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

Santiago BOTERO, Tatiana JIMENO, Jorge-Wilson GONZÁLEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico, Ingeniero Electricista

Director: Jorge Wilson González

Nombres: Santiago Botero y Tatiana Jimeno

Título profesional: Ingeniero Electrónico, Ingeniero Electricista

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Eléctrica-Electrónica
Programa de Ingeniería Electrónica, Ingeniería Eléctrica
Medellín
2015**

Dedicatoria

A nuestros padres, quienes han sido el mayor apoyo y ejemplo motivándonos continuamente a lograr nuestras metas

Agradecimiento

A Dios, por guiarnos a lo largo de este arduo camino

A nuestros padres y familiares, quienes nos han acompañado durante todo este proceso brindándonos su apoyo y consejos para llegar a ser las personas que somos hoy.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por permitirnos pasar este lapso de nuestras vidas en que conocimos excelentes amigos y crecimos como personas.

A Ph.D. Jorge Wilson González, por sus aportes, dedicación, compromiso, buena disposición y confianza motivándonos a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A Ph.D. Idi Amin Isaac, Ph.D. Andrés Emiro Diez, Ph.D. Gabriel Jaime López y Msc. Hugo Cardona por sus críticas constructivas, generosos aportes, su tiempo y constante atención durante la elaboración de la tesis.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	12
1. RESEÑA HISTÓRICA E IMPACTO GLOBAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES	13
1.1. Generalidades de las energías renovables	13
1.2. Impacto en Mercados seleccionados	17
1.3. Colombia, historia, actualidad y potencial	21
1.4. Generalidades de las Micro Redes	24
1.5. Micro red inteligente de la Universidad Pontificia Bolivariana	31
2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA OPTIMIZACIÓN Y EL MERCADO ELÉCTRICO	34
2.1. Teoría de Optimización	34
2.2. Generalidades de los árboles de decisión como método de optimización.....	38
2.3. Generalidades del despacho económico.....	42
2.4. El problema del flujo de potencia en los sistemas eléctricos	44
2.5. El mercado eléctrico colombiano	47
3. MODELAMIENTO BÁSICO DE LOS ELEMENTOS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA MICRO RED	50
3.1. Generación solar fotovoltaica.....	50
3.2. Generación Eólica	54
3.3. Generación con plantas Diesel	56
3.4. Generación a partir de la Biomasa.....	59
3.5. Cogeneración.....	61
3.6. Bancos de Baterías	65
4. SIMULACIÓN DEL DESPACHO ECONÓMICO UTILIZANDO MATLAB	70
4.1. Comandos Básicos.....	70
4.2. Herramienta para la elaboración de árboles de decisión.....	72
4.3. Simulación y limitaciones	74
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	80
5.1. Evaluación de desempeño del método	80
5.2. Análisis económico del planteamiento.....	87
5.3. Propuestas para trabajos futuros.....	88
6. CONCLUSIONES	89
REFERENCIAS	90
AUTORES.....	97

Lista de Figuras

FIGURA 1. GENERACIÓN MUNDIAL DE ELECTRICIDAD SEGÚN EL TIPO DE FUENTE EN 2012 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2014)	17
FIGURA 2. NÚMERO DE ARTÍCULOS EN SCOPUS POR PAÍS QUE INCLUYEN “RENEWABLE ENERGIES” COMO PALABRA CLAVE	18
FIGURA 3. NÚMERO DE ARTÍCULOS POR PAÍS QUE INCLUYEN “MICROGRIDS” COMO PALABRA CLAVE EN SCOPUS	31
FIGURA 4. SUPERFICIE DE RESTRICCIONES EN UN ESPACIO DE DISEÑO BIDIMENSIONAL HIPOTÉTICO (RAO, 2009)	36
FIGURA 5. SUPERFICIE DE FUNCIÓN OBJETIVO	37
FIGURA 6. ÁRBOL DE DECISIÓN PARA EL EJEMPLO DEL DADO	39
FIGURA 7. PERFIL TÍPICO DE CARGA DE UNA BATERÍA VRLA	67
FIGURA 8. CARACTERÍSTICAS DE UN ÁRBOL DE DECISIÓN	74
FIGURA 9. RED BENCHMARK IEEE 14 BARRAS MODIFICADA (MENA KODSI & CAÑIZARES, 2003)	75
FIGURA 10. MEJORAMIENTO DEL ERROR PARA EL CASO 2	83
FIGURA 11. RELEVANCIA DE LA CAPACIDAD DE LAS LÍNEAS CONECTADAS A LA GENERACIÓN EÓLICA	83
FIGURA 12. RELEVANCIA DE LAS VARIABLES RELACIONADAS CON LA GENERACIÓN EÓLICA EN EL COSTO	84
FIGURA 13. RELEVANCIA DE PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA GENERACIÓN SOLAR EN EL COSTO DE LA ENERGÍA	84
FIGURA 14. RELEVANCIA DE LA HORA DEL DÍA Y LA CARGA EN EL COSTO FINAL	85
FIGURA 15. COSTO DEL MWH DURANTE EL DÍA 230	86
FIGURA 16. COSTO DEL MWH DURANTE EL DÍA 40	86

Lista de Tablas

TABLA 1. PENETRACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE EN MERCADOS SELECCIONADOS (GIPE, 2013)	16
TABLA 2. MAYORES EFICIENCIAS LOGRADAS POR DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE CELDAS SOLARES PV (GREEN, EMERY, HISHIKAWA, WARTA, & DUNLOP, 2014)	53
TABLA 3. ALGUNOS COMANDOS Y FUNCIONES DISPONIBLES EN MATLAB	72
TABLA 4. RECOPIACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES PARA EL CASO DE FORT BLISS	82

Glosario

AGC: (*Automatic Generation Control* o control automático de generación) es un sistema automático o manual encargado de mantener el equilibrio entre la generación y la demanda en tiempo real, modificando la potencia despachada por ciertas unidades previamente determinadas.

AIE: (Agencia Internacional de la Energía o también IEA por sus siglas en inglés) agencia creada en el marco de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico para coordinar las políticas energéticas de sus países miembros tras la crisis del petróleo de 1973.

Armónico: Señales con frecuencias múltiplos entero de la frecuencia fundamental del sistema (50 Hz para Europa, 60 Hz en América). Se constituyen en potencia no aprovechable y pueden ser dañinos para algunos equipos.

Biomasa: Material orgánico residual de procedencia animal o vegetal susceptible a ser aprovechado con fines energéticos.

CA: (también AC o corriente alterna) tipo de corriente eléctrica cuya magnitud varía cíclicamente, generalmente a una frecuencia de 50 Hz en Europa y de 60 Hz en América oscilando de manera sinusoidal.

CD: (También DC o corriente directa) tipo de corriente eléctrica cuya magnitud permanece constante en el tiempo.

Cogeneración: (También CHP o *Combined Heat and Power*) sistema integrado que permite la producción simultánea de energía eléctrica y calor desde una única fuente (gas natural, biomasa, carbón, calor residual, etc.).

Confiabilidad: Probabilidad de suministrar potencia a los usuarios en todo momento, admitiendo mínimas interrupciones.

Densidad Energética: (también densidad de energía másica o volúmica) es la energía presente en un elemento o compuesto por cada unidad de masa o volumen. Su importancia radica en el transporte del combustible y sus implicaciones económicas. La densidad energética es mayor en los elementos radioactivos, seguido por los carburantes de origen fósil (gasolina, carbón), los gases (butano, metano), alcoholes (etanol, metanol) y por último, las baterías.

Despacho Económico: Estudio previo a la operación de una red eléctrica, que busca determinar la potencia que debe generarse en cada central de manera que se supla la demanda esperada con el menor costo posible.

Distribución: Proceso mediante el cual se transporta la energía eléctrica dentro de perímetros urbanos en valores de tensión menores de 57.5kV para ser llevada al usuario final. En Colombia se suele hacer a 13.2kV para usuarios residenciales y 44kV para industrias.

Factor de potencia: Es la relación entre la potencia real y la potencia aparente, indicando la eficiencia de la transferencia de potencia. Su valor varía entre 0 y 1, siendo este último el mejor caso. Es adimensional.

GEI: (Gases de efecto invernadero) gases que retienen la radiación solar que es reflejada por la tierra y por tanto aumentan la temperatura del ambiente. Este proceso es natural y permitió el desarrollo de la vida en la tierra pero la excesiva emisión por la quema de combustibles fósiles y otras actividades humanas ha acelerado el calentamiento haciéndolo peligroso. Algunos de estos gases son el anhídrido carbónico (CO_2), metano (CH_4) y los clorofluorocarbonos (CFC).

Generación Distribuida: (también generación descentralizada, dispersa, *in-situ* o energía distribuida) se refiere a la generación de energía eléctrica cerca a los lugares de consumo con sistemas que no superan los 10 MW de potencia máxima, eliminando pérdidas e ineficiencias relacionadas con los procesos de transmisión y distribución.

Generación Eólica: Proceso que aprovecha la energía cinética del viento para hacer girar las aspas de una turbina y convertirla en energía eléctrica.

Generación Solar Fotovoltaica: (o *PV* por sus siglas en inglés) proceso que utiliza placas semiconductoras (generalmente de silicio) para generar una corriente eléctrica a partir de los fotones emitidos por el sol.

IEEE: (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* o Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos) asociación profesional fundada en 1963 con sede principal de operación en Piscataway, New Jersey.

MATLAB: (*MATrix LABoratory*) herramienta de software con lenguaje de programación propio (M) que permite hacer desarrollos matemáticos, la creación de interfaces de usuario e interconexión con otros programas y dispositivos de hardware.

Micro red: Es una versión moderna y de menor tamaño de un sistema eléctrico convencional que integra la generación (generalmente a partir de fuentes renovables), distribución y control del flujo de energía a escala local.

Optimización: Proceso de planeación en el cual se pretende buscar el mejor resultado para una situación dada. En matemáticas, es la acción mediante la cual se busca determinar el valor de las variables que mejor satisfagan condiciones y limitaciones previamente definidas.

Potencia Activa: Porción de la potencia que, promediada para un ciclo AC completo, resulta en transferencia neta de potencia en una sola dirección. Tiene la capacidad de generar trabajo útil. Se representa por la letra P y se expresa en Vatios (W).

Potencia Aparente: Suma vectorial de la potencia activa y reactiva. Siendo la primera una cantidad en números reales y la segunda imaginaria. Su magnitud equivale a la multiplicación de las magnitudes del voltaje y la corriente para un elemento o instalación. Se representa por S y se expresa en Voltiamperios (VA).

Potencia Reactiva: Porción de la potencia relacionada con el almacenamiento de energía en elementos reactivos (bobinas y condensadores) y que al final de un ciclo regresa a la fuente, sin generar trabajo útil. Se expresa en Voltiamperios reactivos (Var).

SCADA: (*Supervisory control and data acquisition*) software que permite controlar y supervisar en tiempo real procesos a distancia.

Seguridad: Propiedad de suministrar energía, incluso con una falla en el sistema de potencia, garantizando la estabilidad (sincronismo).

SPIDERS: (*Smart Power Infrastructure Demonstration for Energy Reliability and Security*) iniciativa de Estados Unidos para desarrollar micro redes más confiables, especialmente diseñadas para cubrir la demanda en sitios críticos durante apagones, ataques y desastres naturales de gran magnitud.

Subestación: Nodo o interconexión del sistema de potencia que permite transformar el valor de tensión, frecuencia, número de fases y tipo de conexión de los circuitos de la red eléctrica.

Transmisión: Proceso mediante el cual se transporta la energía eléctrica desde las fuentes de generación hasta los lugares de consumo (ciudades). Involucra grandes distancias y altos niveles de tensión (En Colombia entre 230kV y 500kV), se denomina subtransmisión si se hace entre 57.5 kV y 220kV.

Usuario Regulado: Pequeños usuarios con bajo consumo de potencia que compran su energía a comercializadores y no participan directamente en el mercado. La CREG regula los precios para estos usuarios.

Usuario no Regulado: Usuarios con consumo de potencia promedio superior a 0.1MW o 55MWh al mes, que pueden comprar su energía directamente a los generadores para obtener mejores precios.

Resumen

Se presenta una recopilación de la historia y desarrollo de las energías renovables, las micro redes y la teoría de optimización, haciendo especial hincapié en el método de los 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, tomando como referencia datos relevantes para el momento del despacho. *Copyright © UPB 2015*

Palabras clave: Función de costo, micro redes, optimización, despacho de potencia, fuentes de generación renovable.

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 in reference to certain variables related to the dispatch.

Keywords: Cost function, microgrids, optimization, power generation dispatch, renewable energy sources.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas las fuentes de generación renovables han ganado terreno frente a las tradicionales, debido a la posibilidad de implementarlas en lugares remotos o cercanos al consumo y en diferentes escalas, eliminando la alta dependencia de los grandes generadores lejanos y con ello pérdidas significativas asociadas a la transmisión. Sin embargo, principalmente en países en vías de desarrollo, se tiene la noción de que su utilización no es viable, gracias a sus elevados costos de instalación, su naturaleza variable y los retos asociados al control de estos sistemas. La responsabilidad entonces recae sobre los centros de investigación, para desarrollar esquemas y estrategias que permitan implementar estas tecnologías en países como Colombia, basándose en las experiencias de otros estados para su incorporación, así como en el conocimiento de las limitaciones actuales del sistema eléctrico nacional.

Los avances tecnológicos y el alto grado de interés en las energías renovables han permitido mejorar tanto la relación entre los costos y la potencia generada, así como los sistemas de comunicación que permiten un mayor control de la generación distribuida. Esto ha llevado a una creciente necesidad por desarrollar estrategias de monitoreo y optimización lo suficientemente poderosas y adaptables para solucionar continuamente el problema del despacho de la potencia eléctrica.

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 tres 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.

1. RESEÑA HISTÓRICA E IMPACTO GLOBAL DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

En este capítulo se plantea una contextualización del desarrollo de las tecnologías que involucran las energías renovables. Para hacerlo, se parte de un recuento histórico desde los inicios de la manipulación de los procesos y recursos naturales, hasta las tecnologías utilizadas hoy en día y las implicaciones que estas han tenido en la sociedad y el medio ambiente. Posteriormente se hace un estudio de mercados que, por sus características, se consideran relevantes o se constituyen en un ejemplo de integración de nuevos y más eficientes métodos de generación. En tercer lugar se expone el desarrollo de las energías renovables en Colombia, su potencial y algunos proyectos que se encuentran actualmente en estudio o se han implementado. Finalmente se abarcará el tema de las micro redes, su historia e importancia, haciendo especial énfasis en eventos donde el suministro tradicional de energía se ha visto comprometido.

1.1. Generalidades de las energías renovables

“Quizás el momento más decisivo para la humanidad haya sido el descubrimiento del fuego, gracias a él, la humanidad comenzó a ser capaz de controlar y modificar muchos procesos que hasta ese momento dependían únicamente de la naturaleza. Desde entonces la energía ha sido un elemento indispensable en la satisfacción de las necesidades cotidianas”. (Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República, 2004)

Antes del siglo XIX, se utilizaban principalmente recursos de origen orgánico para satisfacer la demanda energética mundial. Su consumo era tan bajo en ese entonces que dichas materias primas se consideraban renovables. Hacia 1760, con el inicio de la revolución industrial y la invención de la máquina de vapor, se hizo posible convertir las reservas de recursos fósiles en trabajo, lo que permitiría separar las fuentes energéticas del consumo final, permitiendo el desarrollo de grandes ciudades que no dependieran únicamente de los recursos hídricos aledaños. Esta transición solo sería viable al encontrar una fuente energética con mejores condiciones y mayor disponibilidad que la leña. Rápidamente el mundo tornó su mirada hacia el carbón, un elemento que estaba presente en vastas cantidades en la naturaleza, fácil de transportar y de almacenar puesto que no se descomponía y, más importante aún, con una gran densidad de energía que permitía generar mucho más calor con menor masa, mejorando la relación entre el peso transportado y el trabajo generado. Posteriormente el mundo vería una transición aún más significativa que la del carbón. La diversificación de la tecnología para el usuario final llevaría a extender el uso de la electricidad por la facilidad de convertirla en luz, trabajo y calor mientras, simultáneamente, se imponía el petróleo como carburante fundamental en los nuevos motores de combustión interna que revolucionarían el transporte de personas y mercancías en todo el planeta.

Las grandes potencias pronto aprenderían que su dependencia del petróleo, principalmente el de procedencia extranjera, podía poner

en peligro su estabilidad económica. Una de las mayores crisis ocurrió en 1973 durante la guerra árabe-israelí, en la cual la organización de países exportadores de petróleo (OPEP) impuso un embargo contra Estados Unidos y países como Portugal, Holanda y Sudáfrica que apoyaban y proveían armas a las fuerzas judías. Dicho embargo incluía la prohibición de la exportación a estas naciones además de recortes en la producción del crudo. Ese mismo año Richard Nixon tendría que sentenciar una ley para disminuir la dependencia del petróleo extranjero y liberar la presión que ejercían los árabes por aumentar los precios y mejorar las ganancias de sus subsidiarias locales de las grandes multinacionales de crudo. (Office of the Historian, 2013)

La lección no se aprendió lo suficientemente rápido, en 1979 el Sha de Irán fue derrocado, haciéndose con el poder el ayatola Jomeini quien cortó la producción de petróleo de su país, disminuyendo las importaciones de Estados Unidos, subiendo drásticamente los precios y llevando a la nación a una nueva recesión económica, con una inflación de dos dígitos y tasas de interés sobre el 20%. Automotive News declaró que, en la convención de las Vegas de Febrero de 1979, los productores nacionales de vehículos se encontraban en un estado de intranquilidad y una creciente tensión, cuando en los primeros 10 días del año la venta de automotores había aumentado un 23%. Prácticamente de la noche a la mañana los consumidores empezaron a demandar mejor eficiencia y rendimiento de combustible, gran debilidad de los productores de Detroit, lo que los llevó a buscar automóviles japoneses. Al terminar este fatídico

año, las ventas de Datsun habían aumentado el 39.7% respecto a las de 1978 y las de Ford habían caído 17.2%. (Sawyers, 2013)

A raíz de estos eventos, el mundo comenzó a preocuparse por la eficiencia energética y surgieron inquietudes sobre los efectos que tendrían a largo plazo las fuentes energéticas utilizadas hasta el momento.

“La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue adoptada en la sede de las Naciones Unidas en New York, el 9 de Mayo de 1992. La firma de este documento responde a una inquietud surgida en la década de los ochenta, cuando comenzaron a aportarse datos científicos que preveían un posible cambio climático permanente e irreversible a escala mundial, producto del aumento de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), como son el anhídrido carbónico (CO₂) y otros gases, provenientes principalmente de las actividades humanas relacionadas con la quema de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural), la agricultura y el cambio de uso de la tierra”. (Comisión Nacional del Medio Ambiente)

Uno de los planes más ambiciosos para acogerse a lo propuesto en esta convención es la llamada *Energiewende* o transición energética alemana. Ésta incluye el desmonte gradual de todas las plantas nucleares en el país para el 2020, proceso que fue acelerado en la primavera del 2011 con el cierre de 8 plantas luego del accidente nuclear de Fukushima. A 2012 Alemania redujo sus emisiones de GEI un 27%, superando la meta del 21%

fijada en Kioto y acercándose al objetivo de 40% para 2020 (con referencia en las emisiones de 1990). (Energy Transition, 2013)

“Las fuentes renovables son aquellas fuentes primarias inagotables o con capacidad de regeneración en un periodo de tiempo inferior al de su uso. En general todas las fuentes provenientes directa o indirectamente del sol son consideradas renovables. Adicionalmente se clasifican como fuentes renovables el calor proveniente de la tierra y las mareas ocasionadas por la atracción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Algunos de los principales inconvenientes de la explotación a gran escala de las energías renovables o en cantidades suficientes para desplazar energías convencionales radican en que su disponibilidad está sujeta a la geografía: recursos como el viento, el agua o el sol tienen altos potenciales de explotación en sitios específicos. Existe además una gran variabilidad en el recurso, esto es particularmente cierto para la energía eólica, solar e hidráulica sin embalse, cuya capacidad de generación está asociada directamente a la disponibilidad del recurso y este puede presentar grandes variaciones de una hora a otra o entre el día y la noche. Otra barrera es la dificultad o imposibilidad en el transporte; a diferencia de los combustibles fósiles estos recursos deben ser utilizados y transformados en electricidad en el punto donde existen y solo así pueden ser transportados”. (García, Corredor, Calderón, & Gómez, 2013) Una de las principales ventajas de estas fuentes radica en que los usuarios finales pueden tener acceso a ellas directamente, lo que hace posible a las personas generar electricidad para consumo propio, evitando la emisión de

gases de efecto invernadero. Al mismo tiempo se aliviana la potencia demandada en los sistemas de transmisión, garantizando confiabilidad en el servicio y disminuyendo aún más la contaminación debido a pérdidas en dicho proceso. Esto ha permitido que la generación se descentralice creando ingresos para más personas. Se calcula que solo en Alemania se han generado 380 mil empleos gracias a las energías renovables. (Energy Transition, 2013)

Uno de los aspectos más importantes a considerar al utilizar este tipo de fuentes renovables es el almacenamiento de la energía, puesto que no es posible crear reservas del recurso que se usa para generarla. De allí nace la necesidad de incorporar baterías y sistemas inteligentes de monitoreo y despacho, analizando continuamente el costo de la energía para tomar decisiones sobre su permanencia como un sistema aislado o su interconexión al sistema de potencia, ya sea para satisfacer la totalidad de su propia demanda o comercializar el exceso. Esta integración de sistemas da vida a lo que se conoce como una micro red inteligente. Configuración que, además de proveer energía de respaldo en caso de cortes, se puede utilizar para ahorrar costos y garantizar la confiabilidad cuando se depende de redes muy pequeñas o inestables. Las micro redes permiten que las comunidades sean más independientes en el manejo de la energía y más amigables con el ambiente. (Lantero, 2014). Estos sistemas se pueden escalar y adaptar a las necesidades del lugar dependiendo de los recursos con los que se cuenta y la demanda a suplir.

Tabla 1. Penetración de energía renovable en mercados seleccionados (Gipe, 2013)

País	ER		Generación total	ER Total	ER Nueva
	Tota l	ER Nueva			
	%	%	TWh	TWh	TWh
Islandia	100	26,4	16,9	16,9	4,5
Noruega	97	1,4	125,2	121,4	1,8
Dinamarca	44,9	44,9	34	15,3	15,3
Portugal	37,2	25,3	52,2	19,4	13,2
Italia	32,3	17,1	284,8	92	48,7
España	30,3	22,3	292,5	88,6	65,1
Alemania	22,1	19	575,6	127,3	109,1
Francia	16,4	4,6	541,4	88,6	24,8
EEUU	12,7	4,9	4,078,5	516,7	199,5
G. Bretaña	10,6	9	342	36,3	30,6

Fuentes: EIA y otras fuentes seleccionadas

ER Total: Energía renovable (incluye hidráulica)

ER Nueva: Energía renovable a partir de plantas eólicas, solares, de biomasa y geotérmicas.

En la Tabla 1 se muestra la penetración de energías renovables en algunos mercados con gran actividad en el campo y la capacidad de sus proyectos futuros.

Se destacan dos implementaciones en Estados Unidos: la red de la cárcel de Santa Rita en California y la de Fort Collins Colorado. Esta primera, una instalación con cerca de 4000 reclusos y 500 empleados ahorra cerca de 100 mil dólares al año en electricidad (Alameda County, CA, 2015), utilizando celdas fotovoltaicas que cubren en casi su totalidad los techos de los bloques generando hasta 1.2 MW y 1MW generado con una celda de carbonato fundido que incluye un sistema de recuperación de calor para aguas de uso doméstico. Para su almacenamiento se usa una batería de ión de litio de 2MW y 4MWh y un sistema que permite que la cárcel se desconecte de la red actuando de manera aislada. Esto permite a la instalación generar casi el 70% de su carga pico de 3MW y evitar tiempos muertos en caso de cortes mientras se encienden los generadores diesel de respaldo. (Berkeley Lab and Department of Energy of the U.S).

Fort Collins Colorado, una ciudad con una carga pico de 45.6 MW y 7257 usuarios entre los que se cuenta una cervecería, un laboratorio, el campus principal de la Universidad de estatal de Colorado y varios edificios de gobierno, ha reducido la carga de sus alimentadores entre el 20% y 30%, incrementando la penetración de energías renovables y mejorando la eficiencia y confiabilidad del servicio usando celdas de combustible, micro turbinas, celdas fotovoltaicas y cogeneración. En particular la

cervecería llega a generar hasta la mitad de la energía que consume. (Berkeley Lab, 2015).

En la Figura 1 se muestra la distribución de la generación de energía eléctrica según su fuente en todo el mundo.

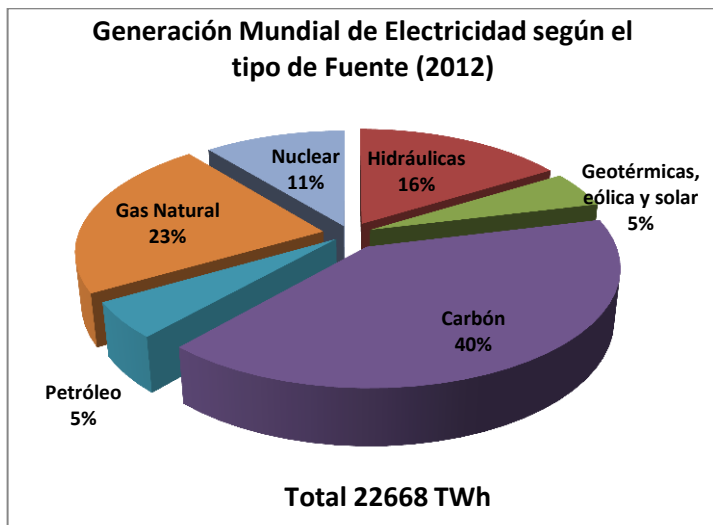


Figura 1. Generación mundial de electricidad según el tipo de fuente en 2012 (International Energy Agency, 2014)

El aumento en la demanda energética ha sido notorio a nivel

mundial, lo que ha hecho incrementar la generación de 6129 TWh en 1973 a 22668 TWh en 2012. Se destaca la contribución del carbón cuya participación varió de 38.3% a 40.4% manteniéndose como la principal fuente de energía eléctrica, y el declive del petróleo del 24.8% a 5% durante esos 40 años. Por otra parte, las energías renovables han ido ganando terreno desde un insignificante 0.6% subiendo al 5% en ese mismo período, igualando el aporte con el que contaba el petróleo en 2012. (International Energy Agency, 2014) En la Figura 1 se observan la participación de cada una de las fuentes de generación a nivel mundial para ese mismo año.

1.2. Impacto en Mercados seleccionados

En 2013 la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables aumentó en 240 TWh (cerca del 5% respecto al año anterior) y se constituyó como casi el 22% de la generación mundial total. Para el 2020 se proyecta un aumento del 45% de energías renovables con respecto al 2013. Lamentablemente esto constituye un crecimiento más lento al presupuestado en el *Medium-Term Renewable Energy Market Report 2013* de la AIE, principalmente por la poca disponibilidad que hubo de generación hidráulica durante el año y el escaso crecimiento de la biogeneración. (International Energy Agency, 2014)

Dinamarca. En marzo de 2012 se logró un acuerdo histórico para Dinamarca. En él se plantean una serie de iniciativas que contribuyen a su ambicioso plan de lograr para el año 2050 la generación del 100% de la energía para el sector eléctrico y de transporte a base de fuentes renovables. Se espera que para el

2020 la penetración de las energías renovables supere el 35%, se reduzcan los gases de efecto invernadero (GEI) en un 40% (respecto a 1990) y que el consumo energético se disminuya aproximadamente un 7.6% respecto al 2010. Esto con el fin de cumplir los acuerdos firmados con la Unión Europea donde se hace obligatorio para Dinamarca a 2020 tener una participación del 30% de energías renovables en el sector eléctrico y el 10% en el sector transporte. (Danish Energy Agency, 2013) Se presupuesta una inversión de 2950 millones de dólares para la eliminación total de los combustibles fósiles para mitad de siglo, cifra que representa alrededor del 0.5% del PIB anual de Dinamarca. (Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico, 2014)

Estas inversiones han logrado hitos históricos. El día domingo 3 de noviembre de 2013, en horas de la tarde (momento tradicionalmente de baja demanda, 3875 MW), la generación eólica superó el consumo interno aportando 3893MW. Es importante, sin embargo, tener en cuenta que Dinamarca tiene múltiples tratados de exportación de energía con Alemania, Noruega y Suecia por lo que al mismo tiempo las plantas de cogeneración aportaban 334 MW y las termoeléctricas 1262 MW para un intercambio neto de 1615MW. (Morris, 2013) A pesar de esto se debe considerar la naturaleza variable del viento pero sin desconocer su gran aporte. En 2014, el 39.1% de la energía consumida en Dinamarca se suplió con generación eólica, siendo el mes de mayor participación enero con un impresionante 61.7% y, el de menor, julio con 23%. (Norskov, 2015)

En la Figura 2, se muestra, gracias a la base de datos de Scopus, que países han sido más activos en la investigación de energías renovables y cuanto han publicado al respecto.

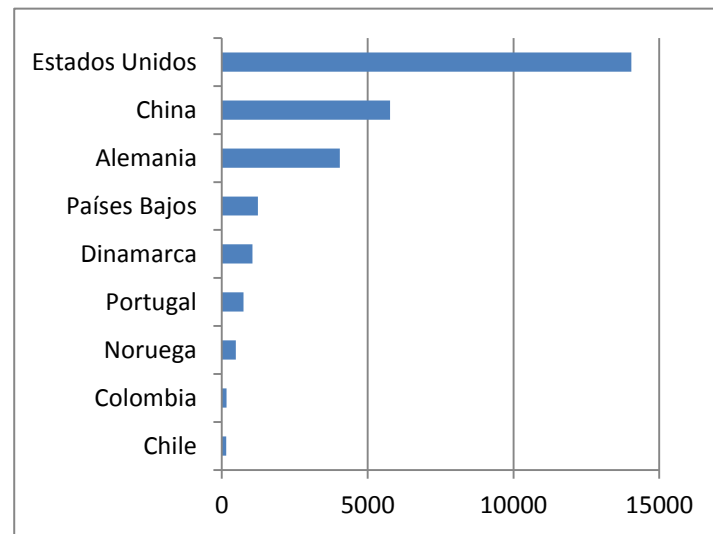


Figura 2. Número de artículos en Scopus por país que incluyen “*Renewable energies*” como palabra clave

Alemania. Uno de los países que más se ha interesado por el tema, es Alemania. Esto se ve claramente en la reducción de la generación a base de plantas nucleares que en el año 2000 ascendió a poco más de 161 TWh (29.8% del total generado) mientras las fuentes renovables aportaron cerca de 41 TWh (donde 19.5 correspondían a fuentes distintas a la hidráulica, con participaciones de 7,77% y 3,6% respectivamente). Para el año 2012, con los cierres de plantas nucleares motivados por el incidente de Fukushima, su participación se redujo en casi un 42% aportando tan solo 94 TWh (16% del total de 585 TWh), siendo sobrepasado por los 142 TWh generados con fuentes renovables (de los cuales 121.7 corresponden a fuentes distintas a la hidráulica, para un aporte del 24.3% y 20.8% respectivamente). (U.S. Energy Information Administration, 2013) La meta que se ha impuesto el Estado para 2020 es aumentar este último porcentaje al 30%. (RWE AG) Entre las múltiples iniciativas que han aportado al cambio evidenciado en estas cifras se destacan el proyecto de la ciudad de Múnich y el de Frankfurt. En el primero se pretende suplir la demanda de hogares completamente con energías renovables para el 2015 y para todos los usuarios a 2025, incluyendo generación solar, eólica, hidráulica, biogeneración y cogeneración. Y en la segunda se pretende eliminar totalmente las emisiones de carbono para el año 2050. (GO100% Renewable Energy, 2015)

Portugal. Portugal ha dependido históricamente de la generación hidráulica para satisfacer la demanda de energía. Pero debido a su clima Mediterráneo es propenso a fuertes sequías. En el año 2005,

el tiempo seco le costó al país cerca de 300 millones de euros (Khalip, 2012), principalmente por los problemas en el sector agro y el encarecimiento de la generación eléctrica. En 2003 la generación hidráulica aportó 15.6 TWh, contra 26.8 TWh generados a partir de combustibles fósiles y 2.26 TWh de fuentes renovables (distintas al agua). Dos años más tarde, el escenario se invirtió completamente. Ahora la hidráulica aportó sólo 4.68 TWh, siendo necesario recurrir a las fuentes fósiles que generaron 35.4 TWh y las fuentes renovables sólo 3.83 TWh. Las inversiones de la nación en energías renovables, principalmente eólicas, permitieron que, en 2012, en una nueva sequía donde solo fue posible generar 5.6 TWh a partir de las centrales hidroeléctricas, se contara con 13.75 TWh de energía renovables. Para ese año la generación utilizando combustibles fósiles sólo ascendió a 24.4 TWh, es decir, casi 2 TWh menos que en 2003 y solo 1 TWh por encima de 2010, año con abundantes precipitaciones. Los mayores contribuyentes a esta cifra fueron la energía eólica, seguida de la biomasa, la solar y mareomotriz con 10.26, 2.95 y 0.39 TWh respectivamente. (U.S. Energy Information Administration, 2013) (Gipe, 2013)

Noruega. Noruega tiene el segundo consumo eléctrico per cápita más alto del mundo (solo por detrás de Islandia), con más 23 MWh por habitante por año. El país, generó en 2012 144.62 TWh, 140 de ellos solo de fuentes hídricas, es decir que esta nación, con una decimosexta parte de los habitantes de Alemania, es capaz de generar más de una cuarta parte de la energía eléctrica de dicho país. Esto significa necesariamente que Noruega cuenta con un

excedente, pues su consumo en 2012 ascendió a 115 TWh, lo que les permitió exportar energía a sus vecinos Dinamarca, Alemania, Suecia, Finlandia, entre otros. En las sequías de 2003, el país nórdico generó 104.4 TWh, y consumió 103.7 TWh, castigando las exportaciones y necesariamente aumentando los costos para sí mismo y los demás países. Para el siguiente año, los efectos seguían latentes y la generación aumentó sólo hasta 107 TWh intentando minimizar el abuso de sus embalses. (U.S. Energy Information Administration, 2013) Esto ha demostrado la dependencia europea de la energía Noruega y las complicaciones producto de los extensos períodos de transición entre las sequías y las temporadas lluviosas.

Aunque se suele resaltar la naturaleza variable de las fuentes renovables, incluso cuando esto se da por cortos periodos, no se hace la misma crítica con las fuentes convencionales. Para el caso de Noruega esto se hace evidente, pues su generación ha variado tanto como el 25% entre años húmedos y secos.

Estados Unidos. Estados Unidos se constituye como el segundo mayor consumidor de energía eléctrica en el mundo con 4047 TWh en 2012, solo por detrás de China que llegó a los 4768 TWh en el mismo año. La mayor participación de la generación en el país norteamericano corresponde a los combustibles fósiles con un impresionante 68.6%, viniendo de un 74% en 2005, mientras que las renovables representan el 5.7%, la hidráulica el 6.8% y la nuclear el 19%. (U.S. Energy Information Administration, 2013) Esto a pesar de su gran potencial para las energías renovables pues su territorio incluye los desiertos de Chihuahua, Mojave,

Sonora y Nevada que podrían ser explotados para generación solar en cualquiera de sus clases. Cuenta además con una industria alimenticia muy desarrollada, generando gran cantidad de residuos que podrían ser aprovechados para desplazar a los combustibles fósiles utilizados actualmente. Hasta el momento, aunque no ha habido muchos desarrollos en el campo de las energías renovables en este país, algunos estados han implementado ambiciosas políticas para incentivar proyectos en este ámbito. Entre ellos se pueden destacar Texas y California. Este primero, tradicionalmente productor de petróleo, es hoy en día el líder nacional en la instalación de granjas de generación eólica con un total de 12976 MW en todo su territorio, incluyendo la que fuera la mayor de su clase hasta 2012, The Roscoe Wind Farm, con 781 MW instalados, destronada precisamente por un proyecto en California, para ese entonces con 1020 MW instalados y que llegará hasta los 1550 MW con el apoyo de Google y Citigroup, The Alta Wind Energy Center. (Citigroup) El estado de la estrella solitaria genera actualmente el 8.3% de su electricidad a partir del viento, suficiente para satisfacer la demanda de 3.3 millones de hogares. (Wind Energy Foundation) California, el estado dorado, cuenta con la planta de generación solar Ivanpah, que toma su nombre del lago seco en el que se ubica, ocupando un área de 14.164 kilómetros cuadrados, con una capacidad instalada de 377 MW, y un costo de 2200 millones de dólares aportados por Google, el Departamento de Energía, NRG y Bechtel Corporation. El proyecto usa tecnología solar térmica y cuenta con 300 mil espejos controlados por software utilizados para redirigir el sol hacia una torre de 140 metros de altura donde

se calienta agua para mover una turbina, como se hiciera con cualquier combustible fósil. Se espera que en 30 años de uso se dejen de emitir 13.5 millones de toneladas de dióxido de carbono. (Ivanpah Solar, 2013)

En diciembre de 2013, el presidente Obama ordenó a todos los estamentos federales obtener el 20% de su energía eléctrica de fuentes renovables para el 2020, generándola por sí mismos o comprándola, actualizando la directriz que impusiera el senado en 2005 para alcanzar una participación del 7,5% en 2013. Se dijo además que las emisiones de carbono debían bajar en un 17% para 2020 (en referencia a 2005) y que el gobierno debía constituirse en el ejemplo a seguir. (Bernstein, 2013) Esta exigencia se suma al plan de acción para el clima presentado el 25 de junio de 2013 por el presidente, en el cual se planteaba reducir las emisiones de carbono en 3 mil millones de toneladas para 2030, es decir más de la mitad de la polución generada anualmente por el sector energético del país norteamericano. (Obama, 2013)

Entre los estados con metas más ambiciosas para la participación de las energías renovables se encuentra California con 33% y Colorado con 30% para 2020, y Nueva York con un 29% para 2015. (North Carolina State University, 2014)

Por otra parte, Sudamérica, a diferencia de los países europeos, cuenta actualmente con muy pocos proyectos y la capacidad instalada de energías renovables es insignificante. Sin embargo, durante los últimos años se ha visto la necesidad y la viabilidad de hacer inversiones en este campo. Un ejemplo de ello es Chile,

donde se planea construir, en el desierto de Atacama, un parque fotovoltaico de 1000 hectáreas (4 millones de módulos solares) con una capacidad total instalada de 250 MW y una inversión de US\$ 773 millones. Su construcción se llevará a cabo en 5 etapas anuales de 50MW y se espera que su vida útil sea de 30 años. El proyecto reducirá las emisiones de CO₂ equivalentes a generar 522.36 TWh/año usando combustibles fósiles. (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2012) Otro ejemplo destacado se encuentra Uruguay, donde se proyecta convertir el aeropuerto de Carrasco en el primer edificio de su clase en utilizar energía 100% renovable. Para esto se ocuparán 4 hectáreas con paneles fotovoltaicos que generarán entre 3 y 4 MW para satisfacer la energía que es utilizada con distintos fines en las instalaciones así como para satisfacer el transporte interno. El comienzo de la instalación estaba presupuestado para el segundo semestre de 2014 y tomaría cerca de 2 años. El Director Nacional de Energía de Uruguay, Ramón Méndez, declaró que en un futuro no muy lejano el 95% de la energía de Uruguay provendrá de fuentes renovables, y los viajeros observarán los parques eólicos al entrar al país e, incluso, el bus que tomen tras salir del aeropuerto será alimentado con energía eléctrica. (Presidencia República Oriental del Uruguay, 2014)

1.3. Colombia, historia, actualidad y potencial

“En Colombia el tema es primordial, ya que el país y su red de generación eléctrica es altamente vulnerable al cambio climático. En 2012 el parque de generación eléctrica estaba compuesto en

67% por generación hidroeléctrica (64,88% grandes centrales y 2,12% plantas hidráulicas menores), y 32,73% por generación térmica, de la cual 27,79% es con turbinas de gas natural, 4,94% con plantas de carbón y 0,14% en cogeneración y 0,13% en generación eólica. (UPME, 2012) En cuanto a la generación total de energía, la generación hídrica oscila entre 45% y el 95% según la disponibilidad del recurso hídrico y el resto se produce a partir de centrales térmicas. (Behrentz, Cadena, Mutis, Pérez, & Rosales, 2012) Esta composición hace que la generación eléctrica en Colombia tenga una menor huella de carbono que otros países, pero en los años en los que la generación térmica ha tenido una alta participación por escasez hídrica, la intensidad de emisiones de carbono ha aumentado. Es así que ante escenarios de cambio climático con fenómenos más marcados de El Niño puede aumentarse la producción a partir de centrales térmicas que generan un mayor nivel de emisiones de GEI.” (García, Corredor, Calderón, & Gómez, 2013) Estos porcentajes se calculan sobre una generación neta de 57.8 TWh en 2012.

Esta dependencia de los recursos hídricos tocó su punto más crítico en 1992, año en que se presentó un fuerte fenómeno del niño que destaparía los graves problemas de planeación y regulación en el mercado nacional. El impacto fue tal, que el gobierno decidió ejecutar un estricto plan de racionamiento, inicialmente de 2 horas que se aumentaría a 9 en ciudades como Bogotá, y 18 en el archipiélago de San Andrés y Providencia. Adicionalmente, con el fin de reducir el consumo energético, se decidió adoptar la clásica medida de la hora de verano, que se

conocería en el país como “La hora Gaviria” (refiriéndose al presidente de ese entonces) , de manera que se aprovechara la mayor cantidad posible de horas de sol. (Colprensa, 2012)

Poco a poco fueron saliendo a la luz las razones reales de la crisis. El ministro de Minas y Energía de la época, Juan Camilo Restrepo, el mismo que propusiera el racionamiento, revelaría ante el Senado que dos años antes el gobierno había archivado el plan de expansión, pues la demanda no crecía como los expertos en econometría habían calculado (cerca del 10%), por lo que el sistema parecía sobredimensionado y la carga financiera del Estado era demasiado grande. En realidad el sistema estaba 500 MW por debajo de lo necesario y debía seguir creciendo 350 MW al año. Anteriormente, en 1982, una crisis energética de parecidas proporciones tuvo lugar y por las mismas razones, con un déficit aproximadamente igual al del 92. Un estudio contratado por Interconexión Eléctrica S.A. –ISA- (operador del mercado y del sistema de transmisión colombiano) predijo en 1990, que para dos años más tarde habría que racionar un 5.1% de la demanda total de energía con pérdidas cercanas a 1600 millones de dólares anuales por los retrasos en el plan de expansión. Estudio desmentido dos años más tarde por Pedro Javier Soto Sierra, gerente para entonces de la misma compañía, quien aseguraría que se contaban con suficientes reservas para varios años más. En ese momento las plantas termoeléctricas constituían el 22% del total de la potencia instalada en el país pero su mal estado habría forzado mayor generación por parte de las hidroeléctricas. La situación era tal que la Corporación Eléctrica de la Costa

Atlántica (Corelca), teóricamente con una capacidad de 1100 MW, solo podía generar 700 MW (36% menos) por falta de mantenimiento. Esto se repetía por toda la zona costera, Termobarranquilla generaba menos de la mitad de su capacidad nominal de 270 MW, además de unas pequeñas plantas con hasta 50 o 60 años de antigüedad que llevaban varios años sin funcionar y su reparación no era rentable. El caótico panorama era completado con el caso de la planta de Chinú, una sorprendente muestra de ineptitud, en que una planta con 10 años de existencia nunca entró en funcionamiento por falta de gas en la zona. (Mejía Mazuera, 1992)

Como consecuencia de estos hechos, Colombia mejoró la regulación del mercado y ha aprobado leyes que promueven el desarrollo de nuevas fuentes energéticas. Lamentablemente también se dio un crecimiento en la participación de los combustibles fósiles como una forma para amortiguar las crisis que puedan ocasionar las sequías en el futuro (del 22% al 32% de la capacidad instalada en el país).

Colombia, con sus 2270 billones de metros cúbicos de agua dulce, un área de 1109500 km² y una densidad poblacional de apenas 44 habitantes por kilómetro cuadrado, tiene poco más de 35 veces el agua por habitante de Alemania y aproximadamente 5 veces el de Estados Unidos, lo que ha definido la generación hidráulica como el camino seguro para suplir la demanda interna e, incluso, vender energía a los vecinos Ecuador y Venezuela, quienes históricamente han dependido de la generación a base de hidrocarburos. (Banco Mundial, 2014) Esto ha causado que se

dejen de lado otras posibles de generación que puedan mejorar la forma en que se distribuyen las centrales por el país ya que históricamente los embalses se han concentrado en la zona andina y las termoeléctricas en la región atlántica. Dicha región, junto con la pacífica tiene un potencial que ha sido ignorado totalmente en Colombia. Sumadas, ambas costas colombianas miden 3100 km, a lo largo de los cuales se podrían instalar aerogeneradores tanto *off-* como *on-shore*, emulando lo hecho en países de largas líneas costeras como Dinamarca, o turbinas para generación mareomotriz. Esta última con gran potencial, pues el agua tiene cerca de 800 veces la densidad energética del viento permitiendo su funcionamiento con velocidades a partir de 2 m/s. En el litoral pacífico se encuentran cerca de 45 bahías con un potencial total de 120 MW, mientras que en el atlántico la velocidad del agua no probó ser suficiente para la generación pues ascendía hasta escasos 1.2 m/s, excepto en la bahía de Santa Marta, pero ésta ya se encuentra bloqueada por una carretera. (Polo, Rodríguez, & Sarmiento, 2008) Respecto a la generación eólica, actualmente en Colombia solo se cuenta con la central Jepirachi ubicada en el departamento de la Guajira, límite norte del país, con una capacidad instalada de 19.5 MW pico repartidos en 15 unidades de 1.3 MW y 60 metros de altura, aprovechando vientos promedio de 9.8 m/s. Cabe resaltar que este proyecto se construyó en el territorio de la comunidad Wayuu, grupo aborígen más abundante de Colombia, con el acompañamiento de sus habitantes, evitando cualquier desplazamiento del suelo o conflictos con esta etnia. (EPM)

Debido a su naturaleza agropecuaria, Colombia tiene una gran capacidad para desarrollar la biomasa como fuente energética, pues produce vastas cantidades de residuos provenientes del arroz, banano, café, caña de azúcar, caña de panela, maíz, palma de aceite y plátano, cultivos comunes en el país, así como desechos propios de la ganadería bovina, porcina y avícola. El potencial total de sector agrícola asciende a 331645 TJ/ año, y en el pecuario a 117747 TJ/año. Esta energía sería aprovechable en forma de gas natural para cocinar o generar electricidad. (Ministerio de Minas y Energía, 2010) En 2008 entró en funcionamiento la primera planta para producción de biogás a base de madera en el municipio de Necoclí, ubicado en el golfo de Urabá, costa caribe del país. Lo que siempre fuera un problema para el municipio, la excesiva presencia de madera en sus playas, arrastrada hasta allí por el Río Atrato desde los departamentos de Antioquia y Chocó, se convirtió en una solución para abastecer a cerca de 200 habitantes distribuidos en la zona, mediante un generador de 40 KW y una línea de distribución de media tensión de 13200V y conexiones en baja tensión de 120/208V. Este proyecto se desarrolló por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE) y la Universidad Nacional sede Medellín. (Agencia de Noticias UN, 2008) (IPSE, 2011)

El potencial geotérmico de Colombia también ha sido explorado desde los años 70, motivado por la amplia presencia de volcanes en el territorio nacional. Entre ellos el macizo volcánico del Ruiz, considerado uno de los más activos del mundo, y el proyecto

geotérmico de Tufiño-Chiles-Cerronegro ambos adelantados por ISAGEN, la tercera generadora más grande del país, y con aportes del gobierno colombiano y ecuatoriano. Los estudios cuentan con el acompañamiento de múltiples entidades estatales incluyendo la Universidad Nacional de Colombia, Colciencias, el Centro Internacional de Física (CIF) e Ingeominas (hoy en día servicio geológico colombiano) y, en algunos de ellos, apoyo de instituciones internacionales como el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Fondo Japonés y el consorcio GEF, del Banco Mundial. Para el caso del proyecto binacional se incluyó además la estatal Corporación Eléctrica de Ecuador (Celec) que aportó la mitad de 4 millones de dólares necesarios para el estudio. (ISAGEN, 2012) (Rojas T., 2012) Actualmente no existe ningún proyecto en funcionamiento en el país y los resultados de los estudios no han sido publicados.

1.4. Generalidades de las Micro Redes

Una micro red es un conjunto 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)

Las micro redes están diseñadas para prestar servicio a comunidades urbanas de pequeña o mediana extensión o a zonas rurales grandes y pueden ser una forma confiable, económica y amigable con el medio ambiente de generar energía en niveles de

voltaje de distribución. Sus fuentes se pueden clasificar según sus características de dos maneras: en despachables y no despachables, en términos del control del flujo de potencia o en inerciales y no inerciales, según la forma en que se conectan al sistema. Esta primera diferenciación hace referencia a la forma en que se puede disponer de los generadores en cualquier momento. Los generadores diesel, micro turbinas y celdas de combustible, por ejemplo, pueden ser puestos en funcionamiento en cualquier momento pues solo dependen de la existencia de una reserva de combustible, de ahí el nombre de esta categoría, pues pueden ser despachados a voluntad. Esta clase es a su vez la responsable de mantener la frecuencia del sistema. Los no despachables son aquellos que dependen de condiciones ambientales externas, imposibles de controlar y solo medianamente predecibles, como los aerogeneradores y los paneles PV. Esta clase depende de técnicas de control para optimizar la potencia que entregan al sistema y mantener la frecuencia de la red. Es por esto también que algunos sistemas eléctricos donde priman las energías renovables y los aerogeneradores como en Dinamarca, suelen conectarse a redes mucho más fuertes, en este caso la de Alemania, para realizar dicho control. Por otro lado, se dice que una fuente es inercial cuando incluye generadores, normalmente sincrónicos, con su propia masa inercial, que les permite seguir rodando aun cuando falte propulsión y por tanto no causan súbitas variaciones en el intercambio de potencia con el sistema. Los no inerciales son aquellos como las baterías, celdas de combustible y celdas fotovoltaicas, conectadas a través de inversores donde el cambio puede ser instantáneo. (Dewadasa, Ghosh, & Ledwich)

Las micro redes se constituyen en una posibilidad para mejorar la confiabilidad de los sistemas eléctricos debido a sus características constructivas y operativas. Gracias a su naturaleza controlable, aportan a la modernización de las redes enviando en tiempo real datos importantes de las variables del sistema, mejorando la integración de técnicas de redes inteligentes. Además permiten implementar métodos de generación distribuida y renovable que anteriormente no eran viables, como la cogeneración. Reducen los costos de transmisión y la contaminación, horas pico críticas para la demanda y permiten a terceros construir proyectos locales evitando así inversiones de sumas astronómicas que incluyen grandes intervenciones perjudiciales para los ecosistemas. Las micro redes promueven la independencia energética de las comunidades y les permiten hacer parte del suministro de electricidad, para así ajustarlo a sus necesidades. (Bialek, 2014)

Tal vez la característica más importante de las micro redes radica en su capacidad para alimentar cargas críticas, demasiado importantes para depender solo del sistema de distribución y sumamente costosas de respaldar únicamente con generación diesel. Este aspecto podría transformarlas en la principal solución a los problemas relacionados con los cortes de energía, en instalaciones gubernamentales o de servicios de emergencia como los acueductos, prisiones, hospitales, aeropuertos, entre otras. Un claro ejemplo viene de una comparación bastante curiosa. Cuba, país que tuvo 224 días de apagones serios en 2005 debido a la inestabilidad de su red, altamente dependiente de 11 generadores

de la era soviética, pasó a tener solo 3 en 2006 y ninguno en 2007, adoptando generación distribuida, sistemas más eficientes y en algunos casos micro redes independientes. Eso permitiría que en 2008, cuando dos tornados atacaron la red cubana en solo 2 semanas, principalmente en la parte este, el suministro se mantuviera. Por otro lado Estados Unidos, durante el huracán Sandy en 2012, no pudo restablecer el servicio de 25000 hogares por dos semanas. Aquellos menos afectados por esta clase de eventos, por ejemplo los habitantes de las zonas montañosas, suelen ver el suministro afectado por culpa de las nevadas. (Lovins, 2012)

Algunos de los mayores apagones de la historia han tenido consecuencias nefastas en la economía y la seguridad pública, incluyendo daños en los equipos y posibles pérdidas humanas. El 14 de Agosto de 2003, mientras la red del noreste de Estados Unidos estaba en los límites de temperatura debido al extendido uso de aires acondicionados durante el verano y múltiples generadores estaban fuera de servicio por mantenimiento, un árbol causó un corto circuito que dejó sin energía a cerca de 50 millones de personas en 9 estados incluyendo Ontario, Canadá. Este episodio, que empezó a las 4:10 pm, duraría cerca de dos días y se constituyó como el segundo mayor apagón por número de afectados en la historia, solo por detrás del ocurrido en Brasil en 1999. Este evento llevaría a pérdidas cercanas a los 10 mil millones de dólares y 11 muertes. (Walsh, 2013) En total 21 plantas generadoras se desconectaron, dejando fuera de funcionamiento ascensores, trenes, semáforos e, incluso, el

servicio de acueducto de Michigan, dependiente de bombas eléctricas. Los aeropuertos también se vieron afectados, aunque el de Cleveland y dos de los neoyorkinos solo experimentaron retrasos, el JFK Airport, también en Nueva York, duraría más de 4 horas sin servicio. Ese mismo día se despacharon 40 mil policías para mantener el orden en la gran manzana en la primera noche de apagón. (CNN, 2003) Además del fatídico evento de 1999, donde 97 millones de personas quedaron sin energía durante 5 horas, Brasil sufrió otro apagón en 2009 que levantaría graves interrogantes sobre su infraestructura y su capacidad para realizar grandes eventos como el Mundial de Fútbol 2014 y los Juegos Olímpicos de Rio en 2016. Ese jueves 10 de Noviembre, cerca de 60 millones de personas se quedaron sin electricidad en 18 de los 26 estados del país y 7 millones perdieron el suministro de agua en la ciudad de Sao Paulo. El evento causó además una desconexión momentánea de todo el sistema de potencia paraguayo. Las proporciones de este episodio fueron tales que Itaipú, la segunda hidroeléctrica más grande del mundo, salió de funcionamiento por primera vez en sus 25 años de historia. (AP, 2009) En Colombia el apagón de mayores proporciones se presentó en 2007 cuando, durante actividades de mantenimiento con posibilidad de disparo en el interruptor de acople de barras de la subestación de Torca en Bogotá, la activación de su protección causó la salida de 10 elementos correspondientes al 31.5% de la potencia generada en ese momento, aunque supuestamente el sistema estaba cubierto para los casos N-1 y N-2. La apertura en cascada de múltiples interruptores provocó la suspensión del servicio en el 80% del país. (XM, 2012)

Breve historia del desarrollo de las micro redes. El concepto de las micro redes es en realidad la reformulación de un sistema más antiguo. Desde que en 1882 se creó la central Pearl Street en Nueva York bajo la dirección de Thomas Alva Edison haciendo uso de sus “*Jumbo Dynamos*” para generar en total poco menos de 1 MW, lo que ahora se conoce como generación distribuida o micro red era el estándar alrededor del mundo. De hecho, en 1918 cerca de la mitad de los consumidores en Estados Unidos, principalmente en ciudades pequeñas, recibían el suministro de plantas aisladas de menos de 10 MW. Los sistemas locales solo alimentaban unas cuantas millas y no se interconectaban entre sí, lo que los hacía poco confiables, pues una sola planta que fallara se convertía en un apagón de todo el sistema. Este modelo era entonces necesariamente caro, cerca de \$1 USD/ kWh (convertido a 2001 por inflación) y funcionaba por periodos cortos pues no era viable usarlo durante los momentos de bajo consumo del día. La eficiencia de estos sistemas solo se hacía razonable cuando se utilizaban simultáneamente para generar calor y potencia eléctrica (cogeneración), lo que sucedía en lugares donde la localidad ofrecía servicios de calefacción distrital. Sin embargo, la eficiencia no sobrepasaba el 25% cuando no se aprovechaba el calor residual. (EPRI, 2001)

Los primeros ingenieros encargados del suministro eléctrico en cada ciudad empezaron a considerar la interconexión como una manera de aumentar la confiabilidad de sus redes, puesto que esto permitía que algunos de los generadores asumieran la carga de aquellos que debían salir de funcionamiento. Además, la

interconexión permitía mejorar el factor de carga y, con ello, la eficiencia, disminuyendo el costo del kWh. Así se empezaría a considerar la idea de integrar estas versiones tempranas de micro redes en lo que hoy se conoce como un sistema interconectado. Una de las principales dificultades para lograrlo sería la diferencia entre las frecuencias utilizadas en cada localidad, pues algunas funcionaban en corriente alterna, entre 25 Hz y 100 Hz, y otras en corriente directa. Este problema se hacía más complicado de enfrentar por la falta de desarrollo en los métodos de sincronización, protección y control remoto. (EPRI, 2001)

Entre 1910 y 1920, múltiples avances tecnológicos motivarían la creación de un sistema interconectado de mayores proporciones, principalmente por la construcción de grandes centrales hidroeléctricas alejadas de los centros urbanos, el desarrollo de nuevas tecnologías de Transmisión y Distribución (T&D), la estandarización de los 60 Hz que hacía cada vez más fácil la sincronización entre sistemas antes aislados y el funcionamiento de grandes generadores como economías de escala, haciendo cada vez menores los costos por kWh. Además, con la nueva diversidad de la red, se mejoraba el factor de carga y se contaba con mayor cantidad de generadores, cada vez más eficientes, por lo que aparecería un primer atisbo de lo que es hoy el despacho económico, conectando los generadores con la mejor relación potencia/precio. (EPRI, 2001)

En Estados Unidos, en el periodo entre 1907 y 1970, los incentivos federales para la construcción de grandes proyectos como la represa de Hoover y de Grand Coulee, así como el

desarrollo de tecnologías nucleares evitó que pequeñas centrales entraran en el negocio vendiendo a sus zonas cercanas. Estas nuevas políticas incluyeron subsidios para la interconexión de las zonas rurales lo que evitó la creación en estos lugares de soluciones alternativas y con fuentes renovables o de producción local. En 1970 cerca del 95% de la energía eléctrica vendida en Estados Unidos se hacía a través de los sistemas interconectados. Aun así, algunos sistemas en forma de micro redes se mantuvieron en lugares de difícil acceso como islas, donde la instalación de cables submarinos no era económica o técnicamente viable. (EPRI, 2001)

A continuación se hará un recorrido por proyectos significativos organizados por países.

Corea del Sur. Jeju, la isla más grande de Corea del Sur y ubicada en el extremo austral del país, es ahora también su primer banco de pruebas para la aplicación de tecnologías renovables de generación y uno de los primeros del mundo. Su importancia es vital para cumplir la ambiciosa meta del estado de reducir en un 30% las emisiones de CO₂ para el 2020. En el proyecto participaron 168 compañías como Hyundai, LG, GS Caltex, ABB, Samsung, ICEPCO, Poscon y SK Telecom. La inversión total es cercana a los US\$ 208 millones, de los cuales 58 son aportados por el estado, y lo demás por las empresas privadas. La primera fase del proyecto, concluida en 2011, involucró la construcción de la micro red y la infraestructura. La segunda, ejecutado desde el verano de 2011 hasta mayo de 2013 se concentraba en hacer pruebas a la red y la calidad de los servicios, de manera que se

puedan obtener los datos necesarios para replicarlo exitosamente en la porción continental del país. El proyecto cubre cerca de 6000 hogares. Para 2030, Sur Corea generaría el 11% de su energía a partir de fuentes renovables, eliminaría aproximadamente 230 millones de GEI, crearía 50 mil empleos anualmente, generaría US\$ 64 mil millones de dólares en demanda interna de nuevas tecnologías, eliminaría US\$ 40 mil millones y ahorraría US\$2.8 mil millones en la construcción de plantas generadoras convencionales. (GSMA, 2012) El proyecto se centra en 5 áreas de estudio para optimizar su funcionamiento. Red inteligente, diseñada para permitir todo tipo de interconexión entre los consumidores y generadores, allanando el camino para nuevos modelos de negocio. Consumidor inteligente, usando información en tiempo real para incentivarlo a ahorrar en el uso de la energía, con electrodomésticos que responden al nivel de carga de la red. Transporte inteligente, apuntando a la construcción de puntos de carga de vehículos eléctricos conectados directamente al sistema donde se cargan en los momentos de bajo uso de la red. Fuentes renovables inteligentes, motivando la construcción de complejos que puedan alcanzar la autosuficiencia energética implementando tecnologías de generación de pequeña escala. Servicio inteligente de electricidad, creando una serie de planes para ahorrar el consumo adaptándose a las necesidades de cada usuario. (Korea Smart Grid Institute) El proyecto cuenta con 5 instalaciones distintas y un centro de operaciones central. Cada granja de generación eólica está compuesta de turbinas de diferente procedencia para probar cada

una de ellas antes de extender su uso por toda la nación. (Min, 2012)

Países Bajos. La primera micro red del país se ubica en el centro vacacional Bronsbergen cerca de Zutphen (aproximadamente 100 kilómetros al oeste de Amsterdam). Las instalaciones están compuestas por 208 casas de veraneo, de las cuales se utilizaron 108 para ser adaptadas con paneles fotovoltaicos obteniendo una capacidad instalada pico de 315 kWp para una carga pico de 150 kW. Por lo tanto dos bancos de baterías han sido adheridos permitiendo almacenar la carga extra para los momentos de baja radiación solar. Los objetivos de la investigación en este sistema se centran en permitir que éste funcionara de manera aislada de la red durante 24 horas continuas, además se planea trabajar con el control de las baterías para maximizar su vida útil, reducir los problemas de armónicos y mantener la correcta operación de la micro red durante fallas en las líneas de media tensión, a las cuales está conectada por un interruptor automático de a 10 kV. (Loix, 2009)

Japón. La micro red de Sendai es, tal vez, la más conocida del planeta, y pertenece a un grupo de 4 proyectos ejecutados en Japón entre 2005 y 2008 por *New Energy and Industrial Technology Organization* (NEDO). Alcanzaría gran parte de su reconocimiento por su excelente desempeño durante el terremoto y subsecuente tsunami de 2011, durante el cual, después de una pequeña interrupción en el servicio, serviría para alimentar el hospital de la universidad Tohoku Fukushi con electricidad y calefacción por los siguientes dos días. Las instalaciones incluyen

sets de generadores de gas natural que suman un total 350 kW, 50 kW de generación solar fotovoltaica y un sistema de almacenamiento. Una de sus características especiales es la inclusión de circuitos independientes con 6 niveles de calidad, uno de ellos en corriente directa para la sala de control. Estos se eligieron en CD para evitar que las señales CA causaran distorsiones en las medidas y el control. (Berkeley Lab)

Estados Unidos. Es el país líder en el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas a las micro redes. Una de estas es la tecnología SPIDERS, implementada por primera vez en la base de Pearl Harbor, Honolulu, Hawái, incorporando 146 kW de generación PV y cerca de 50 kW de eólica (Burns & McDonnell, 2012). La universidad de California, San Diego cuenta con una micro red para proveer el 85% de la electricidad, 95% de la calefacción y 95% del aire acondicionado para su campus principal, con una población diaria de 45 mil personas y una extensión de 450 hectáreas. Esta consiste en dos turbinas de gas que generan 13.5 MW, una de vapor de 3MW y celdas solares de 1.2 MW. Estas turbinas producen 75% menos emisiones que las plantas de gas convencionales y cuenta además con un depósito de energía térmica con una capacidad de 140674 kW/hora, 14385m^3 , una celda de carbonato fundido de 2.8 MW y 8 enfriadores, de los cuales 3 son impulsados por turbinas de vapor y 5 por electricidad. (Berkeley Lab)

El complejo residencial y comercial Mesa del Sol en Albuquerque, Nuevo México creada por la japonesa NEDO, el estado, la compañía estatal de servicios públicos, Sandia National

Laboratory y compañías japonesa como Shimizu, Toshiba, Mitsubishi, entre otras. El sistema incluye 50 kW de generación PV instalados sobre los techos de los parqueaderos, 80 kW de celdas de combustibles, un generador de gas natural de 240 kW, un banco de baterías de plomo-ácido, un enfriador y depósitos de calor y frío. (Berkeley Lab)

Fort Bliss, una instalación militar ubicada en Texas, ha revelado la que sería la primer micro red al servicio del ejército estadounidense. El sistema incluye energía renovable, almacenamiento, generación local y control de la demanda para garantizar un servicio ininterrumpido a pesar de condiciones adversas. El mayor General Dana J.H. Pittard fue citado diciendo que la micro red era de importancia estratégica para su independencia energética, que permitiría blindarlos ante ciberataques, a los cuales la red normal es muy propensa, y que el sistema de US\$ 2.4 millones sería escalable. Se espera un ahorro en los costos de la energía del 20%, sobre una base de US\$ 16 millones. El plan incluye la conversión de Fort Bliss para 2018 en un complejo con cero consumo de energía y agua externas, además de generar cero residuos. Por el momento se encuentran instalados un generador de respaldo, un arreglo solar de 120 kW, un sistema de almacenamiento de energía de 300 kW y conexión a la red de servicios, proceso realizado por el contratista privado Lockheed Martin, mientras que para 2015 se espera comenzar con un proyecto de granja solar de 20 MW para otro sector del fuerte, realizado con apoyo de la empresa de servicios públicos El Paso Electric. (Ferdinando, 2013)

China. En la ciudad de Hangzhou, en el extremo sur del gran canal de China, se encuentra la micro red de la universidad Hangzhou Dianzi, construida por la alianza entre NEDO y NDRC (*National Development and Reform Commission*), catalogada como la primera de su clase en alcanzar 50% de penetración de generación PV. Sus instalaciones incluyen 728 paneles solares que cubren un área de 946m² y generan 120 kW, acompañados de un generador diesel de igual capacidad. El sistema además está acoplado con celdas de combustible, un banco de baterías de 50 kW y un capacitor de 100 kW. (Berkeley Lab)

Dinamarca. La isla danesa de Bornholm, situada al sur de Suecia representa cerca del 1% de la población de su país e igual porcentaje del consumo de electricidad con una demanda pico que asciende hasta los 63 MW. Es uno de los bancos de pruebas del programa de la comisión europea *More Microgrids*, debido a su gran cantidad de turbinas eólicas, ha permitido probar el funcionamiento de las micro redes de manera aislada cuando esta forma de generación tiene gran penetración. Cuenta con 14 generadores diesel (34 MW), una turbina de vapor por combustión de petróleo (25 MW), una turbina mixta de petróleo, carbón y viruta de madera (37 MW), 35 aerogeneradores (29 MW) y 2 turbinas de biogás (2 MW). La red de distribución de la isla se divide en dos niveles de voltaje 60 kV, y 10 kV y es controlada mediante dos sistemas SCADA. (Berkeley Lab)

En la Figura 3, se pueden observar los países con mayor producción científica sobre micro redes según Scopus.

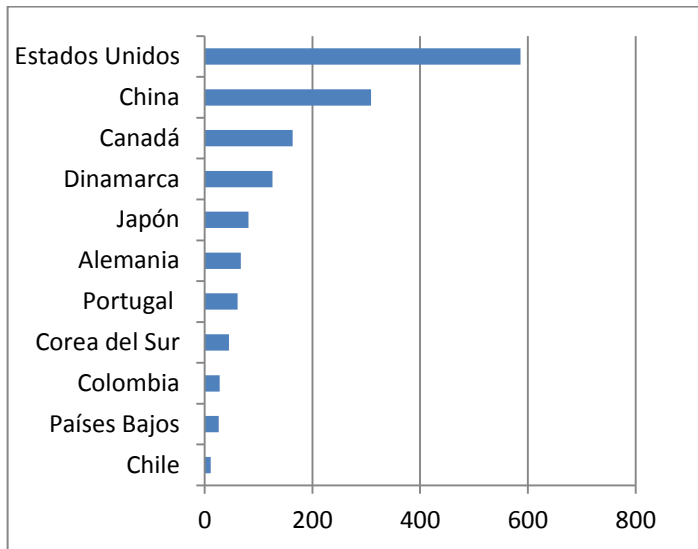


Figura 3. Número de artículos por país que incluyen “Microgrids” como palabra clave en Scopus

Chile. La Universidad de Chile desarrolló la primera micro red del país austral en una comunidad remota de aproximadamente 150 habitantes en la cordillera de los andes, un lugar llamado Huatacondo. Se construyó totalmente aislada del sistema y que solía operar tan solo 10 horas al día apoyándose en un generador

diesel de 150 kW. El proyecto consistió en adherir 22 kW de generación PV, un aerogenerador de 3 kW, una batería de 170 kWh y un sistema de control. Usando dicho sistema se puede fijar el objetivo de generación de cada unidad minimizando los costos operativos y teniendo en cuenta la carga y las predicciones de viento, consumo de agua y radiación solar. Como novedad se presenta lo que se denominó como un “SCADA social”, mediante el cual se presenta la información de manera sencilla a la comunidad, de manera que ésta pueda intervenir en la toma de decisiones sobre el manejo del sistema eléctrico. Hasta el momento el consumo de diesel ha disminuido en un 50%, y la instalación se ha constituido en un caso de estudio interesante por la forma en que la comunidad la administra y le hace mantenimiento. (Berkeley Lab)

1.5. Micro red inteligente de la Universidad Pontificia Bolivariana

“Consciente de su papel como pionera y precursora de la sostenibilidad energética en el país, la Universidad Pontificia Bolivariana se encuentra en la actualidad ante el reto de implementar la primera Micro-Red Inteligente de su naturaleza en Colombia, pretendiendo integrar 10 subsistemas básicos gestionables centralmente, para el uso racional y eficiente de los recursos energéticos”. (Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD))

En un proyecto interdisciplinario en el que participan expertos en los temas de vigilancia tecnológica, infraestructura, arquitectura,

energía eléctrica, TICs, planeamiento urbano, etc. La Universidad Pontificia Bolivariana inicia en enero de 2013 su proyecto de Micro Red Inteligente, la primera de su tipo en Colombia, como un laboratorio para los fabricantes e investigadores y un espacio para demostrar la viabilidad de los proyectos de energías renovables a políticos y directivos de empresas e instituciones (Arbeláez, 2014). Su construcción y puesta en funcionamiento es ejecutada en 3 etapas. La primera, que está cerca de su finalización, es la implementación de la infraestructura, durante la segunda se realizarán las investigaciones y pruebas del funcionamiento de cada componente instalado y la tercera es el diseño y comercialización de micro redes de mayor tamaño para potenciales clientes.

Las fuentes de generación utilizadas son paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y un sistema híbrido con un biodigestor anaerobio. Este primer sistema cuenta con 20 paneles policristalinos para una potencia total de 5 kWp. Para su acople a la red se utilizaron 20 micro inversores, es decir que el funcionamiento de cada uno es independiente. Actualmente se encuentra ubicado en el techo del bloque 10 de las instalaciones del campus Laureles. Adicionalmente se utilizaron 104 paneles con una generación total de 25 kWp adaptados a 2 inversores ubicados en igual número de entradas peatonales de la institución. Se espera que con este sistema se pueda suplir la demanda correspondiente a la iluminación del bloque de parqueaderos que cuenta con cerca de 1000 celdas para carros y motocicletas y cuyo consumo de energía es equivalente a 18 hogares promedio de 4

personas (Vargas Rodríguez, 2014). El biodigestor de 150 litros aprovecha los residuos de poda y de comida de la universidad y las aguas negras permitiendo generar 121 litros de biogás, equivalente a 1 kWh de energía generado en un día o 30 minutos de cocción, y 4 kg de biofertilizantes usando 1 kg de desechos y 3 litros de aguas negras. Se espera en un futuro contar con un biodigestor de 5000 litros, suficiente para proveer energía a 6 familias de 4 personas. Este sistema se constituye en una alternativa para el tratamiento de desperdicios orgánicos, pues disminuye la carga contaminante de estos desechos para mejorar la capacidad fertilizante del riego y elimina los malos olores, a su vez que evita la contaminación hídrica y del suelo. Su vida útil es de por lo menos 7 años (Arbeláez, 2014). Los estudios realizados dentro del campus con el fin de implementar la generación eólica con turbinas helicoidales de baja velocidad y eje vertical demostraron que su incorporación no era viable por la poca rapidez del viento en el sector. Estos equipos serán instalados en una sede en el vecino municipio de Marinilla.

El proyecto incluye además un sistema de iluminación de alta eficiencia con tecnología LED para las porterías y senderos peatonales al interior de las instalaciones, utilizando lámparas de poste alimentadas por un generador solar fotovoltaico. Esto permitirá remplazar luminarias de sodio de 70W por LED de 25W. Para su correcto funcionamiento se utilizarán baterías de plomo-ácido gelificadas de descarga profunda y sensores para su monitoreo que permitirán almacenar la carga generada durante el día. Su capacidad se proyecta en 50 kWh.

En este momento la universidad cuenta con un vehículo eléctrico de rango extendido Chevrolet Volt, además de haber realizado pruebas sobre un Renault Fluence totalmente eléctrico, buscando desarrollar sistemas de monitoreo constante de sus variables y de georeferenciación. De igual manera se planean construir estaciones de carga dentro de sus parqueaderos para promulgar el uso de esta clase de automotores y se implementarán estaciones de carga modular para vehículos pequeños como bicicletas y motos.

Se espera que la micro red permita ahorrar cerca del 5% del consumo de energía de la Universidad (Calle Atehortúa, 2013) no solo por su capacidad de generar sino también por los sistemas de control de la demanda que se implementarán. Para tal fin se hacen actualmente pruebas en el piso número 5 del bloque 9 (Calle Atehortúa, La UPB genera energía limpia para el campus Laureles, 2014), en el cual el funcionamiento del aire acondicionado está restringido por el nivel de consumo de las instalaciones, permitiendo aumentar la temperatura de sus salones en pasos de un grado centígrado cuando se considere que hay desperdicio de energía. Además, el proyecto busca crear prototipos de usuario final residencial permitiéndole tener acceso a los hipotéticos precios horarios de la energía para así tomar decisiones sobre la utilización de algunos electrodomésticos.

Como parte del control de estos subsistemas se utiliza una estación meteorológica para el análisis continuo de las variables de interés. En ella se cuenta con sensores de radiación solar, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento y

pluviometría. Todos los datos allí obtenidos, así como los proveídos por cada generador sobre su desempeño, serán visualizados en el Centro de Monitoreo y Control mediante el uso de múltiples técnicas de telecomunicaciones y allí se tomarán las decisiones pertinentes al despacho, conexión y desconexión de los subsistemas. (Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD))

En 2013, Jorge León García, secretario técnico del COCME (sección colombiana del Consejo Mundial de la Energía). Declaró que es importante que las universidades fomenten este tipo de proyectos pues es aquí donde están los futuros líderes del sector y que estas proveen una excelente plataforma para compartir las experiencias y desarrollos en las últimas iniciativas tecnológicas. Además señaló que son un espacio especial para discutir los estudios del Consejo Mundial de la Energía.(World Energy Council, 2013)

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA OPTIMIZACIÓN Y EL MERCADO ELÉCTRICO

En este capítulo se hace un acercamiento a los conceptos básicos de la optimización, su historia y el planteamiento y desarrollo de problemas típicos. Posteriormente se presenta la teoría básica de los árboles de decisión, diferenciando las aplicaciones que se les puede dar y se muestran ejemplos prácticos o comerciales de ellas. Por último se plantean los objetivos del despacho económico, explicando los procesos necesarios tanto en el aspecto comercial como la parte técnica del flujo de potencia, incluyendo restricciones y consideraciones de calidad. Además se presenta la organización y la dinámica de las empresas y los entes reguladores, que garantizan la seguridad, confiabilidad y calidad del suministro según los estándares y procedimientos asociados al Mercado Eléctrico Colombiano.

2.1. Teoría de Optimización

La optimización es el acto de obtener el mejor resultado bajo ciertas circunstancias dadas. En el diseño, construcción y mantenimiento de cualquier sistema ingenieril, se deben tomar decisiones tecnológicas y administrativas en distintos niveles. La meta final de tales decisiones es la de minimizar el esfuerzo requerido o maximizar el beneficio deseado. Ya que dicho esfuerzo o beneficio puede ser expresado como una función de ciertas variables, la optimización se puede definir como el proceso mediante el cual se encuentran las condiciones que le dan el máximo o mínimo valor a una función. (Rao, 2009)

No todos los métodos de optimización son igual de eficientes para resolver toda clase de problemas, lo que ha llevado a desarrollar múltiples procedimientos con ventajas y características propias, entre los cuales se deberá elegir el que mejor se adapte a la situación que se está tratando.

Historia. La teoría de optimización está basada en aportes al cálculo diferencial de Newton y Leibnitz. Mientras que el fundamento de los métodos de minimización en cálculo diferencial provienen de los principios descritos por Bernoulli, Euler, Lagrange y Weirstrass. Así, Lagrange plantearía lo que se conoce como el método de los multiplicadores de Lagrange para las funciones sujetas a restricciones, en contraposición de Cauchy, quien desarrolló un método propio para aquellas que no lo estaban. A pesar de la rapidez con que se hicieron estas contribuciones tempranas, el campo se quedaría sin recibir ningún aporte significativo hasta mediados del siglo XX cuando, con la construcción de computadores de alta velocidad, se empezaron a implementar nuevas técnicas, lo que llevaría a grandes avances y con ello una gran producción literaria, dando pie a la separación de la teoría de optimización en múltiples áreas. Entre los eventos más destacados se pueden resaltar el desarrollo de los métodos *Simplex* de Dantzig en 1947 para la programación de problemas lineales, la ecuación de programación dinámica (más conocida como *Principle of optimality*), creada por Bellman en 1957, la cual prepararía el camino para posteriores desarrollos en el campo de la optimización sujeta a restricciones. En 1951 Kuhn y Tucker definirían las condiciones de suficiencia para los problemas de

programación, lo que llevaría a grandes avances en la programación no lineal, campo que también recibiría aportes en 1960 de parte de Zoutendijk y Rosen. A pesar de ello no se ha logrado encontrar una técnica global aplicable a todos los problemas no lineales. El trabajo de Carroll y Fiacco y McCormick llevaría a la resolución de problemas bastante conocidos usando métodos de optimización no sujeta a restricciones, además se desarrollaría la programación geométrica en 1960. Gomory hizo grandes adelantos en la programación de enteros, una de las áreas más interesantes y de mayor crecimiento en optimización ya que la mayoría de problemas caen en este campo. Dantzig, Charnes y Cooper desarrollaron las técnicas de programación estocástica, resolviendo problema al asumir los parámetros de diseño como independientes y con una distribución normal. Posteriormente, el deseo de optimizar más de un objetivo daría lugar a los métodos de programación multiobjetivo. La teoría de juegos planteada en 1928 por von Neumann también ha sido aplicada a la resolución de múltiples problemas de matemáticas económicas y militares. Posteriormente aparecerían lo que se conoce como métodos modernos o no tradicionales de optimización, ampliamente utilizados para resolver problemas de ingeniería en años recientes pues han demostrado un excelente desempeño. Algunos de ellos son los algoritmos genéticos, el recocido, cúmulo de partículas, colonias de hormigas, redes neuronales y la lógica difusa. (Rao, 2009)

Método para el planteamiento de un problema de Optimización.
Al plantear un problema de optimización, lo primero que se debe

tener en cuenta es la función objetivo $f(X)$, es decir la función que calcula el costo o beneficio que se busca reducir o mejorar respectivamente. Posteriormente se debe hacer la identificación de la variable, o vector de variables X , de la que depende dicha función. Así,

$$\text{Encontrar } X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} \text{ tal que minimice } f(X)$$

Sujeto a las restricciones:

$$\begin{aligned} g_j(X) &\leq 0, & j &= 1, 2, \dots, m \\ l_j(X) &= 0, & j &= 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (1)$$

donde, X es un vector de n dimensiones llamado el vector de diseño, $f(X)$ la función objetivo, y $g_j(X)$ y $l_j(X)$ restricciones de desigualdad e igualdad respectivamente. El número de variables n y de restricciones m y p , no necesitan estar relacionados de ninguna manera. Los problemas como el planteado en (1) se conocen como problemas de optimización sujetos a restricciones, mientras que existen problemas sin restricciones, que deben ser planteados de igual manera al anterior pero las ecuaciones e inecuaciones correspondientes a $l_j(X)$ y $g_j(X)$. (Rao, 2009)

Vector de diseño. Todo sistema ingenieril está definido por una serie de cantidades, algunas de las cuales son vistas como

variables durante todo el proceso de diseño y se llaman variables de diseño o de decisión. Las variables de diseño son representadas en el vector que lleva el mismo nombre $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ y otras preestablecidas que se conocen como parámetros pre asignados. Si se considera un espacio Cartesiano de n dimensiones, donde cada eje coordinado representa una variable de diseño $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ se le llama espacio de diseño, y cada uno de sus puntos representa una solución, posible o imposible, al problema. Esto porque en algunos sistemas hay soluciones sin sentido físico, por ejemplo dimensiones con cantidades negativas.

Restricciones de diseño. En muchos problemas prácticos, las variables de diseño no pueden ser elegidas arbitrariamente. En general, a todas estas limitaciones se les conoce como restricciones de diseño. Aquellas que representan limitaciones físicas de las variables de diseño en el comportamiento o desempeño del sistema se conocen como restricciones funcionales o de comportamiento, y aquellas que presentan limitaciones físicas, como la construcción o disponibilidad del material o una pieza se llaman restricciones geométricas. (Rao, 2009)

Superficie de restricciones. Considérese un problema de optimización sólo con restricciones de desigualdad $g_j(X) \leq 0$. Los valores de X que satisfacen la ecuación $g_j(X) = 0$ forman una hipersuperficie en el espacio de diseño, llamada superficie de restricciones. Ésta constituye un subespacio de $n-1$ dimensiones, donde n es el número de variables de diseño, y divide el espacio en dos regiones, una donde $g_j(X) < 0$ satisfaciendo las

restricciones y otra donde $g_j(X) > 0$ y las restricciones no son satisfechas. De la misma manera los puntos pertenecientes a la hipersuperficie se consideran críticos, es decir que están en el límite de satisfacer las desigualdades $g_j(X)$. (Rao, 2009)

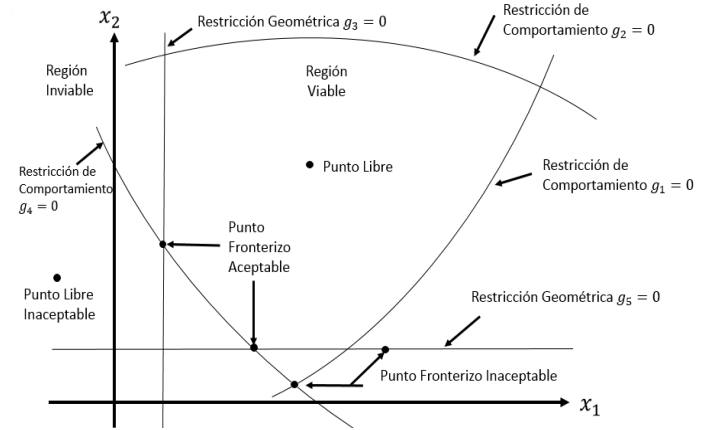


Figura 4. Superficie de restricciones en un espacio de diseño bidimensional hipotético (Rao, 2009)

La Figura 4 muestra un espacio de diseño hipotético. El espacio delimitado por las líneas se llama región viable, mientras que el externo a estas se llama inviable. Un punto que se ubica sobre una o más líneas se considera un punto límite. Existen 4 tipos de

puntos determinados por dos características. Si es aceptable o inaceptable y su posición (libre o límite). (Rao, 2009)

Función Objetivo. El procedimiento de optimización convencional tiene como objetivo encontrar el diseño que mejor se ajuste a los requerimientos del problema, ya que existen gran variedad de soluciones que pueden ser consideradas aceptables o satisfactorias. La factibilidad de cada una de éstas se determina mediante un criterio previamente seleccionado, que permita comparar el desempeño de las diferentes opciones. Al ser expresado en forma de función, se conoce como función objetivo, criterio o mérito y está determinada por la naturaleza del problema. Así, en algunas aplicaciones como aeronáutica se procura minimizar peso, o en ingeniería civil el costo, mientras en mecánica se busca maximizar la eficiencia del diseño. En algunos casos los criterios son excluyentes, es decir, que satisfacer uno necesariamente involucra sacrificar el desempeño respecto al otro. Por ejemplo, al diseñar una caja de cambios, aquella que tenga una mejor transmisión de potencia o relación de fuerzas no será la más liviana. Es por esto que escoger la función objetivo es una de las partes más críticas del proceso de optimización. Aun así, en algunos casos es necesario satisfacer múltiples criterios a la vez, esta clase de planteamientos reciben el nombre de problemas de programación multiobjetivo. Esto se hace difícil de controlar pues los diferentes criterios entran en conflicto. Para solucionarlo se puede crear una función objetivo que sea una combinación lineal de las demás de la siguiente manera:

$$f(X) = \alpha_1 f_1(X) + \alpha_2 f_2(X) \quad (2)$$

donde, f_1 y f_2 corresponden a dos funciones objetivos y α_1 y α_2 son dos constantes cuyo valor indica la importancia relativa de cada una de estas funciones en relación con las otras. (Rao, 2009)

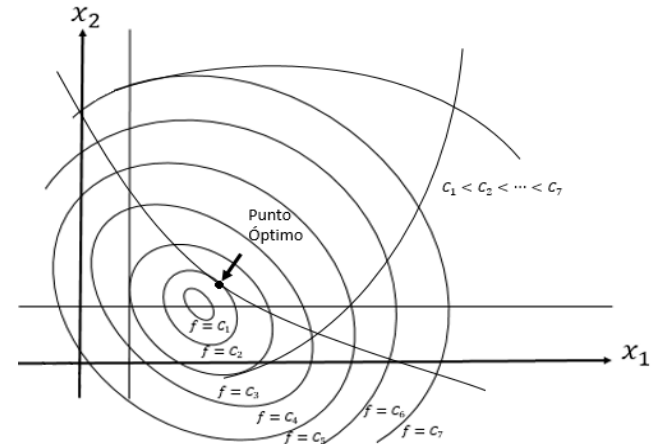


Figura 5. Superficie de función objetivo

Superficie de función objetivo. La unión de todos los puntos que satisfacen $f(X) = C = Constante$ forma una hipersuperficie en

el espacio de diseño, donde cada valor de C corresponde a una familia de superficies llamadas superficie de función objetivo. Una vez éstas son dibujadas, determinar el punto óptimo se hace sencillo pero la dificultad radica en representar o visualizar el problema cuando se exceden 3 dimensiones. Un ejemplo de 2 dimensiones puede ser visualizado en la Figura 5. (Rao, 2009)

2.2. Generalidades de los árboles de decisión como método de optimización

Los árboles de decisión toman su nombre debido a la estructura que los caracteriza, pues consisten 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). Cada hoja representa el resultado final de seguir un camino específico desde la raíz hasta ese punto. De esta manera, el árbol no es circular, las ramas nunca se conectan a la raíz, ni se puede viajar a través de él y volver al punto inicial, pues el diagrama indica una secuencia temporal que avanza, por convención, de izquierda a derecha, dividiéndose según los aspectos o características del problema que se consideren. (Alemi, 2008)

Existen diferentes tipos de árboles de decisión aplicables a distintas áreas del conocimiento y con una forma propia de representación. Los más comunes y a su vez, los más simples son los utilizados para la toma de decisiones de carácter administrativo.

Árbol de decisión de carácter administrativo. Para la representación gráfica de los árboles de este tipo se utiliza la siguiente simbología:

- Cuadrado: Representa un nodo de decisión.
- Círculo: Representa un nodo aleatorio. Es decir que su salida depende de variables externas no controlables y cada una tiene una probabilidad asociada.
- Líneas: Representan las ramas, es decir la relación entre nodos. Estas también incluyen valores asociados o costo, y la probabilidad de ocurrencia. Esta última solo aplica al partir de nodos aleatorios y se escribe entre paréntesis.

A manera de ilustración se presenta el siguiente ejemplo: Un joven le propone a su padre el siguiente trato. Éste le pagará a su hijo 9.000 pesos y se tirará un dado. Si éste cae en 3, 4, 5 o 6, el hijo le pagará 15.000 pesos. En caso contrario, éste conservará su dinero. Por último, el menor aceptará repetir este juego las veces que su padre lo desee. ¿Deberá él aceptar este trato? En casos como este, un árbol de decisión resulta ser una herramienta práctica para elegir la opción que plantee un mayor beneficio.

Existe una probabilidad de $1/6$ para cada posible resultado. Es decir que el padre tiene $4/6$, o $2/3$ de probabilidad de que la suerte le favorezca con un 3, 4, 5 o 6 para así ganar 6.000 pesos. Su hijo en cambio cuenta con los $2/6$ (o $1/3$) restantes para conservar los 9.000 que le fueron entregados al principio del juego. En la

Figura 6 se muestra la representación en forma de árbol de decisión asociada a este problema.

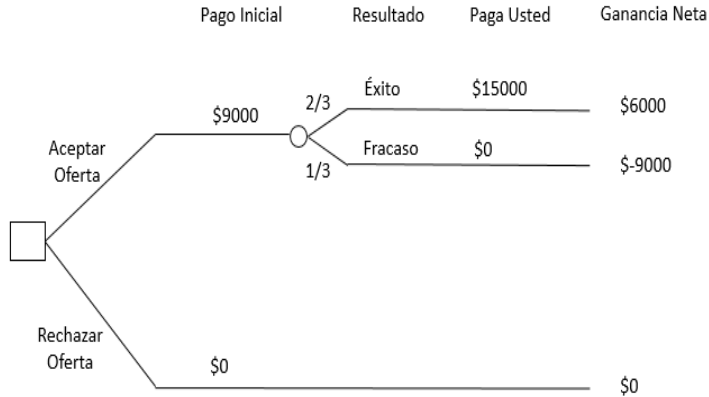


Figura 6. Árbol de decisión para el ejemplo del dado

Para tomar la decisión sobre si entrar o no al juego, se debe elegir un criterio de selección que, en este caso, sería el dinero que se espera ganar. Aquí se habla de Valor Esperado. Éste considera todas las posibles salidas para cada decisión y la probabilidad de que sucedan. En este caso, debido a que el joven le permitirá continuar con el juego tanto tiempo como sea necesario, la proporción de juegos en los que el padre ganaría en el largo plazo, equivale aproximadamente a la probabilidad de ganar uno solo. El

procedimiento para determinar el valor esperado parte desde cada una de las hojas y el resultado que ésta supone para el competidor. En este caso, existe una hoja que le supone una pérdida de 9.000 mientras otra le significa una ganancia de 6.000. Luego, estos valores son multiplicados por la probabilidad de llegar hasta allí y son sumados, determinando así el valor esperado. En las situaciones donde se espera ganar un beneficio (mas es mejor) se deberá elegir la opción con mayor valor esperado, mientras en otras donde se ven involucrados costos (menos es mejor), se debe elegir el menor valor esperado.

Para este caso el valor esperado se calcula como $\frac{2}{3} * \$6.000 + \frac{1}{3} * (-\$9.000) = \$1.000$. Claramente este valor no representa una ganancia en cada juego, sino más bien una aproximación de lo que se espera ganar al final por cada iteración. Teniendo en cuenta que se debe hacer una cantidad de repeticiones lo suficientemente alta para que el resultado real se asemeje a las probabilidades relacionadas con un solo juego, se elige lanzar el dado 1.500 veces. Esto significaría que se tienen $\frac{2}{3}$ de probabilidades de ganar, es decir que, aproximadamente el padre ganaría 1000 veces, y $\frac{1}{3}$ de perder, o 500 veces. La ganancia neta esperada está dada por $1.000 * \$6.000 + 500 * (-\$9.000) = \$1.500.000$. Es decir, 1000 pesos por juego, lo cual corresponde al valor esperado calculado anteriormente. (University of Michigan)

En aplicaciones reales, se debe tener en cuenta que existen decisiones secuenciales e incertidumbres interrelacionadas. Para

mostrarlo se presenta en el Anexo A un nuevo ejemplo de mayor complejidad. Este ejemplo permite observar algo bastante interesante. En realidad los árboles de decisión no se comportan como un método de optimización corriente en que se busca la posibilidad que dé mejores resultados, sino que se basan en el concepto de utilidad esperada. Concepto definido en 1738 por Bernoulli mientras trabajaba con la noción de expectativa, al notar que las personas no preferían la opción con mayor retorno monetario, sino aquella que le reportara una mayor utilidad en relación a lo invertido. (Alemi, 2008) Llevado al ejemplo se puede decir que no se prefiere la decisión que contiene la mayor ganancia posible (44 millones) porque al incluir los riesgos, no se pueden asegurar tan buenos resultados como en una opción “más conservadora”.

Árboles de decisión para clasificación y regresión. Los árboles de decisión son un método particularmente eficiente para generar clasificadores a partir de datos. Aplicación para la cual son el procedimiento lógico de mayor utilización. Gran cantidad de algoritmos de inducción en forma de árboles de decisión son empleados en estadística aplicada o *Machine Learning*, y se construyen a partir de un set conocido de entradas y salidas, conocido con el nombre de *Learning Set* (o *LS*). Esta última aplicación se refiere a algoritmos que son capaces de “aprender” directamente a partir de unos datos sin necesidad de asumir una ecuación predeterminada como modelo, con la capacidad de adaptarse y mejorar su comportamiento mientras mayor sea la cantidad de muestras disponibles para realizar el aprendizaje.

Estos algoritmos son utilizados en aplicaciones tales como finanzas, biología, generación de energía y predicción de carga, estabilidad eléctrica (Genc, Diao, Vittal, Kolluri, & Mandal, 2010), reconocimiento de imágenes, procesamiento del lenguaje, publicidad y sistemas para crear recomendaciones. Dichas aplicaciones requieren de una gran cantidad de información y contienen grandes conjuntos de datos que pueden ser separados basados en múltiples predictores o atributos. (Mathworks, 2014) Esto se hace muy complejo para utilizar un simple modelo paramétrico. Un sistema típico de aprendizaje de árbol de decisión adopta una estrategia de arriba abajo para encontrar una solución en el espacio de búsqueda y garantiza que se encuentra un árbol simple, aunque no necesariamente el más simple. Su objetivo es el de encontrar atributos repetidos y representativos que permitan clasificar los datos en clases o grupos, proceso llamado Minería de Datos (del inglés *Data Mining*). Aplicación de gran utilidad en servidores y grandes bases de datos para facilitar la utilización de la información agilizando búsquedas u ofreciendo servicios a ciertos clientes según características como su ubicación, intereses, etc. (Kantardzic, 2011)

La persona más destacada en la investigación de esta aplicación es J. Ross Quinlan, PhD en ciencias de la computación de la Universidad de Washington, quien desarrolló en 1979 lo que se conoce como el algoritmo ID3, que consistía en ubicar todos los datos en la raíz y empezar a dividirlos repetitivamente partiendo de los atributos más representativos. En 1993, el mismo Quinlan crearía el algoritmo C4.5 como una mejora al ID3 e incluía

nuevas características como permitir atributos numéricos, nuevas técnicas para lidiar con datos faltantes y ruidosos. Las últimas versiones del algoritmo son la C4.8 implementada en Java como J4 y la versión comercial C5.0. (Stefanowski, 2010)

El software SQL Server de Microsoft, una aplicación de manejo de bases de datos que permite almacenar y recuperar información según sea requerida por otras aplicaciones, provee un algoritmo de árboles de decisión para clasificación y que es usado en modelamiento predictivo para atributos discretos y continuos. (Microsoft, 2014)

A diferencia de los árboles para decisiones administrativas, los árboles de regresión y clasificación no definen una ruta a seguir, sino que predicen un resultado basándose en las entradas, éste es numérico en el primer caso, o un valor binario de verdad en el segundo. Los árboles creados a partir de *Machine Learning* son de mayor complejidad y tamaño, dificultando el recorrido desde una hoja hasta la raíz para determinar el valor de los atributos que llevaron a tal hoja o salida. Estos árboles subdividen los datos basados en sus atributos y evalúan la precisión de las separaciones usando métodos estadísticos, generalmente la desviación estándar. El algoritmo está diseñado para detectar la variable de mayor relevancia, es decir aquella que garantice la división más equilibrada de los datos, evitando crear hojas después de pocas evaluaciones. En muchos casos, los atributos deben ser considerados en múltiples ocasiones, pues tras solo una evaluación se mantienen altos valores de desviación que no pueden ser disminuidos mediante la consideración de otras

variables. Esto se puede deber a que existen grupos de datos con características muy parecidas pero que generan salidas lo suficientemente diferentes para que el algoritmo se esfuerce en encontrar el factor que causa tal diferencia. Los símbolos utilizados en este tipo de diagramas son triángulos que representan evaluaciones de los atributos y círculos para las salidas y su lectura se realiza de arriba abajo, es decir que la raíz se encuentra en la parte superior. (Duprey, 2013)

Para construir el árbol y determinar su precisión se utilizan medidas estadísticas tales como la desviación estándar, la cual es una medida de dispersión utilizada al momento de dividir la información en subconjuntos que contienen instancias con cierto grado de similitud. Se emplea para calcular la homogeneidad de una muestra numérica. En el caso del despacho económico aquí planteado, la desviación estándar se calcula respecto al promedio de costo por megavatio-hora de los datos de cada conjunto. La desviación estándar se calcula según la ecuación (3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

donde,

x_i = Cada uno de los datos a evaluar

\bar{x} = Promedio de los datos a evaluar

n = Número de datos

Otra forma de calcular la homogeneidad de la muestra es mediante el cálculo de la entropía. Menor entropía significa mayor homogeneidad, siendo 0 la entropía de un conjunto totalmente homogéneo y 1 el punto de máxima incertidumbre. Este parámetro se calcula según la ecuación (4). (Sayad)

$$E(S) = \sum_{i=1}^c -p_i \log_2 p_i \quad (4)$$

donde,

S =Conjunto de datos

p_i =Probabilidad de los posibles valores

i =Posible respuesta de los datos

La decisión sobre si crear o no otro nodo se basa en el concepto de ganancia de información. Éste es la medida del cambio de la entropía al dividir un conjunto en subconjuntos. Se calcula según la ecuación (5).

$$G(S, A) = E(S) - \sum_{v \in \text{Valores}(A)} \frac{|S_v|}{|S|} * E(S_v) \quad (5)$$

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 .

$|S|$ =Tamaño del conjunto S

$|S_v|$ =Tamaño del subconjunto S_v

Se puede afirmar entonces que la primera división del árbol siempre corresponderá a la de mayor ganancia de información y que la entropía de los conjuntos de datos disminuye a medida que se incrementan las divisiones. (Northern Michigan University, 2009)

2.3. Generalidades del despacho económico

El concepto del despacho económico hace referencia a la búsqueda de la combinación más económica de unidades de generación que suplan la demanda total de un periodo, es decir, únicamente tiene en cuenta la sumatoria de potencia a generar y su costo. En muchas ocasiones suele confundirse dicho concepto con el de *Unit Commitment*, el cual tiene como objetivo planear la combinación de unidades de generación que entrarán en funcionamiento con la mejor relación de costos, pero priorizando las restricciones de cada generador y las de transmisión, así como otros parámetros importantes para la calidad de la energía, siendo la reserva rodante una de ellos. Por lo general, éste es realizado con una antelación de entre 1 día y una semana y determina las unidades que generarán durante cada uno de los periodos de un día, teniendo en cuenta parámetros técnicos e inter temporales de cada generador como el mínimo tiempo de funcionamiento, mínimo tiempo fuera de funcionamiento, tiempo de notificación, tiempo de arranque y parada, curvas de toma de carga, etc. sin

especificar los niveles de generación, pues estos son concernientes al despacho económico. (Wright, 2013)

En la literatura se suele usar el nombre “problema del despacho económico” para describir la unión del despacho económico y el *Unit Commitment*, pues se refiere a la optimización del funcionamiento de la red considerando al mismo tiempo tanto costos como parámetros técnicos.

El objetivo primario de un problema de despacho económico es encontrar un conjunto de potencia activa entregada por ciertos generadores para satisfacer en cualquier momento la demanda requerida, sujeta a limitación técnicas de cada unidad minimizando el costo de la operación. Es entonces indispensable resolver este problema de la manera más precisa y rápida posible. Las técnicas convencionales ofrecen buenos resultados, pero cuando el espacio de búsqueda es no lineal y tiene discontinuidades los algoritmos se vuelven muy complicados con largos tiempos de convergencia y soluciones lejanas a la óptima. Se necesitan entonces nuevos métodos numéricos para lidiar con estas dificultades, especialmente aquellos que requieren altas velocidades evitando quedarse atrapados en mínimos locales. Algunos ensayos al respecto incluyen métodos numéricos basados en inteligencia artificial como redes neuronales, recocido y algoritmos genéticos. Llegando incluso a técnicas más complejas como la programación evolutiva. Por otro lado, la lógica difusa ha sido de gran ayuda para resolver problemas de sistemas de potencia tales como el despacho económico, la localización y el diagnóstico de fallas debido a que simplifica y acelera algoritmos

complejos que contienen un número considerable de variables. (Roa-Sepúlveda, Herrera, Pavez-Lazo, Knight, & Coonick, 2003)

Existen dos componentes básicos que intervienen en el despacho económico: la planeación del despacho del día siguiente y la operación del sistema de potencia del día actual.

Planeación del despacho económico del día siguiente. Durante esta actividad, realizada por agentes independientes al mercado, se programa la potencia que generará cada unidad hora a hora del día siguiente según el pronóstico de la demanda. Para tal fin se deben elegir los generadores que se reporten como funcionales y disponibles, teniendo en cuenta sus límites operativos tales como: la tasa de toma de carga (que tan rápido se puede cambiar la potencia de salida de una unidad), niveles máximos y mínimos de generación, y los tiempos mínimos de operación y de permanencia fuera de servicio una vez apagado el generador. Además se deben conocer las características económicas de cada unidad como son: el costo de generación, que depende de la eficiencia y gastos variables de operación, el costo de puesta en funcionamiento y el valor de impuesto y otros pagos por perjuicios ambientales. Posterior a este proceso se debe hacer un análisis de confiabilidad que permita asegurar que el sistema está en condiciones de suplir la demanda, sin poner en riesgo equipos o el suministro, ante perturbaciones que se puedan presentar. Es importante además asegurar unos estándares de calidad del servicio como la permanencia del voltaje y la frecuencia dentro de unos límites definidos. (Federal Energy Regulatory Commission - FERC, 2005)

Operación del sistema de potencia del día actual. El despacho del día actual es una acción de monitoreo de la carga, la generación y el intercambio con otros países para asegurar el balance entre el suministro y la demanda. Esto incluye el monitoreo en tiempo real de la frecuencia y el voltaje usando AGC (*Automatic Generation control*), sistema que permite aumentar o disminuir automáticamente la potencia despachada en cada unidad para contrarrestar cambios abruptos en la demanda o la salida de servicio de otro equipo. Según las observaciones durante el monitoreo del sistema se analiza el despacho para la hora siguiente, para asegurar que se mantenga el balance. El objetivo del monitoreo es mantener los flujos y el voltaje dentro de los límites de confiabilidad. En caso contrario se deben tomar acciones correctivas como: desconectar cargas y cambiar el despacho, o limitarlo, en caso de ser necesario. Estas acciones son llevadas a cabo por el agente operador del sistema de transmisión. (Federal Energy Regulatory Commission - FERC, 2005)

Algunos factores que pueden aumentar los costos a los usuarios son: la región geográfica en la cual se da el despacho, pues áreas más grandes y la separación entre generadores y cargas involucran mayores gastos por dificultades técnicas en la transmisión. Las unidades de generación y las instalaciones disponibles para la transmisión también pueden aumentar costos por indisponibilidad de la opción más económica. (Federal Energy Regulatory Commission - FERC, 2005)

El éxito del despacho económico y el buen funcionamiento del sistema dependen de la buena comunicación y coordinación entre

todos los agentes involucrados, brindando la información necesaria de manera precisa y rápida.

2.4. El problema del flujo de potencia en los sistemas eléctricos

El problema del flujo de potencia es ampliamente estudiado en el análisis de sistemas eléctricos y se centra en la búsqueda de las magnitudes de los voltajes con sus respectivos ángulos para cada una de las barras de la red. El planteamiento parte de datos conocidos, basándose en la solución del despacho económico, como la potencia entregada por ciertos generadores, la demanda a satisfacer y la suposición de una barra “*Slack*” con ángulo de cero grados, que sirve como referencia para las demás. El objetivo final de este desarrollo es determinar la generación real de cada unidad, así como el flujo de potencia tanto activa como reactiva, además de las pérdidas. En general, la solución a este problema tiene dos aplicaciones, una a corto y la otra a largo plazo. La primera, radica en la posibilidad de analizar el buen funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta sus restricciones, para asegurar parámetros de confiabilidad, calidad y seguridad. La segunda, radica en la elaboración de un modelo de expansión y mejoramiento de la red en el futuro. La solución del problema se realiza normalmente por métodos numéricos, siendo los más comunes el algoritmo de Newton-Raphson y el de Gauss-Seidel. (McCalley, 2001)

Planteamiento del problema. Se debe partir desde el conocimiento de la configuración y los parámetros de impedancia (o admitancia) de la red, además deben convertirse todas las

fuentes de voltaje con su respectiva impedancia interna en fuentes de corriente en paralelo con esta misma impedancia. Posteriormente se procede a sumar para cada barra las inyecciones (positivas) y salidas (negativas) conocidas de potencia, tanto activa como reactiva. Teniendo claro el modelo de la red, se deben ordenar dentro de una matriz las admitancias relacionadas con cada barra, donde el elemento y_{ij} corresponde a la admitancia que conecta la barra i con la j . Los elementos donde $i = j$ se calculan como la suma de todos los componentes asociados a la barra i , estén conectados a tierra o a otra barra. En la ecuación (6) se muestra como está compuesta la matriz de admitancias Y y en la (7) y (8) cómo se calculan los demás coeficientes.

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & \cdots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$Y_{ii} = y_i + \sum_{k=1, k \neq i}^n y_{ik} \quad (7)$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad \forall i \neq j \quad (8)$$

donde y_i corresponde a los equipos de admitancia constante conectados entre la barra i y tierra. Cabe anotar además que los términos Y_{ij} y Y_{ji} son iguales, es decir que la matriz es simétrica.

Habiendo calculado la matriz de admitancias y conociendo las corrientes inyectadas en las barras con generación, se calculan los voltajes según la ecuación (9).

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = [Y]^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Ecuaciones de flujo de potencia. Para determinar los flujos de potencia, se debe partir desde las inyecciones de corriente al sistema. La potencia aparente y la corriente se relacionan según la ecuación (10). Para datos dados en por unidad (p.u.)

$$S_k = V_k I_k^* \quad (10)$$

Teniendo que, la inyección de corriente en una barra cualquiera, según voltajes de nodo está dada por la ecuación (11).

$$I_k = \sum_{j=1}^n Y_{kj} V_j \quad (11)$$

Es importante recordar que los elementos Y_{ij} se refieren a las posiciones de la matriz y no a las admitancias reales. Remplazando (11) en (10), se obtiene (12):

$$S_k = V_k \left(\sum_{j=1}^n Y_{kj} V_j \right)^* = V_k \sum_{j=1}^n Y_{kj}^* V_j^* \quad (12)$$

Para continuar con el planteamiento se debe recordar que V_k es un fasor por lo que puede ser expresado como $V_k = |V_k| \angle \theta_k$. De manera análoga, los elementos $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, donde G es llamada conductancia y B susceptancia. Haciendo los remplazos y las conjugaciones correspondientes se obtiene la ecuación (13) y, posteriormente, la (14).

$$S_k = \sum_{j=1}^n |V_k| |V_j| \angle (\theta_k - \theta_j) (G_{kj} - jB_{kj}) \quad (13)$$

$$= \sum_{j=1}^n |V_k| |V_j| (\cos(\theta_k - \theta_j) + j \operatorname{Sen}(\theta_k - \theta_j)) (G_{kj} - jB_{kj}) \quad (14)$$

Separando las partes real e imaginaria, se obtienen la potencia real y reactiva respectivamente. Esto se observa en las ecuaciones (15) y (16).

$$P_k = \sum_{j=1}^n |V_k| |V_j| (G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \operatorname{Sen}(\theta_k - \theta_j)) \quad (15)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^n |V_k| |V_j| (G_{kj} \operatorname{Sen}(\theta_k - \theta_j) - B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (16)$$

El cálculo de los flujos se realiza posteriormente mediante uno de los métodos iterativos anteriormente mencionados. (McCalley, 2001)

Restricciones. Es especialmente importante anotar que no todos los resultados de este problema son viables. La aplicabilidad de estos depende de que se cumplan una serie de restricciones tanto eléctricas, impuestas por las condiciones de la red, y operativas, que dependen de criterios de seguridad del operador. (Cadavid Mazo, 2008)

Las restricciones eléctricas incluyen límites térmicos admisibles en la operación de equipos de transformación o transporte, límites en la operación y capacidad del equipamiento, e indisponibilidad de equipos. Mientras que las restricciones operativas incluyen las exigencias para garantizar seguridad, confiabilidad, calidad, estabilidad de tensión y electromecánica, regulación de frecuencia y compensación reactiva. (Cadavid Mazo, 2008) En general, durante la solución del problema de flujo de cargas y la optimización del despacho económico, las restricciones planteadas se muestran a continuación en las ecuaciones (17), (18) y (19).

$$D + L = \sum_i^n P_i \quad (17)$$

$$L = \sum_t \sum_j a_{ij} P_i P_j \quad (18)$$

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (19)$$

donde,

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 .

Las restricciones operativas son revisadas mediante programas de simulación, donde además se evalúa el comportamiento del sistema ante posibles fallas para determinar el nivel de seguridad. En el Anexo B, se explica paso a paso un ejemplo de flujo de potencia mediante el método de Newton-Raphson para un sistema de potencia hipotético.

2.5. El mercado eléctrico colombiano

El sector eléctrico colombiano se encuentra regulado por diferentes entidades encargadas de establecer políticas generales para asegurar la confiabilidad y la calidad del suministro de energía eléctrica a un costo razonable. Para tal fin se organizó un esquema de supervisión y control del mercado. Dicho esquema está encabezado por el Ministerio de Minas y Energía el cual adopta, dirige y coordina políticas para la generación, distribución, transmisión, comercialización, el uso racional de la energía y el desarrollo de fuentes alternas de generación (Ministerio de Minas y Energía, 2012). La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), donde intervienen ministros, comisionados y Planeación Nacional, es la encargada de regular los servicios públicos de energía eléctrica y combustibles promoviendo el desarrollo sostenido, regulando los monopolios, incentivando la competencia donde sea posible y atendiendo las necesidades de los usuarios. (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG) Los usuarios, clasificados

como regulados y no regulados según su consumo mensual, y los agentes (aquellos que transmiten, generan, etc.) son los que toman parte activa del mercado y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, es la encargada de la supervisión y el control de los agentes, sancionando las violaciones a leyes cuando sea necesario. (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG)

XM Compañía de Expertos en Mercados S.A. E.S.P. “Es el encargado de efectuar la planeación, coordinación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación y transmisión del Sistema Interconectado Nacional.” (XM, 2008) En sus instalaciones se encuentran el Centro Nacional de Despacho (CND), encargado de la operación del mercado, las actividades de planeación, supervisión y control de la operación de recursos involucrados en la generación, transmisión e interconexión; el Administrador del Sistema de Intercambios Comerciales (ASIC), quien efectúa el registro y la liquidación de contratos de largo plazo y transacciones en Bolsa; y el liquidador y administrador de cuentas del Sistema de Transmisión Nacional (LAC), quien factura, cobra y distribuye los cargos por el uso del Sistema de Transmisión Nacional (STN). (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG)

El funcionamiento del mercado colombiano y la planeación del despacho económico del día siguiente comienzan por las ofertas de los generadores. Las cuales incluyen el precio de cada kWh y la cantidad de unidades de generación disponibles para ese día. Dicha oferta debe entregarse a XM hasta las 8 de la mañana del

día anterior a la operación (normalmente llamado n-1) y es igual para todo el día n. Los precios ofertados tienen un piso o límite inferior definido por la recolección de dineros para el FAZNI (Fondo de Apoyo a las Zonas no Interconectadas) y por cargo de confiabilidad (Costo Equivalente Real de la Energía o CERE), que es una incentivo que los generadores cobran y luego es repartido de nuevo entre las centrales de acuerdo al tiempo que cada una haya estado disponible así no se haya usado. Las ofertas se ordenan de menor a mayor precio para realizar la primera parte del despacho económico llamada despacho ideal y es en el que se da la competencia y se fija el precio de la energía sin tener en cuenta restricciones ni eléctricas ni operativas. Tras esta organización de precios, se adhieren las plantas no despachadas centralmente, aquellas de menos de 10 MW de capacidad instalada o de hasta 20 MW que elijan ser de esta clase, que entran a la oferta con precio \$0. Este tipo de generadores sólo reporta la disponibilidad de sus unidades y no ofertan en dinero porque normalmente no dependen de reservas como embalses sino del cauce de ríos (centrales a filo de agua) o la velocidad del viento (Jepírachi en la Guajira). Después de realizar esta organización se procede a definir el precio de bolsa nacional, el cual es impuesto por el último generador despachado para cada hora. El precio de bolsa se expresa en \$/kWh y con este se le paga a todos los generadores por la energía que hayan despachado durante ese período. Posteriormente se debe evaluar el funcionamiento del sistema de transmisión según la carga esperada y se define la reserva rodante, o generadores que funcionan al mínimo de su capacidad para entrar a despachar en

caso de alguna perturbación. Otras unidades se añaden por razones técnicas, por ejemplo para mantener el voltaje dentro de los límites de calidad en las zonas que puedan estar muy alejadas de las unidades inicialmente despachadas. La energía generada con este fin se paga a precio de Reconciliación Positiva, el cual puede ser menor al que ofertaron inicialmente e incluye variables como el costo de arranque del generador. Las empresas están obligadas a prestar este servicio cuando sea necesario. Los generadores cuyo despacho de potencia real es menor al ideal deben pagar por la energía que no entregaron a precio de Reconciliación Negativa. (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, 2010) El AGC por otro lado se le asigna a generadores que se ofrezcan voluntariamente, recibiendo a cambio una compensación económica. A estas unidades se les define una banda dentro de la cual pueden variar su potencia despachada. Salirse de ésta es sancionable. Para los demás agentes, la máxima variación permitida sin acarrear sanción respecto a la generación asignada en el despacho es del 5%. (XM, 2008)

El mercado se divide además en *SPOT* (o punto en español), y en mercado a largo plazo. El primero se refiere a las negociaciones en bolsa donde se asume que todos los generadores y cargas se conectan a un solo nodo (de ahí su nombre). El segundo se define por contratos entre usuarios no regulados, que hacen convocatorias públicas para comprar la energía que planean consumir, y las centrales. Existen dos tipos de acuerdos: “pague lo demandado”, con precios más caros pues la central asume el

riesgo de cambios en la demanda y “pague lo contratado” que es más económico, pero con la obligación de pagar por potencia que puede no haber sido consumida a una determinada tarifa. Estos contratos no se constituyen en entregas físicas de energía sino en el cubrimiento del riesgo económico. Normalmente se pactan a dos años. (XM, 2008)

En el día de la operación (o día n) se realiza el despacho programado, en el cual se hacen las entregas reales de energía atendiendo la demanda y garantizando el servicio. Está sometido a las restricciones eléctricas y operativas por lo que son necesarias las reservas rodantes y el monitoreo en tiempo real de las variables del sistema. Se hace basándose en la planeación que entrega XM en la tarde del día $n-1$, pero puede modificarse basado en los imprevistos que se reporten, como daños en máquinas o líneas. Éste procedimiento lleva el nombre de Redespacho y se puede hacer hasta una hora y media antes del momento de la operación. El día $n+1$ se utiliza para hacer la liquidación basada en la generación real de cada unidad. (XM, 2008)

Colombia tiene acuerdos con sus vecinos Ecuador (Transacciones Internacionales de Electricidad TIE) y Venezuela para la compra y venta de energía eléctrica. Este primero se encuentra integrado al mercado colombiano y ambos países deben definir un precio de venta internacional. Aquel que tenga el menor debe venderle al otro. Para el año 2012, Colombia exportó a Ecuador 236 GWh e importó 6.5 GWh y a Venezuela le vendió 478.4 GWh. (Ministerio de Minas y Energía, 2013)

3. MODELAMIENTO BÁSICO DE LOS ELEMENTOS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA MICRO RED

En este capítulo se presenta una breve recopilación de las principales fuentes de generación y almacenamiento utilizadas en micro redes. Ésta incluye una explicación teórica de los procesos físicos y químicos involucrados, así como los materiales empleados para su construcción. Posteriormente se muestran las ecuaciones necesarias para el cálculo de los costos de su utilización asumiendo ciertas restricciones y precios promedio. Con el fin de que los costos de las tecnologías sean comparables, se utilizarán los datos de Estados Unidos otorgados por el WEC en su informe anual y algunas referencias tomadas de la firma de asesoría financiera Lazard para el mismo país. Se debe anotar además que los precios de estos reportes están dados para plantas con capacidades mayores a 1 MW, pues los datos de pequeñas unidades de generación difieren demasiado entre sí dificultando su análisis. Esto puede causar que los costos aquí descritos sean menores a los que se tendrían para una micro red de pequeña capacidad.

El Consejo Mundial de la Energía (WEC) en su informe anual del costo por tecnología para la generación de energía eléctrica, acuña los siguientes términos:

- CAPEX: (del inglés *Capital Expenditure*) se refiere al costo total del desarrollo y construcción de la planta, excluyendo los cargos por conexiones a la red.

- OPEX: (del inglés *Operating Expenditure*) es el total de gastos anuales de operación durante el primer año de funcionamiento del proyecto, dado en por unidad de capacidad instalada.
- LCOE: (del inglés *Levelized Cost of Electricity*) representa el costo en dólares por cada unidad de energía generada (MWh) por cierta tecnología, teniendo en cuenta los gastos de operación y construcción para una vida financiera y ciclo de uso esperados. Se utiliza ampliamente para comparar el precio real de cada fuente de generación. (U.S. Energy Information Administration, 2014)
- Factor de Capacidad: (del inglés *Capacity Factor*) también llamado factor de carga, es la relación entre la cantidad de MWh netos generados en un año y la energía que se pudo haber generado con el total de la capacidad instalada funcionando continuamente en su máximo de potencia posible durante las 8760 horas de dicho periodo. (World Energy Council, 2013)

3.1. Generación solar fotovoltaica

El término “fotovoltaico” se refiere a la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales exhiben una propiedad conocida como el efecto fotoeléctrico que permite que los electrones, al ser golpeados por un fotón, considerado como un paquete de energía que depende de la frecuencia de la luz

incidente, sean acelerados creando una diferencia de potencial, conocida como voltaje de frenado. Esto debido a que inicialmente el efecto se comprobó haciendo saltar electrones entre un electrodo y una placa, variando dicho voltaje hasta detener el flujo de corriente. Este efecto fue descubierto por primera vez por el físico francés Edmund Bequerel en 1839, quien notó que algunos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica al ser expuestos a la luz y luego fue comprobado con el arreglo anteriormente mencionado por Lenard en 1902. En 1905, Albert Einstein describe la naturaleza de la luz como partícula, explicando el concepto de cuanto o fotón, lo que se constituye como la primera explicación del fenómeno. Durante la crisis energética de 1970, la tecnología fotovoltaica ganó terreno como fuente de energía para aplicaciones no espaciales, único uso que se había hecho viable hasta el momento por motivos de costo. (Knier, 2002) (Fowler)

Las celdas solares se construyen en materiales semiconductores, principalmente silicio cristalino de alta pureza. Éste elemento, el segundo más abundante de la tierra tras el oxígeno, tiene 4 electrones de valencia, razón por la cual busca cumplir la ley de octeto formando enlaces covalentes con 4 átomos vecinos. Esta unión puede ser disuelta por efecto del calor o la luz, dándole libertad al electrón para moverse y dejar un hueco (carga positiva de igual valor a la del electrón) en la red cristalina, lo cual se conoce como conductividad intrínseca. Esta conductividad no puede ser aprovechada para generar electricidad, por lo que el cristal se dopa con otros elementos, como el Fósforo (con 5

electrones de valencia) y el Boro (con 3 electrones de valencia). Estos dopajes causan que la capa tenga un electrón de más (tipo n) o uno menos (tipo p) lo que permite que haya un flujo de cargas desorganizado llamado conducción impura o extrínseca. Con el fin de aprovechar este fenómeno se forman uniones entre capas p-n. Al hacerlo, los electrones de la región n ocupan los huecos de la región p creando una región con pocas cargas libres conocida como la región de espacio de carga. Los átomos de la región n quedan cargados positivamente y los de la región p de manera negativa, creando un campo eléctrico que se opone al flujo, evitando que éste continúe hasta que las cargas de ambas capas se equilibren. Cuando el semiconductor p-n se expone a la luz, los fotones son absorbidos por los electrones brindándoles la suficiente energía para romper los enlaces, liberándolos y permitiendo que el campo arrastre los electrones hacia la región n y los huecos hacia la región p. (The German Energy Society, 2008)

Para la construcción de las celdas solares se ubica la placa dopada con fósforo (n) enfrentada al sol, y la capa dopada con boro (p) detrás de ésta. Se utilizan además contactos metálicos en la parte frontal y trasera de la celda para tomar la potencia de la misma. Esto se hace normalmente imprimiendo una pantalla en forma de malla sobre la parte anterior de manera que se perciba la mayor cantidad posible de radiación solar y con una capa de plata o aluminio en la parte posterior. Se adhiere además una película delgada de nitrato de silicio u óxido de titanio en la parte frontal de la celda solar para disminuir la reflexión de la luz. (The

German Energy Society, 2008) En algunos casos los módulos incluyen un sistema de seguimiento que les permite girar para quedar enfrentados al sol y así aprovechar mejor su potencial durante el día. Las celdas solares se dividen en dos grandes grupos, los de silicio cristalino y los de película delgada.

Los dos tipos más comunes de celdas de silicio cristalino son:

- Monocristalinas: para su proceso de fabricación se utiliza el método de Czochralsky en el cual se derrite material policristalino en un crisol de cuarzo a 1420°C. Posteriormente se introduce en ella un cristal semilla girándolo y extrayéndolo lentamente de manera que se forma un lingote cilíndrico de aproximadamente 30 cm de diámetro y algunos metros de longitud. Dicho cilindro es cortado para formar barras cuadradas o semicirculares que se cortan nuevamente en láminas (*Waffers*) con un espesor de 0.3 mm. Posteriormente se hace el dopaje con Boro y Fósforo y se aplica el cubrimiento anti reflectivo. Su eficiencia energética está entre el 15% y 18%
- Policristalinas: el material se derrite en una crisol de cuarzo y se deposita en un recipiente en forma cuboide. Posteriormente pasa por un proceso de enfriamiento y calentamiento controlados en una sola dirección de manera que se formen cristales homogéneos del mayor tamaño posible. Los límites entre dichos cristales constituyen defectos en el cristal reduciendo su eficiencia. Al igual que para el material monocristalino

se hace el dopaje y corte del silicio. Su eficiencia es del 13% al 16%. (The German Energy Society, 2008)

Por lo general, para la construcción de celdas de silicio cristalino se utilizan *Waffers* de 150 μm de espesor, lo cual requiere de gran cantidad de materiales y procesos. Por el contrario, para la fabricación de celdas solares de película delgada se utilizan unidamente láminas de 1 a 4 μm de espesor reduciendo de manera significativa los costos en el proceso de manufactura, así como la cantidad de materiales involucrados en dicho proceso. Sus ventajas incluyen además la versatilidad, pues se construyen a partir de películas flexibles que permiten su incorporación en toda clase de superficies y por tanto su utilización en aplicaciones más avanzadas como la integración en los edificios y vehículos. (Solopower) Su construcción se hace a manera de emparedado entre una capa de telururo de cadmio (CdTe) y sulfuro de cadmio (CdS), y tiene una participación en el mercado entre el 5% y 7%. Durante los últimos años, su eficiencia ha mejorado sobrepasando el 20% en el laboratorio, aunque su referencia comercial de mejor desempeño, llamada *Series 3 Black*, alcanza un 16.1%. Aunque esta tecnología es aproximadamente un 5% menos eficiente que el silicio actualmente, su rápido desarrollo y ventajas constructivas le permiten competir en igualdad de condiciones. (Peplow, 2014)

En la Tabla 2 se muestran las mayores eficiencias logradas por distintas tecnologías de celdas terrestres medidas en el espectro AM1.5 con una densidad de potencia de 1000 W/m^2 a 25°C, según la norma IEC 60904-3 de 2008. (Green, Emery, Hishikawa, Warta, & Dunlop, 2014)

Tabla 2. Mayores eficiencias logradas por distintas tecnologías de celdas solares PV (Green, Emery, Hishikawa, Warta, & Dunlop, 2014)

Clasificación	Eficiencia	Fabricante
Silicio Cristalino	22.9±0.6%	UNSW/ Goschermann
Silicio Multicristalino	18.5±0.4%	Q-Cells
CdTe (Película delgada)	17.5±0.7%	First Solar
CIGS (Película delgada)	15.7±0.5%	Miasole
Orgánica	8.7±0.3	Toshiba

La potencia generada por una celda solar se expresa mediante las ecuaciones (20) y (21).

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

$$P^{Ph} = P_{STC} \left\{ \frac{G}{1000} [1 + \delta(T_{cell} - 25)] \right\} \quad (21)$$

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)

En los últimos años se ha evidenciado una caída consistente de los costos de los módulos y otros componentes utilizados en esta clase de generación, disminuyendo a su vez el LCOE.

La función de costo de la generación solar incluye la inversión inicial de los equipos y los costos de operación y mantenimiento (O & M) de los arreglos de celdas. El capital invertido en tierras no es considerado porque se aplica para proyectos locales o residenciales utilizando espacios propios.

$$F(P_s) = aI^P P_s + G^E P_s \quad (22)$$

$$a = \frac{r}{[1 - (1 + r)^{-N}]} \quad (23)$$

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 instantánea [\$/MW]

La ecuación (22) se utiliza para calcular el costo total anual de la generación de energía solar teniendo en cuenta la depreciación de todos los equipos utilizados, el retorno de la inversión y los gastos de operación y mantenimiento. Para su aplicación se asume que se utilizan celdas de silicio cristalino sin seguimiento, para las cuales los costos de inversión por unidad instalada (I^P), corresponden a un CAPEX de 1.77 millones de dólares por MW. Por otro lado, los costos de O & M (G^E) equivalen a 42500 dólares por MW. Considerando que, con un factor de capacidad promedio de 16.5%, se generan al año 1445.4 MWh por cada MW instalado ($1\text{MW} \times 8760 \text{ horas} \times 16.5\%$), se puede dividir el costo total por año que implica la planta de generación por cada MW instalado es decir, $F(1 \text{ MW}) = 236315 \text{ USD}$, sobre la energía que se espera generar en el mismo periodo, obteniendo un precio de 163.49 USD/MWh. Dicho precio es consistente con el LCOE publicado en el informe del WEC que lo ubica entre los 117 y 239 dólares/MWh. La ecuación (23) se utiliza para el cálculo del retorno de la inversión inicial, y se llama factor de recuperación de capital en una serie uniforme y se utiliza cuando el acuerdo involucra pagos anuales uniformes. Depende de la tasa de interés (r) y la cantidad de periodos durante los cuales se realizará el

pago (N dado en daños para este caso) (Noel, Suresh, Moghe, & Sheikh, 2011) (World Energy Council, 2013) (Leyva Carranza)

Una de las ventajas de esta forma de generación es que no está sujeta a la volatilidad de los precios de los combustibles. El valor total del arreglo fotovoltaico está compuesto por el costo de los módulos, que incluye la interconexión de las celdas, materia prima, procesamiento y manufactura, y el del balance del sistema que incluye el montaje de la estructura, las baterías, el inversor y el cableado. El precio de las celdas ha caído significativamente reportando un cambio de entre 51% y 64% entre septiembre de 2010 y de 2012, mostrando un interés de las compañías por mantener un flujo constante de producción. Entre septiembre y diciembre de 2012 el costo aproximado para silicio cristalino proveniente de China estuvo cerca de USD 0.75/W y para fabricantes occidentales se ubicó alrededor de USD 1.1 /W. Para algunas transacciones y dependiendo del volumen se han reportado precios tan bajos como USD 0.4/W. (International Renewable Energy Agency, 2013)

3.2. Generación Eólica

El viento es una forma de energía solar. Éste es causado por el calentamiento no homogéneo de la atmósfera, las irregularidades de la superficie terrestre y su rotación. Los patrones del flujo del aire son modificados por la geografía, cuerpos de agua y la vegetación. Estos flujos pueden ser aprovechados por turbinas, cuyas aspas al girar impulsan un generador mediante un eje. Para

mejorar el desempeño del arreglo, se utilizan múltiples componentes adicionales. Las aspas están unidas a un sistema de control de la inclinación para evitar que éstas giren en vientos demasiado fuertes o débiles. Éste se une a un eje de baja velocidad que gira entre 30 y 60 veces por minuto, y que debe ser conectado por medio de un convertidor mecánico, parte más costosa y pesada de la turbina, a un eje de alta velocidad aumentando la cantidad de revoluciones a entre 1000 y 1800 por minuto, que es lo requerido por la mayoría de generadores de inducción utilizados en este tipo de aplicaciones. Para el control del sistema se utiliza un controlador encargado de accionar el mecanismo cuando el viento alcance velocidades entre 13 y 26 km/h y apagarlo cuando supere los 88 km/h para proteger la integridad del equipo. Esto se hace posible mediante el uso de un anemómetro que envía la medición de la velocidad del viento al controlador y un freno que puede ser hidráulico, eléctrico o mecánico. La torre sobre la cual se soporta el aerogenerador, generalmente de por lo menos 30 metros de altura para aprovechar los vientos más rápidos y menos turbulentos, suele incluir además un mecanismo de orientación con su respectivo motor que permite mantener las aspas encarando el viento. (U.S. Department of Energy)

Hay dos tipos de turbinas de viento. Las de eje horizontal y las de eje vertical. Las primeras son las más utilizadas y son construidas típicamente con 3 o 4 aspas que se ubican encarando el viento. Las segundas tienen una forma similar a un batidor de huevos y suelen ser empleadas en lugares donde las velocidades del viento

son menores. Las turbinas pueden ser instaladas en la tierra o en grandes cuerpos de agua como océanos y lagos. Actualmente Estados Unidos no posee parques eólicos costa afuera, construcción muy común en lugares como Dinamarca y Países Bajos, pero se está trabajando en múltiples proyectos de su clase basándose en que cerca del 50% de su población habita a menos de 80 km de la línea costera. Para la generación a gran escala se utilizan arreglos de múltiples turbinas desde 100 kilovatios hasta varios megavatios, utilizando aspas de cerca de 150 pies de largas, ya que a mayor tamaño mejor relación potencia-costo. Pequeñas turbinas de menos de 100 kilovatios se utilizan en solitario para alimentar hogares, sistemas de telecomunicación y el bombeo de agua. En otros casos se utilizan sistemas eólicos híbridos que incluyen generadores diesel, celdas solares y baterías para alimentar lugares remotos sin conexión a la red. (U.S. Department of Energy)

La potencia generada por turbinas eólicas se calcula mediante la siguiente ecuación (24).

$$P = \frac{1}{2}(\rho * A * u^3) \quad (24)$$

donde,

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

A = Área de barrido por el viento

u = Velocidad del viento

Como se observa en (24) la potencia generada por las turbinas depende del cubo de la velocidad del viento. Esto significa que duplicar dicha velocidad supone un aumento de 8 veces la energía obtenida.

La función de costo utilizada para la generación se expresa en la ecuación (25) y (26) e incluye costos de inversión inicial y O & M, excluyendo gastos relacionados con la tierra tal como se explicó en la generación solar.

$$F(P_w) = aI^P P_w + G^E P_w \quad (25)$$

$$a = \frac{r}{[1 - (1 + r)^{-N}]} \quad (26)$$

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 potencia generada instantánea [\$/MW]

La ecuación (25) se utiliza para calcular el costo total de la generación de energía eólica de manera análoga a la solar y se asume que la instalación se encuentra ubicada en tierra (*on-*

shore). Para su aplicación se toman los costos del informe anual del WEC que corresponden a un valor de CAPEX (I^P) y OPEX (G^E) de 1.83 millones de dólares por MW y 24200 USD/MW respectivamente. Con un factor de capacidad promedio de 33% obtenemos que se generan al año 2890.8 MWh por cada MW instalado, para un costo anual por unidad ($F(1 MW)$) de 224585 USD, obteniendo un costo promedio de generación de 77 USD/MWh, lo que se encuentra dentro del rango de LCOE dado por el WEC (61-136 USD/MWh). (Noel, Suresh, Moghe, & Sheikh, 2011) (World Energy Council, 2013)

3.3. Generación con plantas Diesel

Uno de los usos más comunes del diesel es para la generación de energía eléctrica en zonas alejadas o como planta de emergencia en hospitales, aeropuertos y demás cargas críticas ante apagones y toda clase de desastres naturales. Sus ventajas radican en la rapidez para entrar en funcionamiento (10 segundos o menos), su alta densidad energética, que le permite generar el doble de energía que un generador a gas de igual tamaño, su alta confiabilidad, portabilidad, su suministro constante de energía soportando oscilaciones o variaciones en la carga; y su capacidad de funcionamiento de entre 20000 y 30000 horas sin mantenimiento, lo que es equivalente a 1 millón o un millón y medio de millas recorridas en un automóvil. (Diesel Technology Forum)

El motor diesel, “Es un motor de combustión interna en el cual, en la fase de aspiración, solo entra aire en el cilindro, siendo

comprimido en la fase de compresión, con lo que se consigue elevar su temperatura. El combustible es introducido a presión y pulverizado en el seno de la masa de aire caliente comprimido, y se inflama espontáneamente al contacto con éste. La combustión tiene lugar sin encendido por chispa. Son motores de gran robustez, dadas las elevadas presiones de trabajo y con una relación peso / potencia elevada.” (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2000)

Para la generación de energía eléctrica a partir del diesel, se utiliza un motor de combustión interna unido a un alternador. A esta unión se le denomina grupo electrógeno.

Los motores diesel se clasifican de acuerdo a:

- Tipo de inyección: puede ser directa o indirecta. En la primera, la inyección se realiza directamente sobre el pistón alcanzando presiones de hasta 30 o 50 bar y temperaturas de 700°C. Mientras que en el segundo caso la inyección se hace en una pre cámara conectada al cilindro a través de un ducto, lo que permite aumentar la velocidad de rotación, y con ello la potencia, del motor hasta 5000 rpm, en contraposición al anterior donde se alcanza 3500 rpm.
- Tipo de ciclo: el proceso de combustión en un motor se realiza en 4 momentos: compresión, combustión, escape y barrido y admisión. Existen propulsores llamados de “dos tiempos” donde el proceso de succión del aire para la combustión y escape se hace simultáneamente. Se

utilizan donde se requieren pequeños rangos de variación de carga. Mientras que los de cuatro tiempos cada proceso se realiza en un determinado momento, permitiendo tener un mejor control del combustible y la potencia entregada por el motor para así soportar mayores variaciones en la carga.

- Velocidad de rotación: de acuerdo a la velocidad se determinan sus características constructivas y de potencia nominal. La velocidad y el tamaño del generador tienen una relación inversa. Se conocen como motores de baja velocidad aquellos de hasta 300 rpm, media velocidad entre 300 y 900 rpm, y de alta velocidad aquellos que superan las 900 rpm. En Colombia, por ejemplo, los motores de baja velocidad se consiguen con potencias mayores a 4000 kW.
- Tipo de enfriamiento: su función es mantener todos los componentes a una temperatura ideal que permita el buen desempeño del motor, evitando que se recaliente, pues esto podría deformar las partes móviles, o que se enfríe ocasionando pérdidas de compresión por escape. Se concentra principalmente en las partes interiores de los cilindros, el pistón, las válvulas de descarga, las culatas y los inyectores. Se puede hacer por agua, equipando una bomba que le permite recorrer un circuito interior por el cual se intercambia calor con las paredes calientes, o por aire, que es impulsado por un ventilador y recorre las superficies del sistema que se construyen

intencionalmente con deflectores que mejoran la disipación.

- Tipo de alimentación: la potencia generada por el motor depende necesariamente de la cantidad de oxígeno para realizar la combustión del diesel. Los sistemas aspirados succionan aire del medio debido al vacío generado cuando el pistón se desplaza. Por otro lado, los motores sobrealimentados emplean un turbocargador para aumentar la cantidad de aire hasta un 60% al incrementar la presión con la que ésta entra al cilindro mediante una turbina impulsada por los gases de escape. Es así como, sin cambiar el volumen del cilindro, se puede utilizar una mayor cantidad de combustible por ciclo, mejorando la relación peso (y cilindraje)/ potencia.

El control de velocidad de los generadores diesel se puede hacer por medios electrónicos, que miden la velocidad del motor con un “pick up” magnético mediante el cual se cuenta la cantidad de vueltas del eje y envían la señal a un controlador donde se compara con una referencia; o se hace por medios hidráulicos, usado comúnmente en los motores más grandes y que cuenta con un motor sincronizador externo que actúa sobre la bomba de inyección. Este sistema permite controlar varios grupos electrógenos simultáneamente y un arranque más suave. (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2000)

La función de costo para el diesel es asumida como un polinomio de orden 2 dependiente del costo del combustible y el

mantenimiento y se expresa en la ecuación (27). Este modelo no es 100% preciso pero es el de mayor utilización y se considera que refleja de una manera lo suficientemente fiel el comportamiento del sistema. Además, hace posible analizar el costo total de operación de la planta minuto a minuto mientras ésta se carga. El resultado de la función de costo está dada en \$/h. (Deckmyn, Vandoorn, Moradzadeh, & Vandeveldel, 2014)

$$C_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} a_i + b_i P_{Gi} + c_i P_{Gi}^2 \quad (27)$$

donde,

a_i = Costo constante asociado al arranque del generador

b_i y c_i = Coeficientes de costo de combustible por potencia generada

N_G = Número de generadores

P_{Gi} = Salida de potencia activa del generador i -ésimo

Para determinar el valor de los coeficientes se eligió un generador Caterpillar 3512B de 1275kW (Ver Anexo C) (Caterpillar, 2015) con un consumo de combustible conocido para diferentes potencias de salida, obteniendo, mediante aproximación de la función en Excel, $a_i=7$ USD/MWh, $b_i=318.46$ USD/MWh, $c_i = -32.06$ USD/MWh, para un valor del galón de diesel igual a 4 USD/gal con base en el reporte de la firma de asesoría financiera Lazard de septiembre de 2014, del cual también se obtienen los datos sobre gastos de mantenimiento e inversión, pues el WEC no

incluye esta clase de generadores en su informe. El costo anual de operación y mantenimiento es de 15 USD por kW instalado, lo que en este caso significaría un total 19125 dólares al año y una inversión inicial promedio de 650 USD por kW instalado, para un total de 828750 USD, que serán recuperados en 20 años mediante el mismo método de pago empleado en los casos de las celdas solares, obteniendo un gasto anual por este concepto de 90786 USD (10.95% de la inversión inicial, según la ecuación (23)). Para calcular cómo se verán reflejados estos costos en cada MWh anualmente, y debido a que la prioridad se le debe dar a las energías renovables, se elige el peor factor de capacidad de este informe para el Diesel, 30%. Esto significaría que el generador despacha 3350,7 MWh al año (que corresponden al 100% de su capacidad durante 2628 horas). Al dividir los costos de O&M y de la inversión inicial sobre este volumen de ventas se obtienen 5.71 USD/MWh y 27.094 USD/MWh respectivamente. Estos gastos dependen de la potencia generada y por tanto serán sumados al factor b_i . Se puede decir entonces que el coeficiente a_i se relaciona con el gasto de encender el generador, b_i con el consumo de combustible, mantenimiento y recuperación de la inversión debido a la venta de potencia eléctrica y c_i indica una reducción en gastos por mejoras en la eficiencia al usar el generador más cerca de su potencia nominal. Es importante anotar que el generador puede ser utilizado un 10% por encima de su máximo teórico durante 1 hora en caso de ser necesario. Al incluir estas consideraciones, remplazar datos en la ecuación (27) y haber definido que se empleará un solo generador, se obtiene la

ecuación (28) con la que se calculará en el futuro el costo de la generación diesel. (Lazard, 2014)

$$C_D = 7 + 351.264P_{GD} - 32.06P_{GD}^2 \quad (28)$$

Al evaluar en esta ecuación una potencia de 1MW, se obtendría un costo de 326 USD/MWh, lo que se encuentra dentro de los límites del informe consultado. Aun así, el gasto varía dependiendo del porcentaje de carga de la máquina. En casos en que el precio del combustible fluctúe considerablemente, se puede revertir el procedimiento, dividiendo los factores a_i, b_i y c_i iniciales (antes de sumar O & M y la inversión) sobre los 4 dólares que se asumieron y multiplicar por el nuevo precio. Cabe anotar que el precio asumido por galón es también bastante pesimista.

3.4. Generación a partir de la Biomasa

“La palabra biomasa describe los materiales provenientes de seres vivos animales o vegetales. Es decir, toda la materia orgánica (materia viva) procedente del reino animal y vegetal obtenida de manera natural o procedente de las transformaciones artificiales. (...) La energía de la biomasa proviene en última instancia del Sol. Los vegetales absorben y almacenan una parte de la energía solar que llega a la tierra y a los animales en forma de alimento y energía. Cuando la materia orgánica almacena la energía solar, también crea subproductos que no sirven para los animales ni para

fabricar alimentos pero sí para hacer energía de ellos. La biomasa era la fuente energética más importante para la humanidad hasta el inicio de la revolución industrial, pero su uso fue disminuyendo al ser sustituido por el uso masivo de combustibles fósiles”. (Endesa)

Existen tres tipos de biomasa: la natural generada sin intervención humana, la residual incluye los restos orgánicos provenientes de las actividades humanas y la producida que se refiere a cultivos cuya única finalidad es la obtención de biocombustibles y otros materiales para el aprovechamiento energético.

Para la conversión de la biomasa en energía, se utilizan actualmente dos métodos: los termoquímicos y los bioquímicos. Los primeros utilizan el calor para transformar el material orgánico que contiene menor humedad. Se hace de 4 maneras, la combustión, que incluye mayor presencia de oxígeno (20% a 40% sobre el valor teórico) y se eleva la temperatura a entre 600 y 1300°C; la pirólisis en la cual se descompone la biomasa anaeróbicamente a una temperatura aproximada de 500°C; la gasificación que genera múltiples subproductos como el monóxido y dióxido de carbono, el metano e hidrógeno y se hace con temperaturas entre 700 y 1500°C con una presencia de oxígeno entre el 10% y 50%; y la co-combustión que consiste en adicionar biomasa a calderas de carbón para reducir la emisión de CO₂. Los métodos bioquímicos se realizan de dos maneras, utilizando diferentes microorganismos para fermentar el material, y se diferencian según el producto generado. Se utiliza fermentación alcohólica para conseguir etanol al descomponer

hidratos de carbono. Por otro lado, la fermentación metánica genera biogás mediante digestión anaerobia. (Endesa)

La biomasa es aprovechada para la producción de energía térmica, biogás, combustibles y energía eléctrica. La primera puede ser empleada para dar calor, cocinar alimentos o producir vapor para la industria pero a su vez es altamente contaminante, aunque menos que los combustibles fósiles. La producción de biogás (metano) es de gran utilidad para suministrar calor o electricidad principalmente en el sector agrícola y ganadero pues estos generan su propia materia prima. Los biocombustibles son utilizados para el transporte y se dividen en dos, el bioetanol, obtenido de fermentación de cereales, maíz y remolacha, reemplazando la gasolina en vehículos livianos y el biodiesel sustituye el ACPM en automotores de carga. Las centrales de biomasa pueden generar electricidad con potencias de hasta 50 MW usando combustión o gasificación mediante un proceso similar al de las plantas térmicas. (Endesa)

Siempre y cuando la obtención de la biomasa se realice a una velocidad que permita al medio ambiente recuperarse de sus efectos, esta fuente se puede considerar 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. Aunque los recursos de biomasa serían suficientes para abastecer de energía a todo el planeta, esto implicaría una deforestación masiva contribuyendo al cambio climático. (Endesa)

En general, los costos de la generación con biomasa pueden ser modelados de dos maneras. Para algunos casos se hace compra de residuos de madera, basura, hojas y restos de comida, lo que involucra un gasto de “combustible” y los costos podrían ser vistos como en el caso del diesel. Por otro lado, los generadores con biomasa en micro redes utilizan subproductos de los procesos locales, por lo tanto este costo no solo es despreciable, también se ahorra el pago por la disposición de estos residuos. Para este caso, se asumirán solo gastos de inversión inicial y O & M, obteniendo el costo anual total de la generación por biomasa según la ecuación (29).

$$A = \left(I_c \frac{i}{1 - \frac{1}{(1+i)^n}} \right) + \text{Annual } O \& M \quad (29)$$

donde,

A = Pago anual (pago amortizado)

I_c = Inversión inicial

i = Tasa de interés

n = Vida útil (en años)

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

Para estimar el valor del MWh generado, se debe elegir primero el método de generación a utilizar. Para este caso, con el fin de emular el proceso elegido en la Universidad Pontificia

Bolivariana, se utilizará gasificación. Según el informe del WEC, el costo promedio de inversión inicial por MW para este sistema es de 5 millones de dólares, y el de O & M es de 145000 USD. Es decir que el costo total anual, empleando la ecuación (29) para un retorno de la inversión a 20 años y una tasa de interés de 0.09 es de 692732 USD. Suponiendo un factor de capacidad del 80% según dicho informe, se puede suponer que se generarán anualmente 7008 MWh, teniendo como resultado un precio de 98.85 USD/MWh. Este precio se ubica dentro del rango del LCOE del WEC, y es el segundo más económico después de la generación eólica. Aun así, para esta aplicación se debe considerar que el factor de capacidad asignado es bastante alto, lo que necesitaría la consecución de una cantidad bastante considerable de recursos, que podría no siempre ser viable. Para estos casos podría ser posible comprarlos o recolectarlos lo que involucraría nuevos gastos de logística.

3.5. 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 y disminuyendo costos entre un 15% y un 40%. En la actualidad la cogeneración representa el 11.2% de la electricidad generada en toda la Unión

Europea, con porcentajes variables en cada país, yendo desde el 0% en Malta y el 0.9% en Chipre hasta un 47.4% en Letonia. (The European Association for the Promotion of Cogeneration) La cogeneración aprovecha el calor proveniente de los generadores térmicos para calentar agua que será utilizada en procesos industriales o en la calefacción. En un generador a gas por ejemplo, se puede aprovechar la energía disipada en el bloque del motor, en el radiador para el enfriado del aceite, en el filtro de aire y los gases del escape. Estos últimos, por su temperatura cercana a los 400 y 500°C, pueden ser utilizados también para procesos de secado o para generar vapor. (Clarke Energy)

Existen dos tipos de cogeneración: de ciclo superior y de ciclo inferior. Este primero, el más común, consiste en utilizar primero el combustible para generar electricidad o energía mecánica utilizando una porción del calor residual para obtener energía térmica. Por otro lado, en el de ciclo inferior, mucho menos común, se aplica en algunos tipos de industrias como las del acero y el vidrio donde grandes hornos generadores de calor podrían expulsar al ambiente gran cantidad de gases que pueden ser aprovechados para obtener electricidad por medio de turbinas de vapor. Instalaciones de gran tamaño pueden utilizar sistemas diseñados a la medida, mientras las aplicaciones de menor escala pueden utilizar unidades modulares. (Center for Climate and Energy Solutions) Honda, por ejemplo lanzó en marzo de 2003 un equipo compacto para el hogar que combina el motor a gasolina más pequeño del mundo, un inversor y un calentador de agua. Su última versión lanzada en 2011 incluye un propulsor EXlink con

una eficiencia de 26.3% para la generación de energía que, al integrarse como sistema CHP alcanza valores del 92%. Se estima que en Japón a marzo 31 de 2011 había cerca de 108000 de estos sistemas instalados. (HONDA, 2012)

La cogeneración se clasifica según su motor primario en 5 tipos:

- Turbinas de gas: con capacidades típicas de 500 kW a 25MW, son altamente confiables para aplicaciones donde es necesario un alto grado de calor. Luego de la combustión del gas se utiliza el vapor para hacer girar las aspas de una turbina y, con ella, un generador eléctrico. Posteriormente se utiliza un sistema de recuperación de calor para capturar este a partir del vapor obtenido en la turbina, el cual puede ser utilizado para calefacción o enfriamiento.
- Turbinas de vapor: utiliza gran variedad de combustibles incluyendo gas natural, residuos sólidos, carbón, madera y sus residuos, y productos agrícolas. Son altamente confiables y pueden ser empleados para aplicaciones con distintos requerimientos de temperatura. Este tipo de turbinas alcanza capacidades de entre 50 kW a 250 MW. En este método se realiza el calentamiento de agua a partir de una caldera con combustible, generando vapor a altas presiones que hace girar una turbina para generar electricidad. El gas a baja presión expulsado por el generador puede ser utilizado para proveer energía

térmica. Se utiliza en sistemas industriales de pequeña y gran escala.

- Motores recíprocos: son impulsores de combustión interna similares a los de automóviles aunque impulsados por propano o gas natural que incluyen bujías de ignición. Son de altamente utilizados en aplicaciones de pequeña y mediana escala (máximo 5 MW), aunque suelen usarse en arreglos de múltiples unidades. En general son eficientes, tienen un arranque rápido y siguen bien los cambios en la carga. Los más pequeños se utilizan para obtener agua caliente mientras que los más grandes para generar vapor a baja presión.
- Microturbinas: son turbinas de combustión pequeñas y compactas con capacidades típicas entre 30 kW y 300 kW. En ellas, se utiliza un intercambiador de calor que permite recuperar la energía térmica del escape de la microturbina para producir agua caliente o vapor a baja presión, utilizados en procesos de calentamiento de procesos y espacios, des humidificación y refrigeración por absorción.
- Celdas de combustible: son una tecnología emergente de gran potencial para servir las necesidades térmicas y de potencia con muy bajas emisiones y alta eficiencia eléctrica. Las celdas utilizan procesos electroquímicos o similares a las baterías para convertir la energía del hidrógeno para convertirlo en agua y energía. Dicho

hidrógeno se obtiene al procesar gas natural, metanol, carbón u otros hidrocarburos. Sus ventajas incluyen bajas emisiones, bajo ruido, alta eficiencia en gran cantidad de porcentajes de carga y diseño modular. A pesar de ello, esta tecnología tiene poco desarrollo por lo que puede resultar costoso y tener un servicio técnico deficiente. (Center for Climate and Energy Solutions)

La cogeneración ofrece múltiples beneficios ambientales, entre ellos la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero debido al aumento en la eficiencia de los procesos que, en últimas, reduce la cantidad de combustible consumido. Actualmente la cogeneración evita el equivalente al 1.8% del consumo de energía anual de Estados Unidos y la emisión de cerca de 248 millones de toneladas de CO₂ o cerca del 3.5% del total de este mismo país en 2007. El uso de la cogeneración ha sido incentivado principalmente por las leyes que regulan las emisiones de gases al aire. En Texas, por ejemplo, la cogeneración es utilizada comúnmente por su gran cantidad de industrias petroquímicas, haciéndolo responsable del 20% del total de esta clase de generación en Estados Unidos. (Center for Climate and Energy Solutions)

La función de costo para la cogeneración suele asumirse de manera análoga al diesel con un polinomio de orden 2. Sin embargo, debido a la forma en que los fabricantes reportan la información de consumo no se puede aproximar una función de costo, pues solo se dice el consumo a la potencia nominal, por tanto 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 (Ver Anexo D) (Captstone, 2010). Ésta tiene un consumo de combustible de 12 mil MJ/h (ó 11,4 MBTU/h, es decir 11,4 millones). El gas cuesta actualmente 18.29 USD/MBTU, es decir que el costo de combustible es de aproximadamente 208.5 USD/h. (U.S. Department of Energy, 2015) A pesar de que esta inversión aparente ser muy elevada, se debe considerar que la energía recuperable en la salida de calor del sistema es igual a 7100 MJ/h (6,75 MBTU), lo que indica un consumo de energía de 4,65MBTU para la generación de electricidad, acarreando un costo de tan solo 85.05 dólares en combustible por este concepto. Además, es necesario considerar los gastos de O & M de la máquina, que son en promedio 20 USD/MWh, y los de la inversión inicial que ascienden a 3050 USD/kW instalado. Con un factor de capacidad aproximado del 95%, se puede afirmar que la máquina generaría 8322MWh al año, sobre los cuales se debe repartir la recuperación de la inversión inicial. Dicha inversión es en total 3050000 USD, de los cuales se pagarán al año 333975 USD (el 10.95% según la ecuación (23)), es decir 40.13 USD/MWh. Se puede crear entonces la ecuación (30), la cual define el costo de la cogeneración separada en 3 coeficientes, O&M e inversión inicial, costo de combustible relacionado a la generación eléctrica y costo de combustible por calor. Estos coeficientes no se suman para facilitar la comprensión y posible separación de los gastos. Aun así se debe anotar que es imposible separar los procesos de generación de energía eléctrica y de calor,

por lo que cada vez que el sistema sea utilizado se debe considerar el valor conjunto. Una alternativa de trabajo para un despacho hipotético sería considerar la generación de calor por CHP como una carga negativa, pues cada vez que se utilice, la demanda total del sistema caería en una suma equivalente a la potencia eléctrica relacionada con el calor obtenido.

$$C_{CHP} = C_{O\&M+I}P_{CHP} + C_{GE}P_{CHP} + C_{GC}P_{CHP} \quad (30)$$

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]

Es decir que el costo total de utilizar el sistema durante una hora completa cuesta 268.63 dólares, y que el costo de 1 MWh, incluyendo los gastos de O & M e inversión, mas no de calor, sería de 140.18 dólares. Valor un poco por encima del máximo de 135 USD dado por Lazard. La microturbina utilizada tiene una eficiencia eléctrica de apenas el 33%, lo que permite afirmar que la cogeneración es en realidad más eficiente para generar calor, pues su salida de 6.75MBTU/h, equivale a 1.957MWh. Si se supusiera una eficiencia total del sistema del 90%, lo cual es normal para este tipo de configuraciones, se podría asegurar que

se aprovechan 1.727 MWh en forma de calor, generando una disminución de la demanda igual a dicha cantidad. (Lazard, 2014)

3.6. Bancos de Baterías

Debido al cambio en los paradigmas y métodos de generación, donde el almacenamiento de energía no puede depender de reservas de combustibles fósiles, las baterías se constituyen en la manera de asegurar la confiabilidad del suministro energético. Sus ventajas radican en la capacidad para amortiguar los precios, pues pueden ser utilizados para cubrir la demanda en horas pico cuando el costo de la electricidad es más elevado, además permiten hacer 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)

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. Para el caso de sistemas recargables, las baterías permiten almacenar una cantidad determinada de energía química y ser re-cargada cuando el material ha sido transformado. Actualmente, debido a la nueva demanda de aplicaciones portátiles y de transporte, así como la electrónica de potencia utilizada en sistemas de gran escala para ciertos servicios, ha habido un aumento dramático en nuevas tecnologías de baterías. (Antonucci & Antonucci, 2011) Las baterías están compuestas por celdas apiladas, cada una de estas conformada por tres

elementos: electrodo positivo, negativo y electrolito. Las baterías se especifican según la cantidad de carga eléctrica que pueden entregar a un sistema desde el estado de carga completa hasta que el voltaje en los bornes caiga por debajo de su valor de corte. Esta característica normalmente se expresa en Amperios/hora (Ah), lo que es equivalente a 3600 Culombios. 1 Ah se refiere a la capacidad de proporcionar corriente eléctrica de 1 amperio durante una hora. Su otra característica más relevante es la tasa de corriente o tasa C y se refiere a la corriente que puede entregar la batería constantemente, de manera que se pueda calcular su tiempo de carga y descarga. Ambos parámetros de la batería están relacionados de forma inversa, debido a que ésta posee múltiples curvas de funcionamiento, mayores corrientes involucran menor capacidad total del sistema. Las baterías deben cumplir con ciertos requisitos de desempeño en aspectos como la energía específica, potencia específica, eficiencia, requerimientos de mantenimiento, seguridad y aspectos económicos y ambientales. La energía específica y la potencia específica se expresan en Wh/kg y W/kg respectivamente, y se modelan según las ecuaciones (31) y (32).

$$E_{espe} = \frac{nFVr}{3.6 \sum M_i} \quad (31)$$

$$P_{pico} = \frac{V_0^2}{4(R_c + R_{int})} \quad (32)$$

donde,

n = Número de electrones transferidos en la reacción

F = Constante de Faraday en Culombios por mol (96.495)

V_r = Voltaje reversible de la celda

$\sum M_i$ = Suma del peso molecular de las especies involucradas en la reacción.

V_0 = Voltaje termodinámico.

Donde el voltaje reversible se refiere a la máxima diferencia de potencial posible entre los bornes y el voltaje termodinámico es un parámetro que depende de la constante de Boltzmann, la carga y la temperatura de una partícula. (UPB, EAFIT, EPM, SOFASA S.A., 2014) (Ruiz-Morales, y otros, 2006) (Doolittle)

Las baterías se clasifican según los materiales utilizados para su fabricación. Cerca del 90% de la participación en el mercado corresponde a las celdas llamadas plomo-ácido (en inglés *lead acid*), conformadas por un electrodo negativo de plomo, uno positivo de óxido de plomo y separados por un electrolito de ácido sulfúrico. Algunas de éstas, llamadas comúnmente inundadas, requieren ser llenadas con agua destilada regularmente; mientras otras selladas y libres de mantenimiento poseen un electrolito absorbido. Para las aplicaciones de transporte, se suele construir un empaquetado exterior de polipropileno para la batería, con separaciones entre celdas de fibra de vidrio, polietileno, matrices de cloruro de polivinilo o redes delgadas de calcio, antimonio, catión de plomo o aleaciones de estaño y aluminio. El desarrollo continuo de esta tecnología ha llevado a importantes progresos en sus capacidades, con bajo costo y alta confiabilidad, pero su deficiencia radica en su baja

densidad energética debido al alto contenido de plomo. Actualmente se están llevando a cabo ensayos para dopar el plomo con materiales como carbono o sustituirlo con el fin de aumentar su tiempo de vida, desempeño y cantidad de ciclos. (Antonucci & Antonucci, 2011)

Las baterías de ion de litio fueron desarrolladas para los primeros dispositivos electrónicos portátiles, debido a que poseen la mayor densidad energética entre las baterías comerciales. El ánodo está compuesto de litio metálico, aleaciones de litio o compuestos intercalados de carbono-litio. El electrolito se basa en compuestos no acuosos, tales como perclorato de litio (LiClO_4) o hexafluorofosfato de litio (LiPF_6). A pesar de la alta demanda de estas baterías por el creciente interés en el aumento de la movilidad sostenible, se han despertado muchas críticas debido al lento desarrollo de ésta en comparación con otras tecnologías como los semiconductores. El mercado de estas baterías se encuentra controlado por un reducido grupo de compañías asiáticas con cerca del 90% de la producción mundial. (Antonucci & Antonucci, 2011)

Las baterías de níquel-cadmio constituyen una buena relación entre energía específica, potencia específica, ciclo de vida y confiabilidad. Su proceso de manufactura es más caro que el de las baterías de plomo-ácido, además sufre de efecto memoria, permitiendo su carga completa únicamente después de varios ciclos de descarga total, aun así este efecto puede mitigarse con un manejo adecuado. Su ventaja principal frente a las baterías de plomo-ácido radica en su poca necesidad de mantenimiento.

Existen además baterías especializadas para el uso en altas temperaturas. Algunos de los compuestos utilizados para tal fin incluyen compuestos de sodio debido a su alta disponibilidad y bajo costo tales el sulfuro de sodio y el níquel-sodio cloruro. (Antonucci & Antonucci, 2011)

Para este caso se supondrán baterías VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*), es decir baterías de plomo-ácido libre de mantenimiento. Según el fabricante C&D Dynasty, para restablecer la carga perdida en una batería al 100%, se debe hacer una recarga igual al 107% a 115%, es decir 10.7 amperios por cada 10 utilizados. Intentar sobrecargar la batería más allá de ese límite podría derivar en daños prematuros a su vida útil debido a corrosión de las rejillas, gasificación y consumo de agua en el electrolito. La corriente de carga de una batería está dada por la ecuación (33). (C&D Dynasty, 2012)

$$I_c = \frac{(V_c - V_b)}{R_c + R_r + R_b} \quad (33)$$

donde,

V_c = Voltaje del cargador

V_b = Voltaje de la batería en circuito abierto

R_c = Resistencia de la fuente de carga

R_r = Resistencia limitadora del circuito

R_b = Resistencia de la batería

En la Figura 7 se muestra el perfil típico de carga de una de estas baterías según el fabricante anteriormente mencionado. Es interesante notar como más del 90% de la carga de la batería es aprovechable tras 10 horas de recarga, pero sólo lo es en su totalidad tras cerca de 40 horas. Cuando el voltaje de la batería se acerca a los 11 V, se pasa a la fase de absorción. En ella la corriente de carga disminuye considerablemente y el proceso de recarga de energía se hace mucho más lento. (C&D Dynasty, 2012)

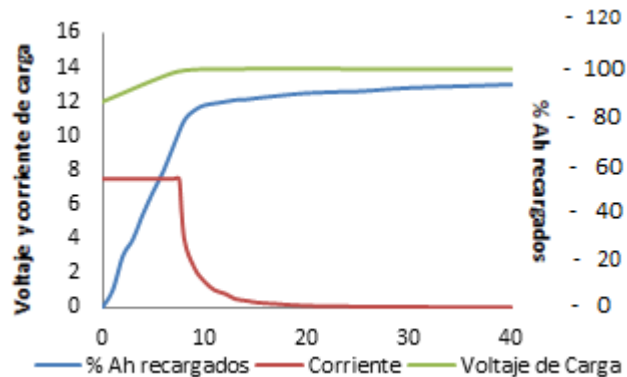


Figura 7. Perfil típico de carga de una batería VRLA

Determinar el tiempo requerido para recargar una batería puede ser un problema difícil pues depende de la profundidad de

descarga o DOD (por las siglas en inglés de *Depth of Discharge*), el ritmo de descarga (*rate of discharge*), corriente de carga (I_C), el voltaje de carga, y el estado de carga o SOC (*state of charge*) involucrados en la reposición de la carga. En algunos casos se prefiere sobredimensionar las baterías. Un acumulador diseñado para el 110% de la capacidad necesaria, se debe recargar solo al 90%, reduciendo el tiempo total de carga. Esto es importante, pues bajo ciertas condiciones, obtener un nivel del 100% de carga lleva 4 veces más tiempo que del 90%. El periodo de carga se calcula según la ecuación (34). (C&D Dynasty, 2012)

$$T_{RX\%} = \frac{Ah_R K_x}{I_C} \quad (34)$$

donde,

$T_{RX\%}$ =Tiempo de recarga en horas para alcanzar el estado de carga x%

Ah_R = Amperios hora removidos en la descarga previa

I_C =Corriente máxima de carga en amperios

K_x =Constante dependiente de la corriente de carga disponible y el estado de descarga (para este fabricante, $K_x = 2.78$ para una descarga del 90%). Es menor, cuando menor es la descarga.

Las baterías VRLA se diseñan típicamente para un tiempo de descarga aproximado de 20 horas, e intentar acelerar este proceso disminuye la energía disponible significativamente. Ensayos en

una batería con capacidad de 5Ah evidencian que ésta puede descargarse durante 20 horas a un ritmo de 0.25 A, entregando el total de su carga o en 37 minutos extrayendo de ella una corriente de 5 A y no en una hora, que sería el tiempo teórico. (Lasseter & Erickson, 2009)

Los costos del almacenamiento de energía son altamente variables entre vendedores e, incluso, los informes de distintas entidades parecen no coincidir en los costos de inversión y mantenimiento. Lo cierto es que los informes del WEC y Lazard ubican el precio del MWh al mismo nivel. El primero lo aproxima a 300 USD/MWh, mientras el segundo habla de un rango entre los 265 y 324 USD. Para aproximar los costos y tener una base de trabajo se utilizará el reporte preparado por Sandia National Laboratories, laboratorio de investigación y desarrollo del departamento de energía de Estados Unidos. Dicho reporte no revela el nombre del fabricante, así que se refieren a éste como S15 (S por el inglés *Supplier*). Se elige entonces un banco de baterías de plomo-ácido avanzado de 1000 kW, con capacidad para almacenar energía para 10 horas, es decir, una capacidad de carga de 10000 kWh para la profundidad de descarga nominal (descarga profunda del 80%). El costo total de las instalaciones es de 5.023 millones de dólares, más 9.2 USD/kW-año de mantenimiento, 1088 dólares/kW para el remplazo de las baterías cada 8 años, y un tiempo de vida esperado de 15 años. Estos datos suponen 365 ciclos de carga y descarga por año, aunque cabe resaltar que dicho tiempo es bastante variable, puesto que en muchas ocasiones, debido a que éste depende de gran cantidad de parámetros externos como la

temperatura en el momento de la carga, las corrientes, etc., el tiempo de vida útil real resulta ser mucho menor al especificado por el fabricante. La energía total almacenada en un año es entonces de 3650 MWh. El costo total anual depende entonces de todos estos factores y se muestran en la ecuación (35).

$$C_b = aI_{IB} + O\&M_b + C_R + \frac{C_C}{\eta_b} \quad (35)$$

donde,

a =Factor de recuperación de la inversión inicial (según la ecuación (23)) 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 remplazar 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)

Al evaluar la ecuación se obtiene un total de 768052 USD/año, sin considerar el precio de recargar las baterías. Esto significa 210 dólares por MWh extraído. Suponiendo que la recarga se hiciera con energía proveniente de la biomasa o viento, a un precio aproximado de 100 USD/MWh y teniendo en cuenta η_b el costo total del proceso completo, es decir desde que la potencia de

entrada se rectifica hasta que se invierte para ser devuelta al sistema, es de 321.11USD/MWh. (Akhill, y otros, 2013)

4. SIMULACIÓN DEL DESPACHO ECONÓMICO UTILIZANDO MATLAB

En el siguiente capítulo se dará una breve explicación de los principales comandos utilizados al realizar el algoritmo de MATLAB de manera que se le facilite la comprensión al lector. Además se exponen los detalles y limitaciones de las simulaciones, los datos asumidos y la forma en que se interrelacionaron las variables.

4.1. Comandos Básicos

MATLAB, del inglés *Matrix Laboratory*, es una herramienta de software con lenguaje de programación propio (M) que permite hacer desarrollos matemáticos, creación de interfaces de usuario e interconexión con otros programas y dispositivos de hardware, optimizada para el trabajo con matrices y vectores.

MATLAB dispone de una ventana de comandos (*Command Window*) donde se pueden realizar y visualizar toda clase de operaciones matemáticas y sus respectivos resultados. Igualmente funciona como salida para los procedimientos ejecutados en los archivos, llamados *Scripts*. Dichos *Scripts* son el lugar donde se escriben códigos complejos que pueden ser guardados en forma de archivo con extensión .m. El resultado de cualquier operación realizada en un *Script* se observa en la ventana de comandos a menos que se haya ingresado un punto y coma (;) al final de la línea. Por otro lado, también se pueden hacer comentarios antecediendo

estos de un signo porcentaje (%) en un *Script*. Estos se reconocen fácilmente por su color verde.

Para asignar una variable se escribe un nombre cualquiera, que puede incluir letras (sensible a las mayúsculas) y números al lado izquierdo e igualando a una operación, número, vector (ingresado entre corchetes con espacio entre los elementos) o matriz (asignada como vectores separados por punto y coma y entre corchetes). Para darle un valor específico a una posición de un vector se usa el nombre del mismo, y el número de la posición entre paréntesis. Los elementos de los vectores se numeran a partir de 1. En cambio, el contenido de las matrices se enumera recorriendo las columnas, es decir, en una matriz 3x3, el elemento 4 corresponde a la primera fila, segunda columna.

Otra forma de crear vectores es dando un nombre de variable y entre paréntesis escribir los elementos a los que se les desea asignar un valor, separados con dos puntos e igualados a un número o función que se le asignará a cada posición del vector. Es decir, el comando “x(1:99)=3”, crea un vector de 99 elementos en que todos ellos son iguales a 3. Una posible manera de asignar valores a vectores o a funciones como las trigonométricas o las “for” es creando una variable e igualarla a un número de partida, una amplitud del paso y un número final. Por ejemplo el código “t=0:0.1:100”, crea un vector t de 1000 elementos que contiene los números de 0 a 100 en pasos de 0.1.

El comando “If” se utiliza para simbolizar que una condición se debe cumplir para que se ejecute una parte del código ubicada

entre dicho *if* y la partícula “*end*” que denota el final de esta sección. Para utilizar un *if*, éste se escribe seguido de un espacio y una condición entre paréntesis. Éstas suelen hacerse comparando una variable o varias con valores constantes u otras variables y algunas de ellas pueden incluir la condición mayor que o mayor igual que ($>$ ó $>=$), menor que o menor igual que ($<$ ó $<=$), igual ($=$) o diferente de (\neq), así como operaciones lógicas entre las condiciones, utilizando ($\&\&$) que funciona en forma de compuerta *AND* o ($\|\|$) que hace las veces de compuerta *OR*. Dichas operaciones lógicas también aplican para trabajar con binarios.

Los ciclos *for* se utilizan para realizar un procedimiento iterativo cambiando el valor de una variable. Suele usarse para evaluar funciones varias veces o asignar vectores. Se escribe como la partícula *for*, seguida de un espacio y una variable, que será la que se modifique en cada ciclo, igualada a un valor inicial, seguido de dos puntos y un valor final, lo que la haría cambiar en pasos de 1. También se puede variar la amplitud del paso como se explicó previamente. Al terminar un ciclo *for* se debe usar la partícula *end* para delimitar las líneas que se iteran.

Otra función de gran utilidad en MATLAB es “*rand*”, que genera un número aleatorio entre 0 y 1. Se suele usar igualándose a una variable escalar o a una matriz (o vector), escribiendo después del *rand* entre paréntesis las dimensiones de la matriz, separadas con coma, empezando por el número de filas y luego de columnas.

Suelen utilizarse al principio de los códigos los comandos “*clear all*”, “*close all*” y “*clc*”. El primero elimina las variables guardadas por MATLAB durante la ejecución del código, la segunda cierra las ventanas que se han abierto para graficar o visualizar el árbol y la tercera limpia la *command window*, aunque sin eliminar valores de variables.

El comando para graficar en MATLAB se llama “*plot*”, éste se utiliza escribiendo entre paréntesis las variables que se desean visualizar en la forma *x,y*. A continuación se puede escribir otra coma y, entre comillas simples, escribir la inicial en inglés del color del que se desea hacer la gráfica acompañada del símbolo que se quiera utilizar para mostrar los puntos. Por ejemplo la línea “*plot(x,y,'r+')*”, crea la gráfica en forma de cruces rojas. El color por defecto es el azul. También se pueden realizar gráficas sólo con la variable de eje *y*, y la *x* es asumida por MATLAB como el número del elemento en el vector. Existe además el comando “*plot3*”, que funciona de manera análoga y se utiliza para gráficos en 3 dimensiones.

Para construir los árboles por medio de *Machine Learning* se deben asignar las variables que se usarán como atributos del árbol, a un vector de variables *X*. Posteriormente se utiliza la línea “*rtree=fitree(X,Y)*”. Esto creará un árbol que se bifurca dependiendo de los valores de las variables en *X*, y cree una predicción para la variable de salida *Y*. Esta creación depende de una base de datos que se debió construir previamente y que relacione todas las variables entre sí.

Tabla 3. Algunos comandos y funciones disponibles en MATLAB

$f(x)$	<i>Comando en Matlab</i>
\sqrt{x}	<i>sqrt(x)</i>
$\cos(x)$	<i>cos(x)</i>
<i>sen(x)</i>	<i>sin(x)</i>
$\tan(x)$	<i>tan(x)</i>
$\arctan(x)$	<i>atan(x)</i>
e^x	<i>exp(x)</i>
$\ln(x)$	<i>log(x)</i>
$\log(x)$	<i>log10(x)</i>
$\sinh(x)$	<i>sinh(x)</i>
<i>mínimo entero</i>	<i>floor(x)</i>
<i>mayor entero</i>	<i>ceil(x)</i>
<i>valor absoluto</i>	<i>abs(x)</i>

Las variables X pueden ser por ejemplo la velocidad del viento, día, hora, costo del combustible, etc. y la Y el costo por cada MWh dadas esas condiciones. Para visualizar el árbol se usa el

comando “view(rtree,’mode’,’graph’)”. Dicho árbol puede ser utilizado para predecir nuevos resultados dando un valor a las variables X, teniendo la precaución de generar igual número de ellas que cuando se creó el árbol. En el caso de que ello sea muy complejo, se pueden utilizar vectores llenos de valores nulos y solo utilizar una de las posiciones para predecir. Esto se haría así: “resultado=predict(rtree,Xnuevo)”. En la Tabla 3 se presentan algunos de las funciones matemáticas básicas disponibles en MATLAB y en el Anexo E se muestran ejemplos para la mejor comprensión de estos conceptos.

4.2. Herramienta para la elaboración de árboles de decisión en MATLAB

MATLAB, a partir de la edición de 2014, cuenta con un paquete de algoritmos de *Machine Learning*, explicado previamente en la sección 2.2. El desarrollo ejecutado para este trabajo se hizo mediante el método de regresión, el cual construye modelos para predecir resultados basándose en un conjunto de muestras. (Mathworks, 2014)

El proceso de desarrollo de modelos por *Machine Learning* de MATLAB se realiza en 4 pasos: exploración, modelamiento, evaluación y despliegue. Las dos primeras etapas dependen del método de aprendizaje, del cual existen dos tipos, supervisado y no supervisado. El primero desarrolla un modelo predictivo basado en los datos de entrada y de salida, mientras que el segundo, relacionado con la exploración, agrupa e interpreta los datos de entrada únicamente. La exploración consiste en obtener

una mejor percepción de los datos a través de un examen visual, mediante el cual se identifican tendencias e interacciones, se detectan patrones, se remueven valores atípicos, se reducen los datos y se eligen los predictores. El modelamiento, donde toma lugar el aprendizaje supervisado, utiliza múltiples algoritmos para construir un modelo predictivo que puede agrupar exitosamente datos nunca antes vistos según ciertas observaciones rotuladas en los datos. El aprendizaje supervisado se divide en clasificación y regresión, que a su vez se subdividen en varias subcategorías. Árboles de decisión, método de conjunto, redes neuronales y máquinas de soporte vectorial para el primer caso, mientras que la regresión se divide en lineal, no lineal y no paramétrica. El proceso de evaluación se lleva a cabo dependiendo de cada tipo, y normalmente depende de métodos estadísticos y distancias entre los datos. Posteriormente cuando el resultado ha sido corroborado, se hace el despliegue del modelo o, en este caso, el árbol obtenido.

Dentro de las herramientas de MATLAB se encuentran además una serie de comandos que permiten construir y visualizar árboles de decisión de ambas clases: clasificación y regresión. Para este caso era necesario trabajar con la herramienta de regresión para así predecir el costo de un despacho hipotético basado en unas características de entrada y los datos del pasado. En el campo de la Ingeniería Eléctrica es común el uso de los árboles de clasificación para determinar si un sistema perderá o no estabilidad. Los pasos utilizados para crear los árboles son:

1. Comenzar con todos los datos de entrada, examinando las posibles bifurcaciones binarias basadas en los predictores.
2. Seleccionar la bifurcación con el mejor criterio de optimización. El método para hacerlo es eligiendo aquella condición de menor error cuadrático medio (ECM).
3. Crear la división
4. Repetir el proceso para los nodos allí creados

La función utilizada para la creación de los árboles de regresión es “*fitrtree*”, y se utiliza asignándole entre paréntesis un vector de descriptores, seguido de una coma y la variable de salida. Esto se le asigna a una variable donde quedará guardado el árbol que luego podrá ser utilizado con el comando “*predict*” para estimar el resultado probable de una nueva entrada. El árbol creado simboliza las bifurcaciones con triángulos y las hojas, o salidas, con puntos. Cada bifurcación del árbol creado tiene la información de desviación estándar, promedio y la cantidad de datos que entraron en esa categoría. El error cuadrático medio de las predicciones se puede obtener al usar el comando “*resubLoss*”. La raíz cuadrada de este resultado equivaldría al error aproximado de cualquiera de las predicciones.

En la Figura 8 se observa un pequeño ejemplo de árbol de decisión con el fin de hacer más claro el funcionamiento del método. Para elaborarlo se supuso un sistema para suplir una carga de 60 MW constantes durante un día con un generador

eólico de 40 MWp, un arreglo de celdas solares de 20 MWp y generadores Diesel. Para tal fin se construyó un pequeño set de datos con vectores de 24 posiciones, es decir un dato para cada hora de un día, incluyendo la velocidad del viento, la hora, la generación solar, la eólica, la Diesel y el costo del MWh.

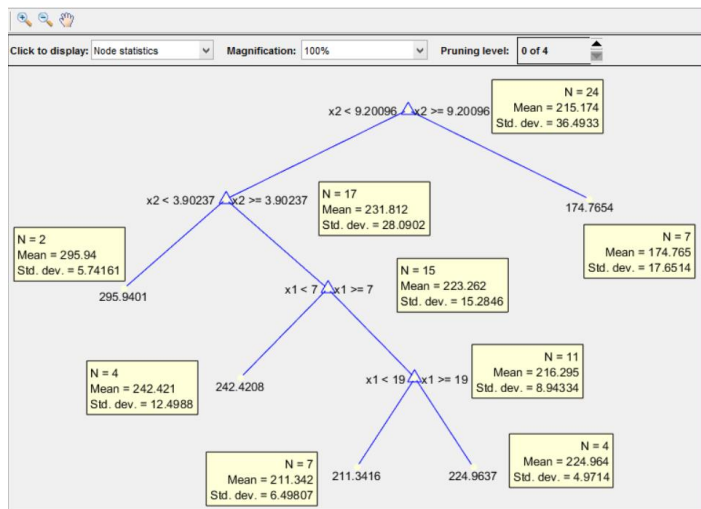


Figura 8. Características de un árbol de decisión

Este pequeño ejemplo presenta además, acompañando cada división, las estadísticas de los nodos de la siguiente manera: el

primero contiene 24 datos, cantidad representada con la letra N, con un promedio de costo de 215.174 (USD/MWh) y una desviación estándar entre estos de 36.49. El sistema hace entonces la primera evaluación, definiendo como más relevante el descriptor x_2 , el cual representa la velocidad del viento. Para aquellas entradas en que ésta es mayor a 9.2 m/s, es decir, en 7 oportunidades, se puede suponer entonces un costo de 174.65 USD/MWh, con una desviación estándar de 17.65. En el caso contrario, se procede a evaluar de nuevo la variable, con el fin de reducir dicha desviación y hacer una mejor predicción. Allí se obtiene entonces otra hoja o salida con 2 datos, los cuales representan los casos en que hay muy poca generación eólica, resultando en el costo más elevado del diagrama. Posteriormente, en la tercera y cuarta bifurcación, y debido a la alta desviación estándar de los datos, se hace necesario considerar la variable x_1 , es decir, la hora del día. En el caso del lado izquierdo, en que está muy temprano, la generación solar es nula, por lo cual se obtiene un alto costo. Debido a que el árbol no hace más de dos bifurcaciones a la vez se debe considerar de nuevo el valor del descriptor en la lado derecho, separando los datos que se ubican en la noche, es decir, pasadas las 7 pm y los que se encuentran de día para, de nuevo, hacer dos predicciones, siendo más costosa aquella en que no habrá sol para generar.

4.3. Simulación y limitaciones

Para las simulaciones se empleará la red IEEE 14 barras con una serie de modificaciones, puesto que se asumieron en total 5

generadores remplazando 3 compensadores sincrónicos cuyo objetivo original era regular el voltaje de la red o mejorar el factor de potencia, entregando o absorbiendo potencia reactiva cuando fuera necesario. Dicha red se observa en la Figura 9.

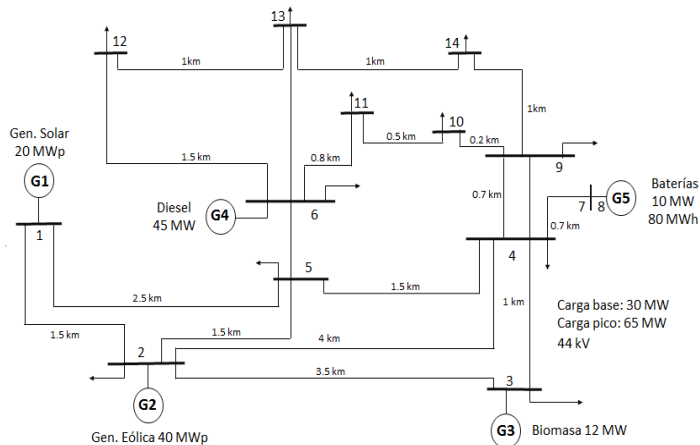


Figura 9. Red Benchmark IEEE 14 barras modificada (Mena Kodsí & Cañizares, 2003)

Se utilizó una red ficticia IEEE 14 barras modificada ubicada en Fort Bliss, Texas debido a la disponibilidad de datos y la existencia de un proyecto, aunque de menores dimensiones, en ese lugar. La red se plantea, debido a que el flujo de potencia es

considerable, a 44 kV (voltaje común para la distribución en sectores industriales en Colombia). Las distancias se eligen de manera arbitraria considerando que, en una base militar las dimensiones deben ser del orden de una pista de aterrizaje, es decir aproximadamente 5.5 km. Se despreciaron las pérdidas en las líneas, debido a que se considera que, en la micro red, la generación está ubicada a escasa distancia del usuario final y las conexiones son muy confiables pues hay una vigilancia y mantenimiento permanente, ya que el operador tiene la posibilidad de estar en contacto con todos los elementos del sistema por su cercanía. Sin embargo, se incluyó para el caso de la generación eólica y la solar una restricción para la potencia que podían transportar las líneas basándose en la hipotética salida de alguna o varias de ellas de servicio, según una probabilidad arbitraria. Esto con el fin de probar la capacidad del algoritmo de tener en cuenta esta clase de restricciones, razón por la cual no se extendió a los demás sistemas. Se asumió la siguiente distribución de los generadores: G1 corresponde a generación solar fotovoltaica, G2 aerogeneradores, G3 generación a partir de la biomasa, G4, por su ubicación central que le da más confiabilidad, las plantas Diesel y G5 las baterías. Se asume además que la conexión a la red se hace en la barra 13. La restricción de mínima velocidad del viento para el funcionamiento de los aerogeneradores si fue considerada, igualmente no existe generación fotovoltaica antes de las 7 am ni después de las 6 pm pues la irradiancia del sol se hace 0. La fórmula para calcular esta clase de generación incluye todos los parámetros previamente discutidos en su modelamiento. No se incluye tampoco la

restricción de mínimo técnico para las plantas diesel, esto se debe a que, en caso de que una de las plantas no alcance dicho valor, se puede proceder a sobrecargar las demás hasta un máximo del 110% de su capacidad nominal. Se asumió una carga base de 30MW y una pico de 65 MW. Para suplir esta demanda se cuenta con una capacidad instalada de 20 MWp PV, 40MWp de eólica, 12MW de biomasa, 45 MW de diesel y bancos de baterías con potencia nominal de 10 MW y una carga máxima de 80 MWh. Para obtener el costo de la generación se utilizaron precios constantes del MWh según las funciones de costo previamente expuestas. En el caso del diesel, cuyo precio no se asumió constante, se eligió utilizar 35 generadores de 1.275 MW. Siempre se procura despachar la menor cantidad posible de generadores, esto quiere decir que se busca un número tal que funcionen a su potencia nominal con precio constante y se utiliza la función de costo para la planta que se encargará de compensar el resto de la energía necesaria.

Para entrenar el árbol se creó un *Learning Set* o LS que contenía datos de días, horas, velocidad del viento, irradiancia solar, temperatura ambiente, carga de las baterías al momento del despacho, las limitaciones de las líneas para la generación eólica y PV y demanda esperada. En total se pueden construir conjuntos de $365 \cdot n$ datos, equivalente a un dato diario por n años, o n datos diarios por un solo año. Es decir que existen n conjuntos que contienen el día 1, n con el día 2, etc. Las horas en cambio se generaron de manera aleatoria y se usaron también para modificar otras variables como la temperatura ambiente e irradiancia solar.

Estos dos parámetros se ven a su vez afectados por el día del año, al igual que la velocidad del viento, altamente dependiente del mes en que se realiza el despacho. Para el ejercicio se consideró un precio constante del diesel de 4 dólares por galón, pero se generó un vector con dicho precio que puede ser cambiado de acuerdo a una distribución por probabilidad, datos históricos o simplemente asignarle otra constante. La generación por biomasa se asumió bastante constante debido a la alta disponibilidad de residuos en el lugar, debido precisamente a su calidad de guarnición militar. Aun así se dejó una pequeña incertidumbre de 2 MW. En cuanto a la lógica de funcionamiento se creó una variable vertimiento que guarda la diferencia entre la carga y la generación renovable del momento y con ella se determina si es o no una buena opción aprovechar esta energía “sobrante” para cargar las baterías. En caso de decidir no hacerlo, esta potencia se vende a un precio previamente definido como constante. Se incorporó además la posibilidad de definir un precio límite del MWh, el cual de no ser superado, permite utilizar 4 generadores diesel para cargar las baterías de manera que se hagan disponibles para el futuro. La cantidad de generadores utilizados para tal fin, y dicho precio límite se pueden modificar manualmente.

El costo total se calculó multiplicando el costo de cada MWh por su respectivo costo constante o, en el caso del diesel, por la cantidad de generadores a potencia nominal y la función de costo para el sobrante. En algunos momentos, principalmente en aquellos donde hay mucha disponibilidad de sol y viento, el costo total de operar el sistema así como el del MWh caen

drásticamente, debido a la venta del vertimiento, mientras en invierno cuando la carga aumenta significativamente y disminuye la disponibilidad de sol, el diesel incrementa el costo total del sistema dramáticamente.

El algoritmo ha sido dividido en dos partes para hacer más fácil su utilización. En la primera, llamada “Fort_Bliss_final” se crean los datos para entrenar el algoritmo. La segunda, llamada “Predictor” permite construir el árbol y además hacer las predicciones basándose en datos ingresados manualmente por el usuario. Esto se hizo para permitir que, una vez creados los datos (que serán diferentes cada vez) se puedan hacer múltiples ensayos para verificar cómo afectan las predicciones los parámetros elegidos. De otro modo, las comparaciones no serían adecuadas pues se usarían datos, y por lo tanto árboles, bastante diferentes. Para hacer una predicción sobre el costo del MWh en un momento dado se debe ingresar la carga de la batería para el momento del despacho, el día del año, la hora, la irradiancia, la temperatura ambiente, un valor de coeficiente para limitar las líneas que llegan a los generadores eólico y PV, la demanda esperada y la velocidad del viento probable. El archivo arroja en pantalla este dato, incluyendo los parámetros que se le entregaron y el error aproximado. Además se grafica el árbol de decisión construido por el algoritmo.

La limitación a la capacidad de las dos líneas que conectan las celdas solares se hizo de la siguiente manera: usando un factor aleatorio, se le da 5% de probabilidad a que ambas líneas estén fuera de servicio, por lo que la generación solar se multiplica por

0, haciéndola totalmente indisponible. Se supuso además que una sola de las líneas puede transportar hasta el 70% de la potencia máxima. En ese caso se multiplica la generación eólica por 0.7 y esa es la potencia que se puede despachar. Hay un 25% de probabilidad de que esto suceda. Para la generación eólica en cambio, se asumió un 3% de probabilidad de que se presente el caso en el cual no sea posible despachar potencia de dicha generación, un 12% en el cual se puede despachar únicamente el 60% y un 15% donde se despacha el 70%.

Una de las principales limitaciones de este ejemplo se presenta para la generación solar fotovoltaica, ya que se usaron datos de distribución horaria y magnitud de la irradiancia según un estudio de la Universidad Politécnica de Cataluña (Guasch Murillo, 2003), sin tener en cuenta factores como las precipitaciones, la nubosidad, el mantenimiento, la disponibilidad de horas de sol según la temporada y otros factores externos que perturbarían la salida. Esto se debe también a la carencia de datos reales o suficientemente detallados pertenecientes a la misma localización, por lo que en algunos casos fue necesario utilizar lugares cercanos. El viento por otro lado se aproxima más a la realidad debido a la disponibilidad de datos promedio, máximos y mínimos de su velocidad durante las distintas temporadas del año, aun así se hicieron algunas simplificaciones como la linealización de la curva de generación vs. Potencia entregada y no se tuvieron en cuenta la altura del lugar, rugosidad del terreno u otros aspectos que podrían afectar los patrones de viento. La biomasa se

asumió funcionando todo el año de manera casi constante suponiendo la disponibilidad de residuos necesarios para tal fin.

Para el caso del diesel se usaron 35 generadores como los modelados en este trabajo por motivos de simplificación, aun así podría ser más eficiente utilizar menos generadores de mayor capacidad para mejorar la relación entre costo y potencia instalada. Además se asumió un precio del galón constante de manera bastante pesimista, lo que causa que esta clase de generación exceda en costo a todas las demás por una gran ventaja. Un modelo más acertado podría tener en cuenta las fluctuaciones del diesel esperadas o por modelos históricos, o como una constante más pequeña.

En el caso de todas las generaciones renovables y las baterías, la división del costo se hizo basándose en el uso esperado al año. En una aplicación real su factor de capacidad podría diferir en gran medida, aumentando o disminuyendo costos según los MWh generados anualmente, cambiando el precio de cada unidad entregada a la red.

La forma de utilizar las baterías y la decisión de comprar o no energía de la red se hace de una manera muy arbitraria. Esto podría incluir memoria o mejores estrategias de control. Aunque se asumieron promedios donde comprar es más caro por MWh que generar, debido a los costos de los servicios de transmisión, distribución, etc. El precio de compra y venta de energía también podría hacerse variable. Ambas secciones del código se incluyen en el Anexo F.

Se plantea además otro ejemplo de manera que se incluya la cogeneración. Para esto se utilizó de igual manera la red de la Figura 8 y se basó en la micro red de la isla de Bornholm, Dinamarca, pero con ciertas variaciones. Dicha isla tiene una carga pico de 63 MW, con una base cercana a los 27 MW. Para modelarla se utilizaron, por su disponibilidad, los datos de la vecina isla de Christiansø, además se hicieron algunas simplificaciones. Una turbina de biogás se supuso de Diesel, al igual que un generador que utilizaba una mezcla de hidrocarburos y residuos de madera se trató como un generador de biomasa. Se asumió también una turbina de gas de 25 MW como un sistema de cogeneración igual al modelado en el trabajo y se dispuso del calor generado. En total se cuentan con 29 MW_p de generación eólica, 36 MW de Diesel, divididos en 2 arreglos de 18 MW cada uno, 37 MW de biomasa y 25 MW de cogeneración para un total de 5 plantas de generación. En el sitio no existen las condiciones para la generación solar y no se cuenta con baterías. Es interesante también anotar que las velocidades del viento en este lugar no suelen superar los 7m/s en promedio por lo que no se usa la capacidad eólica instalada en su totalidad. El principio de la utilización tanto para el viento como para la biomasa es el mismo que se describió anteriormente. Para la cogeneración en cambio se utiliza un costo que incluye el calor de salida del generador, el mantenimiento, la inversión inicial y el costo de la energía eléctrica generada. Luego, y basándose en una eficiencia del 90%, se utiliza el calor de salida para reducir la carga total del sistema hasta la mitad debido a que la gran mayoría de la demanda energética de la isla es por calefacción. Para que esto tuviera

mayor sentido se limitó la cogeneración durante los días más calientes del año y se utilizó toda su potencia durante el invierno. Para este ejemplo el costo se realizó de manera análoga al caso de Fort Bliss y ahora el árbol depende únicamente de la hora, el día y la velocidad del viento.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los detalles y pormenores de las simulaciones efectuadas mediante el software de simulación MATLAB. Se muestran además casos específicos, analizando sus resultados y discutiendo la viabilidad del método para el despacho. En segundo lugar, se realiza un pequeño análisis económico explicando si los precios son competitivos con la situación real de Estados Unidos, país donde se planteó la micro red hipotética. Se habla además de las limitaciones y casos especiales que implicaron la inclusión de nuevas consideraciones y se plantean trabajos futuros para cubrirlas.

5.1. Evaluación de desempeño del método

El método de árboles de decisión resulta ser una herramienta eficiente de predicción del costo de cada MWh generado para suplir la demanda energética en una micro red de un periodo dado. Durante la investigación propia de este trabajo, se pudo comprobar que existía un procedimiento para hacer una optimización propiamente dicha del despacho económico según (Roa-Sepúlveda, Herrera, Pavez-Lazo, Knight, & Coonick, 2003), sin embargo, llevar a cabo el cómputo del algoritmo propuesto por ellos, resulta ser bastante tedioso, complejo y no es posible escalarlo, principalmente porque la superficie de datos generados se vuelve imposible de representar cuando la cantidad de generadores es mayor a tres. Esto no sería eficiente para una micro red por dos motivos. Primero, normalmente se cuenta con más de tres tipos de generación y segundo, los generadores

renovables no son despachables, sino que dependen de variables externas. De allí que se decidiera aprovechar la herramienta que proporciona MATLAB de *Machine Learning* utilizando árboles de regresión, pues ésta permite predecir el costo de operación de la red basándose precisamente en dichas variables.

El método es de gran utilidad por su adaptabilidad a los cambios que pueda hacerle el usuario. El código fue construido de manera que se puedan modificar ciertas variables que intervienen al momento del despacho. Sin embargo, aumentar la cantidad de variables de las que dependen las salidas aumenta a su vez en gran medida su incertidumbre, haciendo necesario crear un mayor número de datos del *Learning Set*, de manera que se mejore la representación de todas las posibles combinaciones de las variables.

Para verificar la precisión de los resultados obtenidos se realizaron una serie de pruebas, simulando diferentes escenarios al momento del despacho para analizar cómo cada una de las variables afectaba el costo final. En un principio se comenzó a trabajar con un árbol creado a partir de 1095 datos, es decir 3 datos por cada día. Dicho árbol tuvo un desempeño bastante precario, así el error esperado fuera cercano a 6 USD/MWh, se encontraron muchos casos para los cuales el error porcentual se acercaba al 20%. Por lo tanto se optó por aumentar el número de datos a 3650, es decir 10 por cada día. Uno de los árboles obtenidos para tal número de datos (debido a que la base de datos incluye variables aleatorias, cada nueva compilación de ésta generará un árbol diferente), se muestra en el Anexo G. En la

Tabla 4 se presenta una tabla que recopila algunas de las simulaciones realizadas mostrando los valores de los descriptores, el resultado calculado mediante las ecuaciones utilizadas para la base de datos, la predicción ejecutada por el árbol y su respectivo error.

En el Anexo I se incluyen los *Learning Set* para los árboles utilizados. Es interesante observar como la generación PV nunca tomó su valor pico, probablemente debido al aumento de la temperatura en la celda puesto que incrementos en la temperatura ambiente coinciden con los de la irradiancia, haciendo que, en los momentos con mayor disponibilidad de potencia entregada por el sol para la generación, disminuye la eficiencia. Esto debido a la forma en que los factores se relacionan en las ecuaciones (20) y (21).

En la prueba #2 de la Tabla 4 se presentó un error demasiado alto. Un recorrido a través del árbol para detectar la hoja que entregó el resultado en cuestión determinó que, la característica que se consideraba más importante en este caso, es decir la indisponibilidad de las líneas para despachar la potencia de las celdas PV, no fue tenida en cuenta para llegar a tal hoja. Esto demuestra una característica importante del método empleado. Cuando se usa una base de datos, se debe procurar cubrir todas las posibles salidas de cada parámetro y asegurar que a cada uno de los valores de estos le correspondan la mayor cantidad posible de los valores de los demás, haciendo relaciones más fuertes que eviten esta clase de salidas o predicciones extrañas. En el caso de

la creación de la base de datos como se hizo para esta investigación, asegurar lo anterior sería un trabajo de cómputo muy tedioso y podría resultar erróneo, debido a la cantidad de variables aleatorias que están involucradas en el proceso. En una aplicación real, en una microred instalada, lo mejor sería utilizar técnicas de *Data Mining* para identificar los datos importantes, que permitan crear un árbol más robusto. Sin embargo se optó por realizar una prueba con una base de datos de mayor tamaño, con el objetivo de comprobar si era posible relacionar la variable x_8 (limitación para la transmisión de la energía proveniente de la generación PV). Esto se hizo asignándole a la variable n un valor de 50, es decir se contaba con 50 datos para cada día, creando un total de 18250 entradas. El árbol resultante posee 2913 bifurcaciones y se puede observar en el Anexo H. En la Figura 10 se muestra que se cumplió el objetivo de relacionar la variable x_8 y se disminuyó el error, como consta en la Tabla 4, de más del 44% a menos del 4%. El costo del MWh según la predicción pasó de 156.25 USD a 111.828 USD.

Tabla 4. 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.

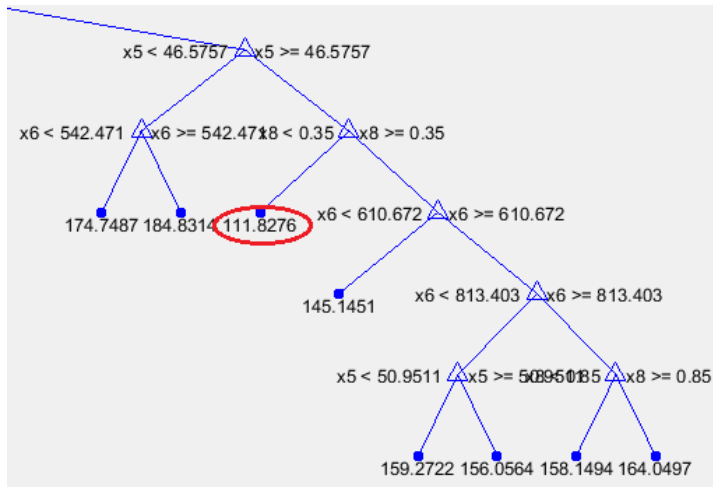


Figura 10. Mejoramiento del error para el caso 2

Es importante anotar que no tienen sentido práctico las divisiones que MATLAB hace de las limitaciones de las líneas y que los valores asignados a los descriptores dependen en gran medida del funcionamiento interno de la herramienta para la creación del árbol. En la Figura 11 por ejemplo, se observa como la división de la variable x_9 (limitación para las líneas relacionadas con la generación eólica) se hace en 0.3, cuando la realidad es que sus valores en la base de datos solo pueden ser 0, 0.7 o 1. Esto quiere decir que predicciones en ciertos rangos tomarán valores iguales. Es decir, en el caso de ingresar, por ejemplo, $x_9=2$ y debido a que

este valor no existe en ninguno de los datos iniciales, se le asociaría directamente con los casos en que éste fue 0.

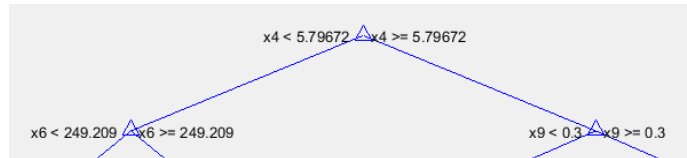


Figura 11. Relevancia de la capacidad de las líneas conectadas a la generación eólica

En la Figura 12 se observa cómo el algoritmo le otorga mayor importancia a la generación eólica al momento de determinar el costo de la operación del sistema. El factor x_4 , referente a la velocidad del viento, y x_9 , relacionado con la restricción de sus líneas, dividen el árbol en grandes sectores. Es decir, se puede ver como las hojas ubicadas hacia el lado derecho presentan los resultados más económicos, rondando entre los 100 y 150 USD/MWh, debido a la gran disponibilidad de la generación con menor costo (la eólica) y la posibilidad de transportar el total de su potencia. De manera similar, los costos en el sector donde la variable x_9 se ubica entre los valores de 0.3 y 0.85 incrementan sin hacerse demasiado grandes, pues se limita la entrega de la energía eólica pero sin eliminarla. Otro es el caso para cuando no es posible despachar potencia proveniente del viento, o su velocidad no es suficiente para suplir una buena porción de la

demanda. Algunos de los valores más críticos ubicados en dichos sectores alcanzan los 267 USD/MWh.

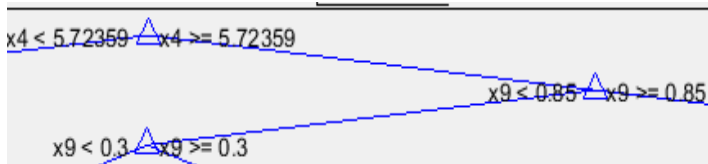


Figura 12. Relevancia de las variables relacionadas con la generación eólica en el costo

En la Figura 13 se observa como las restricciones a la capacidad de las líneas que conectan la generación PV, (representadas con x_8 en el árbol), causan una división que afecta en gran medida el precio. Se muestra además cómo hacia el lado izquierdo, donde las líneas solo se pueden usar hasta, según el programa, un 35% el costo aumenta. Mientras que hacia el lado derecho donde la restricción no es tan fuerte, éste se reduce. Además el árbol procede a considerar la temperatura ambiente (x_7) y la irradiancia solar (x_6), pudiéndose observar que a una temperatura cercana a los 25°C al igual que una mayor irradiancia, reducen el precio total por contribuir a la generación PV.

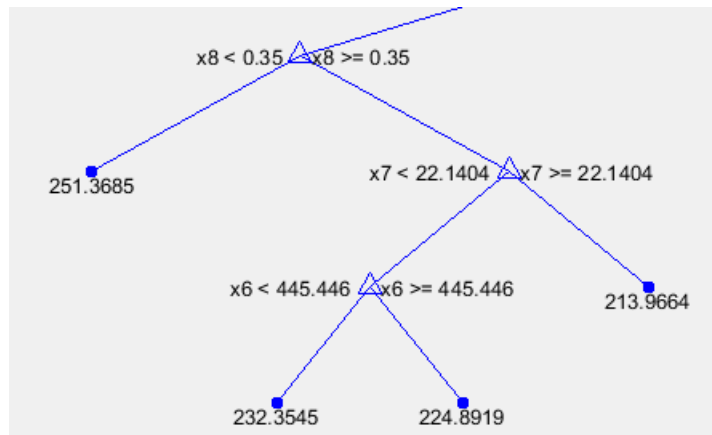


Figura 13. Relevancia de parámetros relacionados con la generación solar en el costo de la energía

En la Figura 14 observamos una división ocasionado por la hora del día (x_3) y la demanda (x_5). Es posible asumir que, como después de las 9 pm (21.00) la carga suele disminuir, haciendo posible suplirla sin necesidad del diesel o las baterías. Del mismo modo, para casos más temprano, el precio dependerá de una evaluación de la demanda. Como es de esperarse, a menor demanda, más económico el MWh. Es importante anotar que esta división es antecedida por otras que denotan que los datos pertenecientes a estas hojas corresponden a un día de invierno,

con velocidades del viento menores a 5.5 m/s, irradiancia menor a 101 W/m² (lo que significaría que sucede en horas sin sol) y una demanda mayor a 52 MW (muy alta), lo que explica el alto costo de la energía.

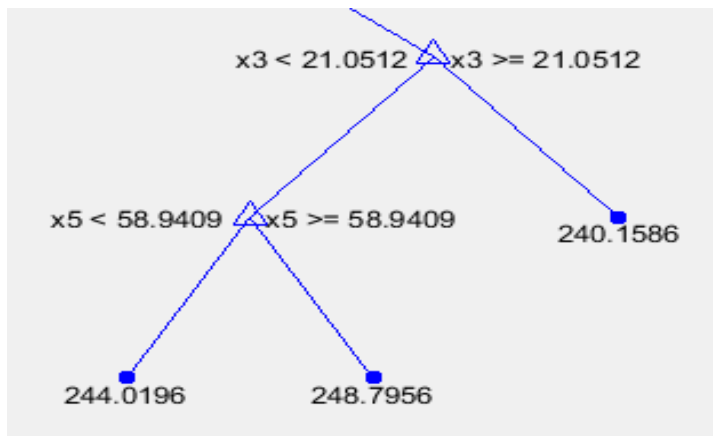


Figura 14. Relevancia de la hora del día y la carga en el costo final

La creación de la base de datos con 3650 datos tarda 0.217 segundos. Por otro lado compilar el predictor toma en total 3.87 segundos, de los cuales 2.153 corresponden a dibujar el árbol.

Cabe anotar que, para la creación de la base de datos con 18250 entradas, su tiempo de creación no aumentó de manera

significativa, pues solo tomó 0.393 segundos. Sin embargo, crear y dibujar en pantalla el árbol requirió poco más de 20. En general no se puede decir que el tiempo de cómputo sea alto, por lo que valdría la pena mejorar así el *Learning Set* y con ello volver más robusto el árbol. A pesar de ello, su gran tamaño vuelve muy complicado no solo intentar recorrer las ramas e identificar resultados a simple vista, sino también el procesamiento para hacer zoom y moverse sobre el árbol, o remover divisiones para despejar un poco la pantalla.

El código implementado para simular una micro red en Dinamarca se realizó únicamente como una prueba para incluir la cogeneración dentro del despacho y posee ciertas limitaciones como son la dificultad para aumentar el número de datos del *Learning Set* y la consideración de tan solo 3 descriptores, el día, la hora y la velocidad del viento. Además se asume un intercambio de potencia uninodal, sin ningún tipo de restricciones o pérdidas. Cabe también anotar que los precios resultantes de esta simulación no son cercanos a la realidad, pues se tomaron como base costos de instalación en Estados Unidos, país donde a 2008 la energía para los hogares valía cerca de una cuarta parte de lo que costaba en Dinamarca. (U.S. Energy Information Administration, 2010) Otro de los factores que aumenta la incertidumbre en los resultados obtenidos fue la asunción del precio del Diesel a 4 USD/gl de igual manera que se realizó para Fort Bliss.

Al analizar el comportamiento de los costos para un día completo se visualiza claramente el efecto de los distintos factores

considerados en la simulación. En la Figura 15 se observa dicho comportamiento para el día 230 del año, es decir el 18 de agosto (en años no bisiestos). En él, se debe tener en cuenta que la carga no es muy alta pues se encuentra comenzando el otoño, por lo cual no se deben alimentar aires acondicionados ni radiadores, pero la velocidad del viento para todo ese mes es particularmente baja lo cual, debido a que la generación eólica es la menos costosa y, normalmente, la más abundante, incrementa mucho los precios. Sin embargo se observa una disminución importante de los costos al aumentar la irradiancia y un aumento en las horas pico, lo que permite suponer un buen funcionamiento del método.

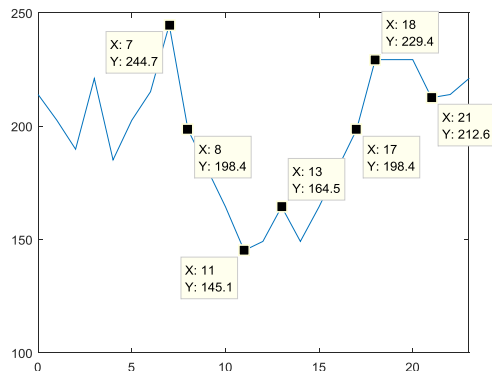


Figura 15. Costo del MWh durante el día 230

En la Figura 16 en cambio se observa una curva que, a pesar de tener variaciones importantes, eso más plana que la anterior. En este caso, se grafica el día número 40 del año, es decir, el 9 de febrero. Para este momento la velocidad del viento es considerablemente buena para generar pero la demanda se mantiene muy grande debido a la temporada invernal, lo que mantiene unos altos precios. Sin embargo la generación solar amortigua un poco los costos durante las horas con radiación. Se puede decir que el resultado observado es el esperado.

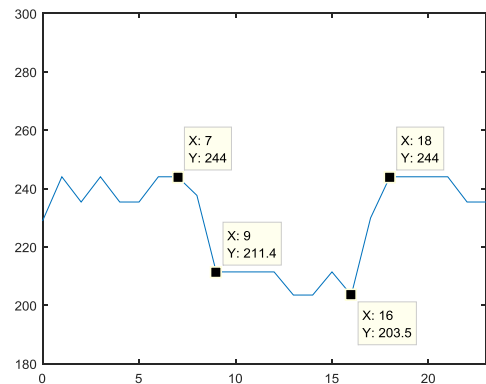


Figura 16. Costo del MWh durante el día 40

En sí, el árbol resultante para Dinamarca es mucho más pequeño, pues normalmente sus divisiones son alrededor de 180 tomando

1095 datos. El diagrama considera la velocidad del viento como lo más relevante, teniendo su velocidad una relación inversa con el costo de generación. La hora es el segundo factor a considerar asumiendo que antes de las 5 am y después de las 9 pm se reduce la carga de manera significativa. En promedio los costos giran alrededor de los 110 USD/MWh, variando desde los 80 USD/MWh hasta los 150 USD/MWh, sin embargo debido a las limitaciones de las que se ha hablado, este dato no es muy confiable. Se puede considerar exitosa la implementación de la cogeneración pues se hace evidente la disminución en la demanda de energía eléctrica y con ello los precios. A pesar de ello, no es posible asegurar si estos resultados se atienen completamente a la realidad, pues se desconoce la eficiencia y funcionamiento real de los sistemas usados para la calefacción en la isla.

5.2. Análisis económico del planteamiento

A enero de 2015, el costo promedio de la energía por KWh en Estados Unidos fue de 101.9 USD, variando desde 66.2 USD para la industria, hasta 121 USD para el uso residencial. (U.S. Energy Information Administration, 2015) Teniendo en cuenta que para la simulación se asume un costo de diesel bastante alto pues la intención era la de demostrar que la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles son hace poco confiables para estas aplicaciones. En las simulaciones se estimó el precio del diesel en 4 USD/gl, mientras que al 30 de enero de 2015 en la costa estadounidense del golfo de México el precio de dicho combustible estaba en 1.628 USD/gl. A este dato se le sumaría el

costo de transporte y de otros intermediarios. Los cuales no serían muy altos para el caso de una micro red en Texas por su cercanía a este lugar. Además se podría mejorar la eficiencia de combustible de este sistema si se considerara un generador más grande en lugar de múltiples unidades pequeñas. (U.S. Energy Information Administration, 2015)

En los reportes del Consejo Mundial de la Energía y LAZARD, se excluyen los beneficios y subsidios otorgados por los gobiernos para fomentar la inclusión de las energías renovables en su parque de generación, lo que provoca que los costos aquí estimados no entren a competir en igualdad de condiciones con las fuentes de generación convencionales previamente instaladas.

Teniendo en cuenta las limitaciones previamente expuestas, se puede considerar que las predicciones aquí realizadas se atienen a la realidad puesto que el cambio de estos parámetros acercaría aun más los resultados. En general la gran mayoría de resultados se ubica por debajo de 150 USD/MWh, lo que hace viable económicamente la micro red. Nuevos ensayos realizados con el mismo algoritmo y reduciendo el precio del diesel a 2 USD/gl, muestran una disminución notoria de los costos de generación, aproximadamente del 30%, haciéndose más cercano al valor real de la generación.

Para la micro red hipotética los costos del MWh dependen de la repartición de los gastos de O&M e inversión inicial sobre el factor de capacidad esperado. En la operación real de la red, la

utilización de los sistemas podría ser muy distinta a este dato, de manera que cambiaría el precio de cada MWh generado.

5.3. Propuestas para trabajos futuros

Para trabajos futuros sería de gran utilidad consultar con distribuidores y contratistas locales los precios de compra e instalación de las tecnologías aquí descritas en Colombia, de manera que el trabajo pueda ser relacionado con el proyecto de Micro Red Inteligente UPB.

En nuevos trabajos se deben tener en cuenta otros parámetros para el modelo de la red como las impedancias de las líneas, de los generados, pérdidas, mínimos técnicos, curvas de eficiencia y tiempos de mantenimiento.

Debido al alto grado de incertidumbre de las energías renovables, es necesario considerar nuevas variables externas que pueden afectar la generación. Algunas de ellas son la nubosidad, las precipitaciones, disponibilidad de recursos de acuerdo a la estación del año en que se vaya a realizar el despacho y la rugosidad del terreno. Respecto a la parte técnica se pueden considerar paradas de los equipos por daños, restricción de la generación eólica por altos vientos, cambios en los precios de los combustibles, atentados, entre otras.

El código empleado en MATLAB puede ser optimizado de múltiples formas. Debido a las características propias del software se debería evitar el uso continuo de la función If y emplear técnicas de vectorización. Esto sería de gran utilidad para

aplicaciones de mayor complejidad. Además se puede desarrollar un código propio o utilizar otras herramientas de *Machine Learning* que provee Mathworks, para restringir o aumentar el número de evaluaciones necesarias para crear una hoja o, por otro lado, exigir un mínimo de casos necesarios para crear una hoja o una nueva ramificación, evitando así validar datos muy alejados de la media.

En el futuro se debe mejorar la lógica del sistema, principalmente en lo que se refiere al manejo de las baterías y disposición de la energía “sobrante”, incluyendo mejores criterios para tomar las decisiones. Sería de gran utilidad dotar al sistema de memoria, de manera que se corrija la distribución de los costos de mantenimiento e inversión inicial sobre la cantidad de MWh reales generados, pues se corre el riesgo de que estos difieran en gran medida del factor de capacidad tomados de los reportes.

El modelo utilizado para la generación diesel tiene una serie de simplificaciones basadas en datos de consumo tomados bajo ciertas condiciones por el fabricante. En realidad, la función empleada no se adapta completamente a dichos datos. Además ciertos factores externos, como la humedad y temperatura ambiente del lugar de la instalación, podrían afectar los datos de consumo. Igualmente para el caso de las baterías, estos y otros factores podrían tener un efecto en su durabilidad y eficiencia, tanto en el corto como el largo plazo. Un modelo mejorado debería tener en cuenta múltiples ecuaciones y parámetros relativos a éstas como el SOC, ciclos de carga y descarga, corriente y tiempo de carga.

6. CONCLUSIONES

El método de árboles de decisión es una herramienta de gran utilidad tanto en el campo de la ingeniería eléctrica como en la toma de decisiones administrativas, siendo una alternativa eficaz para determinar la salida con mayores probabilidades de éxito de una situación que incluye a su vez decisiones e incertidumbre. Debido a la aplicación de criterios estadísticos que permiten determinar el error, así como el orden de las variables a evaluar y su factibilidad, es posible obtener resultados confiables y precisos. A lo largo de este informe investigativo se presenta una recopilación de la teoría básica, partiendo desde las generalidades de la optimización y el *Machine Learning*, hasta llegar a lo más específico del funcionamiento del método. Se incluyen además ejemplos ilustrativos y se hace referencia a múltiples trabajos realizados, aplicando distintas variantes del método, como árboles de regresión o clasificación, tanto dentro del campo de la ingeniería eléctrica como de la informática.

El software de simulación MATLAB, mediante su herramienta de *Regression Trees*, permite predecir resultados según una base de datos creada con distintos parámetros y escenarios, en este caso del despacho económico, permitiendo analizar su efecto sobre éste. Se presenta un algoritmo realizado en dicho programa que le hace posible al usuario ingresar ciertas variables importantes al momento de realizar el despacho, con el fin de predecir el costo por MWh de la generación de una micro red ficticia con una configuración tipo *Benchmark*, incluyendo diferentes fuentes de generación renovable. De igual manera, se adicionan generadores

diesel y bancos de batería, utilizados como respaldo, para garantizar la atención de la demanda al momento del despacho.

Debido a la alta incertidumbre que posee la generación renovable, no es viable optimizar el despacho económico determinando cuanta potencia será entregada por cada unidad generadora. Por el contrario, resulta más eficiente determinar el gasto que dicha generación representará basándose en las variables externas que la afectan. El método empleado permite estudiar cómo dichas variables influyen en los costos de operación de la micro red, por lo que su aplicación puede ser considerada exitosa para el estudio del despacho económico.

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. Éstas y otras posibles mejoras son expuestas previamente, de manera que se sientan las bases para la realización de trabajos futuros en los campos aquí tratados.

Los argumentos expuestos permiten determinar la complejidad al momento de realizar la optimización del despacho económico en su totalidad mediante el método de árboles de decisión. No obstante, las características utilizadas para las fuentes de generación en la micro red hacen de gran utilidad dicho método para el estudio del despacho y los efectos de las variables externas en los costos de la generación, facilitando su posterior predicción.

REFERENCIAS

- Agencia de Noticias UN. (26 de Agosto de 2008). *En funcionamiento primera planta de energía por gasificación de madera en Colombia*. Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de Agencia de Noticias UN: http://historico.agenciadenoticias.unal.edu.co/articulos/ciencia_tecnologia/ciencia_tecnologia_20080826_ipse.html
- 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.
- Alameda County, CA. (2015). *First-of-its-kind Smart Grid at Santa Rita Jail*. Recuperado el 6 de Febrero de 2015, de Alameda County "The Bright side of the bay": <http://www.acgov.org/smartgrid.htm>
- Alemi, F. (29 de Septiembre de 2008). *Decision Trees*. Recuperado el 9 de Marzo de 2015, de George Mason University: <http://gunston.gmu.edu/healthscience/730/DecisionTrees.asp>
- Antonucci, P. L., & Antonucci, V. (2011). Electrochemical Energy Storage. En R. Carbone, *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids* (págs. 3-20). InTech.
- AP. (12 de Noviembre de 2009). *Brazil Blackout Sparks concerns about infrastructure*. Recuperado el 19 de Febrero de 2015, de Fox News: <http://www.foxnews.com/story/2009/11/12/brazil-blackout-sparks-concerns-about-infrastructure/>
- Arbeláez, M. A. (30 de Mayo de 2014). *La UPB se proyecta como una pequeña ciudad inteligente*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de El MUNDO: http://www.elmundo.com/portal/noticias/territorio/la_upb_se_proyecta_como_una_pequena_ciudad_inteligente.php#.VPYK3keG9qW
- Banco Mundial. (2014). *Datos-Indicadores*. Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de Banco Mundial: datos.bancomundial.org/indicador
- Behrentz, E., Cadena, Á., Mutis, H., Pérez, J., & Rosales, R. (2012). *Estrategia colombiana de desarrollo bajo en carbono*. Bogotá: Universidad de los Andes.
- Berkeley Lab and Department of Energy of the U.S. (s.f.). *Current project: Santa Rita Jail*. Recuperado el 6 de Febrero de 2015, de Microgrids at Berkeley Lab: <https://der.lbl.gov/microgrids-lbnl/santa-rita-jail>
- Berkeley Lab. (2015). *Microgrids at Berkeley Lab*. Recuperado el 6 de Febrero de 2015, de Berkeley Lab- U.S. Department of Energy: <https://building-microgrid.lbl.gov/fort-collins>
- Berkeley Lab. (s.f.). *Bornholm Island*. Recuperado el 26 de Febrero de 2015, de Microgrids at Berkeley Lab: <https://building-microgrid.lbl.gov/bornholm-island>
- Berkeley Lab. (s.f.). *Hangzhou Dianzi University*. Recuperado el 26 de Febrero de 2015, de Microgrids at Berkeley Lab: <https://building-microgrid.lbl.gov/hangzhou-dianzi-university>
- Berkeley Lab. (s.f.). *Huatacondo*. Recuperado el 26 de Febrero de 2015, de Microgrids at Berkeley Lab: <https://building-microgrid.lbl.gov/huatacondo>
- Berkeley Lab. (s.f.). *Mesa del Sol*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Microgrids at Berkeley Lab: <https://building-microgrid.lbl.gov/ mesa-del-sol>
- Berkeley Lab. (s.f.). *The Sendai Microgrid*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Microgrids at Berkeley Lab: <https://building-microgrid.lbl.gov/sendai-microgrid>
- Berkeley Lab. (s.f.). *UCSD*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Berkeley Lab: <https://building-microgrid.lbl.gov/ucsd>
- Bernstein, L. (5 de Diciembre de 2013). *Obama doubles the goal for Renewable Energy Usage by Federal Agencies*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de The Washington Post: http://www.washingtonpost.com/national/health-science/obama-doubles-the-goal-for-renewable-energy-usage-by-federal-agencies/2013/12/05/e470388e-5dec-11e3-95c2-13623eb2b0e1_story.html
- Betancur, M. J. (2013). *UPB_autoArt_guía_Word*. Recuperado el 07 de agosto de 2013, de UPB_AutoArt_plantilla_Word: [http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)_UPB_AutoArt_96.2.zip](http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_UPB_AutoArt_96.2.zip)

- Betancur, M. J. (2013b). *Instructivo General UPB_autoArt*. Recuperado el 03 de marzo de 2013, de [http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/\(A\)_UPB_AutoArt_96.2.zip](http://kosmos.upb.edu.co/web/uploads/articulos/(A)_UPB_AutoArt_96.2.zip)
- 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/~trosing/lectures/cse291_microgrid.pdf
- Burns & McDonnell. (2012). SPIDERS: Developing a Smarter, More Sustainable Microgrid for Energy and National Security. *Benchmark - Controlling te Flow*(2), 18.
- C&D Dynasty. (2012). *Charging Valve Regulated Lead Acid Batteries*. Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de C&D Technologies Power Solutions: https://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_2128_0212.pdf
- C&D Dynasty. (2012). *Recharge Time Determination for VRLA Batteries*. Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de C&D Dynasty Power Solutions: https://www.cdtechno.com/pdf/ref/41_2130_0212.pdf
- Cadavid Mazo, E. (2008). *Seguimiento a las Restricciones del Mercado Eléctrico*. Medellín: EAFIT.
- Calle Atehortúa, D. (31 de Julio de 2013). *En la UPB nacerá una nueva ciudad inteligente*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de Diario ADN: <http://diarioadn.com/medell%C3%ADn/mi-ciudad/en-la-upb-nacer%C3%A1-una-nueva-ciudad-inteligente-1.70519>
- Calle Atehortúa, D. (30 de Mayo de 2014). *La UPB genera energía limpia para el campus Laureles*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de Diario ADN: <http://diarioadn.com/medell%C3%ADn/mi-ciudad/campus-inteligente-de-upb-con-ener%C3%ADa-limpia-1.110432>
- Captson. (2010). *CI1000 Megawatt Power Package High-pressure Natural Gas*. Recuperado el 26 de Marzo de 2015, de Captson Turbine: http://www.capstoneturbine.com/_docs/datasheets/CI1000%20HPNG_331044F_lowres.pdf
- Caterpillar. (2015). Recuperado el 21 de Marzo de 2015, de Caterpillar: https://www.google.com.co/url?sa=t&rc=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CBsQFjAA&url=https%3A%2F%2Femc.cat.com%2Fpubdirect.ashx%3Fmedia_string_id%3D3TSS-DM8187-01-GS-EPG-8720016.pdf&ei=H9UNVfDwEseXgwSgl4D4BQ&usq=AFQjCNGZpWXb4S-IC_LSky_mwljUZuRVWg&sig2=CKod
- Center for Climate and Energy Solutions. (s.f.). *Cogeneration/Combined Heat And Power (CHP)*. Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de Center for Climate and Energy Solutions: <http://www.c2es.org/technology/factsheet/CogenerationCHP>
- Citigroup. (s.f.). *Alta Wind Energy Center to be largest in US*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de Citigroup: http://www.citigroup.com/citi/citiforcities/energy_utilities/n_citi_and_google.htm
- Clarke Energy. (s.f.). *Cogeneration & CHP*. Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de Clarke Energy: <http://www.clarke-energy.com/chp-cogeneration/>
- CNN. (15 de Agosto de 2003). *Major Power outage hits New York and other large Cities*. Recuperado el 19 de Febrero de 2015, de CNN International: <http://edition.cnn.com/2003/US/08/14/power.outage/>
- Colprensa. (5 de Marzo de 2012). *A 20 años del apagón, Colombia se siente blindada en energía*. Recuperado el 16 de Febrero de 2015, de El País: <http://www.elpais.com.co/elpais/economia/noticias/20-anos-del-apagon-colombia-siente-blindada-en-energia>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (13 de Mayo de 2010). *Metodología para el cálculo del precio de reconciliación negativa*. Recuperado el 11 de Marzo de 2015, de Apolo - CREG: [http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c55f5dbdfc5c0c3fc0525785a007a72bc/\\$FILE/D-060-10%20RECONCILIACI%C3%93N%20NEGATIVA.pdf](http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/2b8fb06f012cc9c245256b7b00789b0c55f5dbdfc5c0c3fc0525785a007a72bc/$FILE/D-060-10%20RECONCILIACI%C3%93N%20NEGATIVA.pdf)
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (s.f.). *Estructura del sector*. Recuperado el 11 de Marzo de 2015, de Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG: <http://www.creg.gov.co/index.php/es/sectores/energia/estructura-energia>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (s.f.). *Nuestra Labor*. Recuperado el 11 de Marzo de 2015, de Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG: <http://www.creg.gov.co/index.php/es/creg/nuestra-labor>

- Comisión Nacional del Medio Ambiente. (s.f.). *Protocolo de Kyoto*. Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de Dirección de Vialidad- Ministerio de Obras públicas de Chile:
<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/medioambiente/Documents/Normativa/Tratados%20Internacionales/foarticle25995.pdf>
- Danish Energy Agency. (2013). *Danish Climate and Energy Policy*. Recuperado el 11 de Febrero de 2015, de Danish Energy Agency:
<http://www.ens.dk/en/policy/danish-climate-energy-policy>
- Deckmyn, C., Vandoorn, T. L., Moradzadeh, M., & Vandeveld, L. (2014). Multi-objective optimization for environomic scheduling in microgrids. *PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE* (págs. 1-5). National Harbor: IEEE.
- Dewadasa, M., Ghosh, A., & Ledwich, G. (s.f.). *CSIRO Intelligent Grid Research Cluster- Project 7 - Deliverable 5: Switching Control strategies for Distributed Generation*. CSIRO.
- Diesel Technology Forum. (s.f.). *Diesel At Work - Power Generation*. Recuperado el 16 de Marzo de 2015, de Diesel Technology Forum:
<http://www.dieselforum.org/diesel-at-work/power-generation>
- Doolittle, A. (s.f.). *Lecture 8 - Equations of State, Equilibrium and Einstein Relationships and Generation/Recombination*. Recuperado el 18 de Marzo de 2015, de Georgia Tech:
<http://users.ece.gatech.edu/~alan/ECE3080/Lectures/ECE3080-L-8-Equilibrium%20and%20Einstien%20Relationships%20-%20Recombination%20-%20Generation.pdf>
- Duprey, S. (2013). *Machine Learning with MATLAB*. Recuperado el 6 de Abril de 2015, de Mathworks:
<http://jp.mathworks.com/company/events/conferences/matlab-virtual-conference/2013/proceedings/machine-learning-with-matlab.pdf>
- 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
- Energy Transition. (marzo de 2013). *Principales Hallazgos*. Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de Energy transition The german Energiewende:
<http://energytransition.de/2013/03/es/>
- EPM. (s.f.). *Parque Eólico Jepirachi*. Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de EPM:
<http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/ParqueE%C3%B3lico.aspx>
- EPRI. (2001). *Investigation of the Technical and Economic Feasibility of Micro-Grid-Based Power Systems*. Palo Alto, CA: EPRI.
- Federal Energy Regulatory Commission - FERC. (13 de Noviembre de 2005). *Economic Dispatch: Concepts, Practices and Issues*. Recuperado el 10 de Marzo de 2015, de Federal Energy Regulatory Commission - FERC:
<http://www.ferc.gov/eventcalendar/Files/20051110172953-FERC%20Staff%20Presentation.pdf>
- Ferdinando, L. (17 de Mayo de 2013). *Fort Bliss unveils Army's first microgrid*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de United States Army:
http://www.army.mil/article/103577/Fort_Bliss_unveils_Army_s_first_microgrid/
- Fowler, M. (s.f.). *The Photoelectric Effect*. Recuperado el 12 de Marzo de 2015, de Modern Physics - Galileo - University of Virginia:
http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html
- García, H., Corredor, A., Calderón, L., & Gómez, M. (2013). *Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia*. Fedesarrollo.
- 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.
- Gipe, P. (17 de Mayo de 2013). *Breakdown: Penetration of Renewable Energy in Selected Markets*. Recuperado el 2 de Febrero de 2015, de Renewable Energy World:
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2013/05/penetration-of-renewable-energy-in-selected-markets?page=2>
- GO100% Renewable Energy. (2015). *Projects in Europe*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de GO100% Renewable Energy:
<http://www.go100percent.org/cms/index.php?id=19>
- González-Sánchez, J. W. (2014). Notas de clase - Análisis de Sistemas de Potencia II. Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.

- Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W., & Dunlop, E. D. (2014). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD). (s.f.). *Proyecto*. Recuperado el 27 de Febrero de 2015, de Micro Red Inteligente UPB: microred.upb.edu.co/index.php/proyecto.html
- GSMA. (2012). *South Korea: Jeju Island Smart Grid Test-Bed*. GSMA.
- Guasch Murillo, D. (2003). *Modelado y Análisis de Sistemas Fotovoltaicos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hofstrand, D. (s.f.). *Liquid Fuel Measurements and Conversions*. Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de Iowa State University - Extension and Outreach: <http://www.extension.iastate.edu/agdm/wholefarm/html/c6-87.html>
- HONDA. (2012). *Honda household cogeneration units enjoy international popularity and acclaim*. Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de HONDA: <http://world.honda.com/cogenerator/>
- Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. (Agosto de 2004). *Nuevas energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México*. Recuperado el 4 de Febrero de 2015, de Universidad Nacional Autónoma de México: http://xml.cie.unam.mx/xml/se/pe/NUEVAS_ENERG_RENOV.pdf
- International Energy Agency. (2014). *Key World Energy Statistics*. IEA.
- International Energy Agency. (2014). *Medium-Term Renewable Energy Market Report 2014*. París: International Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency. (2013). *Renewable Power Generation Costs in 2012: An Overview*. IRENA.
- IPSE. (15 de Febrero de 2011). *En Necoclí los Residuos de Madera se convierten en un importante Recurso Energético*. Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de IPSE: <http://www.ipse.gov.co/ipse/comunicaciones-ipse/noticias-ipse/359-en-necocli-los-residuos-de-madera-se-convierten-en-importante-recurso-energetico>
- ISAGEN. (18 de Septiembre de 2012). *Notas para la investigación y desarrollo de Proyectos Geotérmicos en Colombia*. Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de ISAGEN: https://www.isagen.com.co/comunicados/Libro_geotermia_sep18.pdf
- Ivanpah Solar. (2013). *What is Ivanpah?* Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de Ivanpah Solar Electric Generating System: <http://www.ivanpahsolar.com/about>
- Kantardzic, M. (2011). Decision Trees and Decision Rules. En M. Kantardzic, *Data Mining: Concepts, Models, Methods, and Algorithms, Second Edition* (págs. 139-164). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Khalip, A. (3 de Marzo de 2012). *Portugal prays for rain as drought adds to crisis*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de Reuters: <http://www.reuters.com/article/2012/03/03/us-portugal-drought-idUSTRE8220EV20120303>
- Knier, G. (2002). *How do Photovoltaics Work?* Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de NASA Science: <http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/>
- Korea Smart Grid Institute. (s.f.). *Jeju Smart Grid Test-bed*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Korea Smart Grid Institute: http://www.smartgrid.or.kr/Ebook/10POWER_IT_PROJECTS.PDF
- Lantero, A. (17 de Junio de 2014). *U.S Department of Energy-Energy.gov*. Recuperado el 6 de Febrero de 2015, de How microgrids work: <http://energy.gov/articles/how-microgrids-work>
- Lasseter, R., & Erickson, M. (2009). *Integration of Battery-Based Energy Storage Element in the CERTS Microgrid*. Madison: University of Wisconsin Madison.
- Lazard. (Septiembre de 2014). *Lazard'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>
- Leyva Carranza, J. d. (s.f.). *12.3 Factores de Pago Único*. Recuperado el 20 de Marzo de 2015, de Academia.edu: http://www.academia.edu/7448068/1_2.3_FACTORES_DE_PAGO_UNICO
- Loix, T. (Febrero de 2009). *The first micro grid in The Netherlands: Bronsbergen*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Leonardo Energy: <http://www.leonardo-energy.org/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2009/article2.pdf>

- Lovins, A. (15 de Noviembre de 2012). *How to End Blackouts Forever*. Recuperado el 27 de Febrero de 2015, de TIME: <http://ideas.time.com/2012/11/15/how-to-make-blackouts-history/>
- Mathworks. (2014). *Machine Learning with MATLAB*. Recuperado el 1 de Abril de 2015, de Mathworks: <http://www.mathworks.com/machine-learning/>
- McCalley, J. D. (2001). *The Power Flow Problem*. Ames: Iowa State University.
- Mejía Mazuera, J. (24 de Marzo de 1992). *Racionamientos: Elevadas Pérdidas*. Recuperado el 16 de Febrero de 2015, de El Tiempo: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento-2013/MAM-73867>
- Mena Kodsi, S. K., & Cañizares, C. A. (2003). *Modeling and Simulation of IEEE 14 Bus System with Facts Controllers*. Waterloo: University of Waterloo.
- Microsoft. (2014). *Microsoft Decision Trees Algorithm*. Recuperado el 10 de Marzo de 2015, de Microsoft Developer Network: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms175312.aspx>
- Min, J. K. (5 de Febrero de 2012). *Jeju, Test-Bed for the world's Smart Grid industry*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Jeju Weekly: <http://www.jejuweekly.com/news/articleView.html?idxno=1222>
- Ministerio de Minas y Energía. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. SIMEC.
- Ministerio de Minas y Energía. (2012). *Decreto 0381 del 16 de febrero de 2012*. Recuperado el 11 de Marzo de 2015, de Ministerio de Minas y Energía - República de Colombia: http://www.minminas.gov.co/minminas/index.jsp?cargaHome=3&id_categoria=43&id_subcategoria=260
- Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Energía Eléctrica*. En M. d. Energía, *Memorias al Congreso de la República 2012-2013* (págs. 114-160). Bogotá.
- Mírez Tarrillo, J. (2012). *Sistemas de Almacenamiento de Energía. XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente* (págs. 1-9). Puno: APES.
- 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.
- Morris, C. (8 de Noviembre de 2013). *Denmark surpasses 100 percent wind power*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de Energy Transition- The German Energiewende: <http://energytransition.de/2013/11/denmark-surpasses-100-percent-wind-power/>
- Noel, A., Suresh, S., Moghe, P., & Sheikh, K. (2011). *Economic dispatch for a microgrid considering renewable energy cost functions*. New York: IEEE.
- Norskov, J. (20 de Enero de 2015). *Wind turbines reached record level in 2014*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de Energinet.dk: <http://energinet.dk/EN/EI/Nyheder/Sider/Vindmoeller-slog-rekord-i-2014.aspx>
- North Carolina State University. (2014). *RPS Policies*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de Database of State incentives for Renewables and Efficiency: <http://www.dsireusa.org/summarymaps/index.cfm?ee=1&RE=1>
- Northern Michigan University. (2009). *Decision trees, entropy, information gain, ID3*. Recuperado el 7 de Abril de 2015, de Northern Michigan University - Mathematics and Computer Science: <http://euclid.nmu.edu/~mkowalc/cs495f09/slides/lesson015.pdf>
- Obama, B. (25 de Junio de 2013). *Fact Sheet: President Obama's Action Plan*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de White House: <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/06/25/fact-sheet-president-obama-s-climate-action-plan>
- Office of the Historian. (31 de Octubre de 2013). *Milestones 1969-1976*. Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de Office of the historian- U.S. Department Of State: <https://history.state.gov/milestones/1969-1976/oil-embargo>
- Peplow, M. (25 de Junio de 2014). *Thin-Film Solar Cells Freed From Toxic Processing*. Recuperado el 19 de Marzo de 2015, de IEEE Spectrum: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/solar/thin-film-solar-cell-freed-from-toxic-processing>
- Polo, J., Rodríguez, J., & Sarmiento, A. (2008). *Potencial de generación de energía a lo largo de la costa colombiana mediante el uso de corrientes inducidas por mareas. Revista de Ingeniería-Universidad de los Andes*, 99-105.

- Presidencia República Oriental del Uruguay. (27 de Junio de 2014). *Carrasco se convertiría en primer aeropuerto abastecido con energías renovables propias*. Recuperado el 16 de Febrero de 2015, de Presidencia República Oriental del Uruguay: <http://www.presidencia.gub.uy/Comunicacion/comunicacionNoticias/carrasco-se-convertiria-en-primer-aeropuerto-abastecido-con-energias-renovables-propias>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (22 de Junio de 2000). *Establecimiento de un plan estructural, institucional y financiero, que permita el abastecimiento energético de las zonas no interconectadas, con participación de las comunidades y el sector privado*. Recuperado el 16 de Marzo de 2015, de Universidad Autónoma de Occidente - Plataforma Augusta: http://augusta.uao.edu.co/moodle/file.php/3302/Material_complementario/SITUACIONACTUALDELAGENERACIONDIESELENLASZNI-REV.pdf
- Rao, S. S. (2009). *Engineering Optimization: Theory and Practice - 4th Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. (2 de Noviembre de 2014). *Dinamarca desarrolla la eólica y otras energías renovables y prescindirá del carbón*. Recuperado el 11 de Febrero de 2015, de Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico: <http://www.evwind.com/2014/11/02/dinamarca-sustituira-el-carbon-por-eolica-y-otras-energias-renovables-para-emitter-menos-co2/>
- Roa-Sepúlveda, C., & Herrera, M. (5 de Abril de 2000). A solution to the economic dispatch problem using decision trees. *Electric Power Systems Research*, 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.
- Rojas T., J. F. (3 de Febrero de 2012). *Isagen lidera energía Geotérmica*. Recuperado el 17 de Febrero de 2015, de El Colombiano: http://www.elcolombiano.com/isagen_lidera_energia_geotermica-ICEC_168440
- Ruiz-Morales, J. C., Peña-Martínez, J., Marrero-López, D., Pérez-Coll, D., Núñez-Coello, P., Ballesteros-Pérez, B., y otros. (2006). Pilas de Combustible. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 22-30.
- RWE AG. (s.f.). *Innovation>Projects & Technologies>Renewables*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de RWE The Energy to Lead: <https://www.rwe.com/web/cms/en/183716/rwe/innovation/projects-technologies/renewables/>
- Sawyers, A. (13 de Octubre de 2013). *1979 oil meant recession for U.S, depression for Autos*. Recuperado el 5 de Febrero de 2015, de Automotive News: <http://www.autonews.com/article/20131013/GLOBAL/310139997/1979-oil-shock-meant-recession-for-u.s.-depression-for-autos>
- Sayad, S. (s.f.). *Decision Tree-Regression*. Recuperado el 7 de Abril de 2015, de Saed Sayad: http://www.saedsayad.com/decision_tree_reg.htm
- Solopower. (s.f.). *Technology: Thin Film Photovoltaics*. Recuperado el 19 de Marzo de 2015, de Solopower Systems: <http://solopower.com/solutions-technology/thin-film-photovoltaics/>
- Stefanowski, J. (2010). *Discovering decision trees Lecture-5 SE Master Course, 2008/9 = revised 2010*. Recuperado el 4 de Febrero de 2015, de Institute of Computing Science Poznan University of technology: <http://www.cs.put.poznan.pl/jstefanowski/sed/DM-5-newtrees.pdf>
- The European Association for the Promotion of Cogeneration. (s.f.). *What is cogeneration?* Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de Cogen - Europe: http://www.cogeneurope.eu/what-is-cogeneration_19.html
- The German Energy Society. (2008). *Planning & Installing Photovoltaic Systems*. Berlin: Earthscan.
- U.S. Department of Energy. (2015). *Clean Cities Alternative Fuel Price Report - January 2015*. Recuperado el 24 de Marzo de 2015, de U.S Department of Energy - Energy Efficiency & Renewable Energy: http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/alternative_fuel_price_report_jan_2015.pdf
- U.S. Department of Energy. (s.f.). *How do Wind Turbines work?* Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de Energy.gov - Office of Energy Efficiency & Renewable Energy: <http://energy.gov/eere/wind/how-does-wind-turbine-work>

- U.S. Energy Information Administration. (10 de Junio de 2010). *Electricity prices for households for selected Countries*. Recuperado el 18 de Abril de 2015, de U.S. Energy Information Administration: http://www.eia.gov/countries/prices/electricity_households.cfm
- U.S. Energy Information Administration. (2013). *International Energy Statistics*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de U.S Energy Information Administration: <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=2&pid=2&aid=12&cid=GM,&syid=2000&eyid=2012&unit=BKWH>
- U.S. Energy Information Administration. (7 de Mayo de 2014). *Annual Energy Outlook 2014*. Recuperado el 19 de Marzo de 2015, de U.S. Energy Information Administration: http://www.eia.gov/forecasts/aeo/electricity_generation.cfm
- U.S. Energy Information Administration. (27 de Marzo de 2015). *Analysis & Projections > Electricity Monthly Update*. Recuperado el 17 de Abril de 2015, de U.S. Energy Information Administration: http://www.eia.gov/electricity/monthly/update/end_use.cfm
- U.S. Energy Information Administration. (30 de Enero de 2015). *Petroleum & Other Liquids*. Recuperado el 17 de Abril de 2015, de U.S. Energy Information Administration: http://www.eia.gov/dnav/pet/hist/LeafHandler.ashx?n=PET&s=EER_EPD2DXL0_Pf4_RGC_DPG&f=D
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (18 de Diciembre de 2012). *Clean Development Mechanism Project Design Document Form*. Recuperado el 12 de Febrero de 2015, de United Nations Framework Convention on Climate Change: http://cdm.unfccc.int/filestorage/6/8/YTODX2LWSQUB53NVK7RZPFHGA89J1.pdf/PDD_Atamarca%20Solar.pdf?t=U0t8bmpvZ2RjfdBT eFIoPO1Bv5PUVju7jZ65
- University of Michigan. (s.f.). *Decision Trees*. Recuperado el 9 de Marzo de 2015, de LSA Complex Systems - University of Michigan: <http://vserver1.cscs.lsa.umich.edu/~spage/ONLINECOURSE/R4Decision.pdf>
- UPB, EAFIT, EPM, SOFASA S.A. (2014). *Estudio de Pre-factibilidad para la masificación de vehículos electricos en Colombia*. Medellín.
- UPME. (2012). *Sistema de Información Minero Energético*. Recuperado el 16 de Febrero de 2015, de UPME-Unidad de Planeación Minero Energética: http://www.upme.gov.co/generadorconsultas/consulta_balance.aspx?idmodulo=3
- Vargas Rodriguez, V. (28 de Abril de 2014). *Energía solar ilumina parqueaderos en UPB*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de Diario ADN: <http://diarioadn.co/medell%C3%ADn/mi-ciudad/energ%C3%ADa-solar-ilumina-parqueaderos-en-upb-1.105890>
- Walsh, B. (13 de Agosto de 2013). *10 Years after the Great Blackout, the grid is Stronger- but Vulnerable to Extreme Weather*. Recuperado el 19 de Febrero de 2015, de TIME: <http://science.time.com/2013/08/13/ten-years-after-the-great-blackout-the-grid-is-stronger-but-vulnerable-to-extreme-weather/>
- Wind Energy Foundation. (s.f.). *Texas: A National Wind Energy Pioneer*. Recuperado el 18 de Febrero de 2015, de Wind Energy Foundation: <http://www.windenergyfoundation.org/wind-at-work/case-studies/texas>
- World Energy Council. (2013). *WEC Colombia teams up with universities to showcase smart grid innovation*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de World Energy Council: <http://www.worldenergy.org/news-and-media/local-news/wec-colombia-teams-up-with-universities-to-showcase-smart-grid-innovation/>
- World Energy Council. (2013). *World Energy Perspective Cost of Energy Technologies*. Londres: World Energy Council.
- Wright, B. (28 de Mayo de 2013). *A Review of Unit Commitment*. Recuperado el 7 de Abril de 2015, de Columbia University of New York: http://www.ee.columbia.edu/~lavaei/Projects/Brittany_Wright.pdf
- XM. (12 de Febrero de 2008). *El mercado de energía mayorista y su administración*. Recuperado el 11 de Marzo de 2015, de XM: <http://www.xm.com.co/Memorias%20Seminarios/%282008-2%29MEM.pdf>
- XM. (2012). *Restablecimiento Sistemas de Potencia*. Recuperado el 19 de Febrero de 2015, de XM: http://www.xm.com.co/memoriascapacitacionemsa/restablecimiento/restablecimiento_emsa.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 HVM 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.