

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

ISSN 2448-7775

Impacto de la Generación Eólica y Solar FV sobre las Emisiones Contaminantes Usando los Toolbox de MATLAB

LUIS CONTRERAS-AGUILAR*, TIBERIO VENEGAS, JAIME ARROYO, RAMÓN BETANCOURT.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Facultad de Ingeniería Electromecánica, Universidad de Colima.

luisc@uclm.mx (* Autor de correspondencia)

tvenegas@uclm.mx

jaime_arroyo@uclm.mx

rjimenez@uclm.mx

RESUMEN El impacto que tienen las fuentes de generación renovables (eólica y solar fotovoltaica) dentro de los estudios de flujos de potencia se han incrementado en los últimos años, debido principalmente a la necesidad de cuantificar el efecto de estas tecnologías sobre la operación de los sistemas eléctricos. Además, debido a su naturaleza estocástica y con cierta incertidumbre en su disponibilidad, se hace necesario analizar el sistema incluyendo periodos o series de tiempo. Asimismo, el uso de las herramientas simples como lo son los Toolbox de MATLAB proveerá de simplicidad a la solución y simplificará el análisis para cuantificar su impacto. En este trabajo se implementó una herramienta para la solución del problema de despacho económico y de emisiones de CO₂, y la solución de flujos de potencia usando los Toolbox de MATLAB. También, se incluyeron las fuentes de energía renovable para cuantificar el impacto que tienen su uso sobre las emisiones del sistema. El caso de prueba es la red de 9 nodos modificada, donde se obtuvieron hasta un poco más de 30% menos emisiones contaminantes respecto al caso base.

PALABRAS CLAVE— Generación eólica y fotovoltaica, despacho económico y de emisiones, series de tiempo.

I. INTRODUCCIÓN

Una problemática en las ciudades está asociada a los servicios que ofrecen a sus habitantes, por ejemplo: el suministro de agua, energía eléctrica, transporte, combustibles, y entre otros. Entonces, para garantizar el abasto las empresas proveedoras de servicios tienen que acceder a información estadística de grandes bases de datos para anticipar o conocer los posibles problemas que pudieran ocurrir. De tal forma, que el manejo y uso de la información demandará de técnicas y estrategias que permitan a estas empresas tomar las mejores decisiones para lograr los objetivos que se planteen.

Por otro lado, el uso y quema de los combustibles fósiles durante el último siglo, han provocado que las condiciones ambientales en zonas conurbadas presenten impactos negativos en la salud y la ecología. En ese mismo sentido, el consumo y sobreexplotación de los recursos energéticos han permitido que los gobiernos promuevan políticas en materia de energía y medio ambiente [1]. Asimismo, el desarrollo industrial ha

logrado que el aprovechamiento de los recursos energéticos sea un área de oportunidad para las tecnologías emergentes [2]. Por tal motivo, la generación de energía eléctrica por medio de fuentes alternas, como lo son la energía eólica y la energía solar fotovoltaica (FV), han presentado un desarrollo importante ya que contribuyen a reducir y/o mejorar el problema de emisiones contaminantes en el sistema eléctrico [3].

En otro sentido, los estudios clásicos de flujos de potencia se realizan para conocer la operación del sistema eléctrico bajo las condiciones más críticas de demanda, y considerando que la operación de los generadores y controladores en el sistema tiene la capacidad para mantener el balance de energía dentro de los límites operativos [4-5]. De la misma manera, el despacho económico permite asignar la generación adecuada para garantizar la economía del sistema y satisfacer las restricciones del mismo, e inclusive se han involucrado las emisiones contaminantes como parte del problema a resolver [6]. Sin embargo, cuando las energías renovables son integradas al sistema eléctrico se pueden presentar variaciones

no controladas de potencia a lo largo del día, por ello el sistema requiere ser evaluado como soluciones sucesivas en series de tiempo [7]. Por lo tanto, la extensión de los algoritmos de Flujos de Potencia (FP) y Despacho Económico y de Emisiones (DEE), para la solución en series de tiempo implica contar con información suficiente que permita estudiar al sistema bajo ciertas condiciones de operación. Teniendo en mente esto, la gran cantidad de datos que se involucran, los modelos que se deseen incluir y la complejidad de los diferentes algoritmos hacen que su implementación no sea una tarea sencilla. Por ello y debido a su simplicidad el uso de los Toolbox en los lenguajes de programación se ha popularizado. Así, que para este trabajo se usa el software MATLAB, el cual es muy popular en universidades y centros de investigación [8] y contiene funciones de optimización enfocadas a la solución de este tipo de problemas.

Dado lo anterior, en este trabajo se usan las funciones *fmincon* y *fsolve* de MATLAB para optimizar el problema de despacho económico y de emisiones, así como la solución de flujos de potencia. La solución para una condición específica de operación se hace de manera secuencial, tal que los argumentos de salida de una función forman parte de los argumentos de entrada para la otra, y viceversa. Además, a la solución se incluyen los sistemas de generación renovable eólicos y solar fotovoltaico. Para los cuales, dada su condición de generación de potencia variable las soluciones sucesivas en series de tiempo se ajustan a esta necesidad. En las siguientes secciones se hace describe la formulación general para la solución usando series de tiempo, el despacho económico y de emisiones, y solución de flujos de potencia. Finalmente, se presenta un caso de estudio para la red de 9 nodos donde se cuantifica el impacto de las emisiones contaminantes cuando se tiene presencia los sistemas de generación renovables.

II. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A. SERIES DE TIEMPO

Los datos que se obtienen del muestreo en las mediciones de un sistema se conocen como series de tiempo [9]. El propósito del análisis de series de tiempo es en dos sentidos [10]: comprender o modelar el comportamiento estocástico de la serie de tiempo y predecir o pronosticar el valor futuro de la serie. En sistemas eléctricos los perfiles o series de tiempo de la demanda eléctrica, así como las condiciones climatológicas: viento, radiación solar, etc., son utilizadas para un sinnúmero de estudios. En este trabajo, las series de tiempo de los perfiles de demanda y climatológicas se combinarán en la solución secuencial del problema de despacho económico y de emisiones junto con flujos de potencia, para obtener los perfiles de generación, emisiones o cualquier variable sujeta a análisis.

La Fig. 1 muestra el contexto general para la solución sucesiva en series de tiempo de sistemas eléctricos de potencia.

B. DESPACHO ECONÓMICO Y DE EMISIONES

El despacho económico y de emisiones es un problema de optimización bi-objetivo, el cual puede ser convertido en un problema mono-objetivo por introducir un factor de penalización [11]. Entonces, su formulación es,

$$\min F(f_C, f_E) \quad (1)$$

con

$$F(f_C, f_E) = \sum_{i=1}^{N_g} [f_{C,i}(P_{G,i}) + h_i \cdot f_{E,i}(P_{G,i})] \quad (2)$$

donde $F(f_C, f_E)$ es la función mono-objetivo a ser minimizada, $f_{C,i}$ es la función de costos que depende de las potencias generadas, $f_{E,i}$ es la función de emisiones, h_i es el factor de penalización que relaciona la unidades de la función de emisiones a costos y N_g es el número de unidades generadoras a ser despachadas en el sistema (incluyendo la generación eólica y solar fotovoltaica). La función está sujeta a la siguiente restricción de igualdad,

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{G,i} - \sum_{j=1}^{N_d} P_{D,j} - \sum_{k=1}^{N_s} P_{p,k} = 0 \quad (3)$$

donde $P_{G,i}$ es la potencia activa generada por el generador i -ésimo, $P_{D,j}$ es la potencia activa demandada por la carga j -ésima, $P_{p,k}$ son las pérdidas de potencia activa en cada elemento k -ésimo del sistema y calculados a partir de la solución de flujos de potencia, N_d es el número total de cargas y N_s es el número total de elementos de transmisión del sistema eléctrico. Finalmente, las restricciones de desigualdad son,

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (4)$$

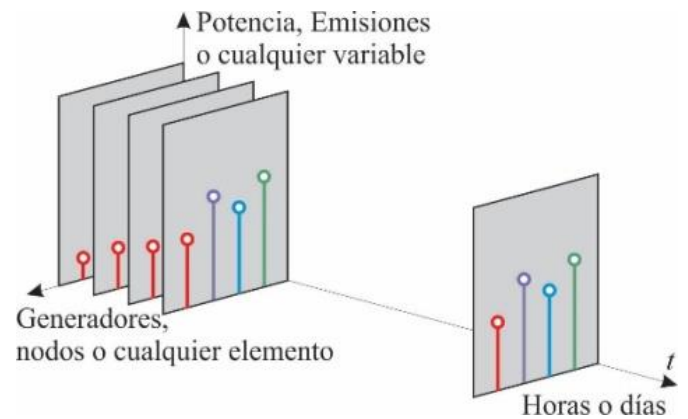


Fig. 1. Solución sucesiva en series de tiempo.

donde $P_{G,i}^{min}$ y $P_{G,i}^{max}$ es la potencia activa mínima y máxima, respectivamente. De la Ec. (2) las funciones de costos [12], sin tomar en cuenta el efecto de las válvulas, son

$$f_{c,i}(P_{G,i}) = a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2 \quad (5)$$

y para las emisiones [12],

$$f_{E,i}(P_{G,i}) = \alpha_i + \beta_i P_{G,i} + \gamma_i P_{G,i}^2 \quad (6)$$

donde a, b, c, α, β y γ son coeficientes asociados a la función de costos y de emisiones, respectivamente. El factor de penalización h_i es calculado como [12],

$$h_i = \frac{\alpha_i + \beta_i P_{G,i}^{max} + \gamma_i P_{G,i}^{2,max}}{\alpha_i + \beta_i P_{G,i}^{max} + \gamma_i P_{G,i}^{2,max}} \quad (7)$$

Cabe mencionar que en este trabajo las funciones de costo para los generadores eólicos y fotovoltaicos se consideraron como una función lineal [13-14], tal que los coeficientes en la Ec. (5) son $a = c = 0$. También, se considera que estos generadores no contribuyen a las emisiones, por lo tanto para la Ec. (6) los coeficientes son $\alpha = \beta = \gamma = 0$. Asimismo, su factor de penalización definido en la Ec. (7) es $h_i = cte$. Además, no se consideran los costos asociados con la penalización por la disponibilidad de recurso tanto eólico como fotovoltaico. Así, que para ambos recursos se dispone de toda la potencia máxima actual que se puede despachar en el momento, entonces los límites de potencia activa para estos generadores son,

$$0 \leq P_G \leq P_G^{act} \quad (8)$$

donde las potencias actuales tanto para la generación eólica como fotovoltaica son calculadas con [14] y [13],

$$P_G^{eólica} = K_1 v_\omega^3 P_{nom} \quad (9)$$

$$P_G^{PV} = K_2 S P_{nom} \quad (10)$$

Donde $K_{1,2}$ son constantes calculadas a partir de los coeficientes asociados a los parámetros físicos y ambientales, v_ω es la velocidad de viento, S es la radiación solar y P_{nom} es la potencia nominal del parque eólico o fotovoltaico.

C. FLUJOS DE POTENCIA

La solución general del problema de Flujos de Potencia consiste en determinar los valores de magnitudes de voltaje y ángulos en todos los nodos de la red, tal que se cumpla con el balance de potencia para una condición específica de operación (punto de operación). Una vez calculados los voltajes fasoriales se determinan los flujos de potencia para todos los elementos de la red, así como generación y pérdidas para cada elemento.

De forma general, las ecuaciones no lineales de balance de potencia activa y reactiva en el nodo m -ésimo pueden ser representadas como [15],

$$\Delta P_m = P_{G,m} - P_{D,m} - P_m^{cal} = 0 \quad (11)$$

$$\Delta Q_m = Q_{G,m} - Q_{D,m} - Q_m^{cal} = 0 \quad (12)$$

donde $P_{G,m}$ y $Q_{G,m}$ son la potencia activa y reactiva generada en el nodo, $P_{D,m}$ y $Q_{D,m}$ son la potencia activa y reactiva demandada, P_m^{cal} y Q_m^{cal} son la potencia activa y reactiva transmitida, las cuales se calculan usando las ecuaciones de flujos de potencia y son función de los voltajes nodales y la matriz de admitancia nodal, Nn es el número de nodos del sistema y se mantienen los tipos: slack, PVs y PQs. Para los nodos con generadores eólicos y fotovoltaicos la potencia activa generada se obtiene del problema de DEE (ver Ec. (9) y Ec. (10)), mientras que la potencia reactiva es [16],

$$Q_G^{eólica} \approx -K_3 V_G^2 - K_4 \frac{P_G^2}{V_G^2} \quad (13)$$

$$Q_G^{PV} = 0 \quad (14)$$

donde $K_{3,4}$ son constantes que depende de los parámetros del generador eólico. La Ec. (13) también depende de la potencia activa eólica generada y el voltaje al nodo conectado. Además, en este trabajo la potencia reactiva del sistema fotovoltaico no es considerada y los nodos para ambos sistemas de generación son considerados como tipo PQ, ya que no se consideran con capacidad de control de voltaje.

III. IMPLEMENTACIÓN

La implementación práctica usando los Toolbox de MATLAB se describe a continuación, asimismo el diagrama de flujo para la solución sucesiva en series de tiempo se muestra en la Fig. 2.

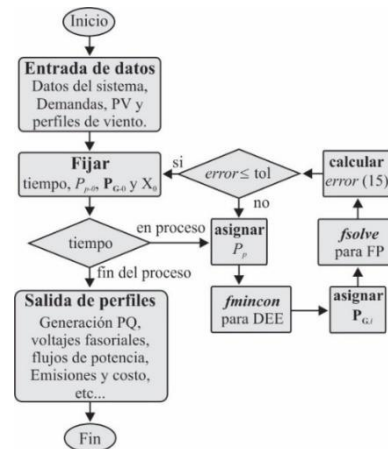


Fig. 2. Diagrama de flujo del esquema implementado.

Primeramente, se leen los datos desde archivos en Excel, los archivos están clasificados en: datos de la red, series de tiempo de demanda, perfil de viento y radiación solar. Una vez disponibles los datos, se indica el tiempo de ejecución y se fijan las Condiciones Iniciales (CI). El proceso interno inicia con la ejecución del DEE usando la función *fmincon* de MATLAB, donde las variables de estado son las potencias generadas. Una vez calculadas las potencias, estas se asignan a los nodos slack y PVs para resolver los FP usando la función *fsolve* de MATLAB. Ahí las variables de estado son magnitudes de voltaje y ángulos, además se calculan otras variables como flujos de potencia, potencias generadas y pérdidas en los elementos de transmisión. Puesto que el generador slack compensa las pérdidas del sistema en la solución de FP, existe una diferencia entre la potencia calculada por la función *fmincon* y la función *fsolve*. Entonces, para ajustar la potencia del nodo slack, se asignan las pérdidas del sistema a la función *fmincon* y se calcula el DEE. El proceso itera hasta que el error máximo entre la potencia del nodo slack calculada por ambas funciones y las pérdidas del sistema son menor o igual a una tolerancia $error \leq tol$ (ver Ec. (15) para el error).

$$error = \max \left| \begin{array}{c} P_{G,slack}^{fmincon} - P_{G,slack}^{fsolve} \\ P_p^{act} - P_p^{ant} \end{array} \right| \quad (15)$$

donde $P_{G,slack}^{fmincon}$ es la potencia calculada por la función *fmincon* para el nodo slack, $P_{G,slack}^{fsolve}$ es la potencia calculada por la función *fsolve* para el nodo slack, P_p^{act} son las pérdidas totales del sistema para la iteración actual y P_p^{ant} son las pérdidas totales del sistema en una iteración anterior. Finalmente, el proceso se repite hasta que se determina todo el intervalo de tiempo para la solución. Adicionalmente durante el proceso se almacenan todas las variables entre las que se incluye emisiones y costos.

A. FUNCIÓN *fmincon*

El Toolbox de Optimización en MATLAB es un conjunto de funciones que ayuda al cálculo numérico para minimizar o maximizar los sistemas no lineales generales [17]. La función *fmincon* es una función predefinida con el propósito de encontrar el valor mínimo de una función de variables no lineal y sujeta a una serie de restricciones. La función a minimizar se le conoce como función objetivo y si se requiere se debe agregar una función de restricciones. El usuario debe implementar las funciones objetivo y de restricciones para la apropiada ejecución de la función *fmincon*. El código general de la función *fmincon*, objetivo y restricciones que se usa en este trabajo se muestra en la Fig. 3.

Los argumentos de entrada y salida de la función *fmincon* se muestran en la Tabla I. Los argumentos en orden de aparición son: **y** es el vector de potencias generadas de salida de la función *fmincon*, así como el vector de Condiciones Iniciales (CI) para la entrada, en este caso no existe conflicto por el uso de la misma variable. Además, tiene la dimensión del número de generadores del sistema y pertenece a los argumentos de entrada para la función objetivo y de restricciones. **@fobj_()** es la función objetivo a minimizar y es definida por el usuario, se conforma por argumentos de entrada y de salida que se describirán más adelante. **[]** son elementos vacíos posicionados y necesarios para la adecuada ejecución de la función. **Pmin** y **Pmax** son vectores que contienen los límites de potencia activa mínima y máxima de cada generador, respectivamente. **@rest_()** es la función definida por el usuario con las restricciones de igualdad y desigualdad, requeridas para la minimización de la función objetivo.

Los argumentos en orden de aparición para la función objetivo son (ver Fig. 3): **f_obj** es el valor escalar de la función objetivo y se evalúa bajo las condiciones actuales de los argumentos de entrada. **y** es el vector de potencias activas actuales de cada generador para evaluarse dentro de la función.

```

%% llamado a la función fmincon
y = fmincon(@fobjfun_(y,Ng,CC,CE,Pmin,Pmax),y,...
    [],[],[],[],Pmin,Pmax,@(y)rest_(y,PD,Pp));

%% función objetivo
function f_obj=objfun_(y,Ng,CC,CE,Pmin,Pmax)
f_obj=0;
FC_max=CC(:,1)+CC(:,2).*Pmax+CC(:,3).*Pmax.^2;
FE_max=CE(:,1)+CE(:,2).*Pmax+CE(:,3).*Pmax.^2;
hi=zeros(size(FE_max));
for k=1:Ng
    f_cost=CC(k,1)+CC(k,2)*y(k)+CC(k,3)*y(k)^2;
    f_emss=CE(k,1)+CE(k,2)*y(k)+CE(k,3)*y(k)^2;
    if FE_max(k)~=0
        hi(k)=FC_max(k)/FE_max(k);
    end
    f_obj=f_obj+f_cost+hi(k)*f_emss;
end

%% función de restricciones
function [ci,ce]=rest_(y,PD,Pp)
ci=[];
ce=sum(y)-sum(PD)-Pp;
    
```

Fig. 3. Código para la implementación de la función *fmincon* en MATLAB.

TABLA I. ARGUMENTOS DE ENTRADA Y SALIDA DE LA FUNCIÓN *fmincon*

Argumento	Descripción
y	Vector de potencias generadas finales, y las CI.
@fobj_()	Función objetivo
[]	Elemento vacío
Pmin	Vector con el límite inferior
Pmax	Vector con el límite superior
@rest_()	Función de restricciones

N_g es el número de generadores tanto convencionales como renovables del sistema. CC son los coeficientes para las funciones de costo. CE son los coeficientes de las funciones de emisiones. P_{min} y P_{max} son los vectores que contienen los límites de potencia activa mínima y máxima de cada generador. Para los argumentos de la función de restricciones son (ver Fig. 3): ci son las restricciones no lineales de desigualdad. ce son las restricciones no lineales de igualdad. y es el vector de potencias actuales a evaluarse en la función. PD es el vector de potencias demandadas a evaluarse en la función y Pp son las pérdidas totales del sistema.

B. FUNCIÓN *fsolve*

La función *fsolve* de MATLAB es parte del Toolbox que permite la solución de sistemas de ecuaciones no lineales. El propósito de la función es encontrar el vector de variables de estado que satisfice la igualdad del sistema no lineal $F(X) = 0$. Asimismo, el usuario debe implementar la función donde se encuentren las ecuaciones de balance de potencias del sistema a resolver. La Fig. 4 muestra la implementación de la función *fsolve* en este trabajo.

Los argumentos de entrada y salida para la función *fsolve* se muestran en la Tabla II. Donde los argumentos en orden de aparición son: x es un vector aumentado con las variables de estado ángulos y magnitud de voltajes nodales. Además, tiene la dimensión del número de ecuaciones de potencia activa y reactiva involucradas según el tipo de nodo. Igualmente, contienen los valores finales de las variables de estado, así como las condiciones iniciales del sistema de ecuaciones. `@ec_balancePQ_()` esta función es definida e implementada por el usuario con las ecuaciones de balance de potencia del sistema. La Y_{bus} es la matriz de admitancias nodales de la cual se obtienen, PQG contiene los vectores de potencia activa y reactiva generados. PQD contiene los vectores de potencia activa y reactiva demandados. V y A son los vectores de voltaje y ángulos iniciales, de ahí se obtienen los voltajes y ángulos que no cambian en la solución (slack y PVs). nod_P son todos los nodos excepto el slack. Ec_P es la cantidad de ecuaciones de potencia activa. nod_Q son todos los nodos PQs. Ec_Q es la cantidad de ecuaciones de potencia reactiva. $K3$ y $K4$ son las constantes para el cálculo de la potencia reactiva del generador eólico.

```
%% llamado a la función fsolve
x=fsolve(@ec_balancePQ_(x,Ybus,PQG,PQD,V,A,...
    nod_P,Ec_P,nod_Q,Ec_Q,K3,K4),x);
```

Fig. 4. Código para la implementación de la función *fsolve* en MATLAB.

TABLA II. ARGUMENTOS DE ENTRADA Y SALIDA DE LA FUNCIÓN *fsolve*

Argumento	Descripción
x	Vector de variables de estado finales y CI.
@ec_balancePQ_()	Función de ecuaciones no lineales.
Y_{bus}	Matriz de admitancias nodales.
PQG	Vector de potencias generadas.
PQD	Vector de potencias demandadas.
V y A	Vectores de magnitud de voltajes y ángulos.
nod_P	Vector con los nodos de potencia activa.
Ec_P	Cantidad de ecuaciones de potencia activa.
nod_Q	Vector con los nodos de potencia reactiva.
Ec_Q	Cantidad de ecuaciones y de potencia reactiva.

IV. CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio es formado a partir de la red de 9 nodos, donde se ha modificado para poder incluir tanto la generación fotovoltaica, así como la eólica. La generación fotovoltaica se ubicó muy cerca del nodo 5 y el parque eólico cerca del nodo 6, donde además se usaron transformadores para realizar la conexión. El sistema resultante es de 11 nodos y se muestra en la Fig. 5. Las bases del sistema son 230 kV y 100 MVA, a una frecuencia de 60 Hz. Los parámetros de la red eléctrica son tomados de [18], y los perfiles de demanda eléctrica se obtuvieron de una base de datos en [19]. Para este caso, se tomaron los registros de los perfiles de demanda eléctrica de tres ciudades diferentes a lo largo de un mes y se generó un perfil unitario, el cual se utiliza como factor de la demanda máxima en cada carga. Asimismo, los perfiles de radiación fueron obtenidos a partir de las mediciones y monitoreo de un sistema fotovoltaico, donde a partir de estas mediciones se hizo una estimación de la radiación solar. De la misma forma, los perfiles de viento fueron tomados de mediciones reales y a una distancia de 15 m sobre el plano terrestre. De [20] son tomados los datos para los coeficientes de costo y emisiones de los generadores convencionales. Mientras que los coeficientes de los generadores eólicos y fotovoltaicos se proponen. Así los datos usados en este trabajo se muestran en el apéndice.

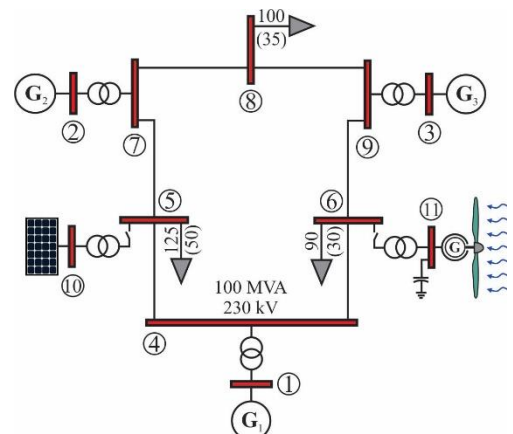


Fig. 5. Diagrama simple modificado del sistema de prueba.

La Fig. 6 muestra los perfiles de demanda de potencia activa para los nodos 5, 6 y 9. Para estas series de tiempos se debe notar que las demandas máximas no coinciden en el mismo día, tal que para el nodo 5 (P_{D5}) la demanda máxima es el día 14, mientras que para el nodo 6 (P_{D6}) y 8 (P_{D8}) las demandas máximas son los días 11 y 22, respectivamente. Por otro lado, los perfiles de las variables atmosféricas de radiación solar y viento se muestran en la Fig. 7 donde se muestra el perfil unitario (pu) determinado a partir de las unidades base de $S_B = 1000 \frac{W}{m^2}$ y $v_B = 14 \frac{m}{s}$. Para la radiación solar, el día 3 es donde se tienen el mayor pico de radiación con el 82% y el día con el menor pico es día 30 con 52% de radiación, así el promedio de los picos de radiación solar para este mes es de aproximadamente 71%. Para el perfil de viento se tiene un comportamiento muy estocástico, donde se observan rachas aleatorias con máximos cercanos al 136% y sostenidas a lo largo varias horas. De esta manera, para los primeros 4 días se tiene un importante recurso eólico, mientras que después se presenta una disminución relativa para los días 5-6, y el recurso se recupera para los días del 7 al 18. Después, para los días del 19-28 se observa una tendencia de reducción del potencial eólico, teniendo días por debajo del 50% y finalmente para los últimos días del mes se incrementa recurso. Por otra parte, los sistemas de medición y monitoreo comúnmente registran la información en intervalos de tiempo de entre los 5-15 min., así que en este trabajo solo se considera la información registrada en cada hora. Para aquellos datos faltantes y que no se registraron en la hora requerida se hizo una interpolación lineal simple para obtener dicha información.

Una vez que se tienen los datos de entrada en series de tiempo se procede a realizar el estudio referente al impacto de las emisiones en el sistema. Como caso base (CB) se procede a realizar una simulación donde no se incluyen las energías renovables. Además, en la simulación no se considera el DEE, tal que todos los generadores convencionales generaran la misma cantidad de potencia activa requerida para abastecer la demanda del sistema. Esto se puede lograr simplemente poniendo los límites de generación muy grandes para los generadores convencionales (p.e. $0 \leq P_{G,i}^{conv} \leq 1000 MW$), y para los generadores eólicos y fotovoltaicos en modo desconectado (p.e. $0 \leq P_{G,i}^{renv} \leq 0 MW$), además la función objetivo se cambia por la suma de las potencias generadas ($f_{obj} = \sum_{i=1}^{Ng} P_{G,i}$). Los resultados para este caso se muestran en la Fig. 8, ahí se muestra la potencia activa generada total (PGT) por el del sistema, la potencia activa demandada total (PDT), las pérdidas totales (Pp) y las emisiones totales (Ems) producidas por el sistema. En esta serie de tiempo el día 21 se presenta el pico máximo de demanda con un poco más de 300 MW, además se tiene el mayor pico de generación y las emisiones contaminantes son de 1860 ton/h. Asimismo, el día

24 se presentan las menores emisiones en su pico con 1110 ton/h y el promedio aproximado de emisiones para todo el mes es de 1200 ton/h. Respecto a las pérdidas los picos máximos son de un poco más de 3 MW y el promedio del mes es cerca de 2.16 MW.

Con el fin de cuantificar el impacto de las energías renovables sobre las emisiones contaminantes, se procede a realizar los casos de estudio usando el problema de despacho económico y de emisiones. El primer caso es sin considerar los recursos renovables, para el cual solo se hace el DEE incluyendo límites de generación y las pérdidas del sistema.

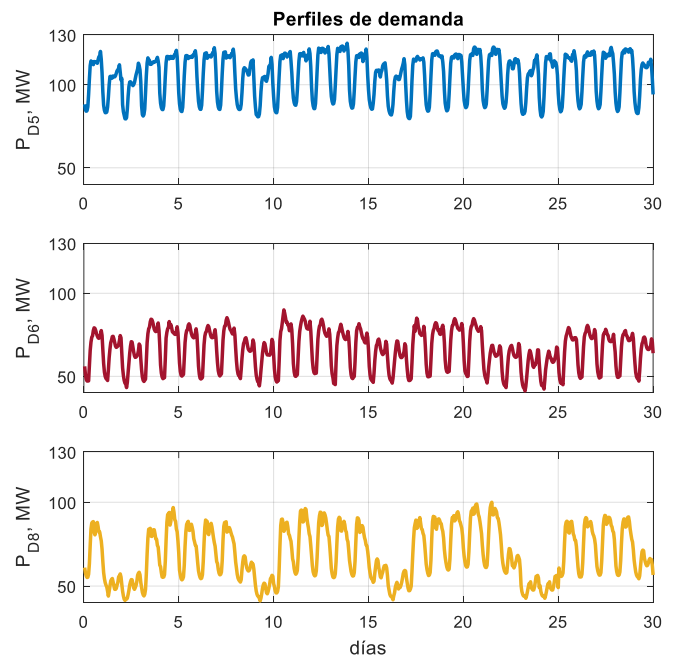


Fig. 6. Perfiles de demanda de potencia activa del sistema.

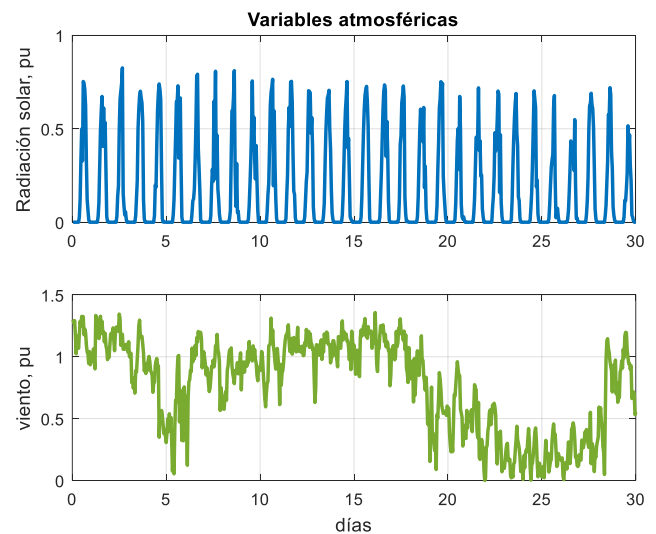


Fig. 7. Perfiles de radiación solar y viento.

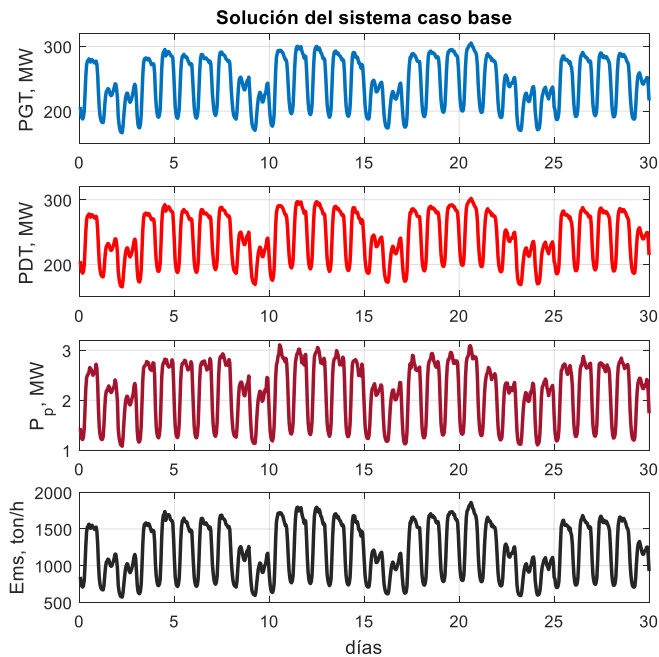


Fig. 8. Solución del sistema para el CB.

El siguiente caso es hacer el DEE incluyendo los sistemas fotovoltaicos en el nodo 5, a este caso se le conoce como DEE(PV). La capacidad del sistema fotovoltaico en este caso es considerada de 25 MW nominales. Se consideran 25 MW por incluir un máximo del 15% en generación renovable durante los valles mínimos del perfil de demanda. El siguiente caso es incluir 25 MW nominales de generación eólica en el nodo 6 y sin el sistema fotovoltaico, a este caso se le conoce como DEE(W). El último caso es incluir ambos sistemas de generación alternativa DEE(W+PV). Para este caso, se considera un sistema fotovoltaico de 10 MW nominales, mientras que el sistema eólico de 15 MW nominales, ambos sumando 25 MW nominales.

La Fig. 9 muestra el resultado en la reducción de emisiones contaminantes para los generadores convencionales en los casos mencionados anteriormente. El cálculo para cuantificar el porcentaje de esta reducción se realizó con la siguiente expresión,

$$R\% = \frac{E_{CB} - E_C}{E_{CB}} \times 100 \quad (16)$$

donde $R\%$ es el vector con la reducción de emisiones respecto al caso base en porcentaje, E_{CB} es el vector de emisiones producidas por el caso base y E_C es el vector de emisiones producidas por el caso analizado.

Para el caso DEE se observa un máximo cercano al 5% en la reducción de emisiones contaminantes del sistema, mientras que la reducción mínima está por debajo del 3%. El promedio

mensual aproximado para este caso es de alrededor del 4.1% en la reducción de emisiones contaminantes. Cuando se agregan los sistemas fotovoltaicos DEE(PV) se logra alcanzar hasta el 20% en la reducción de emisiones contaminantes, pero esto solo se logra en los picos máximos de radiación solar. El promedio mensual para este caso está cerca del 7.35% en la reducción de emisiones contaminantes. Para el caso DEE(W) se logran pequeños periodos de tiempo con una reducción de emisiones máxima de un poco más de 30% y el promedio mensual en la reducción de emisiones contaminantes es de aproximadamente 13.43%. Para el caso DEE(W+PV) la reducción de emisiones máxima obtenida es cerca del 27% y el promedio mensual aproximado de 11.1% en la reducción de emisiones.

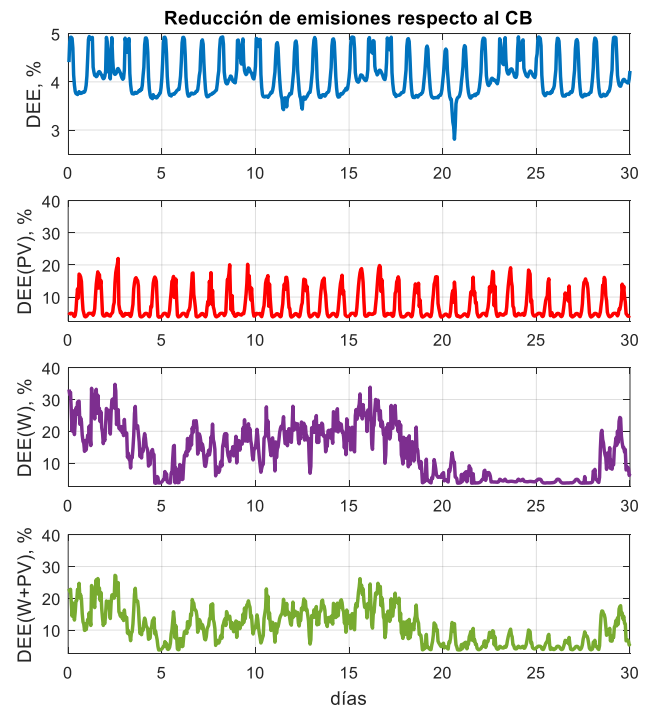


Fig. 9. Porcentaje de reducción de las emisiones respecto al CB.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una alternativa para solucionar las series de tiempo, despacho económico y de emisiones (DEE), y solución de flujos de potencia de sistemas eléctricos. Para solucionar el problema de DEE y FP se usaron las funciones *fmincon* y *fsolve* de MATLAB, donde el Toolbox de este software provee de simplicidad para la implementación. El hecho de resolver los FP simultáneamente con el DEE, ayuda a incluir las pérdidas del sistema de forma más realista y al mismo tiempo conocer todas las variables asociadas a la solución. Además, se incluyó las fuentes de generación renovable fotovoltaica y eólica a la formulación del DEE y FP. Para probar la herramienta se implementó un esquema basado

en la red de 9 nodos, donde se plantea un caso base que sirve de referencia para cuantificar la solución de DEE y la inclusión de las energías renovables. Considerando los diferentes casos de estudio, el sistema de generación eólica presenta el mayor porcentaje en las reducciones de emisiones contaminantes con hasta un poco más de 30%. Adicionalmente, es notorio que el porcentaje en la reducción de las emisiones contaminantes es similar a los perfiles de las variables atmosféricas usados en el trabajo. De tal forma, que las reducciones en las emisiones contaminantes dependerán en gran medida de recurso renovable disponible durante la solución.

APENDICE

Los parámetros del DEE, así como los coeficientes de las funciones de costo y emisiones usados en este trabajo se muestran en la Tabla III. Las potencias mínimas y máximas están en MW, para los coeficientes a (\$/h), b (\$/MWh), c (\$/MW²h), α (ton/h), β (ton/MWh) y γ (ton/ MW²h).

TABLA III. PARÁMETROS PARA EL DEE Y SUS COEFICIENTES.

Nodo	P _{mín}	P _{máx}	a	b	c	α	β	γ
1	36	114	94.70	6.73	0.0069	60	-2.22	0.048
2	60	120	309.5	7.07	0.0202	100	-2.36	0.076
3	25	110	307.4	5.88	0.0161	100	-1.89	0.095
10	0	P ^{act}	0	4.5	0	0	0	0
11	0	P ^{act}	0	4.5	0	0	0	0

REFERENCIAS

[1] L. Lingyue, X. Ren, Y. Yang, P. Zhang and X. Chen. "Analysis and recommendations for onshore wind power policies in China", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, Part 1, pp. 156-167, Feb. 2018.

[2] SENER, "Prospectiva de Energías Renovables". 2012-2026.

[3] SENER, "Prospectiva del sector Eléctrico 2017-2031".

[4] Kundur, P. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1994.

[5] Sauer, P. W. y Pai, M. A. *Power System Dynamics and Stability*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, NJ, USA, 1998.

[6] F. N. Al Farsi, M. H. Albadi, N. Hosseinzadeh y A. H. Al Badi, "Economic Dispatch in power systems", *8th GCC Conference & Exhibition*, Muscat, 2015, pp. 1-6.

[7] T. Venegas-Trujillo, J. Arroyo-Ledesma, L. Contreras-Aguilar y V. Castillo-Topete, "Análisis comparativo del estudio de flujos de potencia en series de tiempo por el cambio de paso en el muestreo de perfiles de carga y generación de sistemas fotovoltaicos interconectados", *Revista de Aplicación Científica y Técnica*, Vol. 3 No. 10, pág., 11-19, Dic. 2017.

[8] online: "<https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>"

[9] R. H. Shumway y D. S. Stoffer, *Time Series Analysis and Its Applications with R examples*. Springer, New York, 2011.

[10] J. D. Cryer y K. S. Chan, *Time Series Analysis with Applications in R*. Springer, New York, 2008.

[11] Y. Sonmez. "Multi-objective environmental/economic dispatch solution with penalty factor using Artificial Bee Colony algorithm", *Scientific Research and Essays*, Vol. 6 (13), pp. 2824-2831, 4 July, 2011.

[12] S. Subramanian y S. Ganesan, "A Simple Approach for Emission Constrained Economic Dispatch Problems", *International Journal of Computer Applications*, Volume 8, No.11, pp. 39-45, October 2010.

[13] N. A. Khan, et al., "Combined emission economic dispatch of power system including solar photo voltaic generation", *Energy Conversion and Management*, Vol. 92, págs. 82-91, 2015.

[14] Azza A. ElDesouky, "Security and Stochastic Economic Dispatch of Power System Including Wind and Solar Resources with Environmental Consideration", *International Journal of Renewable Energy Research*, Vol.3, No.4, 2013.

[15] E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez, C. Angeles-Camacho, *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*, John Wiley & Sons, 2004.

[16] A. E. Feijóo y J. Cidrás, "Modeling of Wind Farm in the Load Flow Analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 1, Feb. 2000.

[17] The MathWorks, Inc., *Matlab Optimization Toolbox, User's Guide 2019*.

[18] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power system control and stability*, N.J: IEEE Press, John Wiley & Sons, 2003.

[19] online: "https://data.open-power-system-data.org/time_series/".

[20] U. Güvenç, Y. Sönmez, S. Duman, N. Yörükere, "Combined economic and emission dispatch solution using gravitational search algorithm", *Scientia Iranica*, Volume 19, Issue 6, Pág., 1754-1762, Feb. 2012