minimizar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) derivados de las actividades de generación de energía eléctrica. La metodología de optimización utilizada para la evaluación está basada en la formulación de un problema de flujo de potencia óptimo (FPO) integrando la estrategia de gestión de redes activas (GRA), que contiene esquemas como el control de tensión coordinado, control de factor de potencia adaptativo y reducción de energía y es aplicable en redes de distribución con características de generación y carga variable en el tiempo. Para resolver el problema de optimización, fue utilizado el programa computacional de modelamiento y optimización AIMMS. Los resultados muestran que, niveles muy elevados de conexión de generación distribuida renovable en redes de distribución pueden ser alcanzados para reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Abstract— This article presents an evaluation of the maximum renewable distributed generation capacity that can be connected to modern distribution networks (active networks), which include time-varying generation and demand, real-time control device performance and flow. bidirectional power in the lines, to minimize carbon dioxide (CO₂) emissions derived from electrical energy generation activities. The optimization methodology used for the evaluation is based on the formulation of an optimal power flow problem (FPO) integrating the active network management (GRA) strategy, which contains schemes such as coordinated voltage control, factor control adaptive power and energy reduction and is applicable in distribution networks with time-varying generation and load characteristics. To solve the optimization problem, the AIMMS modeling and optimization computer program was used.

The results show that very high levels of connection of renewable distributed generation in distribution networks can be achieved to reduce carbon dioxide (CO₂) emissions.

Palabras Clave— Generación distribuida; redes de distribución; flujo de potencia óptimo; gestión de redes activas; energía eólica; dióxido de carbono (CO₂).

Key Words— Distributed generation; distribution networks; optimal power flow; active network management; wind energy; carbon dioxide (CO₂).

Presentado: 16/09/2024
Aceptado: 18/11/2024
Publicado: 31/12/2024

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

^a Email: jmejiao@unmsm.edu.pe

^b Email: lponcem@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Mediante Resolución Ministerial N° 278-2023-MINEM/DM, el estado peruano aprueba “La Hoja de Ruta de Redes Eléctricas Inteligentes (Smart Grids) en la Distribución 2023-2030”. En el punto N° 1 trata acerca de los compromisos internacionales y las políticas nacionales. Dentro de este punto menciona seis (06) objetivos de la Política Energética Nacional del Perú al 2040 vinculados a las ventajas de las Redes Eléctricas Inteligentes, las cuales son: el establecimiento de una matriz energética diversificada, priorizando las fuentes renovables y la eficiencia energética; el logro de un suministro de energía competitivo; la maximización de la eficiencia en toda la cadena de producción y el consumo de energía; la consecución de la autosuficiencia en la generación de energía; el avance de un sector energético

caracterizado por impacto ambiental mínimo y la reducción de las emisiones de carbono, todo ello en un contexto de desarrollo sostenible; y la mejora de los marcos institucionales que rigen el sector energético. En consonancia con la Política Ambiental Nacional dirigida a 2030, se aboga por una mayor utilización de las fuentes de energía renovables como alternativas económicamente viables y técnicamente confiables para las operaciones de distribución, lo que reduce la dependencia energética, fomenta el desarrollo local y promueve la gestión ambiental.

En el punto N° 2 trata acerca de la modernización de las redes de distribución eléctricas en el Perú. Dentro de ese punto menciona: “Las redes eléctricas actuales, que corresponden a un sistema energético en operación, deben evolucionar para mejorar su eficiencia, la seguridad para incorporar energías alternativas, y que esta infraestructura permita el uso masivo de autos eléctricos, además de fomentar la competitividad y el uso responsable de energía de parte de los consumidores”.

En el punto N° 3, trata acerca de las redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) en la distribución. Dentro de los objetivos estratégicos menciona lo siguiente: “Existe la necesidad de incorporar la adopción de nuevas tecnologías, tales como los sistemas de medición inteligente, automatización de la distribución, protecciones inteligentes, tecnologías de información y de las telecomunicaciones (TICs), sistemas de información masiva, DMS (Distribution Management System), OMS (Outage Management System), DERMS (Distribution Energy Network Management System), NMS (Network Management Systems), TMS (Transmission Management Systems), GMS (Generation Management Systems), OMS (Outage Management Systems), IEM (Industrial Energy Management), MMS (Microgrid management systems), entre los principales”.

La generación distribuida que utiliza fuentes de energía renovables se denomina generación distribuida renovable (GDR). La inclusión de generación distribuida renovable en las redes de distribución es una de las formas más eficaces de garantizar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [1].

En [2] se propone una técnica basada en la formulación de un problema de flujo de potencia óptimo (FPO) AC multiperiodo para evaluar la máxima capacidad de nueva generación distribuida variable que puede ser conectada a una red de distribución utilizando estrategias de gestión de redes activas (GRA). Los esquemas de GRA incorporados en el FPO incluyen control de tensión coordinado, control de factor de potencia adaptativo y reducción de energía.

En [3] es propuesto un método basado en el análisis de flujo de potencia óptimo multiperiodo. Sistemas de GRA, tales como control de tensión coordinado, control del factor de potencia y reducción de energía son integrados en el método con el fin de investigar sus impactos en la maximización de la utilización de la energía eólica.

En [4] es propuesto un análisis en estado estacionario multiperiodo para maximizar la conexión de generación distribuida intermitente a través de una técnica basada en el

flujo de potencia óptimo adaptado a la gestión de red activa.

En [5] una técnica basada en FPO AC multiperiodo es utilizado para evaluar la capacidad de nueva generación de energía eólica, considerando las estrategias de control, tales como las evaluaciones dinámicas y control de tensión coordinado.

En [6] para explorar como los límites de regulación de tensión por pasos influyen en la cantidad de GD que puede ser conectado a una red de distribución, las restricciones de tensión están incorporados dentro de un método basado en un FPO para determinar la capacidad de la red para acomodar GD.

En [7], el artículo está enfocado en las numerosas estrategias y métodos que fueron desarrollados en los últimos años para tratar la integración y planificación de GD. Este artículo contiene una revisión crítica de los trabajos en este campo.

En [8] un análisis en estado estacionario de series de tiempo es propuesto para evaluar las cuestiones técnicas, tales como las exportaciones de energía, las pérdidas y los niveles de cortocircuito. Se aplica un enfoque de programación multiobjetivo basado en algoritmos genéticos con el fin de encontrar configuraciones que puedan maximizar la integración de generación distribuida eólica al tiempo que satisface los límites térmicos y de tensión.

En [9] se desarrolla una metodología aplicable en redes de distribución con características de generación y carga variable, para minimizar las emisiones al medio ambiente de gases de efecto invernadero derivados de las actividades de generación de energía eléctrica. La metodología de optimización desarrollada fue basada en la formulación de un problema de flujo de potencia óptimo (FPO) integrando la estrategia de gestión de redes activas (GRA), que contiene esquemas como el control de tensión coordinado, control de factor de potencia adaptativo y reducción de energía.

Las redes de distribución siempre fueron consideradas redes pasivas, con la única función de recibir energía eléctrica del sistema de transmisión y distribuir esa energía a los usuarios finales de manera eficiente y confiable.

Este trabajo tiene como objetivo la evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable que puede ser conectada a las redes de distribución modernas (redes activas), que incluyen generación y demanda variable en el tiempo, actuación de dispositivos de control en tiempo real y flujo bidireccional de potencia en las líneas, para minimizar las emisiones al medio ambiente de dióxido de carbono (CO₂) derivados de las actividades de generación de energía eléctrica.

II. METODOLOGÍA

En este artículo se utilizará la metodología de optimización basada en la formulación de un problema de flujo de potencia óptimo (FPO) integrando la estrategia de gestión de redes activas (GRA), que contiene esquemas como el control de tensión coordinado, control de factor de potencia adaptativo y reducción de energía [9]. La metodología utilizada considera los siguientes pasos:

A. Análisis de datos

Para disminuir el número de periodos a ser analizados, conservando el comportamiento y las interrelaciones entre generación y demanda, serán utilizadas técnicas de agregación de acuerdo con las características de periodos similares [9].

1. Generación variable en el tiempo

La Figura 1 muestra un ejemplo de datos de velocidad del viento durante todo el año. Luego, cada dato de velocidad del viento se convierte en energía disponible en la salida de los GDR utilizando datos de la curva de potencia del generador eólico elegido. La figura 2 muestra un ejemplo de salida de potencia activa de la GDR durante todo el año para cada dato de velocidad del viento[2], [4], [5], [8]-[12].

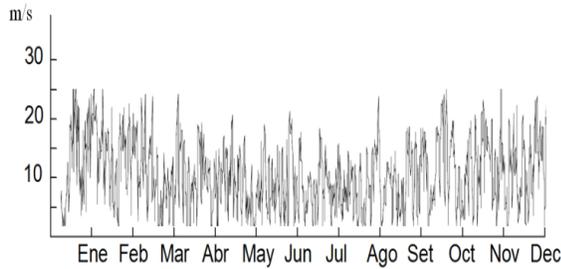


Fig. 1. Velocidad del viento a lo largo del año.

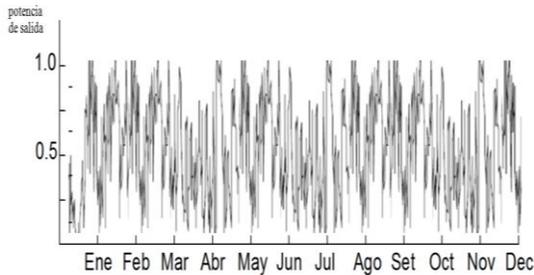


Fig. 2. Potencia disponible en la salida del GDR.

2. Demanda variable en el tiempo

La Figura 3 muestra un ejemplo de la demanda variable a lo largo del año[2], [4], [5], [8]-[13].

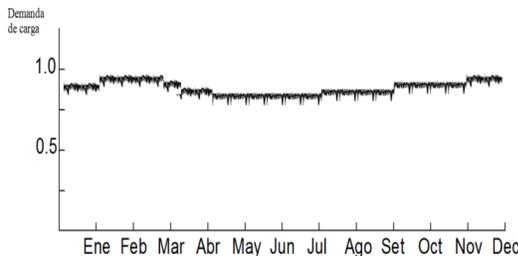


Fig. 3. Demanda a lo largo del año de la red de distribución.

3. Reducción de datos de generación y demanda

La Figura 4 muestra un ejemplo del conjunto de periodos a ser analizados [2], [5], [9], [10], [12].

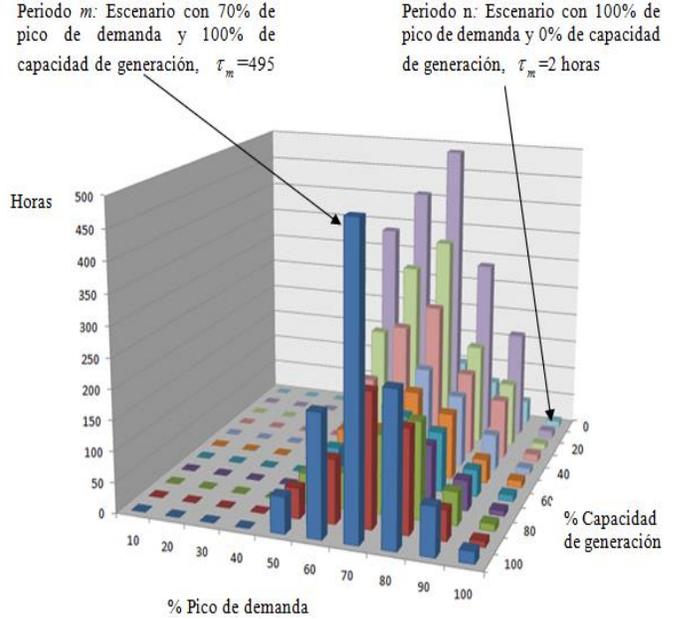


Fig. 4. Horas coincidentes para cada escenario de carga y generación [9].

B. Esquemas de Gestión de Redes Activas

Los esquemas de GRA utilizadas en este trabajo son el control de tensión coordinada, el control de factor de potencia adaptativo y reducción de energía producida[2], [5], [9], [14], [15]. Estos esquemas de GRA se incluirán en la FPO como restricciones operacionales.

C. Flujo de Potencia Óptimo AC Multiperíodo

El FPO puede ser representado matemáticamente a través de un problema general de optimización con restricciones de igualdad, desigualdad y límites de variables [2]-[5], [7], [9], [10], [14], [16].

1. Función objetivo

La formulación básica del FPO tiene la siguiente función objetivo [9], [17]:

$$\text{Min}(CO_{2emisiones}), \quad \forall m \in M \quad (1)$$

Donde:

$$CO_{2emisiones} = (P_{x,m})(t_m)(K_{CO_2-red}), \quad \forall x \in X, \forall m \in M \quad (2)$$

$$P_{x,m} = P_{d,m} - \sum_{g \in G} P_g \quad (3)$$

Donde:

$CO_{2emisiones}$, son las emisiones al medio ambiente de dióxido de carbono (CO₂) de la red de distribución oriundas de la energía importada.

Evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable conectada a las redes de distribución para minimizar las emisiones de CO₂ utilizando metodología basada en flujo de potencia óptimo

M es el conjunto de periodos y m es la identificación de cada periodo.

X es el conjunto de conexiones externas a la red y x es la identificación de cada fuente externa.

$p_{x,m}$ es la potencia activa adquirida de la red de transmisión y t_m es la cantidad de horas de cada periodo.

K_{CO_2-red} es el factor de emisiones de dióxido de carbono de la potencia adquirida de la red de transmisión en ton CO₂/MWh.

$p_{d,m}$ es la demanda total en el periodo m .

p_g es la potencia activa generada por cada GDR (capacidad) en cada periodo.

G es el conjunto de generadores y g es la identificación de cada GDR [9].

2. Restricciones de igualdad

a) Restricciones de balance de potencia nodal activa y reactiva

La Ley de corrientes de Kirchhoff describe el equilibrio de potencia nodal activa y reactiva[2], [5], [6], [9].

$$\sum_{l \in L/b_l^2=b} p_{b,m}^{L,T} + d_b^P \eta_m = \sum_{g \in G_b/b_g=b} p_g + \sum_{x \in X/b_x=b} p_{x,m}, \quad \forall b \in B, \forall m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{l \in L/b_l^2=b} q_{b,m}^{L,T} + d_b^Q \eta_m = \sum_{g \in G_b/b_g=b} p_g \tan(\phi_{g,m}) + \sum_{x \in X/b_x=b} q_{x,m}, \quad \forall b \in B, \forall m \in M \quad (5)$$

$$\sum_{g \in G_b/b_g=b} p_g = \sum_{g \in G_b/b_g=b} p_g^N \omega_m - \sum_{g \in G_b} p_{g,m}^{curt} \quad (6)$$

$$\sum_{g \in G_b/b_g=b} p_g \tan(\phi_{g,m}) = \sum_{g \in G_b/b_g=b} p_g^N \omega_m \tan(\phi_{g,m}) - \sum_{g \in G_b} p_{g,m}^{curt} \tan(\phi_{g,m}) \quad (7)$$

Donde:

B es el conjunto de barras y b es la identificación de la barra. L es el conjunto de líneas y l es la identificación de la línea. Los términos $p_{b,m}^{L,T}$ y $q_{b,m}^{L,T}$ son la suma de todas las inyecciones de potencia activa y reactiva en las líneas y transformadores en b .

d_b^P y d_b^Q son las demandas activas o reactivas de pico en la barra b .

η_m es el nivel de demanda en relación al pico.

$q_{x,m}$ es la potencia reactiva adquirida de la red de transmisión.

$\phi_{g,m}$ es el ángulo del factor de potencia de la turbina eólica en el periodo m .

p_g^N es la capacidad nominal de cada GDR.

ω_m es el nivel de producción relativa a la capacidad nominal del GDR como dictado por la variable de recurso renovable durante ese periodo.

$p_{g,m}^{curt}$ es la generación negativa variable en el mismo local de cada unidad de GDR.

b_g es el índice de la barra que tiene generadores y G_b es el conjunto de generadores en la barra b [9].

3. Restricciones de desigualdad:

a) Restricciones de límite de flujo

Restricciones sobre el flujo de potencia en cada extremidad de las líneas y transformadores[2], [3], [5], [6], [9].

$$\left(p_{(1,2),m}^l\right)^2 + \left(q_{(1,2),m}^l\right)^2 \leq \left(s_l^+\right)^2, \quad \forall l \in L, \forall m \in M \quad (8)$$

$$\left(p_{(1,2),m}^t\right)^2 + \left(q_{(1,2),m}^t\right)^2 \leq \left(s_t^+\right)^2, \quad \forall t \in T, \forall m \in M \quad (9)$$

Donde:

$p_{(1,2),m}^l$ y $q_{(1,2),m}^l$ son las inyecciones de potencia activa y reactiva en cada extremidad del ramo (denotado 1 y 2).

S_l^+ es el límite de flujo de potencia aparente en el ramo.

$p_{(1,2),m}^t$ y $q_{(1,2),m}^t$ son las inyecciones de potencia activa y reactiva en cada extremidad del transformador (denotado 1 y 2).

S_t^+ es límite del flujo de potencia aparente en el transformador de potencia OLTC [9].

4. Límites de las variables:

a) Control de tensión coordinado

La tensión en el secundario del transformador OLTC debe mantener su valor dentro del intervalo reglamentario[2]-[5], [9], [11], [14]-[18].

$$V_{b_{OLTC}}^- \leq V_{b_{OLTC},m} \leq V_{b_{OLTC}}^+, \quad \forall m \in M \quad (10)$$

Donde:

$V_{b_{OLTC},m}$ es la tensión del secundario del transformador OLTC en el periodo m .

$V_{b_{OLTC}}^-$, $V_{b_{OLTC}}^+$ son los límites de la tensión [9].

b) Control de factor de potencia adaptativo

El ángulo del factor de potencia de cada generador es considerado como una variable que debe operar dentro de un determinado intervalo de factores de potencia[1], [3], [5], [9], [11], [15], [18].

$$\theta_g^- \leq \theta_{g,m} \leq \theta_g^+, \quad \forall g \in G, \forall m \in M \quad (11)$$

Donde:

θ_g^-, θ_g^+ son los límites del ángulo de factor de potencia de la turbina eólica [9].

c) Reducción de energía

La reducción de energía es formulada adicionando una generación negativa variable en el mismo local de cada unidad de GDR, afectando solamente las restricciones relacionadas con el equilibrio de potencia nodal activa y reactiva[2]-[6], [9] [11], [14]-[16].

Evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable conectada a las redes de distribución para minimizar las emisiones de CO₂ utilizando metodología basada en flujo de potencia óptimo

$$0 \leq p_{g,m}^{curt} \leq \omega_m p_g^N, \quad \forall g \in G, \forall m \in M \quad (12)$$

d) *Límite del nivel de tensión de la barra*

Tensiones en las barras son limitadas por niveles máximos y mínimos[2], [3], [5], [6], [9].

$$V_b^- \leq V_{b,m} \leq V_b^+, \quad \forall b \in B, \forall m \in M \quad (13)$$

Donde:

$V_{b,m}$ es la tensión en las barras. V_b^- , V_b^+ son los límites de la tensión de las barras [9].

e) *Límite de capacidad de GDR*

Cada generador eólico tiene límites de capacidad de generación[3], [6], [9].

$$0 \leq p_{g,m} \leq p_g^N, \quad \forall g \in G, \forall m \in M \quad (14)$$

f) *Límite del punto de alimentación de red*

El GSP es tomado como barra de referencia (slack) con el ángulo de tensión fijado en cero. Las restricciones para el GSP son[2], [3], [5], [9]:

$$0 \leq p_{x,m} \leq p_x^+, \quad \forall x \in X, \forall m \in M \quad (15)$$

$$0 \leq q_{x,m} \leq q_x^+, \quad \forall x \in X, \forall m \in M \quad (16)$$

Donde:

p_x^+ es el límite de potencia activa de la fuente externa.

q_x^+ es el límite de potencia reactiva de la fuente externa.

La exportación para la red de transmisión de potencia de la GDR acarrea pagos adicionales por el uso del sistema de transmisión de energía eléctrica y por eso fue evitado [9].

D. Implementación

El conjunto de ecuaciones de FPO integrando los esquemas de GRA es resuelto a través de un modelo de optimización utilizando el programa computacional de modelamiento y optimización de redes AIMMS.

III. ESTUDIO DE CASO

En esta sección, utilizando la metodología basada en la formulación del problema de FPO AC multiperiodo, integrando la estrategia de GRA es realizada la aplicación del método a una red de distribución.

A. Sistema de 34 Barras

La red de distribución de 34 barras mostrada en la figura 5 posee 01 transformador de potencia OLTC con tensión de 132/11kV, 01 barra de subestación, 33 barras de carga, 33 líneas de distribución y 4 alimentadores laterales. La red de distribución es alimentada a partir del sistema de transmisión

de 132 kV, a través de un transformador de potencia sobre carga OLTC. La máxima demanda de esta red es de 4.6MW y sus datos pueden ser obtenidos en[19]-[21].

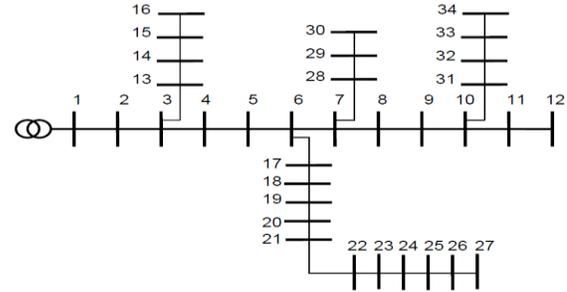


Fig. 5. Red de distribución de 34 barras[19]-[21].

La figura 6 muestra el perfil de tensión de la red de distribución de 34 barras con mínima demanda. La figura 7 muestra el perfil de tensión de la red de distribución con máxima demanda. En los dos casos, los valores de las tensiones en las barras 12, 27 y 34 son bajos.

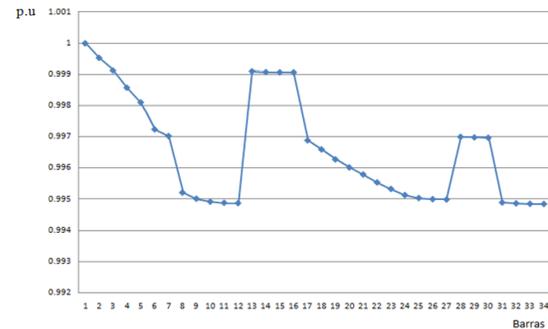


Fig. 6. Perfil de tensión en mínima carga de la red de 34 barras.

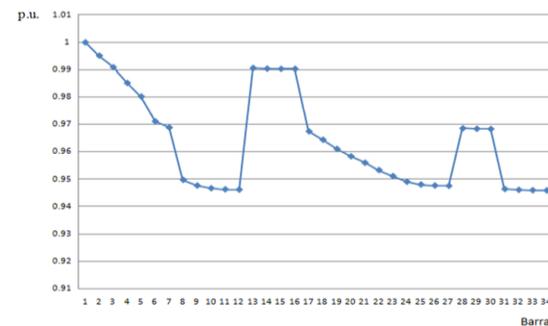


Fig. 7. Perfil de tensión en máxima carga de la red de 34 barras.

B. Reducción de datos de series temporales

1. Generación variable en el tiempo

Los datos son mediciones reales de velocidad de viento (8760) de la estación Natal - RN (OMM: 82598) de la ciudad de Natal, Rio Grande del Norte, Brasil [22]. Primeramente, es realizada la distribución de frecuencia de los datos de velocidad del viento durante todo el año, como muestra la

Evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable conectada a las redes de distribución para minimizar las emisiones de CO₂ utilizando metodología basada en flujo de potencia óptimo

figura 8. En esta figura es presentada la cantidad de horas que tiene un determinado valor de velocidad del viento durante todo el año.

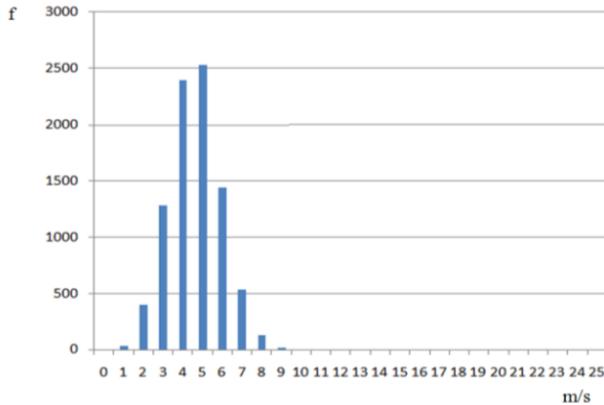


Fig. 8. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento durante todo el año.

Luego, utilizando la curva de distribución de frecuencia de velocidad del viento, es obtenida la curva de potencia del generador eólico de 500 kW [9], [22], [23] como muestra la figura 9.

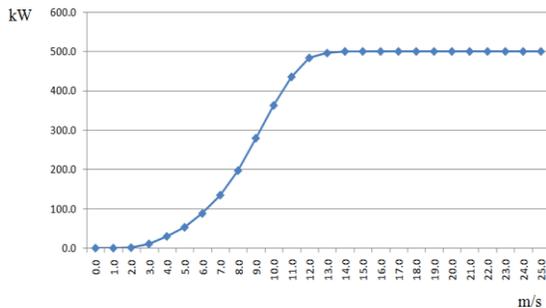


Fig. 9. Curva de potencia del generador eólico de 500 kW[22], [23].

En cada una de las barras 12, 27 y 34 de la red de distribución estudiada son conectadas tres (03) turbinas eólicas de 500 kW de potencia nominal cada una. Luego, la potencia instalada total es de 4.5 MW.

Utilizando los valores de los datos de velocidad del viento a lo largo del año y los valores de la curva de potencia del generador eólico seleccionado, es obtenida la potencia generada para cada valor de velocidad del viento durante todo el año.

2. Demanda variable en el tiempo

El modelamiento del comportamiento de la demanda de la red de distribución a lo largo del año es realizada considerando las curvas de carga diarias estacionales de la literatura[9], [13] como muestra la figura 10. La demanda en cada barra de la red es asumida a seguir la curva de carga que representa posibles comportamientos de consumidores típicos residenciales [9].

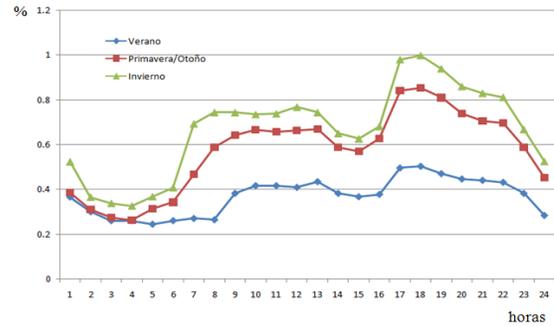


Fig. 10. Curvas diarias de carga[13].

3. Reducción de datos de generación y demanda

Para disminuir el número de datos a ser analizados, es utilizada la potencia generada por el viento a lo largo del año y la curva de demanda de la red de distribución a lo largo del año. Luego, es realizada el interrelacionamiento entre generación y demanda. Esto es alcanzado relacionando cada combinación de generación y demanda con su tiempo de duración. Así, para cada hora, demanda y generación potencial son atribuidos a una serie de periodos. La demanda tiene 10 intervalos y la generación tiene 11 intervalos. La Figura 11 y la Figura 12 muestran los 44 periodos o escenarios no nulos y la cantidad de horas coincidentes de cada una de ellas.

0	0	195	410	203	150	411	288	42	17	0
0	0	797	1004	758	545	861	466	393	100	10
0	0	90	172	230	219	296	126	232	77	20
0	0	4	48	69	71	137	34	115	59	30
0	0	0	6	7	19	35	4	35	21	40
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
0	0	0	0	1	2	1	0	8	2	60
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	70
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	% Capacidad de generación
										% Pico de demanda

Fig. 11. Horas coincidentes de carga y generación en cada periodo.

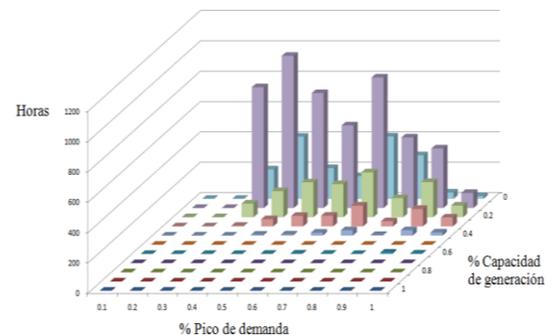


Fig. 12. Horas coincidentes de demanda y generación en cada periodo.

IV. RESULTADOS

A. Máxima conexión de potencia activa de GDR

Utilizando la metodología de optimización descrita

Evaluación de la capacidad máxima de generación distribuida renovable conectada a las redes de distribución para minimizar las emisiones de CO₂ utilizando metodología basada en flujo de potencia óptimo

generación y demanda variable en el tiempo, actuación de dispositivos de control en tiempo real y flujo bidireccional de potencia en las líneas, permite la conexión de mayor capacidad de GDR para minimizar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂).

Investigaciones futuras deben evaluar la capacidad máxima de generación distribuida renovable que puede ser conectada a las redes de distribución del Perú para minimizar las emisiones al medio ambiente de dióxido de carbono (CO₂) derivados de las actividades de generación de energía eléctrica del sistema eléctrico peruano en concordancia con “La Hoja de Ruta de Redes Eléctricas Inteligentes (Smart Grids) en la Distribución 2023-2030”.

REFERENCIAS

- [1] Resolución Ministerial N° 278-2023-MINEM/DM, “La Hoja de Ruta de Redes Eléctricas Inteligentes (Smart Grids) en la Distribución 2023-2030”.
- [2] L. F. Ochoa, C. J. Dent, and G. P. Harrison, "Distribution network capacity assessment: Variable DG and active networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 87-95, 2010.
- [3] P. Siano, P. Chen, Z. Chen, and A. Piccolo, "Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, pp. 598-608, 2010.
- [4] L. F. Ochoa, C. J. Dent, and G. P. Harrison, "Maximisation of intermittent distributed generation in active networks", *CIREED Seminar 2008: SmartGrids for Distribution*, Frankfurt, p.1-4, 23-24 June 2008.
- [5] L. F. Ochoa, L. C. Cradden, and G. P. Harrison, "Demonstrating the capacity benefits of dynamic ratings in smarter distribution networks", in *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, pp. 1-6, 2010.
- [6] C. J. Dent, L. F. Ochoa, and G. P. Harrison, "Network distributed generation capacity analysis using OPF with voltage step constraints", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 296-304, 2010.
- [7] A. Keane, L. F. Ochoa, C. L. Borges, G. W. Ault, A. D. Alarcon-Rodriguez, R. Currie, "State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 1493-1502, 2013.
- [8] L. F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin, and G. P. Harrison, "Time-series-based maximization of distributed wind power generation integration", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, pp. 968-974, 2008.
- [9] J. L. Mejia, H. De Faria, T. Sousa, and E. A. Belati, "Optimal Capacity Planning of Renewable Distributed Generation in Active Distribution Networks to Reduce Greenhouse Gas Emissions", *Przełąd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 4/2017.
- [10] T. Boehme, A. R. Wallace, and G. P. Harrison, "Applying time series to power flow analysis in networks with high wind penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 951-957, 2007.
- [11] T. Sansawatt, L. F. Ochoa, and G. P. Harrison, "Integrating distributed generation using decentralised voltage regulation", in *Power and Energy Society General Meeting*, 2010 IEEE, pp. 1-6, 2010.
- [12] T. H. Boehme, J. Taylor, R. Wallace, J. Bialek, "Matching renewable electricity generation with demand in Scotland", University of Edinburgh, 1.ed. Scottish Executive, 77p, 2006.
- [13] L. F. O. Pizzali, "Desempenho de redes de distribuição com geradores distribuídos", 172 f. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica)– Universidade Estadual Paulista, 2006.
- [14] G. Strbac, N. Jenkins, M. Hird, P. Djapic, and G. Nicholson, "Integration of operation of embedded generation and distribution networks", *DTI Pub URN*, vol. 2, p. 1145, 2002.
- [15] P. Djapic, C. Ramsay, D. Pudjianto, G. Strbac, J. Mutale, N. Jenkins, "Taking an active approach", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, pp. 68-77, 2007.
- [16] S. Liew and G. Strbac, "Maximising penetration of wind generation in existing distribution networks", in *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, pp. 256-262, 2002.
- [17] M. F. Shaaban and E. El-Saadany, "Accommodating High Penetrations of PEVs and Renewable DG Considering Uncertainties in Distribution Systems", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, No. 1, pp.259-270, 2014.
- [18] T. Ackermann, *Wind power in power systems*. 1. ed. Jhon Wiley and Sons, 691 p. 2005.
- [19] M. Chis, M. Salama, and S. Jayaram, "Capacitor placement in distribution systems using heuristic search strategies", *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, vol. 144, No. 3, pp. 225-230, 1997.
- [20] M. R. Carvalho, "Estudo Comparativo de Fluxo de Potência para Sistemas de Distribuição Radial", 104 f, *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)–Universidade de São Carlos*, 2006.
- [21] P. A. F. Brandini, "Metaheurística particle swarm utilizada para alocação ótima de bancos de capacitores em sistemas de distribuição radial", 128 f, *Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)– Universidade Estadual Paulista*, 2007.
- [22] A. Nikolic, B. Kostic, M. Markovic, S. Minic, and S. Milosavljevic, "Power quality analysis of wind generator connected to the weak grid during low wind speed", in *Proceedings of the 15th WSEAS international conference on Systems*, pp. 333-338, 2011.
- [23] L. F. Ochoa, A. Padilha-Feltrin, and G. P. Harrison, "Evaluating distributed time-varying generation through a multiobjective index", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 1132-1138, 2008.

Conflicto de intereses / Competing interests:

Los autores no incurren en conflictos de intereses.

Rol de los autores / Authors Roles:

Jose Luis Mejia Olivas: Conceptualización, investigación, escritura y preparación del borrador original.

Luis Mark Rudy Ponce Martinez: Programación, pruebas, resultados, redacción, revisión y edición.

Fuentes de financiamiento / Funding:

Esta investigación se realizó con el financiamiento de los autores.

Aspectos éticos / legales; Ethics / legals:

Los autores declaran no haber violado u omitido normas éticas o legales al realizar la investigación.