

Aprovechamiento de la energía eólica en ambientes urbanos

Diego Peña^{1,2} , Julio López² , Pedro Marques¹ 

¹ Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Engenharia Eletrotécnica, Rua. General Norton, de Matos, 2411-901, Leiria, Portugal.

² Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Av. 12 de abril y Loja, 010150, Cuenca, Ecuador.

Autor para correspondencia: degos30@gmail.com

Fecha de recepción: 25 de agosto de 2017 - Fecha de aceptación: 29 de septiembre de 2017

ABSTRACT

This article presents the use of a mixed integer nonlinear programming model (PNLEM) for the optimal operation of the microgrid with the purpose of observing the contribution of the integration of wind energy in urban environments. For this, the parameterization of the wind variables in atmospheric and geographic conditions of the study site was done, using the *Weibull* distribution. The study analyzes a real case of a microgrid composed of residential and commercial loads of a small building in the city of Cuenca. Employment of wind energy in cities includes benefits to mitigate problems in the distribution network such as energy losses and decrease of external energy consumption using specific optimization functions.

Keywords: Wind energy, microgrid, optimization.

RESUMEN

Este artículo presenta la utilización de un modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM) para la operación óptima de la micro red con el fin de observar la contribución que tiene la integración del recurso del viento en los ambientes urbanos. Para ello, se realizó la parametrización de las variables de viento en condiciones atmosféricas y geográficas propias del sitio de estudio, utilizando la distribución de *Weibull*. Se exhibe un caso de estudio real de una micro red conformada por cargas residenciales y comerciales de un edificio pequeño ubicado en la ciudad de Cuenca. El uso de la energía eólica en la parte urbana de la ciudad abarca beneficios para mitigar problemas en la red de distribución como son las pérdidas de energía y la disminución del consumo energético externo de la red mediante el uso de funciones de optimización específicas.

Palabras clave: Energía eólica, micro red, optimización.

1. INTRODUCCIÓN

La micro generación de energía eólica da por tentativa optimista la implementación de este recurso en ambientes urbanos para tener un elevado potencial sustentable que puede contribuir positivamente para los objetivos renovables de un país. Hoy en día, este tipo de micro generación en las ciudades tiene pocos ejemplos de adaptación, ya que el potencial eólico en estas zonas tiene singularidades que dificultan el uso de la energía eólica, entre ellas: altas turbulencia por las obstrucciones que producen los edificios, viviendas, árboles o cualquier tipo de edificación que esté a su alrededor, la cercanía de los equipos con las personas, el ruido, entre otros, que hacen que esta tecnología sea peculiar (Teixeira, 2010). Sin embargo, la tecnología puede funcionar correctamente si se instala en lugares apropiados; además, es una nueva alternativa de producción de energía a consumidores residenciales y comerciales. La adaptación de turbinas eólicas en el medio urbano para la generación de energía es

más sostenible, desde el punto de vista medioambiental, que las fotovoltaicas, como señala Sunderland, Narayana, Putrus, Conlon, & McDonald (2016). En este ambiente, las turbinas de tipo VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) pueden ser mejor aprovechadas que las HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*), por su eje de rotación que está en forma perpendicular con respecto al suelo, lo que hace que acepte el viento en cualquier dirección (Wekesa, Wang, Wei, & Kamau, 2014).

Para su estimación amerita realizar algunos estudios previos de monitoreo, entre ellos, y el más importante, es determinar la velocidad y el potencial que existe en el lugar. Por ejemplo, Karthikeya, Negi, & Srikanth (2016) citan algunos métodos de estimación. En dicho estudio se argumenta que el potencial de viento en áreas urbanas puede ser evaluado utilizando anemometría estándar en el lugar, simulaciones de dinámica de fluidos computacionales (CDF) y experimentos de túnel de viento en el modelo físico de una edificación. De Wit, Stathopoulos, & Wisse (2002) utilizan un factor de escala, tomado en un sitio meteorológico estándar, para estimar el viento en las ciudades, que generalmente está ubicado en un aeropuerto cercano, pero concluyen que sigue siendo necesaria la observación de la velocidad del viento cerca de los tejados o azoteas en el medio urbano para evaluar el viento disponible de mejor forma. Con la finalidad de evaluar este recurso, esto se puede realizar a través de métodos estadísticos, entre ellos, y el de más frecuente uso, es la distribución de *Weibull*, como se indica en Álvarez, Martínez, & Alvarado (2013), ya que proporciona una fuente de información más viable al saber cómo se distribuye la velocidad del viento en términos de frecuencia, en un determinado lugar.

Las redes actuales de distribución eléctrica enfrentan problemas en su operación puesto que, en ciertas circunstancias, trabajan en sus niveles máximos de capacidad, es por ello que surge en los últimos años el prototipo de la micro red, cuya misión es realizar generación a pequeña escala acompañada de un conjunto de cargas, recursos energéticos y dispositivos de almacenamiento de energía en niveles de baja tensión para suministrar electricidad de forma fiable (Solanki, Nasiri, Bhavaraju, Familiant, & Fu, 2016). Una micro red puede operar de dos modos, el primero se puede operar conectado a la red de distribución principal a través del denominado *Point of Common Coupling* (PCC), y, el segundo, en modo aislado. La micro red, al operar en forma aislada, tiene como objetivo principal que el sistema sea lo más autónomo posible, y, al operar conectado a la red de distribución, la minimización del precio de importación de energía y la reducción de pérdidas en la red, son objetivos que con mayor frecuencia se utilizan para la optimización del sistema (Levron, Guerrero, & Beck, 2013). Para lograr estos objetivos, es necesario planificar el sistema de distribución, por ello se han desarrollado estudios para el diseño y optimización de la red, abordando modelos de optimización, ya sea como problemas de programación no lineal entera mixta (PNLEM) o de programación lineal entera mixta (PLEM) (Bautista & Pereira, 2003).

Hoy en día es tendencia la investigación en sistemas de operación para optimizar la operación de las redes y popularizar la penetración de las energías renovables, aportando sus máximos beneficios en forma global (Lara, 2014). En este artículo se expone la estimación del recurso eólico en el lugar de estudio y se realiza la formulación del modelo matemático a través del método *DistFlow*, posterior a esto se presentan los resultados del caso de estudio para, finalmente, emitir las conclusiones.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta sección consta de dos etapas: la primera está constituida por la evaluación del potencial de viento que existe en la ciudad de Cuenca y en la segunda se formula el modelo de optimización matemático, teniendo en cuenta que las variables de decisión y las restricciones estén dentro de los limitantes de capacidad y seguridad asociadas al sistema real. Para la implementación del modelo se utiliza una plataforma de software de base matemática denominada AMPL (*A Mathematical Programming Language*) y al definir un modelo de optimización no lineal entero mixto se resuelve mediante un solver de software *KNITRO*.

2.1. Estimación del recurso eólico

Para poder conocer la disponibilidad del potencial eólico en cualquier zona de estudio, es importante tener un registro de la velocidad de los vientos presentes en el sitio de interés. La ubicación del sitio de estudio es 721175 UTMx y 9679144 UTMy. La cota del sitio es 2,550 m s.n.m. La fecha de monitoreo comenzó el 16 de febrero del 2016 con escala de información temporal, diaria y mensual hasta el 28 de noviembre del 2016. Se realiza la clasificación de velocidades dentro de un rango específico en la Tabla 1, con los datos de registro por hora, para observar con qué frecuencia ocurrió cada una de estas velocidades de viento y determinar el potencial existente de la zona.

Tabla 1. Coordenadas del lugar de medición.

i	Intervalo	Punto medio	Número de datos	Frecuencia
1	<0	0	0	0%
2	[0,1]	0.5	1130	16.7%
3	(1,2]	1.5	2488	36.7%
4	(2,3]	2.5	2186	32.3%
5	(3,4]	3.5	819	12.1%
6	(4,5]	4.5	143	2.1%
7	(5,6]	5.5	4	0.1

Fuente: PROMAS, Universidad de Cuenca

Se procede a calcular los parámetros de *forma y escala* (k y c) para conocer la velocidad media de viento mediante la distribución de *Weibull*. Para ello, se utiliza las funciones de distribución de probabilidad de *MATLAB* para obtener estos parámetros: $k = 2.65$ y $c = 2.41$. *Toolbox Statistics* presenta una herramienta interactiva para el ajuste de distribuciones de probabilidad a conjuntos de datos en *MATLAB*, y, mediante la herramienta interactiva *DFITTOOL*, se puede obtener la función de distribución (CDF) y la función de densidad (PDF) acompañada con los parámetros de distribución, según el tipo de distribución que se esté ajustando el modelo. La función de densidad (PDF) de los datos del sector se ve representada en la Figura 1.

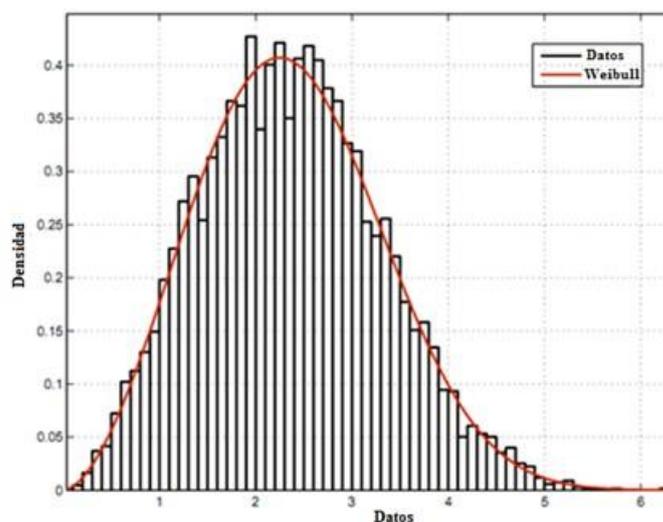


Figura 1. Distribución de *Weibull* del lugar de estudio.

Por lo tanto, la velocidad promedio del lugar de estudio es de 2.4 m/s. Al obtener estos parámetros se puede tener una apreciación a largo plazo del comportamiento del viento en el lugar. No obstante, en este estudio se trabaja solo con 3 días de diferentes épocas del año con referencia a la velocidad promedio, es decir, con promedios diarios inferiores y superiores a 2.4 m/s. La instalación de la turbina se considera a la misma altura de medición ya que está estandarizada para alturas de hasta

15 m. La turbina utilizada de este proyecto es de eje vertical AEOLOS-V con una potencia nominal de 1 kW y un *cut in* (velocidad de arranque) de 1.5 m/s.

2.2. Formulación del modelo

Se formula como un problema de optimización, usando un modelo de programación no lineal entero mixto, incluyendo el recurso del viento en la micro red. Las restricciones se exponen teniendo en cuenta lo planteado en Macedo, Franco, Rider, & Romero (2015) para flujos de carga óptimos, asumiendo las siguientes consideraciones, según como plantea el autor:

- ✓ La carga se representa como potencia activa y reactiva constante.
- ✓ Las pérdidas de potencia activa y reactiva de la rama ij se concentran en el nodo i y nodo j está más próximo a la red de distribución.
- ✓ El sistema es balanceado, por lo que se considera un modelo monofásico.

Bajo las siguientes consideraciones se muestra el sistema radial en la Figura 2.

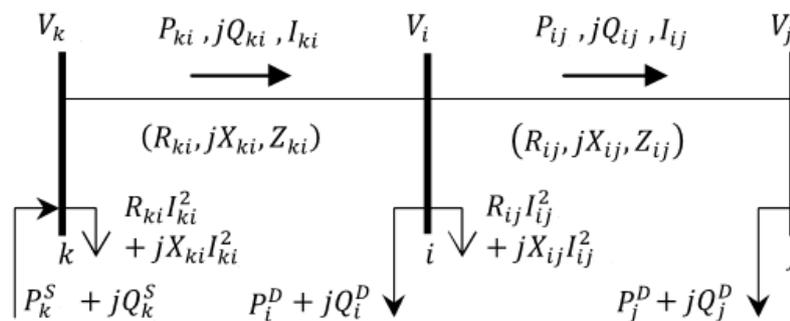


Figura 2. Sistema radial.

donde:

V_i : Magnitud de tensión en el nodo inicial i

V_j : Magnitud de tensión en el nodo final j

I_{ij} : Magnitud de corriente en el tramo i-j

P_{ij}, Q_{ij} : Flujo de Potencia Activa y Reactiva que sale al nudo i hacia el nodo j (kW)

P_{ki}, Q_{ki} : Flujo de Potencia Activa y Reactiva que llega al nudo i y proviene del nodo k (kW)

R_{ij} : Resistencia asociada a la línea i-j

X_{ij} : Reactancia asociada a la línea i-j

Z_{ij} : Impedancia asociada a la línea i-j

2.3. Parámetros del modelo matemático

Son los datos que necesita el modelizador para que el modelo funcione, los cuales están estructurados como se explicó anteriormente.

Conjuntos:

Ω_b : Conjunto de Barras

Ω_l : Conjunto de Líneas

Ω_{wps} : Conjunto de unidades de GD (microturbinas)

Ω_{ss} : Conjunto de unidades de generación SE (Subestación)

Ω_{sd} : Conjunto de unidades de ESD (sistema de almacenamiento de energía)

Parámetros:

i, j, k = Índices de barras

Bus: Número de Barras en el sistema

T: Número de muestras en el periodo de 24 horas

D: Número de Días

Δ_t : Tiempo de duración de la demanda (h)

$S_{i,max}^{SE}$: Límite de potencia máxima aparente de la subestación en la barra i (kVA)

P_i^{d-} ; P_i^{d+} : Potencia mínima y máxima de descarga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kW)

P_i^{c-} ; P_i^{c+} : Potencia mínima y máxima de carga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kW)

E_i^{b-} ; E_i^{b+} : Energía de almacenamiento mínima y máxima del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kWh)

n_i^c ; n_i^d : Rendimiento de carga y descarga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kWh)

kVA_{base} : Potencia Base del sistema

P_i^D : Potencia Activa de la carga en la barra i

Q_i^D : Potencia Reactiva de la carga en la barra i

$P_{i,max}^W$: Potencia Activa máxima suministrada por el aerogenerador en la barra i [KW]

$v_{i,min}$: Magnitud de Tensión mínima en la barra i (V)

$v_{i,max}$: Magnitud de Tensión máxima en la barra i (V)

$I_{i,max}$: Magnitud de Corriente máxima en la barra i (A)

$S_{i,max}$: Potencia Aparente máxima de la subestación (kVA)

c_{SE} : Costo de la energía que proviene de la subestación (\$/kWh)

c_w : Costo de la energía eólica (\$/kWh)

Variables

P_i^{SE} : Potencia Activa generada por la subestación, inyectada en la barra i (kW)

Q_i^{SE} : Potencia Reactiva generada por la subestación, inyectada en la barra i (kW)

P_i^W : Potencia Activa generada por el aerogenerador (kW)

P_i^b : Potencia Activa generada por el dispositivo del almacenamiento (kW)

E_i^b : Energía generada por el dispositivo del almacenamiento (kWh)

P_i^{sd} : Potencia Activa inyectada por el sistema de almacenamiento (kW)

v_i : Magnitud de tensión en barra i (kV)

I_{ij} : Magnitud de corriente en la línea i-j (A)

Variables Binarias

e_i^b : Estado de operación del dispositivo de almacenamiento

2.4. Modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM)

A través del método *DistFlow* explicado anteriormente se formula las ecuaciones que se aplicarán en los casos de estudio teniendo en cuenta la incorporación del sistema de almacenamiento.

- Función objetivo:

$$\text{minimize } z: \sum_i^{SS} \sum_j^D \sum_t^T P_{ijt}^{SE} * c_{SE} * \Delta t \quad (1)$$

- Restricciones:

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d,t} + R_{ij} * I_{ij,d,t}^2) + P_{i,d,t}^{SE} + \sum_{i \in \Omega_{wps}} P_{i,d,t}^W = P_{i,d,t}^D \quad (1)$$

$$\forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d,t} + X_{ij} * I_{ij,d,t}^2) + Q_{i,d,t}^{SE} = Q_{i,d,t}^D \quad (2)$$

$$\forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$V_{i,d,t}^2 - 2(R_{ij} * P_{ij,d,t} + X_{ij} Q_{ij,d,t}) - Z_{ij}^2 * I_{ij,d,t}^2 - V_{j,d,t}^2 = 0 \quad (3)$$

$$\forall i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

$$V_{j,d,t}^2 I_{ij,d,t}^2 = P_{ij,d,t}^2 + Q_{ij,d,t}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d = 1..D, \forall t = 1..T \quad (4)$$

- Límite para variables:

$$V_{i,\min}^2 \leq v_{i,d,t} \leq V_{i,\max}^2 \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d = 1..D, \forall t = 1..T \quad (5)$$

$$0 \leq I_{ij,d,t} \leq I_{i,\max}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d = 1..D, \forall t = 1..T \quad (6)$$

$$0 \leq P_{i,d,t}^w \leq P_{i,d,t,\max}^w \quad \forall i \in \Omega_{wps}, \forall d = 1..D, \forall t = 1..T \quad (7)$$

$$P_{i,d,t}^{SE2} + Q_{i,d,t}^{SE2} \leq S_{i,\max}^{SE2} \quad \forall i \in \Omega_{wps}, \forall d = 1..D, \forall t = 1..T \quad (8)$$

La impedancia de la línea está representada de la siguiente manera:

$$Z_{ij}^2 = R_{ij}^2 + jX_{ij}^2 \quad (9)$$

$$Z_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (10)$$

Las restricciones (2) - (5) representan la formulación del flujo de carga, considerando la inclusión de la producción de la microturbina eólica y la potencia de la batería. Las restricciones (2) y (3) representan el balance de potencia activa y reactiva en cada nodo del sistema para cada periodo del tiempo, la restricción (4) es la magnitud de la caída de tensión en términos de potencia activa y reactiva. Las ecuaciones (6), (7) y (9) garantizan que las variables de decisión siempre estén en sus límites operativos de la red, y, la restricción (8), considera las limitaciones de la producción de energía eólica por parte de la microturbina.

2.5. Caso de estudio

Para la validación del modelo se aplicó un caso real de una micro red en la ciudad de Cuenca, Ecuador, cuyas coordenadas geográficas son: -2.898978, -78.994659, ubicada en la parte centro de la ciudad. El sistema de pruebas se muestra en la Figura 2. La edificación está conformada por cargas residenciales (departamentos) y una comercial (tienda), las cuales están conectadas a un transformador de 15 kVA, propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, el cual pertenece al alimentador 324 (Información facilita en Geoportal¹). La demanda eléctrica de la micro red fue proporcionada por la Centro Sur, cuyos registros están dados cada 10 minutos, en términos de potencia activa y reactiva. El tiempo de medición fue de una semana en el mes de febrero de 2017.

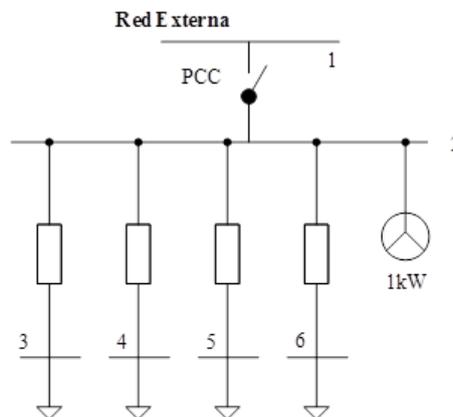


Figura 2. Micro red caso estudio.

¹ Geoportal: Contiene la información general de las Redes Eléctricas propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur acompañada de la cartografía.

La información técnica de la red está dada en la Tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas del lugar de medición.

Línea	Origen	Destino	R (Ω)	X (Ω)	I _{max} (A)
1	1	2	0.0196	0.00604	100
2	2	3	0.0128	0.00085	60
3	2	4	0.064	0.0042	60
4	2	5	0.0768	0.0051	60
5	2	6	0.0204	0.00136	60

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo está planteado para trabajar en el software matemático con 3 tipos de días, cada 10 minutos, estos días corresponden a un día laboral, un día de fin de semana y un día de feriado. Se justifica estos días puesto que son tres típicos ejemplos de consumo de demanda de energía eléctrica que se dan a lo largo del año. La Figura 3 representa la demanda de la micro red, en términos de potencia activa y reactiva.

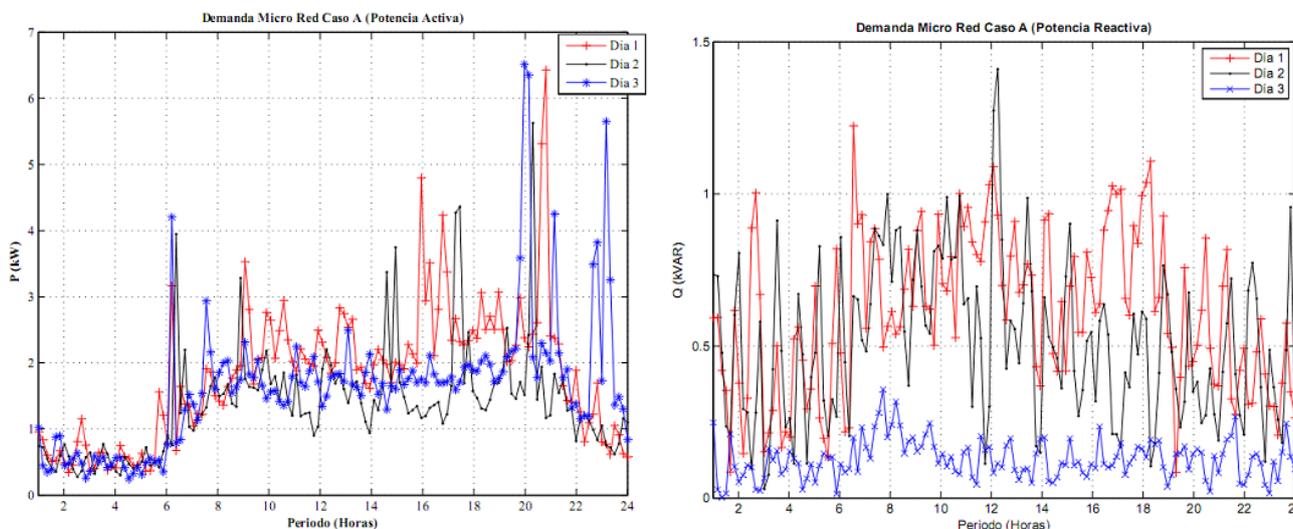


Figura 3. Demanda total de la micro red (Potencia activa y reactiva).

El potencial eólico que se entrega a la micro red se ve representado en la Figura 4, al igual que la demanda, esté también se muestra para 3 días en periodos de 10 minutos, que corresponden a tiempos meteorológicos distintos. Se puede observar cuando el sistema está trabajando con energía eólica su producción a través de una turbina VAWT es minúscula, teniendo sus mayores registros de producción en horas de la tarde, entre las 14:00 y 16:00. La producción máxima que entrega la microturbina está alrededor de los 0.195 kW, que corresponde al día 1.

Con el fin de observar la contribución de la micro generación eólica en la micro red, se trabaja con dos funciones objetivo, las cuales se enumeran a continuación:

1. Minimizar los costos de energía de la red de distribución incluyendo la generación eólica.
2. Minimizar los costos de energía de la red de distribución sin incluir el recurso del viento.

Para el análisis de costo se debe tener en cuenta el tarifario por parte de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad de Servicio Público, que está a cargo de las Empresas Eléctricas de cada ciudad, cuyo costo está relacionado con la tarifa de baja tensión, plan residencial en el cual el costo es de \$0.0945 centavos del dólar (ARCONEL, 2017). Posterior a esto también se considera el precio para la energía eólica, el cual es de 9.13 centavos de dólar (\$0.0913) (CONELEC, n.d.).

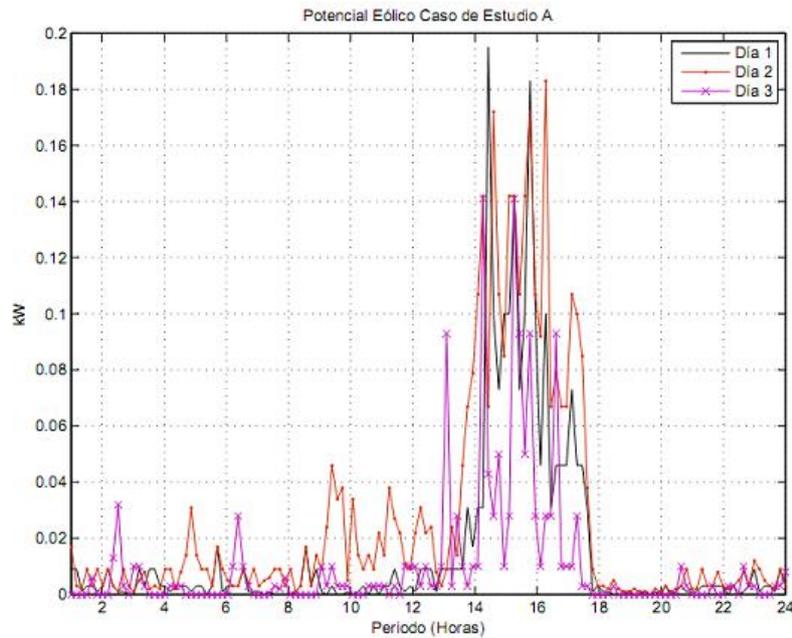


Figura 4. Potencial Eólico para el lugar de estudio.

El modelo entrega el costo de energía de la red de distribución por día cuando se incluye o no el recurso del viento, cuyos valores se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Costo de energía de la red por día.

Día	Sin E. Eólica	Con E. Eólica
1	\$8.09	\$8.02
2	\$6.13	\$6.02
3	\$6.24	\$6.18

Ahora bien, al realizar estas optimizaciones el modelo matemático analiza todas las variables del sistema, incluyendo las pérdidas de potencia que se producen en la red, teniendo los resultados en la Tabla 4 y representado gráficamente en la Figura 5. El día 2 representa el mayor valor de reducción de pérdidas en el sistema.

Tabla 4. Cuadro comparativo de las pérdidas del sistema por día con o sin el recurso eólico.

Día	Sin E. Eólica	Con E. Eólica
1	0.045	0.0153
2	0.0028	0.0089
3	0.0037	0.0104

También se realiza una comparación de la potencia activa entregada por el transformador de la red de distribución, cuando existe el recurso del viento o no esto se ve representado en Figura 6. La línea verde representa al sistema cuando no se trabaja con el recurso del viento, y, la línea azul, cuando sí existe la aportación de microturbina a la red. Se observa que la diferencia es mínima, teniendo valores semejantes de potencia activa debido a que el potencial eólico aportado en la zona es mínimo.

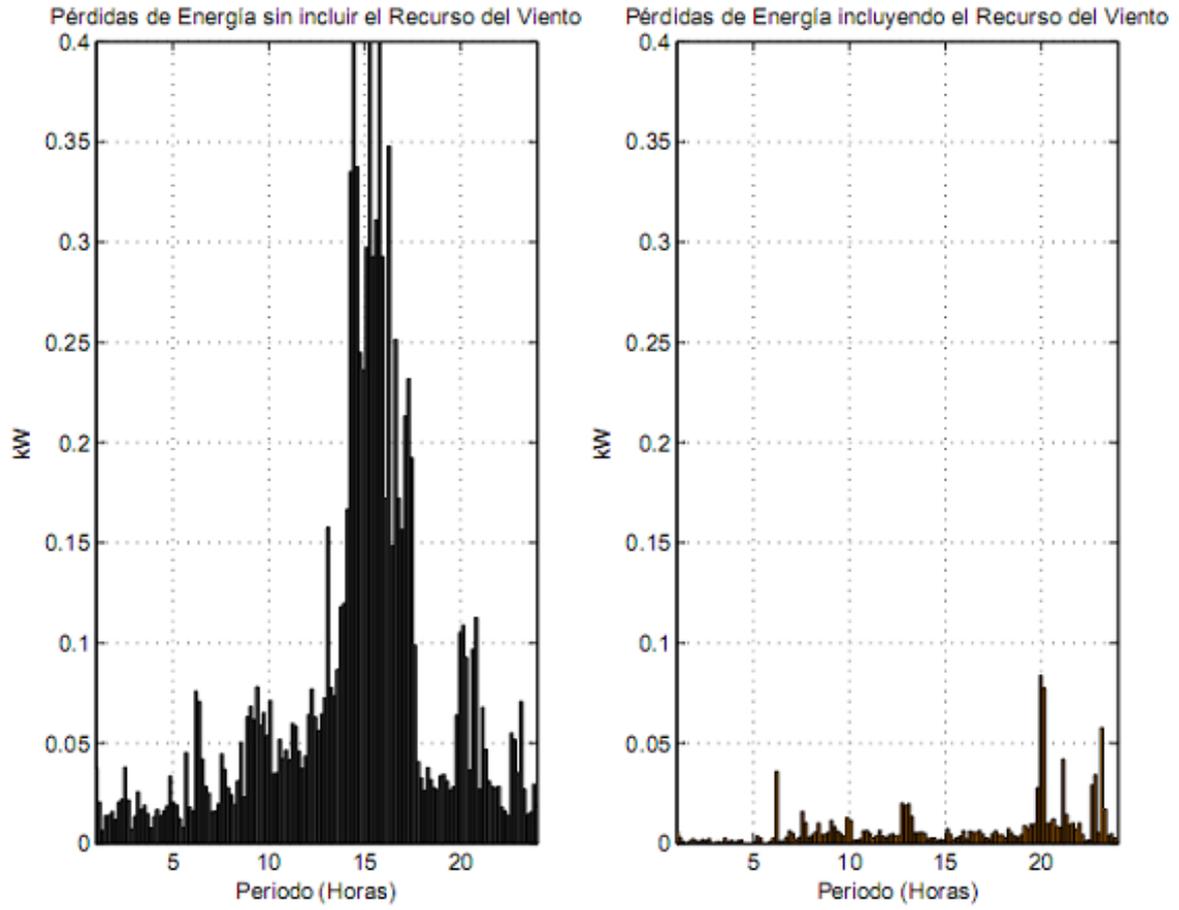


Figura 5. Pérdidas totales del sistema con y sin recurso eólico.

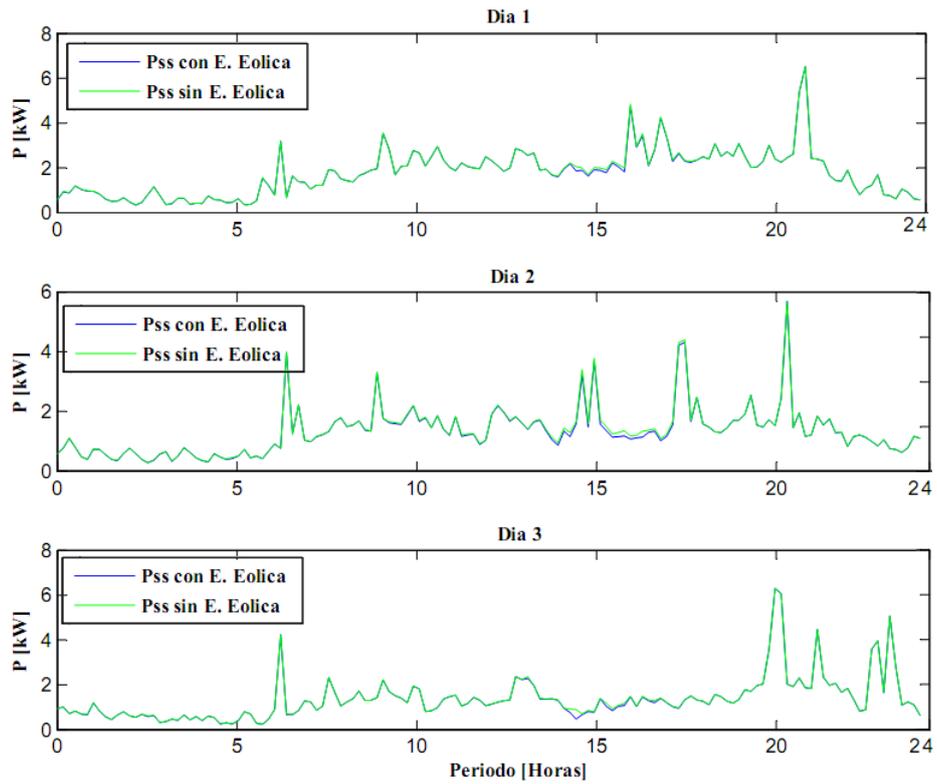


Figura 6. Potencia de la subestación (Pss) con y sin recurso eólico.

4. CONCLUSIONES

El uso de la energía eólica en la parte urbana de la ciudad es una forma de mitigar problemas en la red de distribución y consumo energético, mediante el uso de funciones de optimización. La velocidad promedio registrada en el lugar de estudio fue de 2.4 m/s. El comportamiento de la velocidad del viento a lo largo del día es intermitente y variable, entre las 14:00 y 15:00 es cuando se registran las mayores velocidades de viento. No obstante, el potencial aprovechado por la microturbina es minúsculo, teniendo un máximo valor de 0.19 kW en el día. Al realizar la minimización de costos de energía de la red, se puede observar que la diferencia de costos es mínima cuando se incluye la producción eólica. Sin embargo, la implementación de esta generación aporta provechosamente en las pérdidas de la red, donde sus pérdidas totales se reducen considerablemente. Aunque el potencial eólico aprovechado no sea el máximo, la implementación de esta tecnología en la ciudad tiene importantes beneficios técnicos en la contribución de energía de la red de distribución.

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al programa de becas SENESCYT, Universidad de Cuenca e Instituto Politécnico de Leiria que me ha dado la oportunidad de enriquecer conocimientos y principios imprecios de calidad educativa para que se realice esta investigación.

REFERENCIAS

- Álvarez, W. F., Martínez, L. A., Alvarado, A. C. (2013). *Aplicación de la ecuación de Weibull para determinar el potencial eólico en Tunjá*, Colombia. XX Simposio Peruano de Energía Solar, 11-15 noviembre, Tacna, Perú, 8 p. Disponible en http://www.perusolar.org/wp-content/uploads/2013/12/Alvarez-Casta%3%B1eda-William_-_Aplicacion-Ecuacion-de-Weibull.pdf
- ARCONEL. (2016). *Pliego tarifario para las empresas eléctricas*. 28 p. Disponible en <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/02/Pliego-y-Cargos-Tarifarios-2016-01-02-2016.pdf>
- Bautista, J., Pereira, J. (2003). *Un modelo de PLEM para planificar la distribución de energía eléctrica en entornos urbanos*. V Congreso de Ingeniería de Organización (CIO 2003), Vol. 1, Valladolid-Burgos, Spain. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/258046405_Un_modelo_de_PLEM_para_planificar_la_distribucion_de_energia_electrica_en_entornos_urbanos
- CONELEC. (2004). *Regulación No. CONELEC 004/04* Página 1 de 7. Available at: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/CONELEC-PreciosRenovables3.pdf>
- De Wit, M. H., Stathopoulos, T., Wisse, J. A. (2002). Airport wind speeds used for the design in urban environments: The Eindhoven case. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(11), 1289-1298.
- Karthikeya, B. R., Negi, P. S., Srikanth, N. (2016). Wind resource assessment for urban renewable energy application in Singapore. *Renewable Energy*, 87(1), 403-414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.010>
- Lara, J. D. (2014). *Optimización multiobjetivo en sistemas de distribución con generación distribuida*. Disponible en http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proylic/Lic_2013_II/lic13_03.pdf
- Levron, Y., Guerrero, J. M., Beck, Y. (2013). Optimal power flow in microgrids with energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3226-3234.

- Macedo, L. H., Franco, J. F., Rider, M. J., Romero, R. (2015). Considering energy storage devices. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(6), 2825-2836.
- Solanki, A., Nasiri, A., Bhavaraju, V., Familiant, Y. L., (2016). A new framework for microgrid management: Virtual droop control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), 554-566.
- Sunderland, K. M., Narayana, M., Putrus, G., Conlon, M. F., McDonald, S. (2016). The cost of energy associated with micro wind generation: International case studies of rural and urban installations. *Energy*, 109(15), 818-829. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.045>
- Teixeira, A. R. P. A. (2010). *Micro-turbinas instaladas em ambiente urbano*. Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 85 p. Disponible en http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/9259/1/ulfc104497_tm_Ana_Raquel_Teixeira.pdf
- Wekesa, D. W., Wang, C., Wei, Y., Kamau, J. N. (2014). *Wind resource assessment and numerical simulation for wind turbine airfoils*. 15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM), 9 p. Disponible en <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6920224>