

# OPTIMIZACIÓN DIFUSA MULTI OBJETIVA EN LA PLANIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA<sup>1</sup>

EDMUNDO R. VERGARA MORENO, JENNY M. ROJAS JERÓNIMO<sup>2</sup>,  
FRANCISCO E. RODRÍGUEZ NOVOA<sup>3</sup>

**Resumen.** En este trabajo se formula un modelo de optimización multiobjetiva para la planificación de un centro de generación eólica que maximiza el ingreso y minimiza los desequilibrios de los costos de oferta. La estrategia de la solución que se utiliza está basada en la teoría de optimización difusa, en la que se utiliza la función de pertenencia lineal

**Palabras clave:** optimización multiobjetiva, energía eólica, optimización difusa.

1. **Introducción.** Entre los problemas de hoy y del mañana que preocupa a la humanidad es la generación de la energía. Se proyecta que la demanda de energía en 2035 será 53% mayor de lo que fue en 2008 [4, 6], mientras que el crecimiento de la producción estimada para este periodo está por debajo de la demanda, esto fundamentalmente por la reducción de reservas fósiles que representa el 80% de materia prima para la producción de energía, y por el poco crecimiento de producción de energías provenientes de otras fuentes alternativas como las de energías renovables [7]. Otro problema asociado con la producción de la energía proveniente de los fósiles es el alto porcentaje de contaminación, 20 veces superior al de las energías renovables [12]. En consecuencia las investigaciones de largo alcance deben estar orientadas a generar ciencia y tecnología encaminadas al incremento de la producción de energías renovables.

Se denomina fuentes de energía a todos aquellos elementos y recursos naturales capaces de generar energía. En este sentido y en función de su inagotabilidad se clasifican en fuentes de energías renovables y no renovables. Las *fuentes de energías no renovables*, corresponden a aquellas cuyas reservas son limitadas y, por lo tanto, disminuyen a medida que se utiliza: por ejemplo, el petróleo o el carbón; a medida que las reservas se van gastando aumenta el costo de la extracción (energía de los combustibles fósiles y energía nuclear). Las *fuentes de energía renovables*: son las procedentes de cualquier proceso que no altere el equilibrio térmico del planeta, que no genere residuos irrecuperables y que su velocidad de consumo no sea superior a la velocidad de regeneración de la fuente energética de la materia prima utilizada del mismo [6, 12, 15].

Entre las principales energías renovables son: Energía Eólica, provenientes del viento; Energía Hidráulica, proveniente del agua; Energía Solar, proveniente de los rayos del sol; Energía Procedente de la Biomasa, proveniente de diferentes tipos de materia orgánica; Energía Geotérmica, proveniente de la energía calorífica que la Tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre; Energías provenientes de las olas del mar [1].

---

Proyecto de Investigación desarrollado en la Universidad Nacional de Trujillo, con el código 24041332132.

<sup>2</sup> Departamento de Matemáticas – Universidad Nacional de Trujillo. {[edmundovergara@gmail.com](mailto:edmundovergara@gmail.com), [jmrojas0@yahoo.es](mailto:jmrojas0@yahoo.es)}.

<sup>3</sup> Departamento de Industrial - Universidad Nacional de Trujillo, [frarono@yahoo.com](mailto:frarono@yahoo.com)

De entre las energías renovables, la eólica es la que más se ha desarrollado en los últimos años con un crecimiento anual promedio de 60%, y el costo de producción se ha reducido en 80% en 10 años, debido a la evolución del diseño de los aerogeneradores, de 50 kW en 1990 ha pasado hasta 7.5 MW de producción. En este desarrollo han contribuido por un lado, las investigaciones en la mejora de los materiales de las turbinas (más ligeros y resistentes) y, por otro, la electrónica de control, además de la optimización de diseño y la capacidad para operar a velocidad variable, permitiendo pasar de una disponibilidad del 60% en la década de 1980 al 98% actual, lo que ha aumentado el rendimiento de una manera significativa [12, 11].

La mayor cantidad de energía eólica generada proviene de los parques eólicos que se encuentran distribuidos a lo largo del campo. Sin embargo, existen otras infraestructuras distintas para aprovechar la energía del viento. La microgeneración eólica o aerogeneradores de eje vertical, los parques situados mar adentro (off-shore), y los diseños innovadores como son la generación de energía por medio de cometas y el aprovechamiento de la vibración generada por el viento por medio del Windbelt, son otras formas de infraestructura de aprovechamiento del viento.

La producción de este tipo de energía se debe a que la masa de aire en movimiento es energía cinética que puede ser transformada en energía eléctrica. Al incidir el viento sobre las palas de una aeroturbina se produce un trabajo mecánico de rotación que mueve a su vez un generador para producir electricidad.

Pese a todos logros alcanzados siguen existiendo diferentes tipos de problemas asociados con la generación de la energía eólica. Entre los problemas fundamentales está la variabilidad del viento, que provoca, que tanto la potencia activa como reactiva generada por los aerogeneradores varíe, provocando a su vez una variación en el resto de los parámetros del sistema como la tensión y la frecuencia. A medida que aumenta la potencia eólica instalada en un determinado punto del sistema las afectaciones cercanas a ese punto serán mayores, hasta llegar a una pérdida de la estabilidad y un posible colapso del sistema completo o de una parte del mismo [8]. Asociado a esta situación y otros factores del sistema, también está la pérdida de la energía, rendimiento no óptimo, etc [10].

Otra consecuencia de la variabilidad del viento está la variabilidad de oferta de energía eólica al consumidor, porque no es posible ofertar al mercado una cantidad exacta y por un periodo prolongado. Esto hace la necesidad de modelar el comportamiento del viento o la cantidad de oferta y su precio por periodos cortos. En este sentido existen algunas propuesta de estrategias óptimas de licitación para el comercio de la energía eólica en el mercado de corto plazo. Bathurst et al. [2] propusieron un método de Markov como minimizar el costo de desequilibrio esperado para decidir el mejor nivel de contrato de energía eólica, donde se requiere la tabla de probabilidad para cada hora en términos de banda de oferta actual de energía, y varios pronósticos de retraso. Fabbri et al. [9], Usaola y Angarita [17], y Pinson et al. [15] propusieron estrategias basadas sobre la función de densidad de probabilidad para la predicción de la energía eólica para determinar los errores de la incertidumbre de los pronósticos. Matevosyan y Söder [13] utilizaron el modelo de simulación de escenario ARMA para la predicción de los errores de velocidad del viento y formularon un problema de Programación lineal entera mixta. Galloway et al. [10] discutieron diversos métodos de evaluación de riesgos y propusieron que la estrategia de la función de utilidad es más efectiva que lo métodos de valor esperado o varianza media.

En sistemas complejos como en este caso las formulaciones matemáticas conducen a modelos de optimización multiobjetivo, las mismas que se pueden resolver por medio de los métodos de ponderación, metas y por el método difuso que recientemente se ha diseñado [5, 18, 19]. Pero teniendo en cuenta que los modelos de este tipo contienen variables enteras y no enteras, se tendrá que hacer uso de los métodos de la programación entera mixta [3].

En todos los trabajos anteriores la formulación matemática utilizada incluye un solo objetivo. En este sentido, este trabajo propone una estrategia de oferta multiobjetiva, formulado como un problema optimización lineal mixta y resolverlo mediante un esquema de optimización difusa.

2. **Modelo matemático.** En las transacciones de energía proveniente de la fuente eólica, debido a las fluctuaciones de la fuerza y velocidad del viento, tanto los precios de oferta así como los precios de compra también fluctúan, por lo que no responden a modelos clásicos de la oferta y demanda. Esto implica la necesidad de elaborar modelos específicos. Por tal razón en algunos lugares se reporta los precios (P) y cantidad (Q) cada 4 horas, y en otros lugares se reportan múltiples precios y cantidades. En consecuencia en este trabajo se analiza el problema de la oferta (subasta-licitación) en una hora. repitiendo el proceso durante las 24 horas, se completará el análisis diario.

A diferencia de transacciones bilaterales un mercado de día anterior es un mercado de operaciones a corto plazo. En un mercado de un solo lado (unilateral) de oferta, solo los ofertantes asisten a la licitación, mientras que en un mercado de doble lado, ambos, los proveedores y los consumidores pueden hacer una oferta en el mercado.

Los precios de equilibrio de un mercado son de dos tipos, precios uniformes que se pagan según la oferta de los precios, sin embargo, la mayoría de los mercados eléctricos, adoptan un precio uniforme en el que cada postor admitido paga el precio del bloque de oferta marginal, independientemente de su precio de licitación.

La energía eólica es considerada como un fijador de precios en un mercado; pues a menudo no se le permite al productor de energía eólica hacer ofertas de precios y cantidades (P/Q) múltiples como con combustibles fósiles. Desde este aspecto, las estrategias óptimas para la licitación de energía eólica tratan mayormente con cantidades inciertas, mientras que para generadores convencionales se centran principalmente en la incertidumbre de los precios y la información de otros licitadores.

Sea  $c$  el precio al contado,  $c^+$  el precio en caso de la sobreproducción y  $c^-$  la penalidad por subproducción, los cuales pueden ser determinados de los datos históricos o determinados mediante modelos de predicción. No se considerará la penalización de la sobreproducción. Aunque existen diferentes modelos de precios de desequilibrio que depende de las diferentes reglas de regulación del mercado, una relación razonable entre estos precios puede ser expresado simplemente mediante la siguiente inequación:

$$0 \leq c^+ \leq c \leq c^-$$

2. 1 **Problema Inicial.** La energía eólica es considerado como un proceso aleatorio y no lineal [14]. El licitador dispone de un histograma de probabilidad de pronóstico de la forma que se muestra en la figura 1.

Formulamos el problema en un enfoque multiobjetivo, que maximice los ingresos  $z_1$  y minimice  $z_2$  el desequilibrio del costo esperado como sigue:

$$\text{Max } z_1 = cP_b$$

$$\text{Min } z_2 = E[Z_2] = \sum_{m=1}^M \Delta_m p_m$$

$$\text{Donde } \Delta_m = \begin{cases} (P_b - P_m)c^+, & P_b \leq P_m \\ (P_b - P_m)c^-, & P_b > P_m \end{cases}$$

$$\text{Sujeto a } 0 \leq P_b \leq P_{\max}$$

Donde  $P_b$  es la variable de decisión para la energía eólica agregada en un parque eólico o en multiples aerogeneradores, y  $P_m$  y  $p_m$  son los  $m$ -th segmento o banda de energía pronosticada y probabilidad respectivamente.

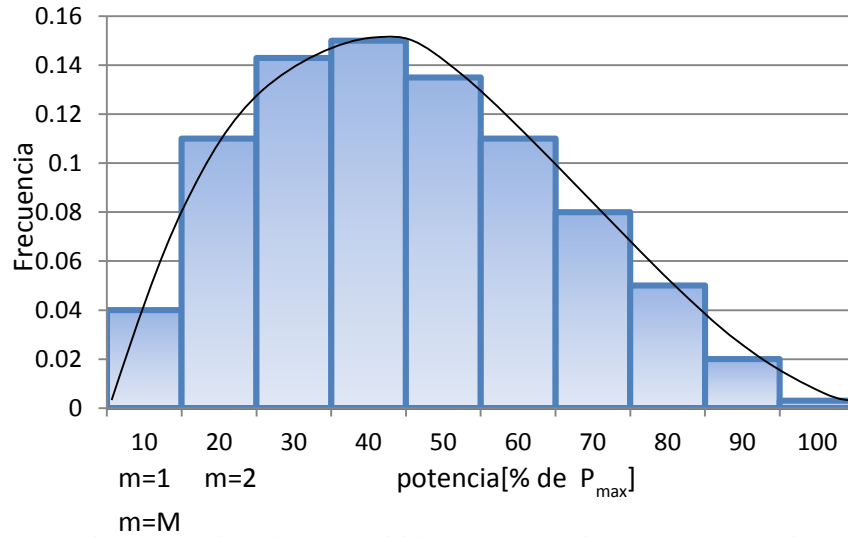


Fig. 1. Un ejemplo probabilidad de pronóstico de energía eólica.

**2.2 Formulación como programación lineal entero mixto.** El problema inicial es transformado a un problema de programación lineal entera mixta (PLEM) de tal manera que sea adecuado para resolver con métodos de optimización.

La formulación PLEM está dado por las ecuaciones de 1 a 8:

$$\text{Max } z_1 \quad (1)$$

$$\text{Min } z_2 = \sum_{m=1}^M (d_m^+ c^+ + d_m^- c^-) p_m \quad (2)$$

$$\text{Sujeta a: } d_m^+ \geq U_m N + (P_b - P_m), m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$d_m^+ \geq (1 - U_m) N + (P_b - P_m), m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

$$d_m^- \geq (P_b - P_m), m = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$d_m^- \geq 0, m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

$$0 \leq P_b \leq P_{max} \quad (7)$$

$$0 \leq U_m \leq 1, m = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

Donde  $U_m$  es un entero, y  $N$  es una constante negativa relativamente grande comparado con  $P_{max}$ , por ejemplo  $-10^6$ .  $d_m^+$  y  $d_m^-$  son variables dependientes introducidos para representar las expresiones condicionales en el problema original.

**2.3 Formulación difusa.** Para resolver el problema multiobjetivo se utiliza la técnica de optimización difusa. Aquí se transforma dos funciones objetivos de tipo clásico en funciones

objetivos difusas en términos de funciones de pertenencia, luego introducimos una variable  $\lambda = \min(u_{z_1}, u_{z_2})$  que se maximiza.

Primero se define el vector de variables de decisión como:

$$X = [P_b \quad D^+ \quad D^- \quad U \quad \lambda]^T$$

Donde  $D^+ = [d_1^+ \quad d_2^+ \quad \dots \quad d_M^+]$ ,  $D^- = [d_1^- \quad d_2^- \quad \dots \quad d_M^-]$ ,  $D^+ = [U_1 \quad U_2 \quad \dots \quad U_M]$ ,

El conjunto difuso para  $z_1$  y  $z_2$  son definidos como sigue:

$$\tilde{Z}_1 = \{[z_1(X), \mu_{z_1}(X)], a_1 \leq z_1(X) \leq b_1\}$$

$$\tilde{Z}_2 = \{[z_2(X), \mu_{z_2}(X)], a_2 \leq z_2(X) \leq b_2\}$$

Donde  $z_1(X) = cX$ ,  $z_2 = \sum_{m=1}^M (d_m^+ c^+ + d_m^- c^-) p_m$



Fig. 2. Funciones de pertenencia de ingresos y penalidad

Sus funciones de pertenencia son definidas lineales como sigue y que se muestra en la figura 2.

$$\mu_{z_1}(X) = \frac{z_1(X) - a_1}{b_1 - a_1}, \quad \mu_{z_2}(X) = \frac{b_2 - z_2(X)}{b_2 - a_2}$$

Donde  $a_1 = c(\alpha P_{max})$   $a_2 = c^+ \sum_{m=1}^M (\alpha P_{max} - P_m) p_m$

$$b_1 = c(\beta P_{max}) \quad b_2 = c^- (\beta P_{max} - P_m) p_m$$

$$0 \leq \alpha \leq 1.0 \quad \text{y} \quad 0 \leq \beta \leq 1.0$$

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  pueden modelar la actitud del oferente respecto al riesgo. La elección más baja (menor) es  $\alpha=0$  y  $\beta=1.0$ .

La formulación final es representado como:

Maximizar  $\lambda$

Sujeta a:

$$\lambda \leq \mu_{z_1}(X)$$

$$\lambda \leq \mu_{z_2}(X)$$

y restricciones de (3) a (8)

**3. Soluciones.** Aquí se presenta las soluciones analíticas y gráficas.

**3.1 Solución analítica.** Para pronóstico con pequeños números de segmentos, la solución óptima se puede determinar analíticamente.

$$\mu_{z1}(P_b)=\mu_{z2}(P_b) \Rightarrow P_b=P_b^*, \text{ esto es } \frac{Z_1(P_b)-a_1}{b_1-a_1} = \frac{b_2-Z_2(P_b)}{b_2-a_2}$$

Esto conduce a

$$Z_1(P_b)+\gamma Z_2(P_b)=a_1+\gamma b_2 \tag{9}$$

Donde  $\gamma = \frac{b_1-a_1}{b_2-a_2}$ .

Para un punto de pronóstico, habrá 2 ecuaciones en (9); para dos puntos de pronóstico, habrá 3 ecuaciones en (9). Dado la cota superior y la cota inferior de la subasta las ecuaciones anteriores pueden ser resueltas para encontrar la subasta óptima de la potencia después de abandonar las soluciones impropias, los cuales son inconsistentes con las condiciones.

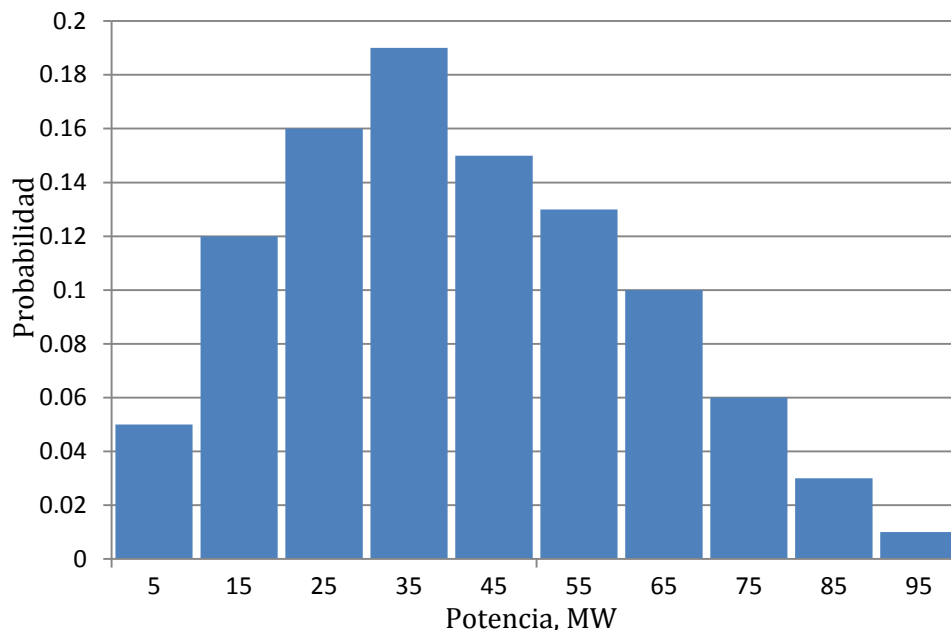


Fig. 3. Histograma del pronóstico de la potencia eólica, 10 bandas

**3.2 Caso de estudio – soluciones numéricas y gráficas.** Se considera dos casos hipotéticos. Caso 1 (Fig. 3) con la probabilidad de pronóstico de 10 bandas para un parque eólico de 100MW y Caso 2 (Fig. 4) con pronóstico de 20 bandas. El modelo se resuelve utilizando el software LINGO.

Se considera que el precio de mercado es \$30/ MWh, la sobreproducción es recargado en \$10/MWh, y la subproducción es cargado en un costo de \$60/MWh. Las tablas 1 y 2 presentan los resultados óptimos para la elección de varios rangos de licitación. El ingreso esperado considerando los costos de desequilibrio pesado se muestran también en las tablas. En ellas se encuentra el ancho del rango de licitación más riesgoso pero con mayor ingreso esperado.

La Figura 5 muestra la solución gráfica de las curvas de optimización.

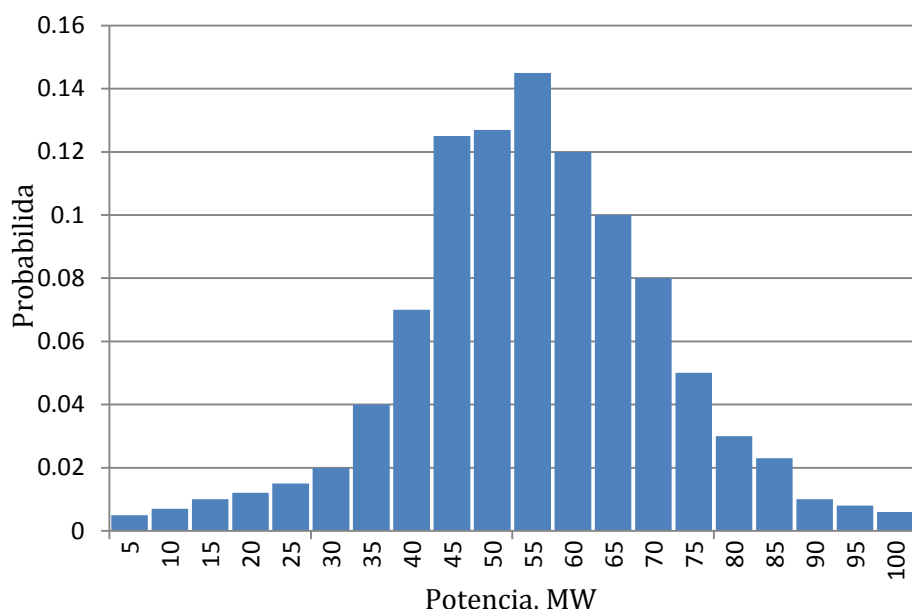


Fig. 4. Histograma del pronóstico de la potencia eólica, 20 bandas.

Tabla 1. Niveles óptimas de licitación para pronósticos de 10 bandas

$\alpha$ -- $\beta$	$P_b^*$	$E[Z_1-wZ_2]$	w
0.0 -- 1.0	59.0	\$ 1045	0.60
0.1 -- 0.9	56.1	\$995	0.65
0.2 -- 0.8	53.1	\$974	0.67
0.3 -- 0.7	50.2	\$954	0.69
0.4 -- 0.6	47.7	\$941	0.70

Tabla 2. Niveles óptimas de licitación para pronósticos de 20 bandas

$\alpha$ -- $\beta$	$P_b^*$	$E[Z_1-wZ_2]$	w
1.0 -- 1.0	62.2	\$ 1341	0.65
1.1 -- 0.9	59.2	\$1324	0.68
1.2 -- 0.8	56.0	\$1314	0.70
1.3 -- 0.7	52.7	\$1275	0.78
1.4 -- 0.6	49.2	\$1263	0.82

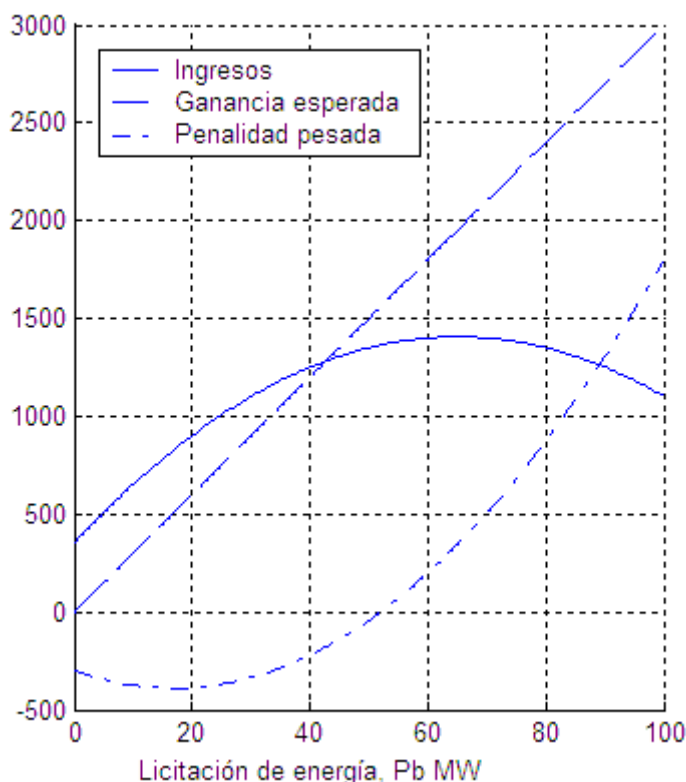


Fig. 5: Soluciones gráficas para caso de pronóstico de 20 bandas, con  $\alpha=0.3$ ,  $\beta=0.7$ .

**4. Conclusiones.** Se muestra que en una modelación basado en pronóstico en un corto plazo, el ingreso y las utilidades esperadas son crecientes por tanto favorables para los productores de energía eólica, las que serán atraídos para lanzar sus ofertas en un mercado de corto plazo. Sin embargo hacer una oferta basada en la predicción puede resultar en costos de desequilibrio sustancial si la variabilidad del viento es muy alto, y que la probabilidad de pronóstico no toma en cuenta el pronóstico de la incertidumbre y el control de riesgos. Por esta razón en este trabajo se ha propuesto una estrategia basada en optimización difusa, con la maximización del beneficio por los productores independientes de energía eólica y de aliviar la incertidumbre, logrando una mejor solución. Un trabajo para el futuro incluye la validación del método utilizando datos de campo de parque eólico y mayor consideración de la forma lineal o lineal por tramos para la función de pertenencia.

## 5. Referencias Bibliográficas

- [1] AMUNDARAN, M. 2012. *La energía removable procedente de las olas*. Ikastorratza. e-Revista de Didáctica 8. ([http://www.ehu.es/ikastorratza/8\\_alea/energia/energia.pdf](http://www.ehu.es/ikastorratza/8_alea/energia/energia.pdf)).
- [2] BATHURST, G.N., WEATHERILL, J. y STRBAC, G. (2002). *Trading wind generation in short term energy markets*. IEEE trans. Power syst., vol. 17, No. 3, 782-789.
- [3] COBOS, D. 2003. *Modelos de optimización entera mixta no lineal en sistemas de transporte de gas natural*. Tesis de Maestría. Universidad de León, México.



- [4] DARIO, R. 2011. *Hacia una concepción humanista de la gestión social para el desarrollo humano*, en *Gestión Social para el Desarrollo Humano*, ed. Velásquez V.M. et al. Bogotá-Colombia, Pág.41-50
- [5] DE OLIVEIRA, H.; VERGARA MORENO, E.; PEREIRA, M. 2008. *Multiobjective optimization of economic balances of sugarcane harvest biomass*. Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.), v.65, n.5, p.561-564.
- [6] EIA(U.S. Energy Information Administration), 2011. *International Energy Outlook 2011*. ([www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2011).pdf), Consultado el 21 de abril de 2012).
- [7] EIA(U.S. Energy Information Administration), 2012. *Short-Term Energy and Summer Fuels Outlook, April 2012*. ([http://www.eia.gov/forecasts/steo/pdf/steo\\_full.pdf](http://www.eia.gov/forecasts/steo/pdf/steo_full.pdf), Consultado el 22 de abril de 2012).
- [8] ESCRIBANO, G. 2012. *Desarrollo Energético Sostenible y Energías Renovables*. ICE-La Cooperación Financiera en España, No. 864, 73-85.
- [9] FABBRI, A., ROMAN, T.G.S. ABBAD, J.R. Y QUEZADA, V.H.M. 2005. *Assessment of the cost associated with wind generation prediction errors in a liberalized electricity market*. IEEE Trans. Power Syst. Vol no. 3, 1440-1446.
- [10] GALLOWAY, S., BELL, G. BURT, G., MCDONALD, J. y SIEWIERSKI, T. *Managing the risk of trading wind energy in a competitive market*. IEEE Proc. Gener. Transm.Distrib., vol. 153, no. 1, 106-114.
- [11] GWEC – Global Wind Energy Council. (2012). In: Sawyer, S. *Global Wind 2011 Report*, First Edition, March 2012, Belgium, 2012. Disponible en: <http://www.gwec.net>. Consultado en 28/04/2010).
- [12] INDURAIN, F. 2005. *Energía: presente y futuro de las diversas tecnología*. Academia de Ciencias y Artes, España. ([www.academiaeuropea.org/pdf/ energia presente y futuro de las diversas tecnologías](http://www.academiaeuropea.org/pdf/energia_presente_y_futuro_de_las_diversas_tecnologias), Consultado el 22 de abril de 2012)
- [13] MATEVOSYAN, J. y SÖDER, L. 2006. *Minimization of imbalance cost trading wind power on the short-term power market*. IEEE Trans. Power Syst. Vol. 21. No. 3, 1396-1404.
- [14] PINSON, P., CHEVALLIER, C. Y KARINIOTAKIS, G.N. 2007. *Trading wind generation from short-term probabilistic forecast of wind power*. IEEE Trans. Power Syst. Vol. 22 no. 3, 1148-1156.
- [15] PNUD (Programa de las Naciones Unidas Para el Desarrollo). *Informe sobre desarrollo humano 2011: Sostenibilidad y equidad*. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
- [16] TORRES, J. 2012. *La educación en el desarrollo integral de Corea del Sur: una revisión sistemática en la década comprendida entre 1999 y 2010*". Contribuciones a las Ciencias Sociales, Vol.17: 1-20. ([www.eumed.net/rev/cccss/17/](http://www.eumed.net/rev/cccss/17/), consultado el 6 de abril, 2012).
- [17] USAOLA, J., ANGARITA, J. 2007. In Pro. Int. Conf. Clean Elec. Power (ICCEP'07) Capri, Italy, may 21-23, 754-759.
- [18] VERGARA MORENO, Edmundo, RODRIGUEZ NOVOA, Francisco y SAAVEDRA SARMIENTO, Hugo. *Métodos de optimización lineal difusa para la planificación nutricional en granjas avícolas*. Mosaico Cient, jul./dic. 2006, vol.3, no.2, p.16-29. ISSN 1817-8391.
- [19] VERGARA-MORENO, E. 2005. *Técnicas difusas en la optimización multiobjetivo*. En proceedings de SELASI, 43-53.