

# Flujo de potencia óptimo multiobjetivo para el análisis de sistemas de potencia con generación eólica.

## Multiobjective Optimal Power Flow for the Analysis of Power Systems with Wind Generation.

Germán Andrés López<sup>a\*</sup>, Edmarcio Antonio Belati<sup>a</sup>, Alfeu Joãozinho SguareziFilho<sup>a</sup>.

### RESUMEN

Este artículo presenta una metodología de análisis para sistemas de transmisión con la inserción de generadores eólicos, el estudio desarrollado tiene dos fases, en la primera fase, la disponibilidad de potencia activa y reactiva para un parque eólico es calculada en relación con la velocidad del viento, haciendo uso de un polinomio que representa la función de inyección de potencia para el parque eólico en la red; para la segunda fase, se implementa un flujo de potencia óptimo multiobjetivo con el fin de analizar el desempeño del sistema buscando minimizar las pérdidas de potencia activa y optimizar los perfiles de tensión; el problema de FPO fue simulado con la herramienta A Modeling Language for Mathematical Programming, a través del solver KNITRO. Las simulaciones desarrolladas en el sistema estándar IEEE de 30 barras modificado, muestran claramente los beneficios de utilizar el FPO multiobjetivo para encontrar un punto de operación óptimo en este tipo de sistemas.

### PALABRAS CLAVE

Flujo de Potencia Óptimo; Generación Eólica; Pérdidas de Potencia; Perfil de tensión; Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica.

### ABSTRACT

This paper presents an analysis methodology for transmission systems with the inclusion of wind generators, the study performed consists of two phases, in the first phase, the availability of active and reactive power for a wind park is calculated in relation to the wind speed, by using a polynomial that represents the function of power injection for the wind park in the network; for the second phase, an optimal power flow multiobjective is implemented to analyze the performance of the system seeking to minimize the active power losses and to optimize the voltage profiles; the OPF problem was simulated with A Modeling Language for Mathematical Programming tool, through KNITRO solver. The simulations developed in the IEEE 30 bar standard system, clearly show the benefits of using the multi-objective OPF to find optimal operating point in these types of systems.

### KEYWORDS

Optimal Power Flow; Wind Power Generation; Power Losses; Voltage profile; Systems Power Transmission.

Energética 44, diciembre (2014), pp.41-47

ISSN 0120-9833 (impreso)  
ISSN 2357 - 612X (en línea)  
[www.revistas.unal.edu.co/energetica](http://www.revistas.unal.edu.co/energetica)  
© Derechos Patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia



## 1. INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) vienen operando cada vez más cerca de los límites máximos de carga y esa situación permanecerá inalterada en los próximos años. La generación de electricidad a partir de energía eólica experimenta un gran aumento, pasando del 1% de la generación mundial de electricidad en 2009 a 13% en el 2035 [IEO, 2011]; por dicha razón la búsqueda de alternativas energéticas con el uso de fuentes renovables y la optimización de los recursos viene aumentando.

Una de las formas de energía renovable más importantes es la energía eólica que es la energía cinética contenida en las masas de aire en movimiento. Su aprovechamiento ocurre por medio de la conversión de energía cinética de traslación en energía cinética de rotación con el empleo de turbinas eólicas (aerogeneradores). La energía producida por el viento es considerada técnicamente aprovechable cuando su densidad es mayor o igual a 500 W/m<sup>2</sup>, a una altura de 50m, lo que requiere una velocidad mínima del viento por vuelta de 7 m/s [ANEEL, 2013]. Una máquina de generación eólica moderna típica tiene una capacidad de producir entre 1 y 3 MW de potencia activa, empleando una turbina eólica con eje horizontal [Heier, 2006]. Diversas de esas maquinas operan de forma conjunto constituyendo un parque eólico cuya capacidad de generación puede alcanzar más de 100 MW.

Inicialmente los aerogeneradores fueron proyectados para operar con factor de potencia unitario. Sin embargo algunos estudios [Xu & Cartwright, 2006; Sguarezi Filho & de liveira Filho, 2011] presentan técnicas de control de potencia activa y reactiva para el Generador de Inducción de Rotor Bobinado (GIRB), comúnmente conocido en la lengua inglesa como DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*) que posibilita la operación con factor de potencia diferente de uno.

El funcionamiento de los SEP que posean generación eólica, con un alto grado de calidad, seguridad y confiabilidad, en conjunto con una operación económica, debe ser prioritario para todos los agentes que actúan en el mercado energético debido a la creciente inserción de este tipo de tecnologías en las redes convencionales; en este orden de ideas, la reducción de pérdidas de energía en conjunto con la optimización de los perfiles de tensión, ofrece la posibilidad de tener un servicio que cumpla con estas características, al mismo tiempo que la reducción de pérdidas tiene un impacto directo en la economía de los operadores, la optimización de los perfiles de tensión incide directamente en la calidad del servicio ofrecido a los consumidores; por tanto, se hace indispensable el uso de herramientas de análisis para los SEP con el objetivo de auxiliar a los agentes operadores en la toma de decisiones que otorguen beneficios tanto para ellos como para los usuarios.

Una de las herramientas más poderosas para el análisis de los SEP es el Flujo de Potencia Óptimo (FPO) [Baptista et al., 2006]. El problema del FPO busca optimizar una función específica, satisfaciendo restricciones que son regidas por particularidades operacionales y físicas de la red eléctrica. El problema del FPO es un problema cuyos modelos matemáticos utilizados envuelven dificultades como: no linealidad y no convexidad, millares de restricciones, variables discretas y/o enteras, lo que ocasiona un problema de difícil solución, tornándose en un tema interesante para investigadores en todos los niveles académicos.

EL FPO tiene aplicaciones en diversos problemas de análisis y operación de sistemas de potencia, tales como, despacho económico, análisis de sensibilidad de generación y transmisión, análisis de seguridad, planeamiento de la expansión de generación y transmisión, y programación de generación en corto plazo. El FPO en comparación con el Flujo de Carga AC trae muchas ganancias, pues atiende todas las restricciones de la red optimizando una determinada función objetivo.

En este trabajo se presenta una metodología de análisis de SEP considerando aerogeneradores del tipo GIRB con control de potencia activa y reactiva [Belati et al., 2013], los aerogeneradores fueron agrupados formando un parque eólico que fue integrado en el sistema estándar IEEE de 30 barras a través de la barra 8, posteriormente fue modelado un algoritmo de FPO con todas las características del sistema y resuelto con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia activa en conjunto con la minimización del desvío de tensión. El algoritmo fue escrito en el lenguaje de programación AMPL [AMPL, 2014] utilizando el solver KNITRO [Knitro, 2014] para obtener la solución.

El trabajo en las siguientes secciones se divide así: la sección 2 describe el modelo de FPO multiobjetivo, la metodología implementada y las herramientas utilizadas en el análisis, en la sección 3 son expuestos los resultados con sus discusiones, y finalmente las conclusiones en la sección 4.

## 2. FLUJO DE POTENCIA ÓPTIMO MULTIOBJETIVO, METODOLOGÍA.

El problema de FPO puede ser presentado de forma general como sigue en la Ec. (1):

*Minimizar*  $f(x)$  sujeto a:

$$\begin{aligned} g(x) &= 0 \\ h(x) &\leq 0 \\ x_{min} &\leq x \leq x_{max} \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

$x$  es el vector de las variables de estado,  $f(x)$  es la función que representa el desempeño del sistema,  $g(x)$  es el conjunto de las ecuaciones de flujo de carga y  $h(x)$  es el conjunto de los límites de las restricciones funcionales del sistema de potencia.

El vector de las variables de estado  $x$  representa las magnitudes de tensión, ángulos de fase y tap's de los transformadores. La función objetivo  $f(x)$  puede asumir diferentes formas, por ejemplo, las pérdidas de potencia o el costo de potencia activa despachada por los generadores; en este trabajo se consideran un FPO multiobjetivo, donde se tiene en cuenta la reducción de pérdidas de potencia activa en la transmisión junto con la minimización del desvío de tensión, Ec. (2); las generalidades del modelo son presentadas en las Ec. (2) a (9).

$$f(x) = \sum_{k=1}^{NL} [g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos \theta_{km}) + \alpha (V_k - 1)^2] \quad (2)$$

Las restricciones de igualdad  $g(x)$  representan las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en las barras del sistema, para las barras sin generación eólica se consideran las siguientes ecuaciones (3) y (4).

$$P_k(x) = P_{GK} - P_{LK} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_k(x) = Q_{GK} - Q_{LK} + Q_k^{sh} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4)$$

Para las barra con generación eólica las restricciones  $g(x)$  se representan de la siguiente manera (5) y (6)

$$P_w(x, v) = P_{Gw} - P_{Lw} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (5)$$

$$Q_w(x, P_w) = Q_{Gw} - Q_{Lw} + Q_k^{sh} = V_k \sum_{m \in k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (6)$$

Donde:

$P_k$  y  $Q_k$  son respectivamente la inyección de potencia activa y reactiva en la barras sin generación eólica,  $P_{GK}$  y  $Q_{GK}$  corresponden a la generación de potencia activa y reactiva para las barras sin generación eólica  $P_w$  y  $Q_w$  son la inyección de potencia activa y reactiva para la barra con generación eólica  $P_{Gw}$  y  $Q_{Gw}$  se relacionan con la generación de potencia activa y reactiva para la barra con generación eólica  $P_{LK}$  y  $Q_{LK}$  son respectivamente la carga activa y reactiva en la barra  $k$ ,  $Q_k^{sh}$  es la inyección de potencia reactiva debido al elemento *shunt* de la barra  $k$ ,  $G_{km}$  es la parte real de los elementos de la matriz de admitancias  $Y_{BUS}$  correspondiente a la línea  $k$  y columna  $m$ ,  $v$  representa la velocidad del viento.

Las restricciones de desigualdad  $h(x)$  representan los límites de inyección de potencia reactiva para las barras sin generación eólica Ecuación (7) y para las barras con generación eólica Ecuación (8), así como los límites en los niveles de tensión Ecuación (9).

$$Q_{GK}^{\min} \leq Q_{GK} \leq Q_{GK}^{\max} \quad (7)$$

$$Q_{Gw}^{\min} \leq Q_{Gw} \leq Q_{Gw}^{\max} \quad (8)$$

$$V_K^{\min} \leq V_k \leq V_K^{\max} \quad (9)$$

Los sobrescritos min y max corresponden a los límites inferior y superior de las variables que deben ser satisfechos en la solución del FPO. Dependiendo del estudio realizado otros objetivos y restricciones pueden hacer parte del modelo de FPO [Baptista et al., 2006].

En este trabajo fue utilizado el lenguaje de programación AMPL y el *solver* KNITRO en la solución del problema. El software AMPL ofrece un ambiente de programación simple para configurar y solucionar problemas de programación matemática, su interface flexible y amigable permite la utilización de diversos *solvers*, que el usuario puede alternar seleccionando las opciones que mejoren el desempeño del programa [AMPL, 2014]. KNITRO es una biblioteca de programas de optimización utilizada para encontrar soluciones tanto para modelos de optimización continua (con y sin restricciones) como modelos de optimización discreta [Knitro, 2014].

Para la solución de problemas de programación no lineal, KNITRO dispone de las siguientes metodologías: Puntos Interiores/Directo, Puntos Interiores/Gradiente Conjugado y la técnica de Conjunto Activo; la solución para el problema planteado toma en cuenta la técnica de Puntos Interiores/Directo [Granville, 1994].

La disponibilidad de potencia activa y reactiva para el parque eólico aplicando el control descrito en [Belati et al., 2013] se presenta en la tabla 1; la potencia reactiva  $Q$  para cada velocidad del viento (más de 9 m/s), puede ser ajustada con un factor de potencia de 1.0 hasta 0.95; estos datos de disponibilidad de generación fueron utilizados para encontrar el polinomio que representa la inyección de potencia activa del parque eólico.

## 2.1. Aproximación de la función de inyección de potencia activa.

Después de conocer la disponibilidad de potencia para el parque conectado en la barra 8 (figura 1A en el apéndice), dentro de la franja de velocidades de viento de 6 [m/s] a 14 [m/s], fue encontrado un polinomio que representa la inyección de potencia activa en función del viento Ecuación (10).

Velocidad [m/s]	$P_{GK}$ [MW]	$Q_{GK}$ [MVar]	$S$ [MVA]	fp
6	16,3	0	16,3	1
7	23,75	0	23,75	1
8	33,85	0	33,85	1
9	64,36	21,33	67,85	0,95
10	80	26,34	84,22	0,95
11	98,55	32,5	103,77	0,95
12	124,24	40,93	130,80	0,95
13	157,32	51,76	165,61	0,95
14	164,64	54,11	173,30	0,95

**Tabla 1:** Disponibilidad de Potencia activa y reactiva para el Parque eólico con control de potencia.

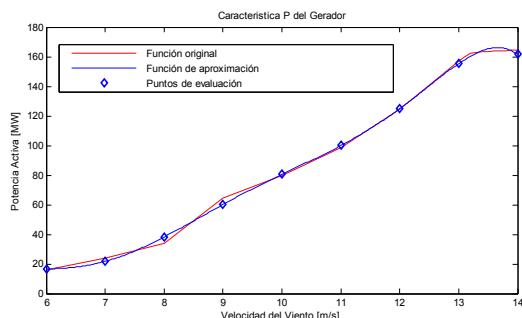
**Fuente.** Tomado de “Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments (A. Méndez-Vilas, Ed. 2013 pp. 525 -535)”

$$P_{GW} = -0.0146591v^6 + 0.82061v^5 - 18.725v^4 + 222.48v^3 - 1447v^2 + 4883v - 6673.3 \quad (10)$$

Donde  $P_{GW}$  es la potencia activa generada por el parque eólico y  $v$  es la velocidad del viento.

La figura 1 representa la gráfica del polinomio.

La función  $P_{GW}$ , Ecuación (10), que constituye la inyección de potencia activa para el parque eólico considerado en el estudio, fue obtenida a través de la herramienta de ajuste de datos (*Basic fitting*) del programa MATLAB; la aproximación de la función puede mejorar en la medida que se disponga de una mayor cantidad de datos.



**Figura 1:** Aproximación de la función de inyección de potencia activa.

**Fuente.** Elaboración propia.

Inicialmente fue graficada la función original teniendo en cuenta la disponibilidad de potencia activa y reactiva mostrada en la tabla 1; esto se hizo considerando 2 vectores,  $x$  y  $y$ , que contienen respectivamente las velocidades del viento para el rango de 6 [m/s] hasta 14 [m/s] y sus correspondientes valores de potencia activa.

Una vez obtenida la curva original es hallada la función de aproximación (línea azul en la figura 1) por medio del ajuste de datos; fue escogido un polinomio de grado 6 en razón de que este presenta el porcentaje de error más bajo con relación a las demás aproximaciones que ofrece la herramienta; como se puede apreciar en la figura 1 el desvió en la función de aproximación se encuentran dentro de un rango aceptable, teniendo esto presente, es posible llevar a cabo el análisis de FPO esperando una respuesta confiable en las simulaciones.

Más allá de tener la opción de realizar un estudio para todos los valores posibles del viento dentro del rango establecido, la importancia de obtener la función de inyección de potencia activa del generador, radica en la posibilidad que se tiene de generalizar los estudios, es decir, no se está sujeto al tipo de generador utilizado o del control aplicado en este, así, en cualquier investigación

que se desee realizar, enmarcada en análisis similares al propuesto, solo bastaría con tener la función de potencia activa del tipo de generador considerado para insertarla en el algoritmo de FPO, que tendría ahora la variable viento como dato de entrada.

### 3. RESULTADOS.

En el estudio fue utilizado el sistema estándar IEEE de 30 barras, los controles aplicados corresponden a los límites de inyección de potencia reactiva y a los límites de tensión en las barras, que se encuentran entre 1.1 y 0.9 en p.u; los transformadores permanecen con tap fijo en 1; otras informaciones del sistema están presentadas en el apéndice.

El objetivo se centró en realizar el despacho de potencia reactiva de la mano de la minimización del desvió de tensión y la reducción de pérdidas de potencia activa.

Una de las restricciones de desigualdad Ecuación (8), presente en el modelo de FPO, hace referencia a los niveles de potencia reactiva ofrecidos por el GIRB, esta disponibilidad fue obtenida teniendo en cuenta los datos de potencia activa arrojados por la función de aproximación y están presentados en la tabla 2.

Considerando un parque eólico conectado en la barra 8 (figura 1A en el apéndice), fueron realizadas simulaciones para las velocidades puntuales del viento desde 6 [m/s] hasta 14 [m/s], teniendo en cuenta los datos de generación presentados en la tabla 2, los cuales hacen parte del modelo de FPO.

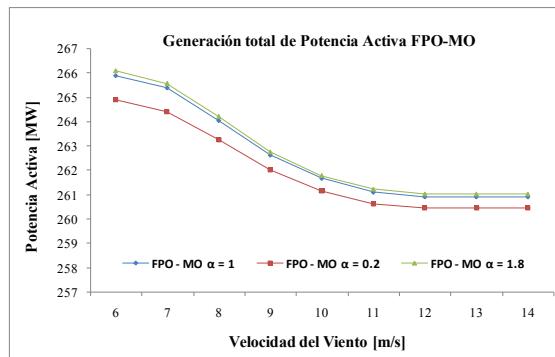
Velocidad del viento [m/s]	P [MW]	FP	Q [MVAr]
6	16.64	1	0
6.5	17.92	1	0
7	21.77	1	0
7.5	28.75	1	0
8	38.24	1	0
8.5	49.09	1	0
9	60.17	0.95	19.78
9.5	70.73	0.95	23.25
10	80.56	0.95	26.48
10.5	90.05	0.95	29.60
11	100.02	0.95	32.88
12	124.99	0.95	41.08
13	155.37	0.95	51.07
14	161.67	0.95	53.14

**Tabla 2:** Disponibilidad de Potencia activa y reactiva para el Parque eólico con la función de aproximación.

**Fuente.** Elaboración propia.

La Ecuación (2) tiene en cuenta un factor  $\alpha$  que multiplica a la función de desvió de tensión; este factor juega un papel importante dentro de la función objetivo, ya que puede tomar diferentes valores dependiendo de la necesidad que se tenga en el análisis del sistema,  $\alpha$  podría aumentar o disminuir en la medida que se requiera dar mayor o menor peso a la optimización del desvió de tensión, con el ánimo de aclarar la función de  $\alpha$  dentro del objetivo planteado en el FPO fueron realizadas simulaciones para los siguientes valores de  $\alpha$  (0.2, 1 y 1.8).

La figura 2 muestra la generación de potencia activa total del sistema.



**Figura 2:** Generación total de Potencia Activa para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Elaboración propia.

De la figura 2 se puede verificar que la generación de potencia activa es directamente proporcional a la reducción de pérdidas como es esperado.

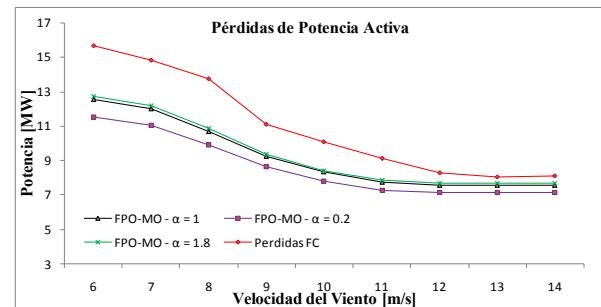
En la figura 3 se presenta una comparación entre los perfiles de tensión para el sistema IEEE de 30 barras modificado, vía flujo de carga (sin considerar optimización) y vía FPO aplicando la optimización multiobjetivo propuesta en este trabajo, el perfil para el flujo de carga fue obtenido con el programa Matpower 4.1. (Versión de prueba).

Se puede ver claramente la mejora en el perfil de tensión cuando es aplicado el FPO multiobjetivo, siendo el mejor caso para  $\alpha=1.8$  y el peor para  $\alpha=0.2$ , este comportamiento del sistema es lógico, dado que se tiene mayor peso en la optimización del perfil al tener un mayor valor del parámetro  $\alpha$ .

Una comparación de las pérdidas de potencia activa vía flujo de carga [Tinney & Hart, 1967] (sin considerar optimización) y vía FPO es presentada en la figura 4. Se puede observar una significativa reducción de pérdidas para todos los valores de  $\alpha$  al

aplicar el FPO multiobjetivo; el mejor caso se presenta para  $\alpha=0.2$ , este comportamiento es justificado dado que para este valor, se tiene mayor peso para la función de minimización de pérdidas dentro del objetivo planteado en FPO. A partir de 12 [m/s] el valor de pérdidas activas

No presenta alteraciones, debido a la cantidad de potencia activa generada para este rango de velocidades la cual es constante. Considerando que la generación de energía eólica tiene un bajo costo por MW/h, esta situación de funcionamiento del sistema puede ser viable, aun si se produjera un aumento en las pérdidas de potencia activa.

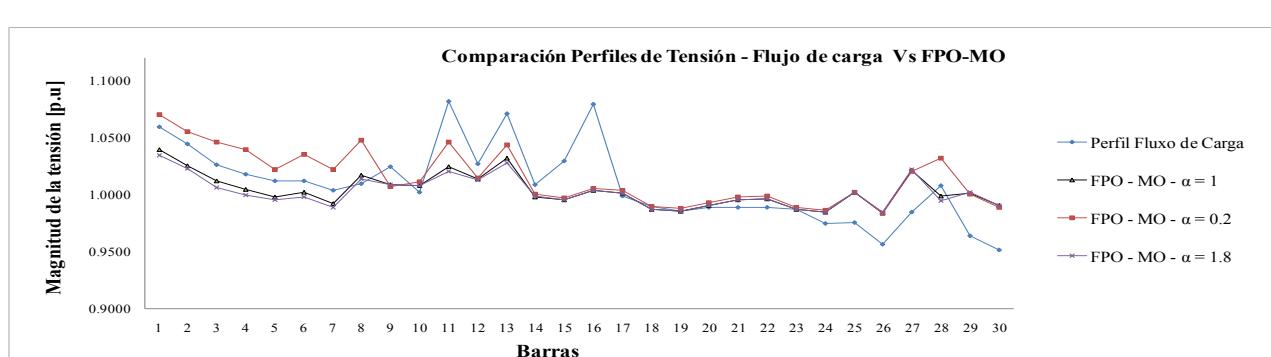


**Figura 4:** Comparación de pérdidas de Potencia Activa - Flujo de Carga Vs FPO – FMO para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Elaboración propia.

Para verificar el porcentaje de ganancia en términos de reducción de pérdidas se presenta una comparación en la tabla 3.

La columna 2 muestra el valor de las pérdidas encontradas por el flujo de carga, las pérdidas obtenidas por el FPO multiobjetivo con un factor  $\alpha=1$  son presentadas en la columna 3, de esta manera el porcentaje de reducción verifica la ganancia al aplicar el análisis de flujo de potencia óptimo.



**Figura 3:** Comparación de los perfiles de tensión a través de Flujo de Carga y FPO –Función Multiobjetivo (FMO).

**Fuente.** Elaboración propia.

Velocidad del viento [m/s]	Perdidas FC [MW]	Perdidas FPO-MO [MW] / $\alpha=1$	Reducción de perdidas [%]
6	15.66	12.51	20.1%
7	14.81	12.01	18.9%
8	13.743	10.67	22.4%
9	11.094	9.25	16.6%
10	10.062	8.30	17.5%
11	9.114	7.73	15.2%
12	8.285	7.54	9.0%
13	8.017	7.54	5.9%
14	8.076	7.54	6.6%

**Tabla 3:** % de reducción de pérdidas activas para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Elaboración propia.

## 4. CONCLUSIONES

El artículo presentó una metodología de análisis para el sistema estándar IEEE de 30 barras con la inserción de generadores eólicos, utilizando un FPO multiobjetivo, buscando reducir las pérdidas de potencia activa en la transmisión y la optimización de los perfiles de tensión.

El FPO puede ser considerado como una excelente herramienta para la realización de una variedad de estudios en sistemas eléctricos de potencia, para encontrar condiciones de operación óptimas que contribuya a un mejor desempeño, generando un impacto directo sobre su planeamiento y operación.

Las simulaciones realizadas en el sistema estándar IEEE de 30 barras muestran que la aplicación del FPO multiobjetivo es una estrategia apropiada para la reducción de pérdidas y la optimización de los perfiles de tensión.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo de la Universidad Federal de ABC (UFABC).

## REFERENCIAS

- AMPL. (13/08/2014). A Modeling Language for Mathematical Programming, disponible en: <http://ampl.com/resources/the-ampl-book/chapter-downloads/> [Accesado el día 13 de agosto de 2014]
- ANEEL. (18/08/2014). Energía Eólica, disponible en: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia\\_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) [Accesado el día 18 de agosto de 2014]
- BAPTISTA, E., BELATI, E. A., SOUSA, V. A. & DA COSTA, G. 2006. Primal-dual logarithmic barrier and augmented Lagrangian function to the loss minimization in power systems. *Electric Power Components and Systems*, 34, 775-784.
- BELATI, E., FILHO, A. S. & SALLES, M. 2013. Analysis of Reactive Power Capability for Doubly-Fed Induction Generator of Wind Energy Systems

Using an Optimal Reactive Power Flow.

GRANVILLE, S. 1994. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 9, 136-146.

HEIER, S. 2006. Grid integration of wind energy, Wiley.

IEO. (07/08/2014). World Energy Outlook 2011, disponible en [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2011\\_web.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2011_web.pdf) [Accesado el día 07 de agosto de 2014]

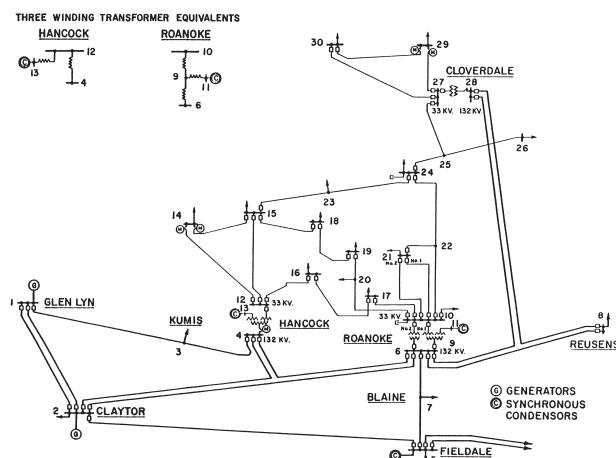
Knitro. (04/08/2014). User's Manual, disponible en: [http://www.artelys.com/uploads/pdfs/Knitro80\\_UserManual.pdf](http://www.artelys.com/uploads/pdfs/Knitro80_UserManual.pdf) [Accesado el día 04 de agosto de 2014]

SGUAREZI FILHO, A. J. & DE OLIVEIRA FILHO, M. E. 2011. A predictive power control for wind energy. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 2, 97-105.

TINNEY, W. F. & HART, C. E. 1967. Power flow solution by Newton's method. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1449-1460.

XU, L. & CARTWRIGHT, P. 2006. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21, 750-758.

## APENDICE



**Figura 1A:** Configuración para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Tomada de [http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg\\_tca30fig.htm](http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/pg_tca30fig.htm)

Barra	P.Gen [MW]	Q.Gen [MVar]	Q.max [MVar]	Q.min [MVar]
1	260.00	-16.00	-50.00	50.00
2	40.00	50.00	-40.00	50.00
5	0.00	37.00	-40.00	40.00
8	Mostrado en la tabla 3	--	Mostrado en la tabla 3	0.00
11	0.00	16.20	-6.00	24.00
13	0.00	10.60	-6.00	24.00

**Tabla 1A:** Barras con generación de potencia - sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Datos tomados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>

De	Para	Resistencia [p.u.]	Reactancia [p.u.]	Suceptancia [p.u.]
1	2	0.0192	0.0575	0.0528
1	3	0.0452	0.1652	0.0408
2	4	0.0570	0.1737	0.0368
3	4	0.0132	0.0379	0.0084
2	5	0.0472	0.1983	0.0418
2	6	0.0581	0.1763	0.0374
4	6	0.0119	0.0414	0.0090
5	7	0.0460	0.1160	0.0204
6	7	0.0267	0.0820	0.0170
6	8	0.0120	0.0420	0.0090
6	9	0	0.2080	0
6	10	0	0.5560	0
9	11	0	0.2080	0
9	10	0	0.1100	0
4	12	0	0.2560	0
12	13	0	0.1400	0
12	14	0.1231	0.2559	0
12	15	0.0662	0.1304	0
12	16	0.0945	0.1987	0
14	15	0.2210	0.1997	0
16	17	0.0524	0.1923	0
15	18	0.1073	0.2185	0
18	19	0.0639	0.1292	0
19	20	0.0340	0.0680	0
10	20	0.0936	0.2090	0
10	17	0.0324	0.0845	0
10	21	0.0348	0.0749	0
10	22	0.0727	0.1499	0
21	22	0.0116	0.0236	0
15	23	0.1000	0.2020	0
22	24	0.1150	0.1790	0
23	24	0.1320	0.2700	0
24	25	0.1885	0.3292	0
25	26	0.2544	0.380	0
25	27	0.1093	0.2087	0
27	28	0	0.3960	0
27	29	0.2198	0.4153	0
27	30	0.3202	0.6027	0
29	30	0.2399	0.4533	0
8	28	0.0636	0.2000	0.0428
6	28	0.0169	0.0599	0.0130

Barra	P. Carga [MW]	Q. Carga [MVAr]
1	0.00	0.00
2	21.70	12.70
3	2.40	1.20
4	7.60	1.60
5	94.20	19.00
6	0.00	0.00
7	22.80	10.90
8	0.00	0.00
9	0.00	0.00
10	5.80	2.00
11	0.00	0.00
12	11.20	7.50
13	0.00	0.00
14	6.20	1.60
15	8.20	2.50
16	3.50	1.80
17	9.00	5.80
18	3.20	0.90
19	9.50	3.40
20	2.20	0.70
21	17.50	11.20
22	0.00	0.00
23	3.20	1.60
24	8.70	6.70
25	0.00	0.00
26	3.50	2.30
27	0.00	0.00
28	0.00	0.00
29	2.40	0.90
30	10.60	19.00

**Tabla 3A:** Datos de carga para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Datos tomados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>

**Tabla 2A:** Datos de línea para el sistema IEEE de 30 barras modificado.

**Fuente.** Datos tomados de <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf30/ieee30cdf.txt>