

Optimización del Despacho Económico de una Micro Red utilizando Árboles de Decisión

Santiago BOTERO, Tatiana JIMENO, Jorge-Wilson GONZÁLEZ

*Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir. 1 #70-01, B11, Medellín
santiago.botero@upb.edu.co*

Resumen: Se presenta una recopilación de la historia y desarrollo de las energías renovables, las micro redes, la teoría de optimización y árboles de decisión. Posteriormente se expone un análisis del funcionamiento de los distintos tipos de generación, las variables que rigen su comportamiento y sus modelos de costo, permitiendo su integración con el método de optimización para plantear un algoritmo que simule el despacho económico de una micro red y permita predecir el costo de la energía generada. *Copyright © UPB 2015*

Palabras clave: Micro redes, optimización, despacho de potencia, fuentes renovables de energía, árboles de decisión. Función de costo

Abstract: A compendium of the history and development of renewable power generation, microgrids and optimization theory is presented with particular emphasis on the decision trees method. Subsequently, an analysis of different generation methods is exposed, explaining the variables that govern their behavior and their cost models, allowing its integration with the optimization method proposed in order to create an algorithm to simulate the economic dispatch of a microgrid, with the capacity to predict the future cost of energy.

Keywords: Microgrids, optimization, power generation dispatch, renewable energy sources, decision trees.

a2015-05-13, r2015-05-13, s2015-04-25

1. INTRODUCCIÓN

El mundo contemporáneo enfrenta el reto de mitigar los efectos del cambio climático reduciendo los niveles actuales de contaminación. Para tal fin se hace necesario buscar nuevas configuraciones de redes eléctricas con fuentes de generación renovables, que permitan suplir la demanda energética de manera sostenible y a un precio razonable. Sin embargo, debido a su naturaleza variable y el uso de recursos no almacenables, se dificulta la planeación del despacho y la predicción de su costo. De allí nace la motivación de desarrollar un método, empleando árboles de decisión y *Machine Learning*, que permita determinar el efecto de variables externas al momento del despacho sobre su respectivo costo. En anteriores trabajos se plantearon propuestas para realizar optimización, como en el caso de (Roa-Sepúlveda, Herrera, Pavez-Lazo, Knight, & Coonick, 2003) y (Roa-Sepúlveda & Herrera, 2000) con buenos resultados pero múltiples dificultades y limitaciones, como lo es poder contar con tan solo 3 generadores necesariamente despachables. Además, se han presentado trabajos sobre estabilidad de sistemas eléctricos utilizando la variante de árboles de clasificación como en el caso de (Genc, Diao, Vittal, Kolluri, & Mandal, 2010), con resultados igualmente satisfactorios. Sin embargo, el método no ha sido ampliamente utilizado para el despacho económico, aplicación que le sería bastante útil en el momento actual, en que el auge de las micro redes requiere herramientas capaces de actuar en

situaciones con la incertidumbre propia de las fuentes de generación renovable.

El método planteado es de especial utilidad en lugares donde las condiciones meteorológicas son bastante variables o no se cuenta con predicciones certeras que faciliten la planeación del despacho. Con el ánimo de superar estas limitaciones se desarrolla una herramienta capaz de simular múltiples escenarios con el fin de contar con una referencia ante las posibles eventualidades y cambios en las condiciones ambientales o de disponibilidad de los equipos.

El creciente interés por las energías renovables nace a partir de la década de 1980, momento en el cual se comenzaron a realizar estudios acerca del calentamiento global debido a la presencia de gases de efecto invernadero (GEI). Esto, además de dos grandes crisis del petróleo, incentivaron la búsqueda del aumento de la eficiencia en los procesos existentes y nuevas fuentes energéticas.. Hechos posteriores como el accidente nuclear de Fukushima llevarían a fortalecer las medidas tomadas en el protocolo de Kioto, con acciones como el cierre de una importante cantidad de plantas de este tipo, fomentando la integración de formas alternativas de energía más amigables con el medio ambiente. Estas nuevas formas de generación se han integrado en configuraciones llamadas micro redes, que consisten en conjuntos de cargas y fuentes de generación distribuida interconectadas entre sí dentro de unos límites claramente definidos, para actuar como una sola entidad controlable respecto a la red. Si así se desea, una micro red se puede operar conectada con la red o de

manera aislada. (Bialek, 2014) Esto se ha hecho posible gracias a nuevas tecnologías para el control y la sincronización, disminuyendo las pérdidas de transmisión y mejorando la independencia energética de las comunidades.

Con el fin de conocer la combinación más económica de unidades de generación necesarias para suplir la demanda esperada en una red, teniendo en cuenta únicamente la potencia a generar y su costo, se realiza el proceso conocido como despacho económico. Éste no debe confundirse dicho con el concepto de *Unit Commitment*, el cual además de lo anterior tiene en cuenta las restricciones y características técnicas de los equipos de generación y transmisión. En la literatura se suele usar el nombre “problema del despacho económico” para referirse a la optimización del funcionamiento de la red considerando al mismo tiempo costos y parámetros técnicos. Es decir, la unión de ambos procesos.

La función objetivo a optimizar en el despacho económico se expresa en (1), sometida a las restricciones dadas por (2), (3) y (4)

$$z = \sum_{i=1}^n C_i P_i \quad (1)$$

$$D + L = \sum_i^n P_i \quad (2)$$

$$L = \sum_t \sum_j a_{ij} P_i P_j \quad (3)$$

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (4)$$

donde,

C_i = Costo unitario de la energía en la unidad i .

z = Costo total de operación.

n = Número de unidades

a_{ij} = Coeficientes de pérdidas de transmisión

P_j = Potencia generada en la unidad i .

D = Demanda total del sistema

L = Pérdidas de transmisión

P_{imin}, P_{imax} = Límite técnico mínimo y máximo de la unidad i .

A continuación se hace una breve recopilación sobre las generalidades de las fuentes de energía renovable y su respectivo modelo para determinar el costo de su operación y potencia generada. Posteriormente, se expone la teoría básica de los árboles de decisión junto con los criterios estadísticos utilizados. Para concluir se presenta la manera en que se planteó la simulación, las limitaciones del método y los resultados obtenidos, con su respectivo análisis.

2. FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Las micro redes suelen utilizar fuentes de generación que aprovechan los recursos naturales e inagotables presentes cerca a los lugares de consumo. Debido a su abundante disponibilidad, algunas de las más empleadas en estas estructuras son: la generación a partir de la biomasa, la solar y la eólica. Sin embargo, su naturaleza variable hace necesaria la inclusión de otro tipo de generación, conocida como despachable, cuya potencia de salida puede ser controlada y modificada a voluntad para suplir la demanda energética. Lo usual es incluir en la configuración de la red un arreglo de baterías que permita almacenar potencia cuando la generación exceda la demanda, y así disponer de ella cuando sea necesario. Las plantas de respaldo utilizando motores a combustión interna como los Diesel son también una forma de asegurar el buen funcionamiento del sistema cuando sus demás componentes no sean suficientes. Otro tipo de generación de amplia utilización es conocida como cogeneración, la cual es en realidad una variación de las plantas térmicas convencionales que utiliza sistemas de recuperación de calor para luego utilizarlo en múltiples aplicaciones aumentando la eficiencia total del arreglo. Para todas las fuentes de generación se calculará la función de costo respectiva con base en la información proporcionada por el Consejo Mundial de la Energía (WEC por sus siglas en inglés), que incluye los valores de inversión inicial de los equipos, los costos de operación y mantenimiento (O & M) y el factor de uso.

2.1. Generación solar fotovoltaica

La generación solar fotovoltaica se lleva a cabo utilizando placas de materiales semiconductores, generalmente silicio, dopadas con elementos de los grupos IIIA y VA, más comúnmente el Boro y el Fósforo. Éstas realizan la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico, generando una diferencia de potencial luego de que un fotón incidente ceda su energía a un electrón del material.

La potencia generada se calcula utilizando las ecuaciones (5) y (6).

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) G \quad (5)$$

$$P^{Ph} = P_{STC} \left\{ \frac{G}{1000} [1 + \delta(T_{cell} - 25)] \right\} \quad (6)$$

donde,

G = Irradiancia solar [W/m^2]

T_{amb} = Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

$NOCT$ = Condición de temperatura nominal para la operación de la celda [$^{\circ}C$]

δ = Coeficiente de Potencia-Temperatura [$\%/^{\circ}C$]

T_{cell} = Temperatura de la celda [$^{\circ}C$]

P_{STC} = Potencia bajo condiciones estándar de prueba [W]

P^{Ph} = Potencia de salida de la celda (Montoya-Bueno, Muñoz, & Contreras, 2014)

La función de costo de la generación solar se expresa en la ecuación (7). Mediante (8) se calcula la tasa de retorno de la inversión inicial, utilizando un factor de recuperación de capital en una serie uniforme para pagos anuales iguales.

$$F(P_s) = aI^p P_s + G^E P_s \quad (7)$$

$$a = \frac{r}{[1 - (1 + r)^{-N}]} \quad (8)$$

donde,

P_s = Generación solar [MW]

a = Coeficiente de anualización (retorno de la inversión)

r = Tasa de interés (se asume 0.09 para casos bases)

N = Vida útil (se asume $N=20$ años)

I^p = Costo de inversión por unidad de potencia instalada [\$/ MW]

G^E = Costos de O & M por unidad de potencia generada [\$/MW]

Según los datos empleados, el costo de cada MWh generado utilizando esta tecnología es de 163.49 USD/MWh.

2.2. Generación eólica

Los flujos de aire, causados por el calentamiento no homogéneo de la atmósfera, las irregularidades de la superficie terrestre y su rotación, pueden ser aprovechados por turbinas, cuyas aspas al girar impulsan un generador mediante un eje, para generar electricidad. Los aerogeneradores incluyen una serie de sistemas complementarios que controlan el ángulo de la turbina para encarar el viento, el arranque de ésta con velocidades de viento

entre 13 y 26 km/h y su parada cuando supere 88 km/h, y convierten la velocidad de rotación del eje de entre 30 y 60 rpm en la hélice, a magnitudes entre 1000 y 1800 rpm en el generador.

La potencia generada por turbinas eólicas se calcula mediante la siguiente ecuación (9).

$$P = \frac{1}{2} (\rho * A * u^3) \quad (9)$$

donde,

ρ = Densidad del aire que se asume como 1 Kg/m³

A = Área de barrido por el viento

u = Velocidad del viento

$$F(P_w) = aI^p P_w + G^E P_w \quad (10)$$

donde,

P_w = Generación eólica [MW]

a = Coeficiente de anualización

r = Tasa de interés (se asume 0.09 para casos bases)

N = Vida útil (se asume $N=20$ años)

I^p = Costo de inversión por unidad de potencia instalada [\$/ MW]

G^E = Costos de O & M por unidad de energía generada [\$/MW]

De nuevo se utiliza la ecuación (8) para el cálculo de la tasa de retorno de la inversión. Según los datos empleados, el costo de

cada MWh generado utilizando esta tecnología es de 77 USD/MWh.

2.3. Generación con plantas Diesel

Los generadores Diesel, ampliamente utilizados como respaldo para cargas críticas y para alimentar lugares aislados debido a su rapidez para entrar en funcionamiento, son altamente portables, confiables y se adaptan fácilmente a los cambios en la demanda. Sin embargo, debido a su baja eficiencia y a la dependencia de los combustibles fósiles para su funcionamiento, son una opción costosa, con fluctuaciones constantes de precios, y poco amigable con el medio ambiente.

Para modelar su costo se utiliza una función polinómica de orden 2. (Deckmyn, Vandoorn, Moradzadeh, & Vandeveld, 2014) En este caso, se tomaron los datos de costos del informe *Lazard's levelized cost of energy analysis* (Lazard, 2014) y la información de consumo del generador Caterpillar 3512B de 1275kW (Caterpillar, 2015). Obteniendo (11).

$$C_D = 1.75P_D + 87.816P_{GD}P_D - 8.015P_{GD}^2P_D \quad (11)$$

donde,

P_{GD} = Salida de potencia activa del generador

P_D = Precio actual del Diesel en USD/gl

2.4. Generación a partir de la biomasa

La generación a partir de la biomasa aprovecha materiales provenientes de seres vivos, tanto animales como vegetales, utilizando métodos bio y termoquímicos para la generación de energía térmica, biogás, combustibles y energía eléctrica. Siempre y cuando la obtención de la biomasa se realice a una velocidad que permita al medio ambiente recuperarse de sus efectos, esta fuente puede ser considerada renovable pues aporta un balance de CO₂ favorable ya que los cultivos absorben más dióxido de carbono durante su vida de la que emiten al ser procesados. (Endesa) El costo de la generación con biomasa puede ser planteado de dos maneras. La primera, considerando necesaria la compra de los residuos utilizados como “combustible”, asemejándose al modelo del Diesel. La segunda, empleada en este trabajo, asumiendo que el costo del combustible es despreciable debido a que se utilizan los subproductos de los procesos de la micro red donde está instalada. Como consecuencia de ello únicamente se considerarán gastos de O&M e inversión inicial. Para un retorno de la inversión a 20 años, y una tasa de interés de 0.09, se estima el costo de generar con biomasa en 98.85 USD/MWh. Esto se expresa en (12).

$$A = \left(I_C \frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \right) + \text{Annual O \& M} \quad (12)$$

donde,

A = Pago anual (pago amortizado)

I_C = Inversión inicial

i = Tasa de interés

n = Vida útil (en años)

$Annual\ O\ \&\ M$ = Costo anual de mantenimiento y operación. (Ahmadi & Pedrasa, 2012)

2.5. Cogeneración

La cogeneración o CHP (del inglés *Combined Heat and Power*) es la generación simultánea de electricidad y calor a partir de un único sistema. Es utilizado en edificios individuales, complejos industriales o para el servicio de calefacción pública en algunas ciudades. Debido a la utilización del calor residual, la eficiencia energética de estos sistemas alcanza el 90% o más, haciéndolo el método de generación más eficiente disponible.

La función de costo para la cogeneración suele asumirse de manera análoga al diesel con un polinomio de orden 2. Sin embargo, debido a que los fabricantes reportan únicamente la información de consumo a la potencia nominal, será necesario suponer una ecuación lineal. En realidad, esto se puede deber a que, por la necesidad del calor en otros procesos industriales, se aprovecha al máximo el sistema CHP. A manera de muestra se utilizará una microturbina de gas natural Capstone C1000. (Capstone, 2010)

$$C_{CHP} = C_{O\&M+I}P_{CHP} + C_{GE}P_{CHP} + C_{GC}P_{CHP} \quad (13)$$

donde,

$C_{O\&M+I}$ = Costo de O & M e inversión inicial (60.13 USD/MWh)

C_{GE} = Costo relacionado con la energía del combustible aprovechado para la generación eléctrica (80.05 USD/MWh)

C_{GC} = Costo relacionado con la energía del combustible aprovechado en forma de calor (128.45 USD/MWh)

P_{CHP} = Energía generada con CHP [MWh]

El costo total, calculado mediante (13), de utilizar el sistema durante una hora completa es de 268.63 USD, y el valor de 1 MWh, incluyendo los gastos de O&M e inversión, mas no de calor, sería de 140.18 USD. Cabe resaltar que los procesos de generación de electricidad y calor no son separables.

2.6. Bancos de baterías

Las baterías son dispositivos que convierten la energía química contenida en un material electroquímicamente activo directamente en energía eléctrica mediante una reacción de reducción-oxidación. Éstas se constituyen en la manera de asegurar la confiabilidad del suministro energético, debido a su capacidad para amortiguar los precios, dando la posibilidad de cubrir la demanda en horas pico cuando el costo de la electricidad es más elevado. Además hacen viable económicamente el uso de fuentes renovables al reducir la volatilidad de la salida, almacenando la energía extra generada cuando hay mayor disponibilidad de los recursos en cuestión para entregarla al sistema cuando ésta escasee. (Mírez Tarrillo, 2012) El costo de utilizar las baterías se

expresa en la ecuación (14), considerando los gastos obtenidos del proveedor S15, para un banco de baterías de plomo-ácido según (Akhill, y otros, 2013).

$$C_b = aI_{IB} + O\&M_b + C_R + \frac{C_C}{\eta_b} \quad (14)$$

donde,

a =Factor de recuperación de la inversión inicial (según la ecuación (4)) a 15 años con una tasa de interés de 0.09 (12.4% anual)

I_{IB} = Inversión inicial de las instalaciones para las baterías

$O\&M_b$ =Operación y mantenimiento de las baterías

C_R =Costo de reemplazar las baterías, dividido dentro de los 8 años de vida

C_C = Costo de cargar las baterías

η_b =Eficiencia de las baterías (0.9 para el caso base)

Sin considerar el precio de recarga de las baterías, el costo aproximado del funcionamiento del sistema es de 210 USD/MWh extraído.

3. MÉTODO DE ÁRBOLES DE DECISIÓN PARA LA PREDICCIÓN DE COSTOS DE GENERACIÓN

Los árboles de decisión son un método aplicable a distintas áreas del conocimiento y con una forma de representación propia, la cual consiste en diagramas que parten desde un punto común (raíz), pasando por varias bifurcaciones (tronco o ramas) que

representan decisiones o sucesos aleatorios a los que están expuestas las variables del sistema, hasta llegar a puntos finales (hojas) donde se expresa un resultado o salida. Existen árboles para aplicaciones administrativas en que se plantean una serie de caminos a seguir con decisiones y sucesos aleatorios, dependientes de una probabilidad, para luego elegir el mejor según su valor esperado (University of Michigan). Existen además árboles de regresión y clasificación creados a partir de *Machine Learning*, utilizados para predecir un resultado basándose en un set conocido de entradas, cada una con una serie de variables llamadas descriptores, y una salida correspondiente, lo cual se conoce como *Learning Set* o *LS*. En el primer caso, ésta será un valor numérico, mientras que en el segundo se obtiene un valor de verdad, utilizado comúnmente en el campo de la ingeniería eléctrica para relacionar los valores de las variables con la pérdida de estabilidad en un sistema. (Genc, Diao, Vittal, Kolluri, & Mandal, 2010)

Los árboles de regresión y clasificación utilizan métodos estadísticos para garantizar la homogeneidad en cada conjunto de datos. El objetivo final es la disminución de la magnitud de la entropía y la desviación estándar de los datos pertenecientes a una misma hoja. Calculando en primera instancia la ganancia de información al hacer cada división. Es decir, se mide el cambio de la entropía al dividir un conjunto en subconjuntos. El cálculo de la entropía y la ganancia de información se hace según las ecuaciones (15) y (16), respectivamente.

$$E(S) = \sum_{i=1}^c -p_i \log_2 p_i \quad (15)$$

donde,

S =Conjunto de datos

p_i =Probabilidad de los posibles valores

i =Posible respuesta de los datos

$$G(S, A) = E(S) - \sum_{v \in \text{Valores}(A)} \frac{|S_v|}{|S|} * E(S_v) \quad (16)$$

donde,

G =Ganancia de información del conjunto S para el atributo A

S =Conjunto de datos

S_v =Subconjunto de datos con $A = v$

$\text{Valores}(A)$ =Es el conjunto de todos los posibles valores de A .

4. MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el caso de estudio se utilizaron árboles de regresión buscando predecir el costo del MWh de una micro red ficticia, con generación renovable teniendo en cuenta factores externos que influyen al momento del despacho tales como el día, la hora, la demanda, la irradiancia solar, velocidad del viento, etc.

Se planteó una micro red ficticia, IEEE 14 barras modificada tipo *Benchmark*, como se observa en la Figura 1, ubicada estratégicamente en Fort Bliss, Texas, incluyendo 5 fuentes de generación, tanto renovable como de respaldo, siendo éstas la solar, eólica, biomasa, baterías y Diesel. Se asume que se cuenta con una demanda base de 30 MW y una pico de 65 MW, la cual se busca suplir utilizando un arreglo de celdas PV de 20 MWp, aerogeneradores de 40 MWp, un generador de biomasa de 12 MW, 35 generadores Diesel para un total de 45 MW y un arreglo de baterías para una carga de 80 MWh, a una potencia nominal de 10 MW.

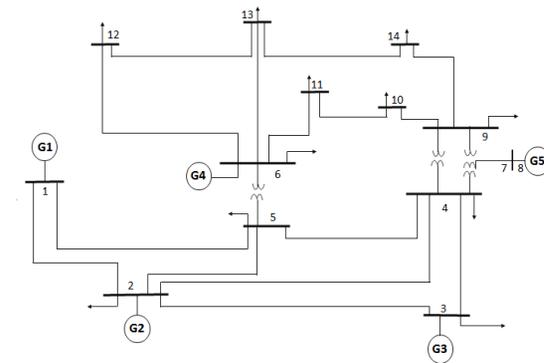


Figura 1. Red Benchmark IEEE 14 barras modificada (Mena Kodsí & Cañizares , 2003)

Utilizando MATLAB se creó una base de datos a partir de 9 descriptores (la carga de la batería, el día, la hora, la velocidad del viento, demanda, irradiancia, temperatura ambiente, y limitaciones en la capacidad de las líneas que transportan la potencia generada en las celdas solares y los aerogeneradores) y las ecuaciones planteadas para cada tipo de generación. Con esta herramienta se representan las evaluaciones de los valores de los descriptores con triángulos, mientras que las salidas o resultados se simbolizan mediante círculos tal como se observa en la Figura 2. En ella se puede evidenciar además una evaluación de la variable x_1 , es decir la carga de la batería al momento del despacho. Allí se hace claro cómo disminuye el costo de la generación cuando la energía almacenada en las baterías es mayor.

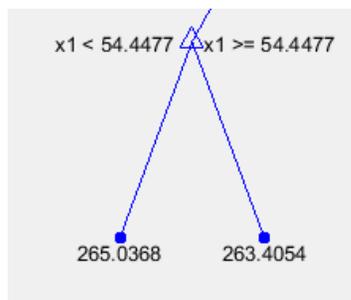


Figura 2. Representación gráfica de un árbol de regresión mediante MATLAB

Para verificar la precisión de los resultados obtenidos se realizaron una serie de pruebas, simulando diferentes escenarios al momento del despacho para analizar el efecto de variables externas en el costo final. Se observó cómo, al aumentar el tamaño del LS del sistema, disminuía el error de la predicción. La anterior afirmación se evidencia en la Tabla 1 donde se observan los resultados obtenidos para un LS de 3650 datos. Es posible evidenciar que el error obtenido es relativamente bajo, pero en el caso 2 específicamente, el árbol creado no funcionó. Posteriores revisiones del esquema generado por MATLAB demostrarían que, para el resultado obtenido, nunca se tuvo en cuenta la restricción en las líneas, pues la base de datos generada no incluyó tal condición en simultáneo a una generación solar de magnitud considerable. Por tanto, para mejorar el desempeño del árbol, fue necesario crear un nuevo LS de 18250 datos asegurando que la restricción se tendría en cuenta en casos en que la generación solar estuviera en un punto alto. El objetivo se alcanzó demostrando la necesidad de una mejor elección de los datos en los que se basarán los árboles para evitar esa clase de sucesos, aumentando la robustez del método. Éste resulta ser una herramienta eficiente para predecir el costo de generación en una micro red, debido a la gran precisión de los resultados obtenidos y a la adaptabilidad a los cambios que el usuario necesite hacer para simular nuevos escenarios, permitiéndole observar el efecto de las variables en el despacho. Además, MATLAB permite graficar un esquema bastante ilustrativo facilitando la comprensión y revisión de los resultados obtenidos.

Tabla 1. Recopilación de los resultados de las simulaciones para el caso de Fort Bliss

#	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Resultado Calculado (USD/MWh)	Predicción (USD/MWh)	Error Esperado (USD/MWh)	Error Real (USD/MWh)	Error Real (%)
1	20	195	12	18	48	800	30	1	1	159.53	164.650	4.373	5.120	3.21
2	20	195	12	18	48	800	30	0	1	108.250	156.26	4.373	48.01*	44.34*
2*	20	195	12	18	48	800	30	0	1	108.250	111.828	2.947	3.578	3.31
3	60	20	12	8	54	450	5	1	1	165.312	164.650	4.373	0.662	0.40
4	20	360	12	10	55	360	7	1	1	139.970	134.697	4.373	5.270	3.77
5	80	360	12	10	55	360	7	1	1	123.012	114.405	4.373	8.607	7.00
6	50	100	22	6.5	42	0	23	1	1	184.731	172.001	4.373	12.730	6.89
7	80	100	22	6.5	42	0	23	1	1	170.038	158.486	4.373	11.552	6.80
8	40	288	12	20	47	660	29	1	1	155.301	156.262	4.373	0.961	0.62
9	40	288	12	20	47	660	29	1	0	202.461	212.255	4.373	9.794	4.84
10	40	10	19	5.3	63	0	16.4	1	1	241.098	252.145	4.373	11.047	4.58

Donde x1 es la carga de la batería al momento del despacho, x2 el día del año, x3 la hora del día, x4 la velocidad del viento, x5 la demanda esperada, x6 la irradiancia solar, x7 temperatura ambiente, x8 la limitación para transmisión de la generación solar y x9 la limitación para transmisión de la generación eólica.

En la Tabla 1 se observa además el efecto de las modificaciones de las variables en la salida del sistema. Los casos 8 y 9 son un claro ejemplo de ello, pues en el primero es posible cubrir la demanda a un costo relativamente bajo, pero al afectar la disponibilidad de las líneas que transportan la potencia generada en la granja eólica, dicho costo aumenta cerca de un 33%. Dicho aumento era de esperarse teniendo en cuenta que, para este caso, y debido a la alta velocidad del viento, éste se constituía en el parámetro más relevante.

En general y debido a la gran capacidad instalada y a las altas velocidades del viento, la primera evaluación del árbol es precisamente dicha velocidad y la segunda es el factor que limita sus respectivas líneas, dividiendo el esquema en grandes áreas con precios significativamente diferentes entre ellas.

5. CONCLUSIONES

Se demostró la aplicabilidad del método de árboles de decisión usando la herramienta de *Regression Trees* del programa de simulación matemática MATLAB, para predecir el costo de generación por MWh en una micro red utilizando fuentes de energía renovables, según una base de datos creada con distintos parámetros y escenarios permitiendo analizar su efecto sobre este.

Debido a la aplicación de criterios estadísticos que permiten determinar el error, así como el orden de las variables a evaluar y la factibilidad de hacerlo, es posible, mediante el método

utilizado, obtener resultados confiables y precisos que garantizan su correcto funcionamiento.

La alta complejidad matemática, el tiempo de cómputo y la gran cantidad de variables que se deben tener en cuenta en los procesos de generación, transmisión y distribución crean la necesidad de hacer una serie de simplificaciones y asunciones que facilitan su desarrollo. Esto hace necesario que se realicen trabajos futuros considerando dichas limitaciones, acción para la cual se sienta aquí su base.

AGRADECIMIENTO

A nuestros padres y a nuestros profesores, especialmente a aquellos del grupo de T&D, quienes nos han acompañado en este arduo proceso que aquí culmina.

REFERENCIAS

- Ahmadi, A., & Pedrasa, M. (2012). *Optimal design of hybrid renewable energy system for electrification of isolated grids*. Cebu: IEEE.
- Akhill, A. A., Huff, G., Currier, A. B., Kaun, B. C., Rastler, D. M., Chen, S. B., y otros. (2013). *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
- Bialek, T. (22 de Mayo de 2014). *Microgrids - UCSD Smart Grid Course*. Recuperado el 19 de Febrero de 2015, de University of California San Diego Computer Science and Engineering : http://cseweb.ucsd.edu/~tosing/lectures/cse291_microgrid.pdf
- Caterpillar. (2015). Recuperado el 21 de Marzo de 2015, de Caterpillar: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web>

&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=https%3A%2F%2Femc.cat.com%2Fpubdirect.ashx%3Fmedia_string_id%3DTSS-DM8187-01-GS-EPG-8720016.pdf&ei=H9UNVfDwEseXgwSgl4D4BQ&usg=AFQjCNGzpxWxb4S-IC_LSkymwljUZuRVWg&sig2=CKod

- Deckmyn, C., Vandoorn, T. L., Moradzadeh, M., & Vandevelde, L. (2014). Multi-objective optimization for environomic scheduling in microgrids. *PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE* (págs. 1-5). National Harbor: IEEE.
- Endesa. (s.f.). *Centrales de Biomasa*. Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de Endesa Educa: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/produccion-de-electricidad/xiv.-las-centrales-de-biomasa
- Genc, I., Diao, R., Vittal, V., Kolluri, S., & Mandal, S. (2010). Decision Tree-Based Preventive and Corrective Control Applications for Dynamic Security Enhancement in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1611-1619.
- Lazard. (Septiembre de 2014). *Lazards's levelized cost of energy analysis - version 8.0*. Recuperado el 21 de Marzo de 2015, de Lazard: <http://www.lazard.com/PDF/Levelized%20Cost%20of%20Energy%20-%20Version%208.0.pdf>
- Montoya-Bueno, S., Muñoz, J., & Contreras, J. (2014). Optimal expansion model of renewable distributed generation in distribution systems. *Power Systems Computation Conference* (págs. 1-7). Wroclaw: IEEE.
- Roa-Sepúlveda, C., & Herrera, M. (5 de Abril de 2000). A solution to the economic dispatch problem using decision trees. *Electric Power Systems Reasearch*, 56, 255-259.
- Roa-Sepúlveda, C., Herrera, M., Pavez-Lazo, B., Knight, U., & Coonick, A. (2003). Economic dispatch using fuzzy decision trees. *Electric Power Systems Research*, 66, 115-122.
- University of Michigan. (s.f.). *Decision Trees*. Recuperado el 9 de Marzo de 2015, de LSA Complex Systems - University of Michigan: <http://vsrserver1.cscs.lsa.umich.edu/~spage/ONLINECOURSE/R4Decision.pdf>

AUTORES



Santiago, BOTERO GONZÁLEZ. Bachiller egresado del Instituto San Carlos De La Salle (2009). Estudiante próximo a graduarse del programa de Ingeniería Electrónica en la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Nació el 21 de noviembre de 1992 en Medellín, Antioquia. Becado para la totalidad de su carrera por la alcaldía de Medellín por obtener el cuarto lugar en “Olimpiadas del Conocimiento 2009”



Tatiana, JIMENO JUNCA. Bachiller egresado del Colegio Gimnasio Los Pinares (2009). Estudiante próximo a graduarse del programa de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín. Nació el 4 de febrero de 1991 en la ciudad de Bogotá, Cundinamarca.

Jorge-Wilson, GONZÁLEZ SÁNCHEZ, Ingeniero Electricista de la Univ. Nacional y MSc - PhD. de la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, donde es Profesor Titular de tiempo completo e Investigador. Laboró en HMV Ingenieros y en Siemens, Erlangen en PTD (FACTS y HVDC). Investigador invitado en la Univ. Kempten, Alemania y en el Power Systems Institute en Erlangen Univ. Alemania en el 2005.