

Recibido 13 Septiembre 2019. Aceptado 29 Noviembre 2019. Publicado 20 Diciembre 2019.

ISSN 2448-7775

Flujos de Potencia Óptimos multi-objetivo: Análisis de la operación de sistemas de potencia considerando las emisiones de CO₂

DAVID CORONA MARTÍNEZ, HECTOR ELIZARRARAZ MENDIOLA, JOSUÉ ADRIÁN MARQUEZ ZAFRA, JOSÉ MIGUEL GARCÍA GUZMÁN*

Instituto Tecnológico Superior de Irapuato
dcoronamartinez@gmail.com
hectorelizarrarazmendiola@gmail.com
ajmzafra@gmail.com
migarcia@itesi.edu.mx (*Autor de correspondencia)

RESUMEN En este trabajo se utiliza una formulación de flujos de potencia óptimos (FPO) multi-objetivo para llevar a cabo el análisis de la operación de sistemas eléctricos de potencia (SEP) considerando las emisiones de dióxido de carbono (CO₂). El FPO se modela como un problema de optimización no lineal multi-objetivo porque optimiza dos funciones: el costo de generación de potencia activa y las emisiones de CO₂. Diversos casos de estudio son llevados a cabo utilizando el sistema de potencia de 11 nodos y el de Nueva Inglaterra. Los resultados de estos casos de estudio muestran que al considerarse las emisiones de dióxido de carbono en la formulación de FPO se podría perjudicar la rentabilidad económica del SEP, ya que se presenta una disminución en el perfil de tensión nodal y un aumento en el costo de generación de potencia activa debido al incremento de las pérdidas de potencia.

PALABRAS CLAVE— FPO multi-objetivo, sistemas eléctricos de potencia, emisiones de CO₂.

I. INTRODUCCIÓN

Las compañías suministradoras de energía eléctrica están en una búsqueda constante de aumentar su rentabilidad económica para competir de manera exitosa en el mercado de energía eléctrica, por lo que, su intención es generar la mayor cantidad de potencia al menor costo. El punto óptimo de operación de estado estacionario de las centrales termoeléctricas, tomando en consideración a los distintos elementos que conforman la red eléctrica, se determina mediante el análisis de Flujos de Potencia Óptimos o FPO. Este análisis permite optimizar una función objetivo, la cual puede considerar aspectos económicos, de seguridad o ambientales, sujeta a restricciones de igualdad y desigualdad que representan las leyes físicas que gobiernan la generación de potencia, la capacidad de transmisión de las líneas, los valores nominales de operación de los equipos eléctricos, etc. [1]. En general, estas restricciones modelan la operación propia del sistema de potencia y lo restringen a límites físicos que garantizan una correcta operación de éste. En el estudio de FPO clásico los elementos del sistema que se modelan son las líneas de transmisión, los generadores, los transformadores, los elementos de compensación en paralelo

y las cargas, estas últimas se manejan como valores constantes de consumo en los nodos del sistema [1-2].

Por otro lado, los altos niveles de contaminación y las grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y de dióxido de carbono que se han presentado en los últimos años, han dado lugar a regulaciones ambientales cada vez más estrictas alrededor del mundo con el fin de controlar y disminuir las emisiones de GEI que provocan el calentamiento global del planeta [3-5]. Las fuentes de este tipo de contaminación son variadas, pero algunos reportes indican que, en los países desarrollados, la industria eléctrica contribuye en gran manera a la generación de contaminación del aire por emisiones de GEI, por ejemplo, de acuerdo a [6] en Estados Unidos la industria eléctrica es responsable de alrededor del 38% de las emisiones de CO₂ y de una tercera parte de las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que la convierte en la principal fuente de contaminación del país a causa de dichas emisiones.

Por lo antes mencionado, en diferentes países se han realizado esfuerzos para disminuir la contaminación ocasionada por la industria eléctrica, principalmente por las centrales termoeléctricas, dando lugar a legislaciones en materia ambiental cada vez más estrictas, donde se penaliza

económicamente a las compañías suministradoras de energía eléctrica si violan ciertos límites permitidos de emisión de gases contaminantes. Estas penalizaciones afectan directamente a la rentabilidad económica del sistema de potencia y por ende la utilidad neta de las compañías suministradoras. Por esta razón, y debido a que las emisiones de gases contaminantes tienen un gran impacto negativo en el ambiente, la reducción de los tales gases se ha convertido en un tema de gran interés para las compañías suministradoras y para los investigadores alrededor del mundo.

Tanto las compañías suministradoras como los investigadores han propuesto e implementado diferentes métodos para reducir las emisiones de las centrales termoeléctricas, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes: cambiar a combustibles fósiles con menor potencial de emisiones, instalar un sistema de limpieza post-combustión, modificar la forma en que se quema el combustible o despachar de manera adecuada las unidades de generación con el objetivo de minimizar las emisiones de gases contaminantes [7-8]. Los primeros métodos hacen necesaria la adecuación o construcción de nuevas instalaciones en las centrales de generación eléctrica, por lo que, la implementación de estos métodos resulta muy costosa y poco factible. En este sentido, el último método resulta ser el más adecuado para lograr la reducción de emisiones porque es mucho más sencillo de implementar y requiere un mínimo costo adicional [9]. Es de destacar que la reducción de las emisiones se trabaja como un problema de optimización no lineal restringido, el cual normalmente va de la mano con la minimización del costo de generación, dando lugar a lo que se conoce como despacho óptimo multi-objetivo o despacho económico y ambiental, esto cuando no se considera la topología del SEP. Algunos estudios sobre esta temática se han presentado en diversas publicaciones, tales como [7-11], donde las emisiones se integran en el análisis del sistema, ya sea en la función objetivo o en las restricciones. Cuando se considera la topología del sistema de potencia el despacho de las unidades de generación se realiza mediante el análisis de flujos de potencia óptimos, y si se incluyen las emisiones de gases contaminantes se considera un FPO multi-objetivo o un FPO económico y ambiental. Los principales gases contaminantes provenientes de las centrales termoeléctricas son el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono CO₂, dióxido de azufre (SO₂) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) [9]. Sin embargo, en este trabajo se consideran únicamente las emisiones de CO₂, por ser el principal impulsor del calentamiento global [12], además de ser el gas contaminante que se emite en mayor cantidad en las centrales de generación termoeléctrica [13], siendo, por lo tanto, el gas con mayores probabilidades de violar los niveles permitidos de emisiones causando penalizaciones económicas a las compañías suministradoras.

En México las regulaciones ambientales para la industria eléctrica no están definidas ni clarificadas por completo, pero en el marco de la Reforma Energética impulsada y aprobada en el sexenio anterior y

bajo la nueva normatividad del Código de Red para la industria eléctrica se está intentando establecer y madurar una adecuada legislación que controle las emisiones de gases contaminantes en la industria eléctrica nacional.

En el contexto descrito anteriormente y teniendo en consideración la enorme área de oportunidad que representa en nuestro país la operación del sistema eléctrico nacional desde una perspectiva ambiental y económica, en este trabajo se presenta un análisis de la operación de sistemas eléctricos de potencia cuando se consideran las emisiones de CO₂ mediante el empleo de una formulación de Flujos de Potencia Óptimos multi-objetivo.

La estructura del artículo es como sigue: en la Sección II se desarrolla la formulación general del problema de FPO. El modelo matemático en el cual se integra la función de emisiones de dióxido de carbono en el problema de FPO, que da lugar a un problema de optimización multi-objetivo, se formula en la Sección III, mientras que en la Sección IV y V se presentan, en forma respectiva, los resultados de los casos de estudio y las conclusiones obtenidas del presente trabajo.

II. FORMULACIÓN GENERAL DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA ÓPTIMOS

La formulación general del problema de flujos de potencia óptimos se modela como un problema de optimización no lineal restringido, el cual consiste en minimizar una función objetivo sujeta a restricciones de igualdad y desigualdad. Matemáticamente, la formulación general de FPO se expresa como sigue,

$$\min f(x) \quad (1)$$

$$\text{sujeto a } h_i(x) = 0 \quad (2)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad (3)$$

$$x^{\min} \leq x \leq x^{\max} \quad (4)$$

donde x es el vector de variables de estado del sistema de potencia; estas variables normalmente son la magnitud y ángulo de tensión nodal y la potencia activa generada por las máquinas síncronas, cuyos límites son modelados mediante la restricción de desigualdad denotada por la Ec. (4). $f(x)$ es la función objetivo a minimizar, la cual puede considerarse, como se mencionó, aspectos económicos, ambientales o de seguridad del sistema de potencia [1]. Los términos $h_i(x)$ y $g_j(x)$ corresponden, respectivamente, a los conjuntos de restricciones de igualdad y desigualdad a funciones. Las restricciones de igualdad permiten modelar el balance de potencia activa y reactiva en cada subestación, mientras que las restricciones de desigualdad modelan los límites físicos y operacionales de los elementos que integran el sistema de potencia. Se debe mencionar que en esta formulación la función objetivo y las restricciones son del tipo no lineal. Un modelado más detallado de estas restricciones se presenta en la siguiente sección.

III. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA ÓPTIMOS MULTI-OBJETIVO

El problema del FPO multi-objetivo consiste en minimizar de manera simultánea dos o más funciones objetivo, mientras se satisfacen las restricciones de igualdad y desigualdad que gobiernan la operación del sistema. En este trabajo se consideran dos funciones: la función de costo de generación de potencia activa y la función de emisiones de CO₂, las cuales consideran aspectos económicos y ambientales, respectivamente. Aquí, el problema de optimización multi-objetivo se resuelve empleando el método de los coeficientes de ponderación, por lo que, un factor de penalización es utilizado para combinar la función de costo de generación y la de emisiones en una función multi-objetivo global, esto con el fin de minimizar simultáneamente ambas funciones durante el proceso de optimización. Las funciones objetivo individuales, tanto de costo como de emisiones, y el modelado matemático del problema de FPO multi-objetivo se describen a continuación.

A. FUNCIÓN DE COSTO DE GENERACIÓN

El costo total de generación de potencia activa, $F_C(P_{G,i})$, en las plantas termoeléctricas se puede expresar mediante una función cuadrática no lineal. Esta función se formula como se muestra en (5),

$$F_C(P_{G,i}) = \sum_{i=1}^{N_g} a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 \quad (5)$$

donde N_g es el número total de generadores incluyendo al nodo de referencia. Los términos a_i , b_i y c_i son los coeficientes de las curvas de costo de los generadores y $P_{G,i}$ corresponde a la potencia generada por cada generador conectado en el nodo i .

B. FUNCIÓN DE EMISIONES DE CO₂

La cantidad total de emisiones de CO₂, $F_E(P_{G,i})$, derivadas de la combustión de combustibles en las centrales de generación se puede expresar, de manera similar a la función de costo, mediante una función cuadrática no lineal como sigue [7-11],

$$F_E(P_{G,i}) = \sum_{i=1}^{N_g} d_i + e_i P_{G,i} + f_i P_{G,i}^2 \quad (6)$$

En la ecuación anterior, los términos d_i , e_i y f_i son los coeficientes de la curva de emisiones de cada generador i . Es importante mencionar que en este trabajo se omite el efecto de los puntos válvula de las unidades de generación.

C. MODELO MATEMÁTICO DEL PROBLEMA DE FPO MULTI-OBJETIVO

La función objetivo global del problema de FPO considerado en este trabajo se formula mediante la combinación de la función de costo y de emisiones dadas por las Ec. (5) y (6), respectivamente, tal como se muestra [7-11],

$$F_T(P_{G,i}) = w_C \cdot F_C(P_{G,i}) + w_E \cdot h \cdot F_E(P_{G,i}) \quad (7)$$

En esta función w_C y w_E representan los coeficientes de ponderación para las funciones de costo y de emisiones. Estas ponderaciones pueden tomar valores entre 0 y 1, siempre y cuando la suma de ambos resulte igual a la unidad. El término h es el coeficiente que permite combinar las dos funciones objetivo individuales. El cálculo de h hace necesario obtener el vector de factores individuales h_i de cada generador en su máxima potencia, lo cual se lleva a cabo mediante la relación entre las funciones de costo y de emisiones evaluadas en la máxima potencia de salida de cada generador i , tal como sigue [9],

$$h_i = \frac{F_{C_i}(P_{G_i}^{max})/P_{G_i}^{max}}{F_{E_i}(P_{G_i}^{max})/P_{G_i}^{max}} \quad (8)$$

Una vez que se calcula el vector de los coeficientes individuales h_i para cada generador, estos se ordenan en forma ascendente, comenzando con el coeficiente h_i más pequeño hasta que la sumatoria de la potencia generada considerada hasta este punto sea mayor o igual a la potencia demandada. El último h_i que se obtiene cuando se cumple la condición anterior corresponde al coeficiente h de la función objetivo global dada por la Ec. (7) [9].

Las restricciones de igualdad y desigualdad del problema de FPO multi-objetivo son las mismas que cuando se considera una sola función, ya que en este trabajo las emisiones de CO₂ se integran en la función objetivo y no en las restricciones del modelo de FPO. De este modo, las restricciones de igualdad que modelan el balance potencia activa y reactiva nodal son dadas por las Ec. (9) y (10), respectivamente, como sigue [14-15],

$$P_{G,k} - P_{D,k} - \sum_{m=1}^{N_b} P_{iny,k} = 0 \quad (9)$$

$$Q_{G,k} - Q_{D,k} - \sum_{m=1}^{N_b} Q_{iny,k} = 0 \quad (10)$$

En las ecuaciones anteriores N_b es el número de buses del sistema; los términos $P_{G,k}$ y $P_{D,k}$ son la potencia activa generada y demandada en el nodo k ($k=1, 2, \dots, N_b$), respectivamente, mientras que el tercer término representa la potencia activa inyectada en el nodo k a través de los elementos de transmisión conectados entre este nodo y el nodo m ($m=1, 2, \dots, N_b$). En el caso de la Ec. (10) solo cambia la variable P por la Q por tratarse de la potencia reactiva.

Tal como se mencionó en la Sección II, las restricciones de desigualdad modelan los límites físicos y operativos del sistema eléctrico de potencia. Estas restricciones son las siguientes,

$$\delta_k^{min} < \delta_k < \delta_k^{max} \quad k = 1, 2, \dots, N_b \quad (11)$$

$$V_k^{min} < V_k < V_k^{max} \quad k = 1, 2, \dots, N_b \quad (12)$$

$$P_{G,i}^{min} < P_{G,i} < P_{G,i}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (13)$$

$$Q_{G,i}^{min} < Q_{G,i} < Q_{G,i}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N_g \quad (14)$$

Es importante mencionar que las expresiones anteriores se dividen en restricciones de desigualdad a variables y a funciones. Las primeras representan los límites del ángulo de

fase y magnitud de tensión en los nodos del sistema, así como la generación de potencia activa en los nodos de generación, mientras que las segundas modelan la generación de potencia reactiva. Esto es porque la potencia Q es dependiente de la magnitud de tensión en los nodos de generación, donde primero se debe verificar que se satisfaga la restricción de la Ec. (12) para posteriormente satisfacer las Ec. (10) y (14).

IV. CASOS DE ESTUDIO

En esta sección se presentan los casos de estudio que permiten analizar la operación del sistema de potencia cuando se consideran las emisiones de CO₂. En las simulaciones numéricas se utilizó el sistema de dos áreas-11 nodos [16] y el SEP de Nueva Inglaterra de 39 nodos [17] con una tolerancia de convergencia, en todos los casos, de 1×10^{-9} .

A. SISTEMA DE POTENCIA DE DOS ÁREAS-11 NODOS

En la primera sección de los casos de estudio, se emplea el sistema eléctrico de potencia de dos áreas-11 nodos [16], el cual se muestra en la Fig. 1, mientras que los coeficientes de las funciones de costo y de emisiones de las unidades de generación de este SEP se aprecian en la Tabla I.

Los límites de tensión utilizados en las simulaciones numéricas de los casos de estudio para este SEP son de 0.95 pu para los límites inferiores y de 1.05 pu para los superiores, mientras que los valores iniciales de los ángulos de fase de tensión son de 0°. Los límites utilizados para la potencia activa y reactiva de cada generador de este sistema son de $30 \leq P_{G_i} \leq 1200$ MW y $-500 \leq Q_{G_i} \leq 500$ MVAR, respectivamente.

El primer caso de estudio con este sistema se realiza considerando los siguientes factores de ponderación: $w_C=1$ y $w_E=0$ (se consideran únicamente factores económicos), $w_C=0$ y $w_E=1$ (se consideran únicamente factores ambientales) y $w_C=0.5$ y $w_E=0.5$ (se consideran factores económico-ambientales), esto con la finalidad de observar y comparar la operación del sistema eléctrico de potencia cuando se considera en forma independiente el FPO económico, el FPO ambiental y el FPO multi-objetivo. Es importante resaltar que en el último se combina la función de costo y la función de emisiones en la función global con el mismo factor de peso, cuya finalidad es analizar la operación del SEP dando la misma importancia al aspecto económico y ambiental.

Un resumen de los resultados obtenidos para esta simulación numérica se presenta en la Tabla II, mientras que en la Fig. 2 se muestra el perfil de tensión nodal de este sistema de potencia para cada función individual y multi-objetivo.

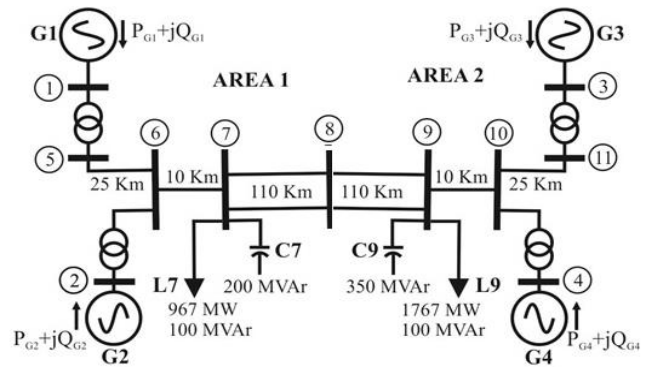


Fig. 1. SEP de dos áreas-11 nodos.

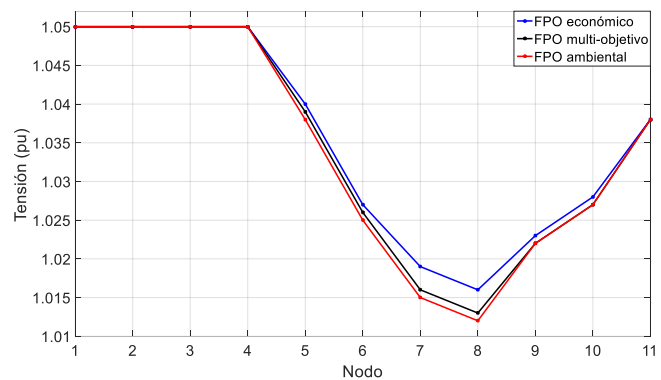


Fig. 2. Perfiles de tensión nodal para el SEP de 11 nodos.

TABLA I. COEFICIENTES DE LAS FUNCIONES DE COSTO Y EMISIONES PARA LOS GENERADORES DEL SEP DOS ÁREAS-11 NODOS.

Gen	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MW ² h)	d (lb/h)	e (lb/MWh)	f (lb/MW ² h)
1	60	3.4	0.004	13.86	0.33	0.0042
2	60	3.4	0.004	13.86	0.33	0.0042
3	60	3.4	0.004	13.86	0.33	0.0042
4	60	3.4	0.004	13.86	0.33	0.0042

TABLA II. RESUMEN DE RESULTADOS DEL SEP DE 11 NODOS.

Parámetros	FPO económico ($w_C=1, w_E=0$)	FPO multi-objetivo ($w_C=0.5, w_E=0.5$)	FPO ambiental ($w_C=0, w_E=1$)
P_g (MW)	2,803.595	2,805.365	2,805.731
Q_g (MVAR)	570.829	589.698	593.641
$P_{pérdidas}$ (MW)	69.595	71.365	71.731
$Q_{pérdidas}$ (MVAR)	920.829	939.698	943.641
Costo de generación (\$/h)	17,665.602	17,667.996	17,669.041
Emisiones (lb/h)	801.908	801.629	801.621

A partir de los resultados mostrados en la Tabla II se puede observar que en el caso del FPO multi-objetivo ocurre un aumento en el costo de generación a causa de un aumento en las pérdidas del SEP, lo cual se debe a que el costo de generación tiene una ponderación menor que en el caso del

FPO económico. Algo similar se presenta con el FPO ambiental, en el que el costo de generación es aún mayor que en los otros dos casos, ya que el objetivo es minimizar las emisiones de CO₂ y no el costo. Obviamente, en este caso las emisiones son menores, pero es importante notar que las pérdidas de potencia y la generación son mayores que en los otros casos, lo que posiblemente disminuirá la rentabilidad económica y operativa del sistema. Por otro lado, los perfiles de tensión nodal de la Fig. 2 muestran que se tiene un perfil de tensión menor con el FPO ambiental que en los otros dos casos, sin embargo, esta variación en el perfil de tensión nodal no es muy significativa para la operación del SEP. Dicha disminución en la tensión se debe a las mayores pérdidas de potencia, tanto activas como reactivas, lo cual a su vez posiblemente obedezca a los coeficientes de las curvas de emisiones y a la redistribución de los flujos de carga en el SEP.

Una forma de observar de manera más detallada lo antes mencionado es mediante la Tabla III, en la que se presentan los resultados de la variación de la función de costo, de emisiones y multi-objetivo en términos de la variación de los coeficientes de ponderación w . La variación de ambos coeficientes se hace en forma inversa y en intervalos de 0.1, es decir, w_C empieza en 1 y disminuye hasta 0, mientras que w_E empieza simultáneamente en 0 y aumenta hasta 1, manteniendo siempre una combinación de las funciones tal que $w_C + w_E = 1$, tal como se muestra en la tabla mencionada.

En la tabla anterior se puede observar que conforme aumenta la ponderación de las emisiones, estas disminuyen y aumenta simultáneamente el costo de generación. Esto ocurre de igual manera para el caso en que se aumenta la ponderación del costo de generación, ya que este disminuye y las emisiones aumentan. Lo anterior permite inferir que el algoritmo de optimización minimiza de manera correcta la función objetivo global del problema de FPO multi-objetivo. Se debe notar que al ponderar en mayor medida las emisiones ocurre un aumento en las pérdidas de potencia, tanto activa como reactiva, lo que trae consigo un aumento en el costo de generación.

B. SISTEMA DE POTENCIA DE 39 NODOS

El sistema de Nueva Inglaterra [17] es utilizado para realizar los mismos casos de estudio con el propósito de analizar la operación de sistemas de potencia reales cuando se consideran las emisiones de CO₂. Los límites de generación de potencia activa y reactiva de este sistema, así como los coeficientes de las curvas de costo y emisiones se muestran en las Tablas IV y V, respectivamente.

Al igual que en el caso del SEP de 11 nodos, en la Tabla VI se presenta un resumen de resultados para el FPO económico, ambiental y multi-objetivo. Del mismo modo en la Fig. 3 se muestra el perfil de tensión obtenido para este sistema.

TABLA III. FUNCIONES OBJETIVO DEL SISTEMA DE DOS ÁEAS-11 NODOS EN TÉRMINOS DE LA VARIACIÓN DE LOS COEFICIENTES W.

w_C	w_E	F_C (\$/h)	F_E (lb/h)
1	0	17,665.6017	801.9076
0.9	0.1	17,666.0453	801.7387
0.8	0.2	17,666.6709	801.6772
0.7	0.3	17,667.2084	801.6499
0.6	0.4	17,667.6437	801.6363
0.5	0.5	17,667.9959	801.6291
0.4	0.6	17,668.2841	801.6251
0.3	0.7	17,668.5229	801.623
0.2	0.8	17,668.7245	801.6219
0.1	0.9	17,668.8944	801.6214
0	1	17,669.0414	801.6212

TABLA IV. LÍMITES PARA LOS GENERADORES DEL SEP DE 39 NODOS DE NUEVA INGLATERRA

Generador	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)	Q_{\min} (MVAR)	Q_{\max} (MVAR)
1	0	350	140	400
2	0	650	-100	300
3	0	800	150	300
4	0	750	0	250
5	0	650	0	167
6	0	750	-100	300
7	0	750	0	240
8	0	700	0	250
9	0	900	-150	300
10	0	1200	-100	300

TABLA V. VALORES DE LOS COEFICIENTES DE LAS FUNCIONES DE COSTO Y EMISIONES PARA LOS GENERADORES DEL SEP DE 39 NODOS

Gen	a (\$/h)	b (\$/MWh)	c (\$/MW ² h)	d (lb/h)	e (lb/MWh)	f (lb/MW ² h)
1	0	6.9	0.019	27.14	0.54	0.0068
2	0	3.7	0.011	13.85	0.32	0.0042
3	0	2.8	0.010	13.86	0.33	0.0042
4	0	4.7	0.008	13.86	0.33	0.0042
5	0	2.8	0.012	13.85	0.32	0.0042
6	0	3.7	0.009	40.26	0.33	0.0068
7	0	4.8	0.009	40.26	0.33	0.0068
8	0	3.6	0.011	13.85	0.32	0.0042
9	0	3.7	0.007	13.86	0.33	0.0042
10	0	3.9	0.006	13.86	0.33	0.0042

TABLA VI. RESUMEN DE RESULTADOS DEL SEP DE 39 NODOS

Parámetros	FPO económico ($w_C=1$, $w_E=0$)	FPO multi-objetivo ($w_C=0.5$, $w_E=0.5$)	FPO ambiental ($w_C=0$, $w_E=1$)
P_g (MW)	6,158.137	6,159.342	6,164.004
Q_g (MVAR)	1,211.282	1,230.140	1,283.340
$P_{pérdidas}$ (MW)	42.037	43.242	47.904
$Q_{pérdidas}$ (MVAR)	-197.618	-178.760	-125.560
Costo (\$/h)	61,213.813	61,928.168	63,207.933
Emisiones (lb/h)	4,719.444	4,491.827	4,436.197

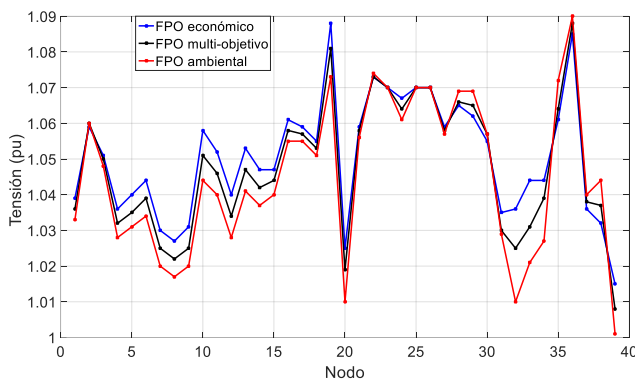


Fig. 3. Perfiles de tensión nodal para el sistema eléctrico de 39 nodos.

Los resultados anteriores muestran que las funciones objetivo y el perfil de tensión nodal tienen el mismo comportamiento que en el caso del SEP de 11 nodos, por lo que, es posible señalar que el comportamiento es muy similar en sistemas de potencia reales y de prueba. Esta simulación numérica resulta importante de realizar, ya que en algunos estudios distintos al presentado en este trabajo la operación es muy distinta entre sistemas de potencia reales y de prueba.

Al igual que en el sistema de 11 nodos, lo anterior se puede complementar con los resultados presentados en la Tabla VII, en la cual se muestra la variación de las funciones objetivo en términos de los coeficientes w . En esta tabla, al igual que la Tabla III, es posible observar que al considerar las emisiones de dióxido de carbono en el modelo de FPO se aumenta el costo, lo que posiblemente reduce, como se mencionó, la rentabilidad económica del sistema de potencia, aunque se debe resaltar que la posibilidad de afección en la rentabilidad ocurre únicamente en el caso de que la proporción en el aumento del costo de generación sea mayor a la proporción del costo por concepto de penalización que se pudiera presentar en caso de violar los límites de emisiones de CO₂. Caso en el cual, resulta más rentable a la empresa suministradora de energía absorber la proporción de los costos de penalización por emisiones y operar el sistema considerando un enfoque orientado hacia el aspecto económico. En caso contrario, es más conveniente operar el SEP desde una perspectiva ambiental, que permita minimizar el dióxido de carbono que emiten las centrales de generación a fin de evitar las penalizaciones y aumentar la rentabilidad económica de la empresa. Se debe resaltar que, en ambos

casos, la formulación de FPO multi-objetivo siempre será indispensable como herramienta de apoyo para las empresas suministradoras de energía eléctrica en la toma de decisiones asociadas con la operación de los sistemas de potencia considerando las emisiones de CO₂.

Por último, se lleva a cabo una simulación numérica en la que se selecciona el nodo con menor carga activa, nodo 31. En este nodo se eleva la carga de potencia activa hasta 1,000 MW para visualizar el comportamiento de las funciones de costo, emisiones y global ante la variación de la carga en el sistema de potencia. Esta simulación se realiza considerando los siguientes valores de ponderación para las funciones de costo y emisiones: ($w_C=1$ y $w_E=0$), ($w_C=0.5$ y $w_E=0.5$) y ($w_C=0$ y $w_E=1$). El efecto de la carga en la función objetivo del FPO económico y ambiental se presenta en las Fig. 4 y 5, respectivamente; cabe mencionar que no se presentan gráficas asociadas de esta simulación para el sistema de potencia de 11 nodos, ya que no se observaron cambios notables en las funciones objetivos del FPO ante la variación de la carga.

Las figuras muestran que con el aumento de la carga se incrementa el valor individual de las funciones objetivo, ya que se tiene una mayor generación de potencia activa y un incremento en las pérdidas. De manera lógica, en el caso del FPO económico la pendiente de incremento del costo es menor que en los otros dos casos, de igual manera en el FPO ambiental el incremento en el valor de las emisiones de CO₂ es menor y en el FPO multi-objetivo se tiene un crecimiento intermedio para ambas funciones porque se minimizan ambas funciones de forma simultánea. Por otro lado, se observa que al ir aumentando gradualmente la carga los resultados que se obtienen son los mismos para el costo de generación y para las emisiones.

TABLA VII. EFECTO DE LOS COEFICIENTES DE PONDERACIÓN EN LAS FUNCIONES OBJETIVO DEL SEP DE 39 NODOS.

w_C	w_E	F_C (\$/h)	F_E (lb/h)
1	0	61,213.8130	4,719.4439
0.9	0.1	61,243.9526	4,659.6288
0.8	0.2	61,332.4154	4,607.4348
0.7	0.3	61,476.8899	4,562.3358
0.6	0.4	61,675.7897	4,523.9105
0.5	0.5	61,928.1739	4,491.8255
0.4	0.6	62,222.8139	4,466.6532
0.3	0.7	62,495.3363	4,451.1687
0.2	0.8	62,770.8649	4,441.5392
0.1	0.9	62,990.7469	4,437.5013
0	1	63,207.9332	4,436.1966

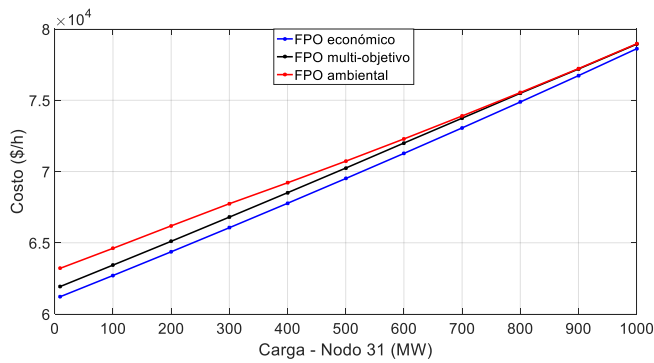


Fig. 4. Efecto de la carga en la función de costo del SEP de 39 nodos.

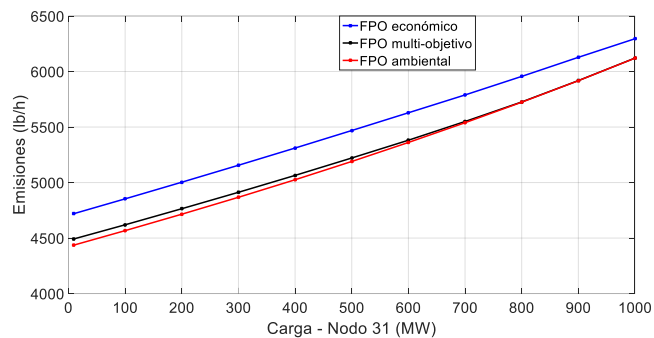


Fig. 5. Efecto de la carga en la función de emisiones del SEP de 39 nodos.

V. CONCLUSIONES

Una formulación de FPO multi-objetivo que permite llevar a cabo el análisis de la operación de sistemas de potencia considerando las emisiones de CO₂ se ha presentado. Los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas muestran que al incluir las emisiones en el FPO multi-objetivo se disminuye la rentabilidad económica y operativa del SEP debido al aumento de las pérdidas y a la elevación de los niveles de generación del sistema de potencia. Los casos de estudio también muestran que al incluirse las emisiones de dióxido de carbono en la formulación de FPO se presenta una disminución poco significativa en el perfil de magnitud de tensión nodal del sistema, que no afecta de manera considerable la operación del SEP.

Por lo anterior, es posible concluir que la formulación de FPO multi-objetivo permite operar, controlar y planear un SEP con una orientación económica y cumpliendo con las regulaciones en materia ambiental, por lo que, utilizar esta formulación de Flujos de Potencia Óptimos resultará indispensable en nuestro país una vez que se materialicen y maduren las regulaciones ambientales asociadas con las emisiones de los gases GEI y en especial con las emisiones del dióxido de carbono, ya que ayudará a las empresas suministradoras de energía eléctrica en la toma de decisiones ante posibles penalizaciones por concepto de violación de límites de emisiones de CO₂, lo cual coadyuvará con la intención de garantizar y en lo posible aumentar la rentabilidad de los sistemas de potencia a fin avalar su participación exitosa en el mercado de la energía eléctrica.

Por último, se debe mencionar que este tipo de trabajos resultan de gran interés en nuestro país por el tipo de problemática que tratan, ya que actualmente no existen regulaciones ambientales lo suficientemente maduras en un mercado de energía eléctrica, lo cual se traduce en un amplio y casi infinito océano de posibilidades para los investigadores y empresas de generación de nuestro país, ya que en un futuro no muy cercano resultará preponderante aumentar la rentabilidad del SEP mientras se satisfacen los requerimientos medioambientales.

REFERENCIAS

- [1] H. Saadat, "Power System Analysis," New York, USA, Mc Graw Hill, 2002.
- [2] E. Acha, C. R. Fuerte, H. Ambriz y C. C. Angeles, "FACTS; Modelling and Simulation in Power Networks," Wiltshire, Gran Bretaña, John Wiley & Sons, 2004.
- [3] M. Huneault and F. D. Galiana, "A survey of the optimal power flow literature," *IEEE Trans. on Power Syst.*, Vol. 6, No. 2, pp. 762-770, May, 1991.
- [4] J. A. Momoh, "Optimal Power Flow with Multiple Objective Functions," in Twenty-first Annual North American Power Symposium, Rolla, MO., USA, 1989, pp.105-108.
- [5] J. A. Momoh, M.E. El-Hawari, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993: part I: nonlinear and quadratic programming approaches," *IEEE Trans. Power System*, Vol. 14, No. 1, pp. 96-104, Feb., 1999.
- [6] B. Stott, "Power system dynamic response calculations," *Proc. of the IEEE, Special Issue on Computers in Power System Operations*, Vol. 67, No. 2, pp. 219-241, Feb., 1979.
- [7] P. S. Kulkarni, A. G. Kothari, and D. P. Kothari, "Combined Economic and Emission Dispatch Using Improved Backpropagation Neural Network," *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 28, No. 1, pp. 31-44, Nov., 2010.
- [8] H. Song, S. Wang, Y. Wang and T. Johns, "Environmental / Economic Dispatch Using Fuzzy Logic Controlled Genetic Algorithms," *IEEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 144. No. 4, pp. 377-382, Jul., 1997.
- [9] Y. Demirel and A. Demiroren, "Economic and minimum emission dispatch," in International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Bursa, Turkey, 2003, pp. 1-5, 2003.
- [10] J. S. Dhillon, S. C. Parti and D. P. Kothari, "Stochastic Economic Emission Load Dispatch," *Electric Power Systems Research*, Vol. 26, No. 3, pp.179-186, April, 1993.
- [11] T. D. King, M. E. El-Hawary and F. El-Hawary, "Optimal Environmental Dispatching of Electric Power Systems via an Improved Hopfield Neural Network Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, pp.1559-1565, Aug., 1995.
- [12] OCEANA, "Gases de efecto invernadero," 2008, [Online]. Available: <https://eu.oceana.org/es/node/46897>.
- [13] C. V. Atten, M. J. Bradley and Paul J. Miller, 2004, "Emisiones atmosféricas de las centrales eléctricas en América del Norte," 2004, [Online]. Available: <http://www3.cec.org/islandora/es/item/2165-north-american-power-plant-air-emissions-es.pdf>.
- [14] A. Ahmad, "Optimal Power Flow Solution Using Second Order Newton Method", Ph. D. dissertation, University of Manchester-Institute of Engineering and Electronics, Manchester, Inglaterra, 1991.
- [15] A. Pizano, C. R. Fuerte, E. A. Zamora and J. Segundo-Ramírez, "Conventional Optimal Power Flow Analysis Using the Matlab Optimization Toolbox," in XII Reunión de Otoño de Potencia, Electrónica y Computación, ROPEC Internacional, Morelia, Mich., México, 2010, pp. 1-6.
- [16] A. Ambriz, "Flexible AC Transmission Systems Modelling in Optimal Power Flows Using Newton's Method", Ph. Dissertation, University of Glasgow, Glasgow, Scotland, 1998.
- [17] M. A. Pai, "Energy Function Analysis for Power System Stability," New York, USA, Springer US, 1989.