

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN MATLAB PARA EL MODELADO DEL
COMPORTAMIENTO OPERACIONAL EN ESTADO ESTABLE DE
COMPONENTES DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS**

**DANIEL FERNANDO PALACIOS BARRETO
JOSÉ ALBERTO PÉREZ MUNÉVAR**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN MATLAB PARA EL MODELADO DEL
COMPORTAMIENTO OPERACIONAL EN ESTADO ESTABLE DE
COMPONENTES DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS**

**DANIEL FERNANDO PALACIOS BARRETO
JOSÉ ALBERTO PÉREZ MUNÉVAR**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista

Director:

**JUAN MANUEL REY LÓPEZ
Ingeniero Electricista**

Co-directores:

**Dr. GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Ing. PEDRO PABLO VERGARA BARRIOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente a los Ingenieros Juan Manuel Rey y Pedro Pablo Vergara por acompañarnos durante la realización del presente proyecto de grado. Además de desempeñar el papel de orientadores, se pusieron la 10 y nos colaboraron en cada situación donde se nos presentaban obstáculos para seguir avanzando.

Al Magister Iván David Serna quien a pesar de no estar vinculado directamente con el proyecto, dedicó gran parte de su tiempo y con paciencia nos orientó en la construcción de este trabajo.

Al Doctor Gabriel Ordoñez Plata, codirector de nuestro trabajo de grado y director del grupo de investigación GISEL por brindarnos su colaboración y permitirnos ingresar al grupo de investigación para poder desarrollar este trabajo.

*Dedico este logro principalmente a Dios por la darme la salud para así poder
avanzar en mi camino día tras día.
A mi amada madre quien con su amor incondicional me apoya, anima y acompaña
para poder crecer y llegar a cumplir mis metas, las cuales son principalmente
suyas.
A mi katesita bella, quien hasta el día de hoy me ha complementado en muchos
aspectos de mi vida.
A José, porque el trabajo desarrollado dio los frutos que esperábamos, fue muy
bacano trabajar con usted.
A la familia Guerrero, mi gran familia, quienes con su apoyo permitieron que yo
pudiese vivir mi mejor experiencia de vida, estudiar.
Y por último y no menos importante, a mis compañeros de estudio, porque mi
mejor etapa se construyó con ustedes.*

Gracias, infinitamente gracias...

Daniel Fernando

*A Dios y a la Virgen, por darme la sabiduría, paciencia y aguante durante este
proceso.
A mi madre, quien ha dedicado su vida a mi bienestar, con esfuerzo, sacrificio y
amor logró sacarme adelante, este y todos mis triunfos son tuyos.
A mi padre, por apoyarme en todos los momentos de mi vida.
A mi Jacke hermosa, por tu apoyo, comprensión y amor incondicional en los
momentos difíciles que tuve que afrontar.
A mi hermano, hermana y abuela, por su apoyo en este proceso.
A Daniel, por que juntos hicimos posible lo que en momentos parecía imposible.
A Nixon, Diego, García, Expósito y todos mis compañeros de eléctrica que me
apoyaron y compartieron conmigo los buenos y malos momentos en la u, a todos
gracias.*

José Alberto

CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, CONCEPTO DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS | 19 |
| 1.1. MICRO-RED | 19 |
| 1.2. ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA MICRO-RED | 22 |
| 1.2.1. Inversores. | 22 |
| 1.2.2. Acumuladores o Baterías. | 23 |
| 1.2.3. Reguladores de Carga. | 23 |
| 1.3. ENERGÍA SOLAR | 24 |
| 1.4. ENERGÍA EÓLICA | 25 |
| 1.5. BIOMASA | 26 |
| 2. SIMULADORES EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS DE MICRO-REDES | 28 |
| 2.1. REVISIÓN GENERAL DE SIMULADORES | 28 |
| 2.2. REVISIÓN ESPECÍFICA, SIMULADORES DE MICRO-REDES | 31 |
| 2.2.1. Gridlab-D. | 31 |
| 2.2.2. Interpss. | 34 |
| 2.2.3. Open DSS | 36 |
| 2.3. SELECCIÓN DE SOFTWARE | 38 |
| 3. MODELOS MATEMÁTICOS EMPLEADOS PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA MICRO-RED | 40 |
| 3.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE ELEMENTOS GENERADORES | 40 |
| 3.1.1. Modelo del panel solar | 41 |
| 3.1.2. Modelo del generador eólico. | 49 |

| | |
|---|----|
| 3.1.3. Modelo de generación a partir de biomasa | 56 |
| 3.2. MODELO MATEMÁTICO DE LOS ALMACENADORES DE ENERGÍA | 62 |
| 3.3. MODELO MATEMÁTICO DEL INVERSOR | 64 |
| 3.4. MODELO MATEMÁTICO DEL CONTROLADOR DE CARGA | 65 |
| 3.5. RESUMEN DE MODELOS SELECCIONADOS | 66 |
| | |
| 4. DESARROLLO DEL PROGRAMA BASE E INTEGRACIÓN A LA INTERFAZ GRÁFICA | 67 |
| | |
| 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 71 |
| | |
| 6. CONCLUSIONES | 78 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA | 80 |
| | |
| ANEXOS | 91 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Ventajas e Inconvenientes de la Generación Fotovoltaica..... | 24 |
| Tabla 2. Características operacionales de los principales simuladores de acceso libre para el análisis de Sistemas de Potencia..... | 29 |
| Tabla 3. Abreviaturas empleadas en la Tabla de Características operacionales de los principales simuladores de acceso libre para el análisis de Sistemas de Potencia..... | 29 |
| Tabla 4. Resumen Ventajas y Desventajas Gridlab-D..... | 33 |
| Tabla 5. Resumen Ventajas y Desventajas InterPSS..... | 35 |
| Tabla 6. Resumen Ventajas y Desventajas OpenDSS..... | 38 |
| Tabla 7. Constantes requeridas para el modelo del panel solar..... | 41 |
| Tabla 8. Especificaciones técnicas del panel solar..... | 41 |
| Tabla 9. Calculo de Errores Promedio de Modelos Solares..... | 48 |
| Tabla 10. Calculo de Errores Promedio de los Modelos Eólicos..... | 55 |
| Tabla 11. Siglas empleadas en la ecuación de la estimativa de generación de biogás..... | 57 |
| Tabla 12. Categorías de residuos orgánicos según el tipo de degradación..... | 58 |
| Tabla 13. Categorías de Climas..... | 58 |
| Tabla 14. Clima en las principales ciudades de Colombia..... | 59 |
| Tabla 15. Índice de Generación de Metano k..... | 59 |
| Tabla 16. Valores de la Generación Potencial de Metano (Lo) por Tipo de Residuo..... | 60 |
| Tabla 17. Factor de Corrección de Metano (MCF)..... | 61 |
| Tabla 18. Resumen modelos seleccionados..... | 66 |
| Tabla 19. Contenido Interfaz..... | 68 |
| Tabla 20. Datos de Ingreso al Sistema de Gestión de Energía Eléctrica..... | 72 |
| Tabla 21. Datos de Potencia de Salida..... | 75 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Estructura de una micro-red | 20 |
| Figura 2. Editor Gráfico InterPSS..... | 35 |
| Figura 3. Interfaz de OpenDSS de simulación para otros programas..... | 36 |
| Figura 4. Diagrama de Bloques para el Panel Solar | 44 |
| Figura 5. Diagrama Unifilar. Programación del panel solar en Gridlab-D | 45 |
| Figura 6. Potencia entregada por un panel solar simulado en Gridlab-D..... | 46 |
| Figura 7. Gráfica de potencia entregada por el panel seleccionado. | 47 |
| Figura 8. Representación Gráfica de la Potencia Suministrada por los Modelos 1, 2 y 3 programada en Matlab | 47 |
| Figura 9. Diagrama de Bloques Generador Eólico..... | 53 |
| Figura 10. Diagrama Unifilar Generador Eólico en Gridlab-D | 53 |
| Figura 11. Potencia suministrada por el generador eólico simulado en Gridlab-D | 54 |
| Figura 12. Potencia suministrada por el generador eólico modelo seleccionado. . | 54 |
| Figura 13. Representación Gráfica de la Potencia Suministrada por los Modelos 2 y 1 en Matlab | 55 |
| Figura 14. Diagrama de bloques, Generador por Biomasa..... | 62 |
| Figura 15. Diagrama de Bloques, Banco de Baterías | 63 |
| Figura 16. Diagrama de bloques Inversor | 65 |
| Figura 17. Diagrama de Bloques Controlador de Carga | 65 |
| Figura 18. Tablero de Botones GUI | 67 |
| Figura 19. Diseño de la Interfaz Gráfica | 68 |
| Figura 20. Diagrama Unifilar para el Ejemplo de Aplicación | 71 |
| Figura 21. Generación de Energía Eléctrica | 73 |
| Figura 22. Ejecución del Ejemplo Propuesto. Comportamiento del Sistema | 73 |
| Figura 23. Ejecución del Ejemplo Propuesto. Permitiendo visualizar el Estado de Operación de Carga de las Baterías..... | 74 |

Figura 24. Ejecución del Ejemplo Propuesto. Comportamiento Red Eléctrica.....74
Figura 25. Comportamiento del Sistema.....76

LISTADO DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Anexo A. Modelos Matemáticos de Páneles Solares | 91 |
| Anexo B. Modelos Matemáticos de Generadores Eólicos | 99 |
| Anexo C. Modelos Matemáticos de Almacenadores De Energía | 104 |
| Anexo D: Modelos de Generación por Biomasa | 111 |
| Anexo E: Perfiles de Ingreso a la Interfaz | 119 |
| Anexo F: Instalación del Software | 124 |

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN SOFTWARE EN MATLAB PARA EL MODELADO DEL COMPORTAMIENTO OPERACIONAL EN ESTADO ESTABLE DE COMPONENTES DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS*

AUTORES: DANIEL FERNANDO PALACIOS BARRETO, JOSÉ ALBERTO PÉREZ MUNÉVAR.**

PALABRAS CLAVES: Software, Micro-redes, Energías Renovables, Estado Estable.

DESCRIPCIÓN: En la generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables derivadas del sol, los software que permitan el procesamiento de datos como radiación solar, temperatura, velocidad del viento entre otros; son de gran utilidad en el momento de tomar decisiones sobre la viabilidad que posee un proyecto de este tipo.

El presente trabajo de grado plantea y desarrolla una herramienta computacional que permite simular el comportamiento operacional en estado estable de micro-redes eléctricas. Esta micro-red cuenta con tres fuentes de generación distribuida, las cuales están desarrolladas por medio de paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y un sistema de generación por biomasa. Además, cuenta con un sistema de respaldo compuesto por un conjunto de baterías y la red eléctrica.

Esta herramienta permite realizar la gestión de la energía eléctrica obtenida por las diferentes fuentes de generación, y tiene como objetivo visualizar el comportamiento del sistema de generación, el sistema de almacenamiento, el estado de operación de carga de las baterías y la red eléctrica cuando interactúan entre sí para satisfacer una carga especificada por el usuario final, permitiendo obtener resultados numéricos que facilitan la metodología a estudiar en la toma de decisiones de un proyecto que pretenda instalar este tipo de elementos.

Esta herramienta obtiene los resultados numéricos hora tras hora, debido a que se estima que la medición de variables de ingreso son tomadas hora a hora, además la barra de DC es de 48V. En caso de que se desee modificar o agregar una nueva fuente de generación, bien sea renovable o no, se deben tener en cuenta estas recomendaciones.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ing. Juan Manuel Rey López. Codirectores: Dr. Gabriel Ordóñez Plata, Ing. Pedro Pablo Vergara Barrios.

ABSTRACT

TÍTULO: DEVELOPMENT OF A SOFTWARE IN MATLAB TO THE MODELING OF BEHAVIOR IN STABLE STATE OF COMPONENTS IN ELECTRICAL MICROGRIDS*.

AUTHORS: DANIEL FERNANDO PALACIOS BARRETO, JOSÉ ALBERTO PÉREZ MUNÉVAR**.

KEYWORDS: Software, Micro-grid, Renewable Energy, Steady State.

DESCRIPTION: The electricity generation through renewable sources of energy derived from the sun and the software for ordinary data processing as solar radiation, temperature, wind speed, and others; all of them are very useful when making decisions that affect the viability that have this type of project.

This degree work envisages and develops a software tool used to simulate the operational performance in micro grids steady state. This micro grid has three types of distributed generation, which are prepared according to photovoltaic panels, wind turbines and biomass generation system. In addition, it has a backup system consisting of a set of batteries and the grid.

On the other hand, this software tool also can generates considerable energy savings received by the sources of electricity generation, and it also aims at display behaviour of the power generation system, the flow storage system, the state of charge of the batteries and the grid when they are interacting with each other to meet a specified load by the consumer. Also, this allows to obtain numerical results that facilitate the methodology to research in the decisions taken of a project whose try to install these items.

Finally, the software tool obtained the numerical results hour per hour, because it is estimated that the measurement of variables that are taken hour per hour, besides, the DC bar it is 48V. If you want to change or add a new source of power generation, it could be renewable or not, you should consider these recommendations.

* Degree work.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: Ing. Juan Manuel Rey López. Co-directors: Dr. Gabriel Ordóñez Plata, Ing. Pedro Pablo Vergara Barrios.

INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento del consumo de energía eléctrica y a la crisis energética por la que atraviesa el planeta, es imprescindible la búsqueda de soluciones para mitigar esta problemática. Una potencial solución consiste en la integración de componentes de generación distribuida capaces de trabajar en conjunto con la estructura de generación, transmisión y distribución actual para suplir demandas que día a día van en aumento [1].

Actualmente y a pesar de los avances tecnológicos presentes, muchas personas no cuentan con acceso a la energía eléctrica, ya sea por los costos que conllevan las interconexiones o por otros factores como conflictos internos. Es por ello que la generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables derivadas del sol, aire, entre otras, es una alternativa para la cual debe evaluarse la viabilidad y sus niveles de penetración en los escenarios actuales y futuros. Partiendo de esto, nace un concepto nuevo de red eléctrica llamado micro-red, la cual puede acoplar dos o más fuentes de generación renovable o convencional, de baja potencia, formando una red eléctrica independiente que, en dado caso, puede trabajar en conjunto con la red eléctrica principal e incluir equipos que pueden efectuar acciones de control haciendo que la red sea total o parcialmente automatizada. Estas características permiten que haya un aumento en la seguridad de suministro y la calidad de la energía [2].

Teniendo en cuenta la relevancia de la inclusión de estas nuevas configuraciones en las redes eléctricas, en este proyecto se diseña una herramienta computacional que permite realizar la simulación de diferentes elementos que modelan el comportamiento operacional en estado estable de micro-redes eléctricas la cual podrá ser empleada por el Grupo de Investigación en Sistemas de Energía

Eléctrica (GISEL) de la Universidad Industrial de Santander para el desarrollo de futuros proyectos de investigación.

1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA, CONCEPTO DE MICRO-REDES ELÉCTRICAS

1.1. MICRO-RED

Una micro-red se considera como un conjunto de cargas y generadores que operan como un solo sistema controlable que proporciona energía y calor en un área específica[3]. Este concepto ofrece un nuevo paradigma para la definición de la operación de la generación distribuida. La utilidad de la micro-red se puede considerar como una célula (o zona) controlada del sistema de potencia. Por ejemplo, la micro-red podría ser controlada como una sola carga asignable, que puede responder en segundos para satisfacer las necesidades de un sistema de transmisión[4].

Dependiendo de su finalidad, la micro-red puede ser diseñada para satisfacer necesidades especiales como mejorar la fiabilidad local, reducir pérdidas en la alimentación, proporcionar una mayor eficiencia a través del uso de calor residual, corregir los huecos de tensión o proporcionar funciones de alimentación ininterrumpida entre otros [4].

La micro-red se caracteriza por acoplar diferentes fuentes de generación, cuya selección se basa en condiciones geográficas, climáticas, disponibilidad de fuentes convencionales de energía y característica financiera para el proyecto [5]. Estos generadores, son pequeñas unidades cuya potencia es menor a 100 [kW], puestas en el sitio de interés e interconectadas con dispositivos basados en electrónica de potencia que proporcionan el control y la flexibilidad requerida para que se pueda cumplir el concepto de micro-red[3] [4].

La Figura 1. ilustra un ejemplo de la arquitectura básica de una micro-red. [4]:

Figura 1. Estructura de una micro-red



Fuente: Meagle Sun. Estructura de una micro-red [em linea] disponible en: <http://www.meaglesun.com/en/solar-photovoltaic>

Este ejemplo ilustra una micro-red que contiene un conjunto de paneles fotovoltaicos ubicados de forma aislada a las cargas (1), un inversor AC/DC (2), una casa de máquinas donde se encuentra ubicado el sistema de respaldo (3, 4 y 5) y un generador eólico (6) que alimenta un sistema de cargas distribuido en las diferentes casas mostradas en la ilustración. Aparte de esto, cada casa tiene su propio sistema de paneles solares que pueden utilizarse para aplicaciones térmicas como el calentamiento de agua.

Entre las ventajas que poseen las micro-redes se destacan [5]:

- La reducción de los picos de consumo debido a que solo estarán en operación las unidades generadoras no renovables requeridas en tiempo real lo

que hace que la red sea eficiente energéticamente minimizando la inversión en los sistemas de generación, transporte y distribución de electricidad convencionales.

- En el caso en que las micro-redes son automatizadas, estas tienen la capacidad de modificar los hábitos de consumo de electricidad en los usuarios que las implementan reduciendo la dependencia a la red eléctrica convencional, permitiendo que la micro-red pueda configurarse para que funcione de forma aislada o conectada a la red.

- Con la inclusión de fuentes de generación renovables y la optimización de las centrales generadores convencionales se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, aumenta la independencia que podría llegar a tener el sector eléctrico respecto a la incertidumbre del precio del petróleo lo cual incide directamente en el desarrollo de la economía a nivel global.

- Los operadores pueden reducir el riesgo de sobrecarga de los transformadores de potencia, permitiendo un servicio continuo y mantener la vida útil de los mismos. A su vez es posible realizar un monitoreo continuo de los distintos equipos de la red facilitando así su mantenimiento.

- El usuario adquiere a su vez múltiples ventajas como [7]:
 - Pago por uso: al no ser necesaria una lectura manual, se eliminan los recibos y los consumidores sólo pagan por lo que consumen.
 - Tarifas flexibles: las empresas gestionan diversas tarifas para optimizar el consumo de la energía[7].

1.2. ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA MICRO-RED

Además de las ventajas enunciadas anteriormente, una micro-red proporciona una alta confiabilidad y a su vez seguridad para los usuarios finales, puesto que con su sistema de recolección de información puede monitorear fallas en el sistema, fluctuaciones en la demanda entre otras. Esta obtiene su generación por medio de energías renovables, las cuales son adquiridas y transformadas en energía eléctrica por medio de paneles solares, aerogeneradores, celdas de combustible, entre otras. Las fuentes generadoras, se ubican cerca de las cargas reduciendo pérdidas por transporte de energía aumentando la eficiencia del sistema reafirmando la principal ventaja de una micro-red.

Además de las fuentes generadoras de energía eléctrica, intervienen otros equipos, los cuales ayudan en el proceso de transformación de la energía tales como: inversores, reguladores de carga, baterías o acumuladores y protecciones para cualquier perturbación que pueda sufrir el sistema.

A continuación se explica de manera general cada uno de los equipos mencionados anteriormente [1]:

1.2.1. Inversores. Los inversores son dispositivos electrónicos utilizados para convertir la CC(Corriente Continua), en CA(Corriente Alterna), la corriente generada de la absorción de energía por medio de los paneles y aerogeneradores se da en corriente continua, por ello para poder interactuar con la red de potencia o bien de manera aislada es necesario su conversión [8].

Una de las características más importantes de los inversores es la capacidad de trabajar de manera aislada o en ausencia de la red. Los inversores *grid-on* operan recibiendo una señal de tensión y frecuencia concordante con las de la red

eléctrica, este tipo de inversores se caracteriza por salir de operación en el momento en que ocurre una falla o perturbación de la red eléctrica. Los inversores *grid-off* son aquellos que funcionan sin la presencia de la red eléctrica, por lo cual pueden trabajar de manera aislada, ya que no requieren una señal de referencia para poder generar una señal de tensión de 60 Hz [8].

1.2.2. Acumuladores o Baterías. Los acumuladores de energía o baterías son dispositivos encargados de almacenar la energía proveniente de las fuentes generadoras como paneles, aerogeneradores entre otros, las cuales son usadas cuando la energía generada no es suficiente para abastecer la energía demandada por la carga [9].

Estas almacenan y liberan la energía por medio de reacciones químicas, lo que provoca una degradación de su vida útil. La duración de estos acumuladores se encuentra de 5 a 7 años, dependiendo del fabricante y el uso que se le otorgue a estos equipos [8].

El dimensionamiento dependerá directamente de la demanda a satisfacer (consumo en Amperes-horas), de ahí se pueden acoplar en serie y paralelo, con el fin de satisfacer la demanda de los usuarios en todo momento, esta configuración depende directamente del diseño que se plantee para cada uno de los proyectos.

1.2.3. Reguladores de Carga. Es un dispositivo encargado de proteger la batería frente a sobrecargas y sobredescargas profundas. El regulador controla constantemente el estado de carga de las baterías y regula la intensidad de carga con el fin de alargar su vida útil. También genera alarmas en función del estado de dicha carga [10].

Los reguladores actuales introducen microcontroladores para la correcta gestión de un sistema fotovoltaico. Su programación elaborada permite un control capaz

de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permitiendo la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento para instalaciones especiales. Incluso, existen dispositivos que memorizan datos permitiendo conocer cuál ha sido la evolución de la instalación durante un tiempo determinado. Para ello, consideran los valores de tensión, temperatura, intensidad de carga y descarga, y capacidad del acumulador [10].

1.3. ENERGÍA SOLAR

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que genera corriente continua por medios de semiconductores al ser iluminados por un haz de fotones. Cuando la luz incide sobre una célula solar, nombre dado al elemento fotovoltaico individual, se genera potencia eléctrica [10].

La energía solar fotovoltaica es una energía limpia, no provoca emisiones de gases contaminantes, cuenta con una fuente ilimitada de energía y esta puede funcionar de manera aislada. A continuación se muestra la Tabla 1 que contiene el resumen de las ventajas e inconvenientes de la generación fotovoltaica.

Tabla 1. Ventajas e Inconvenientes de la Generación Fotovoltaica

| VENTAJAS | INCONVENIENTES |
|---|---|
| Limpia, renovable, infinita, silenciosa | Gran inversión económica |
| Subvenciones | Proceso de fabricación de módulos complejos |
| Sin partes móviles | Producción variable según clima |

La generación de energía solar fotovoltaica representa una gran opción para suplir demandas de carga de una forma limpia, renovable, infinita y silenciosa. A pesar

de que se han realizado diferentes investigaciones en este campo, los paneles solares aún presentan un bajo porcentaje de transformación de energía solar a energía eléctrica, esto debido a que los materiales empleados poseen características que transforman la energía de ingreso en otras formas de energía como calor.

Las células solares están constituidas por semiconductores, que poseen electrones débilmente ligados ocupando una banda de energía denominada “banda de valencia”. Cuando se aplica una cantidad de energía, el enlace se rompe y el electrón pasa a una nueva banda de energía denominada “banda de conducción”, estos electrones pueden ser llevados a un circuito externo, el flujo de electrones que viajan por esta célula se denominan corriente de célula, y su producto con el voltaje determinan la potencia generada.

Cada célula solar genera tensión y corriente pequeñas, estas se acoplan en serie o en paralelo con el fin de obtener potencias mayores, formando así los módulos fotovoltaicos que a su vez se conectan en serie y paralelo para obtener potencias más altas [11].

1.4. ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica se deriva del calentamiento de la atmósfera y de las irregularidades del relieve de la superficie terrestre. El sol calienta el aire que se encuentra sobre la tierra en una cantidad mayor que la situada en el mar, el aire se expande y se eleva disminuyendo la presión y haciendo que el viento se dirija del mar hacia la costa [13].

A mayor altura, mayor es la velocidad del viento, por ello los mejores lugares para la localización de aerogeneradores se encuentran sobre colinas, cerca de la costa

y dentro del mar, pues dentro del mar la velocidad del viento aumenta en comparación con las zonas terrestre [13].

La generación de energía eléctrica por medio del viento se realiza a través de aerogeneradores, los cuales están constituidos por una o más aspas, que capturan la energía cinética del viento en un rotor. Este generador eléctrico se monta sobre una torre alta (generalmente entre 40 y 50 metros), la cual se transporta por medio de un conductor para satisfacer las necesidades de demanda [12].

A partir de la energía cinética y teniendo en cuenta que la Ley de Betz dice que solo se puede convertir menos del 59% de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador [14], es posible obtener la potencia proveniente de una masa de aire, como se muestra a continuación [13]:

$$E_{cinetica} = \frac{1}{2}mv^2 \quad Ec. 1$$

$$P_{eolica} = \frac{1}{2}\delta Av^3 \quad Ec. 2$$

Dónde:

M, es la masa del aire [kg]

V, es la velocidad del viento [m/s]

δ , es la densidad del aire [kg/m^3]

A, es el área de captación [m^2]

1.5. BIOMASA

La obtención de energía eléctrica a través de la quema de biomasa sólida se realiza generalmente a gran escala (plantas mayores de 2MW). Esto es debido

principalmente a que las instalaciones necesarias requieren una gran inversión económica. Además, los rendimientos globales obtenidos son mayores en cuanto mayor sea la potencia generada [13].

El funcionamiento de una planta de biomasa para la generación de energía eléctrica consiste en la recepción de la biomasa, generalmente en forma de alpacas (paja o astillas), posteriormente se colocan en una cinta transportadora, que las conduce hasta la caldera. Allí, previamente desmenuzadas, caen a una parrilla vibratoria que favorece la combustión y la evacuación de inquemados. Dicha combustión calienta el agua que circula por las tuberías de las paredes de la caldera y por haces de tubos en el interior de la misma convirtiéndola en vapor sobrecalentado [13].

El vapor sobrecalentado mueve una turbina conectada a un generador que produce electricidad a una tensión determinada, transformándola posteriormente a otra tensión mayor para su incorporación a la red general.

Por último, los inquemados depositados en el fondo de la caldera, se trasladan a un vertedero autorizado, y las cenizas volantes, retenidas por un filtro, se aprovechan para fertilizantes agrícolas.

2. SIMULADORES EMPLEADOS PARA EL ANÁLISIS DE MICRO-REDES

La descripción del presente capítulo contempla la revisión de los software más importantes empleados para simular micro-redes, donde se especificarán las principales características de cada uno de ellos llegando a comparar las ventajas y desventajas que poseen. Posteriormente se seleccionará uno el cual permitirá simular el comportamiento operacional de la mayoría de los elementos que integran las micro-redes y así dar cumplimiento a los objetivos planteados en el presente proyecto.

2.1. REVISIÓN GENERAL DE SIMULADORES

Mediante la comparación hecha por [16] en su artículo; de las actuales herramientas de simulación para redes inteligentes, se busca dar respuesta a tres cuestionamientos básicos para la selección de un simulador para un propósito específico.

¿Cuáles son las áreas que un simulador de redes inteligentes debería cubrir?

¿Qué funcionalidades ofrecen los actuales simuladores?

¿Qué tan congruentes son sus resultados?

La selección de los diferentes software mostrados en la Tabla 2, se realiza teniendo en cuenta el hecho de que son software de distribución gratuita para la simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEPs) con capacidades potenciales en términos de agentes y flujos de redes, tales como agentes productores, operadores de redes de transmisión, operadores de redes de distribución, agentes comercializadores y consumidores, y aún, flujos de energía,

información y tarificación, teniendo en cuenta diversas tecnologías de comunicación, dispositivos eléctricos y análisis de mercado [16], [17].

Tabla 2. Características operacionales de los principales simuladores de acceso libre para el análisis de Sistemas de Potencia

| Simulador | Flujo de Potencia | | | | | Análisis Dinámico | | | Información | | Tarificación | | AMB | ESPECIAL |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------|
| | AC-PF | DC-OPF | OPF | CPF | 3P-PF | EMT | SA | TD | PLC | COM | MKT | DR | | |
| UWPFLOW | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | <input type="checkbox"/> | | | | | | | |
| TEFTS | | | | | | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | | | | | | |
| MatPower | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | * | | | | | | | * | | | |
| PSAT | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | | GUI,GNE |
| IPSYS | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | | | GNE |
| MatDyn | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | | | |
| AMES | | <input type="checkbox"/> | | | | | | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | GUI |
| InterPSS | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | | | GUI,GNE |
| OpenDSS | <input type="checkbox"/> | | | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | | | GIC |
| Gridlab-D | <input type="checkbox"/> | | | | <input type="checkbox"/> | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Datos Climáticos |

* Paquete opcional disponible como complemento [16].

Tabla 3. Abreviaturas empleadas en la Tabla de Características operacionales de los principales simuladores de acceso libre para el análisis de Sistemas de Potencia

| FLUJO DE POTENCIA | |
|--------------------------|--|
| AC-PF | Flujo de potencia AC. |
| DC-OPF | Flujo de potencia óptimo DC. |
| OPF | Flujo de potencia óptimo, una visión general AC. |
| CPF | Flujo de potencia continuo |
| 3P-PF | Flujo de potencia trifásico para redes de distribución |
| ANÁLISIS DINÁMICO DE SEP | |
| EMT | Transitorios electromagnéticos |
| SA | Diferentes tipos de análisis de estabilidad |
| TD | Simulación en el dominio del tiempo |
| FLUJO DE INFORMACIÓN | |
| PLC | Controladores Lógicos Programables |

| FLUJO DE POTENCIA | |
|----------------------------------|--|
| COM | Links de comunicación |
| MERCADOS DE ENERGÍA | |
| MKT | Simulaciones de mercados de energía |
| DR | Respuesta de la demanda por consumidores y productores |
| FUNCIONES GENERALES Y ESPECIALES | |
| AMB | Modelado basado en agentes |
| GUI | Interfaz gráfica con el usuario |
| GNE | Editor gráfico de la red |
| GIC | Corriente inducida geomagnéticamente |

En la Tabla 3, se enuncian las funcionalidades de diez simuladores de SEPs disponibles de forma libre en la web dividiéndose en 3 subgrupos, el primer subgrupo compuesto por los dos de los simuladores más antiguos proyectados para el análisis en estado estático y dinámico de SEPs que son UWPFLOW y TEFTS creados en el año de 1996 en la Universidad de Waterloo, Ontario, Canadá cuyo programa es escrito en lenguaje C, y dos versiones para DOS (16-bit) y UNIX que están disponibles. El segundo grupo de software presentado, lo conforman cuatro programas (MatPower, PSAT, IPSYS y MatDyn) descritos en ambiente MatLab, entre los que PSAT sobresalta debido a que es uno de los más completos disponibles de forma gratuita con interfaz gráfica y editor gráfico de la red en Simulink. El tercer grupo de software presentado compuesto por cuatro software (AMES, InterPSS, OpenDSS y Gridlab-D) va más allá de la simulación pura de SEPs permitiendo abarcar flujos de potencia en redes de distribución, simulaciones de mercados de energía, respuestas de la demanda por consumidores y productores, modelado basado en agentes entre otras características [17].

2.2. REVISIÓN ESPECÍFICA, SIMULADORES DE MICRO-REDES

Debido a que el enfoque principal de las herramientas de simulación va direccionado a la simulación de micro-redes integradas con la red eléctrica de distribución, los tres últimos software serán tenidos en cuenta en el momento de seleccionar el software que permitirá realizar la comparación cualitativa de diferentes parámetros.

Cabe recalcar que existen otro tipo de software, que al igual que los software mencionados anteriormente, se pueden encontrar de forma gratuita cumpliendo con características de modelado de micro-redes; como es el caso de OpenSG, pero debido a que los software que más se emplean en el ámbito investigativo son GridLab-D, OpenDSS e InterPSS, se enfocará un estudio más profundo para así poder determinar cuál de estos permitirá realizar la comparación propuesta para el presente proyecto.

2.2.1. Gridlab-D. Gridlab-D es un entorno de simulación que permite integrarse con diferentes gestores de datos y herramientas de análisis, este software maneja un algoritmo avanzado que puede determinar el estado de millones de dispositivos independientes, los cuales son traducidos en múltiples ecuaciones diferenciales que soluciona solo a nivel local en estado y tiempo.

Gridlab-D es un software que fue desarrollado por el Departamento de Energía de EE.UU. en el Pacific Northwest National Laboratory en colaboración con la industria y el mundo académico. Este permite la simulación de sistemas de distribución que permite incorporar el más avanzado modelado con algoritmos de alto rendimiento, junto con modelos de automatización de sistemas de distribución y herramientas de integración de software para usuarios de otras plataformas de análisis de sistemas de potencia, ofreciendo un mejor uso final [14] [15].

Gridlab-D cuenta con diferentes módulos de trabajo que permiten integrar diferentes opciones y características que mejoran su desempeño. Los módulos más empleados para simular micro-redes, son el modulo tape, el módulo residencial que permite modelar objetos específicos del hogar, el módulo power flow encargado del cálculo de flujos de carga y el módulo generators que se encarga de realizar el análisis de energías renovables contando con elementos de generación distribuida como paneles solares, turbinas eólicas, inversores, almacenadores de energía, generadores diesel, microturbinas y rectificadores[17] [20].

Para la generación de energía solar, Gridlab-D cuenta con un avanzado modelo de simulación, el cual permite ingresar parámetros como eficiencia, área del panel, ángulos de inclinación entre otros. Para la turbina eólica, Gridlab-D cuenta con varios modelos de turbinas eólicas, las más empleadas para simular micro-redes son las turbias de inducción y de sincronismo que van desde pequeñas potencias hasta grandes potencias, lo cual le permite al usuario escoger el más acorde a su necesidad [20],[16].

Otros módulos de simulación que Gridlab-D posee son [17], [18]:

- Flujo de carga para evaluar la obtención de energía obtenida.
- Equipos de uso final y control.
- Gestión de la demanda en tiempo real.
- Recopilación de datos sobre toda la extensión del sistema y la gestión de condiciones de frontera incluyendo el tiempo y los límites eléctricos.

➤ Ventajas:

- Alto nivel de precisión.
- Fácil adaptación a otros módulos y sistemas.

- Maneja un rango de tiempo superior que va desde 1 segundo hasta varios años.
- Capacidad de funcionar de manera eficiente en múltiples núcleos y máquinas multiprocesador.

Gridlab-D incluye un amplio conjunto de herramientas para construir, gestionar estudios y analizar los resultados [19]:

- Herramientas de modelado basadas en la información de fabricantes que permiten crear modelos detallados de las nuevas tecnologías de uso final, recurso energético distribuido, automatización de la distribución, la interacción y evolución de mercados minoristas.
- Herramientas de creación y validación de estructuras de tasas de cambio, que examinan la reacción de los consumidores, verifican la interacción, dependencia de programas con otras tecnologías y mercados mayoristas.
- Herramientas de recolección de datos para permitir una amplia variedad de análisis.

Tabla 4. Resumen Ventajas y Desventajas Gridlab-D

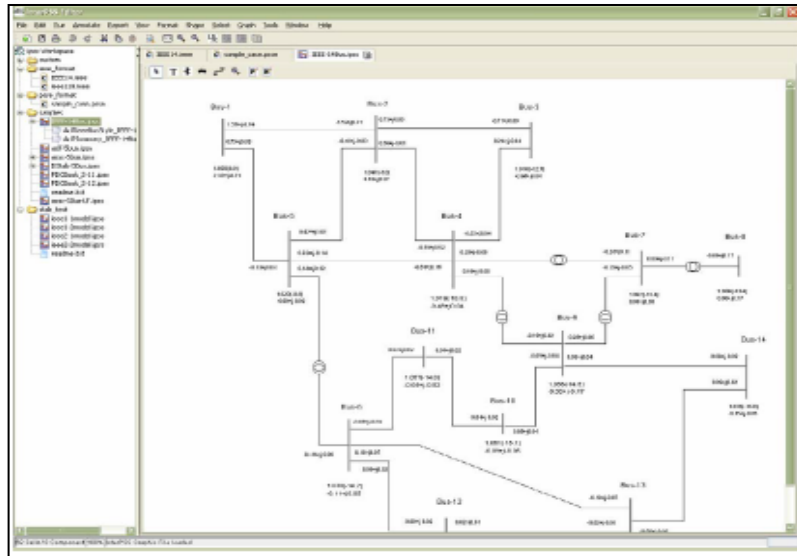
| GRIDLAB-D | |
|---|---|
| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
| Alto nivel de precisión | No cuenta con una interfaz que facilite su manejo |
| Fácil adaptación a otros módulos y sistemas | |
| Rangos de tiempo superiores, de un segundo hasta un año | |
| Modelado de herramientas de uso final, recursos energéticos, automatización y mercados minoristas | |
| Permite el ingreso a cada usuario de datos propios | Algunos de sus módulos internos no se encuentran |

| GRIDLAB-D | |
|---|--------------------------------|
| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
| En el modelo solar, permite ingresar datos tales como ángulo de inclinación, eficiencia, área entre otros. | desarrollados en su totalidad. |
| En el modelo de la turbina, cuenta con varias opciones de turbinas eólicas (BERGEY_10KW, GE_25MW, VESTAS_V82, GENERYC_SYNCH_SMALL, entre otras) | |

2.2.2. Interpss. InterPSS (Internet Based Tecnology Power System Simulator) es un proyecto en desarrollo de software libre y abierto. InterPSS se distingue por su arquitectura de sistema abierto y débilmente acoplado. Esta arquitectura permite que los componentes desarrollados por otro software sean fácilmente conectados a InterPSS para aumentar su funcionalidad, e igualmente importante, permite que sus componentes se integren en otro sistema de software [20], [21].

InterPSS cuenta con un editor gráfico como lo muestra la Figura 2., contiene un espacio de trabajo con un explorador de proyectos que permite manejar múltiples proyectos al tiempo, lo que le permite al usuario manejar de manera paralela varios trabajos. Un ejemplo de esto, es la realización de un proyecto de estudio de flujos de carga, mientras se ejecuta una simulación de estabilidad transitoria (que puede tardar mucho) [22].

Figura 2. Editor Gráfico InterPSS



Fuente: Elistas.net. Editor Gráfico InterPSS. [en línea] citado 15 de enero 2015, disponible en: <http://www.elistas.net/lista/electric/archivo/indice/10981/msg/13658>

Otro ejemplo es que el usuario puede crear un proyecto, dibujando un diagrama de una sola barra y al mismo tiempo introducir datos. Después de ejecutar un análisis, para el ejemplo de flujos de carga, el resultado (tensión de barra, potencia compleja $P + JQ$) puede ser anotado en el diagrama de una barra. El editor también tiene un sistema de información integrado, donde el usuario puede generar diferentes tipos de informes de análisis de demanda.

Tabla 5. Resumen Ventajas y Desventajas InterPSS

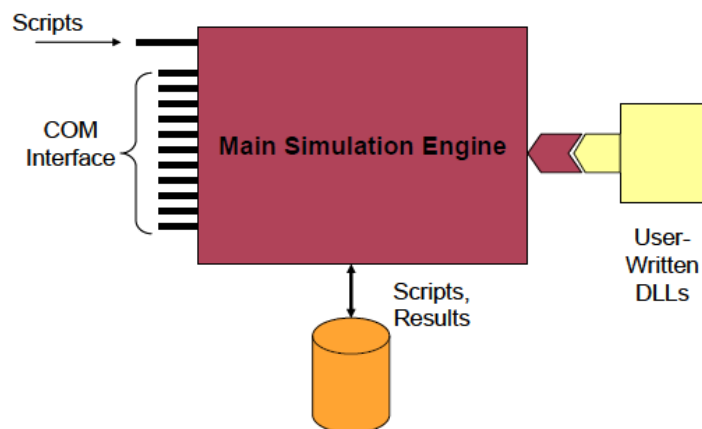
| INTERPSS | |
|--|--|
| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
| Es adaptable con otros software | En estudios de micro-redes, InterPSS no ha desarrollado en totalidad sus componentes |
| Posee una interfaz gráfica | |
| Permite manejar múltiples tareas al mismo tiempo | |

2.2.3. Open DSS. OpenDSS es una aplicación de software de código abierto desarrollado originalmente por Electrotek Concepts en 1997. Una de las razones detrás del desarrollo de esta herramienta fue el cálculo de armónicos e interarmónicos en la red de distribución eléctrica[27].

Más tarde se agregaron nuevos módulos, como el análisis de Monte Carlo y simulaciones anuales. Ya En 2004, el software fue comprado por el Electric Power Research Institute (EPRI) con el fin de tener una herramienta para simular la automatización avanzada y la modernización de las redes de energía. Fue con esto en mente que el EPRI decidió hacer el código fuente disponible de forma gratuita en línea en el sitio SourceForge.net [24].

OpenDSS funciona por comandos de línea con su propia consola. También está diseñado para ser utilizado con Matlab o Excel. Está programado en lenguaje Delphi (Pascal orientado a objetos) y fue diseñado de tal manera que permite ser integrado en la aplicación de diferentes software a través de una interfaz COM (Component Object Model), como se muestra en la Figura 3 [25].

Figura 3. Interfaz de OpenDSS de simulación para otros programas



Fuente: Sourceforge. <http://sourceforge.net/projects/electricdss/>

OpenDSS es un software que realiza análisis basado en frecuencia y no permite realizar análisis en tiempo, por lo cual no es una herramienta para el análisis de estados transitorios. Además de lo anterior OpenDSS no es software tradicional en el análisis de flujos de cargas, debido a que no utiliza ningún tipo de algoritmo como Newton-Raphson en la solución de sistemas no lineales, por el contrario, él software resuelve el circuito mediante el uso de una matriz de impedancia, de acuerdo con EMTP, y con un método de inyección de corriente particular, lo que le permite encontrar el voltaje y la corriente en cada nodo de circuito con muy pocas iteraciones [25].

OpenDSS permite definir los diferentes elementos de la red de distribución eléctrica: líneas, cables, condensadores, reguladores de voltaje, transformadores y cargas. Puede resolver circuitos trifásicos desequilibrados y hacer simulaciones teniendo en cuenta la impedancia de los transformadores de distribución. Otra importante característica de este software es que si los datos geográficos están integrados, el software puede dibujar la forma de la red de distribución eléctrica.

A continuación, se enuncian algunos de los problemas o casos en los que OpenDSS es empleado [18]:

- Cálculo de las pérdidas en un sistema de recogida de parques eólicos, pues estas varían de acuerdo a la potencia suministrada por las turbinas de viento, que oscilan con el tiempo.
- Cálculo del efecto de una nube que pasa a través de una planta de energía solar, Cuando las nubes pasan en una zona con paneles fotovoltaicos, la generación de electricidad se interrumpe por unos momentos (desde unos pocos segundos a unos pocos minutos). Si se conocen estos datos de variación, OpenDSS puede ayudar fácilmente para determinar la caída de tensión en el barraje.

- Las capacidades de análisis de OpenDSS permiten evaluar el impacto de la conexión de vehículos eléctricos a las redes eléctricas [26].

Tabla 6. Resumen Ventajas y Desventajas OpenDSS

| OPEN-DSS | |
|---|--|
| VENTAJAS | DESVENTAJAS |
| Evaluar impactos de conexión de vehículos eléctricos a la red | No permite el ingreso de datos externos al sistema, lo que dificulta la simulación con datos propios |
| Análisis de corto circuito mediante el método de monte Carlo | |
| Permite determinar la caída de voltaje presente en una planta solar cuando una nube pasa por ella | |
| Calculo de pérdidas en sistemas eólicos, por variaciones de la velocidad del viento | |
| Cuenta con una interfaz que facilita su manejo | |

2.3. SELECCIÓN DE SOFTWARE

Descritas las características operativas de cada uno de los software y teniendo en cuenta que la selección del mismo se debe hacer en base a las necesidades de cada proyecto, Gridlab-D se selecciona como el software idóneo para realizar la comparación de algunos de los componentes que integran la micro-red.

La selección de este software se basa principalmente en las características únicas que éste posee, siendo la principal de ellas el permitir realizar un análisis de la micro-red con datos climáticos propios. Además de esto, contiene avanzados modelos de equipos de micro-redes tales como paneles solares, en el que permite

especificar datos como el ángulo de inclinación, área del panel, eficiencia, entre otros. Cuenta además con una amplia opción para modelar turbinas eólicas de diferentes potencias con opción de modelarlas como turbinas de inducción o turbinas síncronas

Gridlab-D cuenta con modelos de inversores, baterías, generadores diésel y diferentes formas para suplir energía y como se trata de un software que permite realizar la gestión de la demanda en tiempo real, los análisis que efectúa se asemejan al comportamiento real de los equipos instalados en una micro-red.

3. MODELOS MATEMÁTICOS EMPLEADOS PARA REALIZAR LA SIMULACIÓN DE LOS COMPONENTES DE UNA MICRO-RED

Los modelos matemáticos seleccionados en el presente proyecto de grado se basan en su análisis operativo individual, cada uno de ellos fue programado mediante la herramienta Matlab en donde se identificó su comportamiento ante los datos de radiación, velocidad del viento y temperatura medidos por el grupo de investigación GISEL de la Universidad Industrial de Santander en la zona del Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG).

Los modelos de generación solar y eólico presentados en los anexos, A y B respectivamente, fueron programados en Matlab y su resultado fue comparado con los modelos predeterminados en Gridlab-D. La comparación y selección de estos modelos se describen en el presente capítulo.

3.1. MODELOS MATEMÁTICOS DE ELEMENTOS GENERADORES

El software cuenta con tres elementos generadores que funcionan a partir de fuentes de energía renovables. Estos elementos son: paneles solares, turbinas eólicas y un generador a partir de biomasa. A continuación se muestran los modelos matemáticos de cada uno de ellos y los criterios de selección basados en su funcionamiento operacional.

3.1.1. Modelo del panel solar

MODELO MATEMÁTICO SELECCIONADO

El modelo matemático seleccionado para simular el comportamiento operacional de un sistema de paneles solares el cual se integró al software creado, se rige bajo datos de ingreso como radiación solar. Mediante estos datos, es posible establecer la potencia entregada en un rango de tiempo determinado y la eficiencia con que opera el conjunto de paneles solares [8], [27].

De los modelos matemáticos revisados en el anexo A, se seleccionó el modelo desarrollado por [8] el cual se presenta a continuación:

Para poder modelar los paneles solares es preciso conocer las constantes mostradas en la Tabla 7 [8], [27].

Tabla 7. Constantes requeridas para el modelo del panel solar

| | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Constante de Boltzman (k) | $1,318 \times 10^{-23}$ [J/K] |
| Temperatura de referencia (Tr) | 25 [°C] |
| Carga eléctrica del electrón (q) | $1,602 \times 10^{-19}$ [C] |

También es preciso conocer las especificaciones técnicas entregadas por cada fabricante, la cual se encuentra en las fichas técnicas de los equipos.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del panel solar

| | |
|-----------|--|
| V_{mpr} | Tensión de máxima potencia en STC ¹ |
| I_{mpr} | Corriente de máxima potencia en STC |
| V_{ocr} | Tensión de circuito abierto en STC |
| I_{Scr} | Corriente de cortocircuito en STC |

| | |
|---------------|--|
| N_s | Número de celdas del panel solar |
| I_{mp800} | Corriente de máxima potencia en NOCT ² |
| T_{NOCT} | Temperatura NOCT |
| α_{sc} | Coefficiente térmico porcentual de corriente de corto circuito |
| β_{oc} | Coefficiente térmico porcentual de tensión de circuito abierto |

Las siglas SCT y NOCT hacen referencia a las condiciones estándar de medición (Standar Test Conditions) y a la temperatura de operación nominal de la celda (Normal Operating Cell Temperature) respectivamente.

Conocidos estos datos, es posible obtener los siguientes parámetros:

Potencial térmico

$$V_T = \frac{n * k * (T_r + 273)}{q}$$

Tensión de circuito abierto normalizada:

$$V_{oc} = \frac{V_{ocr}}{V_T * N_s}$$

Factor de forma:

$$FF_o = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{1 + V_{oc}}$$

Potencia máxima nominal

$$P_{máxr} = V_{mpr} * I_{mpr}$$

Resistencia serie:

$$R_s = \frac{V_{ocr}}{I_{scr}} - \frac{P_{maxr}}{FF_o * I_{scr}^2}$$

Coefficiente térmico de corriente de máxima potencia:

$$\alpha_{mp} = \left(\frac{I_{mp800}}{0,8 * I_{mpr}} - 1 \right) * \left(\frac{1}{T_{NOCT} - T_r} \right)$$

Temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas

$$T_{cell} = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} G$$

Corriente de corto circuito en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$I_{SC} = I_{SCR} * \frac{G}{1000} * (1 + \alpha_{SC} * (T_{cell} - T_r))$$

Corriente de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$I_m = I_{mpr} * \frac{G}{1000} * (1 + \alpha_{mp} * (T_{cell} - T_r))$$

Tensión de circuito abierto en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V_{OC} = V_{OCr} * (1 + \beta_{OC} * (T_{cell} - T_r)) + V_T * N_s * \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_{SCR}}\right)$$

Tensión de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V_m = V_T * N_s * \ln\left(1 + \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \left(e^{\frac{V_{OC}}{V_T * N_s}} - 1 \right)\right) - I_m * R_s$$

Tensión del panel solar en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V = V_T * N_s * \ln\left(1 + \frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} \left(e^{\frac{V_{OC}}{V_T * N_s}} - 1 \right)\right) - I * R_s$$

Potencia real del panel solar en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

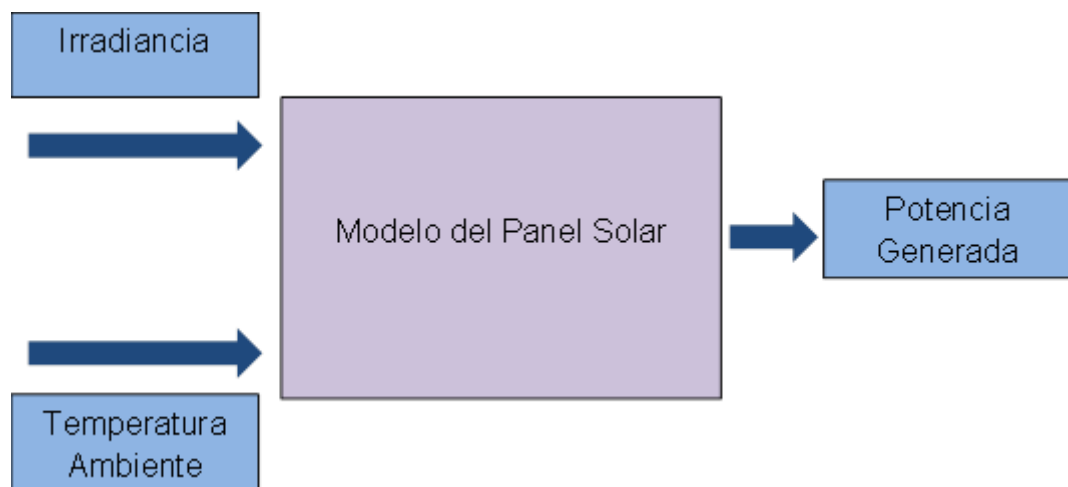
$$P_m = V_m * I_m$$

Eficiencia porcentual del panel solar:

$$\eta = \frac{P_{maxr}}{G * A} * 100\%$$

Los valores de T_{cell} , I_{SC} , I_m , V_{OC} , V_m , y P_m varían las 24 horas del día mostrando hora tras hora el comportamiento real de los parámetros del panel solar, los cuales normalmente difieren de los obtenidos bajo condiciones SCT.

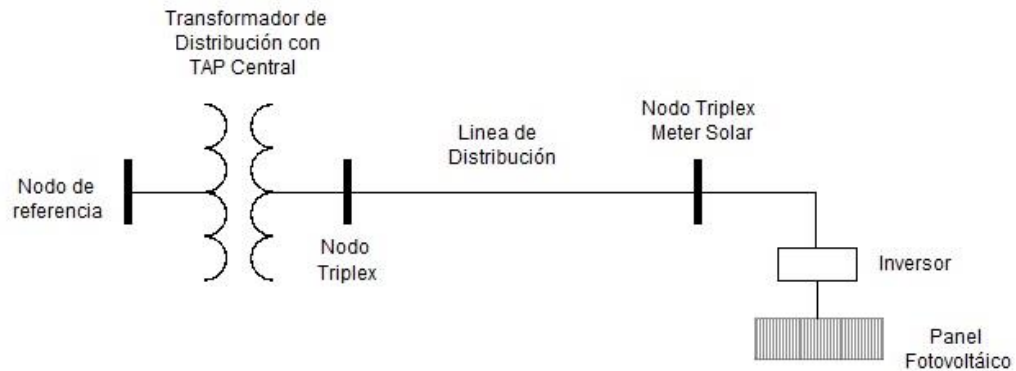
Figura 4. Diagrama de Bloques para el Panel Solar



Para seleccionar este modelo, se desarrolló la simulación en Gridlab-D de su modelo precargado y se compararon los resultados obtenidos por los modelos investigados y programados en Matlab.

La metodología empleada para esta selección comienza con el montaje de elementos que se muestran en el diagrama unifilar de la Figura 5.

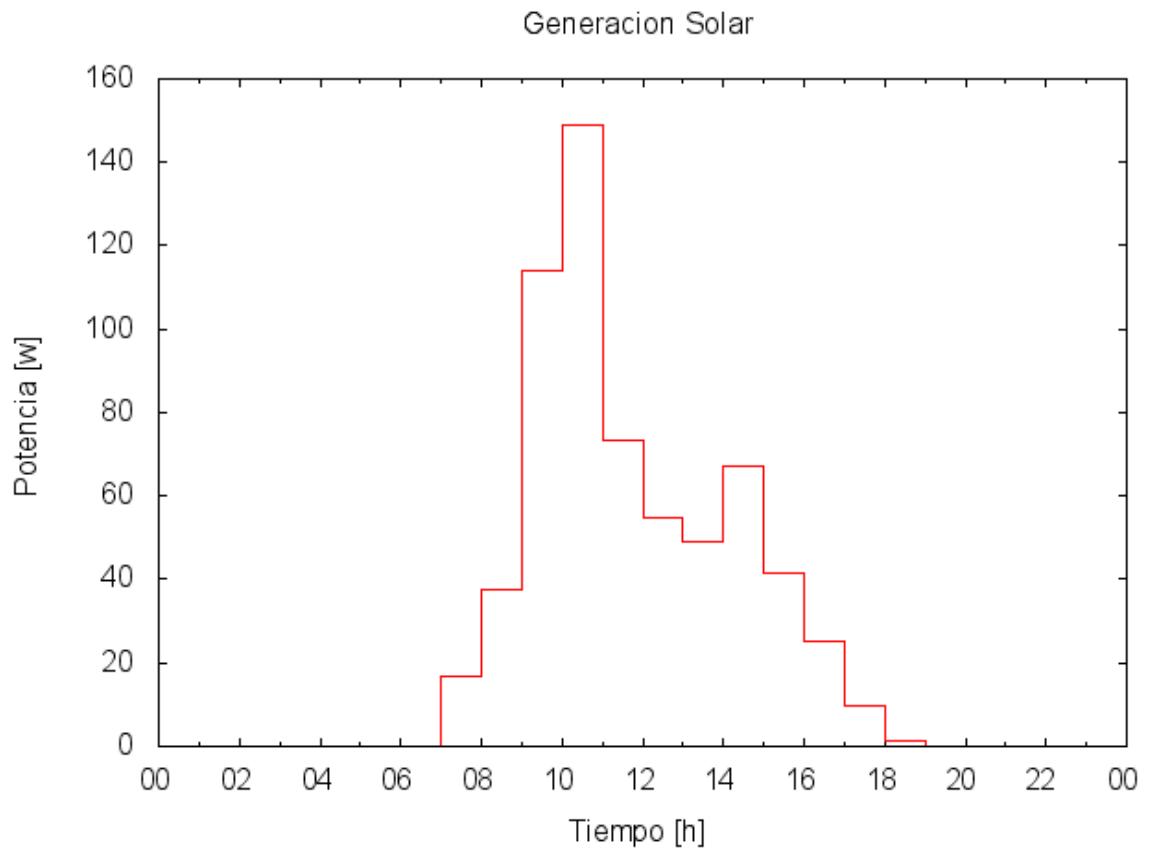
Figura 5. Diagrama Unifilar. Programación del panel solar en Gridlab-D



La Figura 5 ilustra el diagrama unifilar planteado para la programación del panel solar en el software de simulación de micro-redes Gridlab-D. El transformador de distribución de Tap Central permite realizar la conexión del nodo 1 (*nodo trifásico, ABC*) con el nodo 2 (*nodo triplex fase A-neutro*). Gridlab-D no permite realizar conexiones sin una línea física, fue necesario establecer una conexión entre el nodo 2 y el nodo de medición donde se encuentra conectado el panel y el inversor.

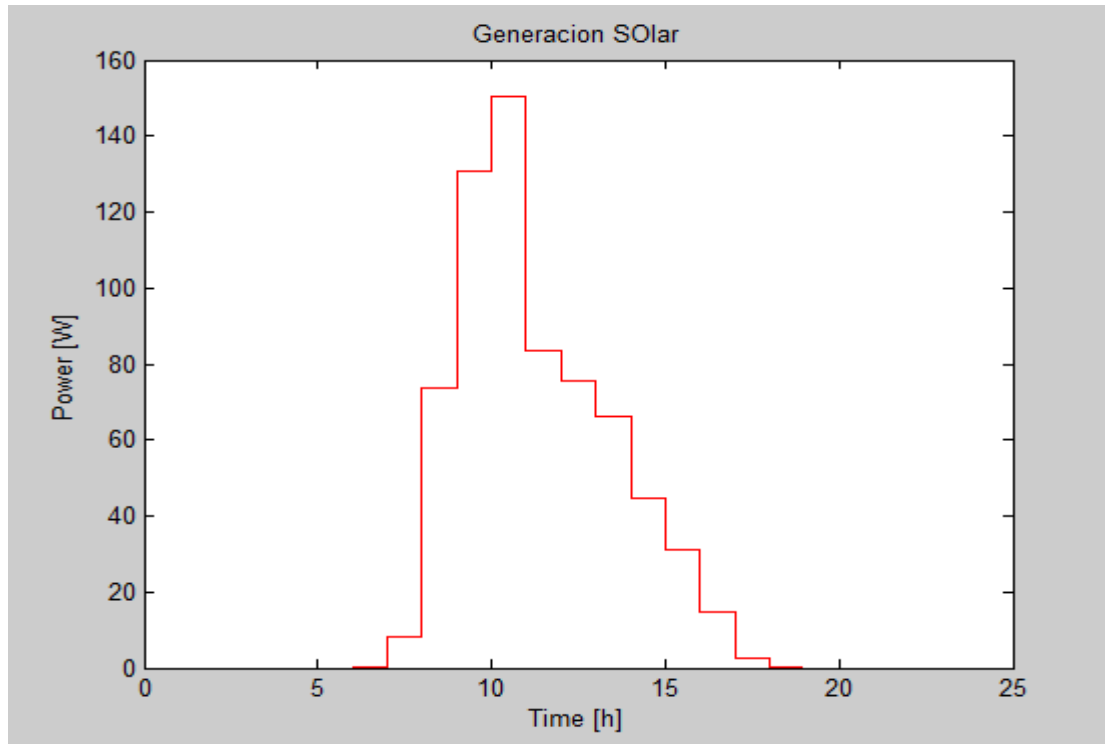
En el nodo de medición se genera un reporte en Excel que contiene los parámetros medidos en Corriente, Tensión y Potencia Real. La Figura 6 permite visualizar el resultado de potencia real obtenida en la simulación realizada con Gridlab-D, esta gráfica fue referencia para poder seleccionar el modelo a ser integrado en la interfaz gráfica.

Figura 6. Potencia entregada por un panel solar simulado en Gridlab-D



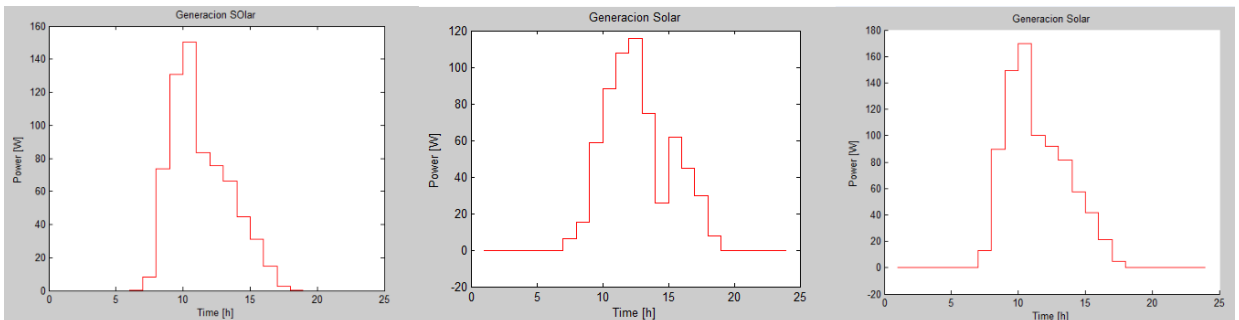
De acuerdo a los datos de potencia obtenidos en los diferentes modelos del anexo A, programados en Matlab, y realizando una comparación de los puntos obtenidos en la simulación de Gridlab-D se observó que el comportamiento del modelo 1 presentado en la Figura 7, es más próximo al observado por la gráfica de Gridlab-D.

Figura 7. Gráfica de potencia entregada por el panel seleccionado.



Las características de potencia de los dos modelos presentan una proporción diferente debido a que, aunque Gridlab-D permite modificar ciertos parámetros técnicos del tipo de panel, no permite acceder a sus modelo interno del panel, por tanto, se selecciona se realiza en base a la característica operacional del panel, sin tener en cuenta la cantidad de potencia suministrada.

Figura 8. Representación Gráfica de la Potencia Suministrada por los Modelos 1, 2 y 3 programada en Matlab



La Figura 8 ilustra los modelos 1, 2 y 3 del anexo A. Donde se puede visualizar que los modelos presentan un comportamiento similar en relación con los resultados obtenidos mediante la simulación realizada en Gridlab-D.

Debido a esta semejanza en los modelos, la selección del modelo adecuado para este proyecto, se basa en el cálculo de error, el cual se estima de la siguiente manera

$$\%Error(t) = \frac{P_{GLD}(t) - P_{MAT}(t)}{\text{máx}(P_{GLD}(\text{día}))}$$

Donde.

$\%Error(t)$, % de error estimado para hora t

$P_{GLD}(t)$, Potencia obtenida en GLD para la hora t

$P_{MAT}(t)$, Potencia obtenida en MATLAB para la hora t

$\text{máx}(P_{GLD}(\text{día}))$, máxima potencia obtenida en GLD durante el día

Tabla 9. Calculo de Errores Promedio de Modelos Solares

| POTENCIA DE GENERACIÓN PANEL SOLAR MODELO 1 [W] | | | | POTENCIA DE GENERACIÓN PANEL SOLAR MODELO 2 [W] | | | | POTENCIA DE GENERACIÓN PANEL SOLAR MODELO 3 [W] | | | |
|---|--------|-----------|---------|---|--------|-----------|---------|---|--------|-----------|---------|
| HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error | HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error | HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1 | -0,06 | 0,00 | 0,04 | 1 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 2 | -0,06 | 0,00 | 0,04 | 2 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 3 | -0,07 | 0,00 | 0,05 | 3 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 4 | -0,07 | 0,00 | 0,05 | 4 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5 | -0,07 | 0,00 | 0,04 | 5 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 6 | 0,06 | 0,22 | 0,11 | 6 | 0,17 | 0,22 | 0,03 | 6 | 0,00 | 0,22 | 0,15 |
| 7 | 8,19 | 16,80 | 5,77 | 7 | 12,98 | 16,80 | 2,56 | 7 | 6,06 | 16,80 | 7,20 |
| 8 | 73,75 | 37,64 | 24,22 | 8 | 89,81 | 37,64 | 35,00 | 8 | 15,48 | 37,64 | 14,86 |
| 9 | 130,77 | 114,19 | 11,12 | 9 | 149,47 | 114,19 | 23,66 | 9 | 58,58 | 114,19 | 37,30 |
| 10 | 150,63 | 149,10 | 1,03 | 10 | 169,51 | 149,10 | 13,69 | 10 | 88,31 | 149,10 | 40,77 |
| 11 | 83,63 | 73,25 | 6,96 | 11 | 100,45 | 73,25 | 18,24 | 11 | 107,82 | 73,25 | 23,18 |
| 12 | 75,53 | 54,94 | 13,81 | 12 | 91,76 | 54,94 | 24,69 | 12 | 115,98 | 54,94 | 40,94 |
| 13 | 65,97 | 49,26 | 11,20 | 13 | 81,37 | 49,26 | 21,53 | 13 | 75,00 | 49,26 | 17,26 |
| 14 | 44,55 | 67,24 | 15,22 | 14 | 57,46 | 67,24 | 6,56 | 14 | 25,62 | 67,24 | 27,91 |
| 15 | 31,04 | 41,44 | 6,98 | 15 | 41,76 | 41,44 | 0,22 | 15 | 61,82 | 41,44 | 13,67 |
| 16 | 14,55 | 25,21 | 7,15 | 16 | 21,48 | 25,21 | 2,50 | 16 | 44,86 | 25,21 | 13,18 |

| POTENCIA DE GENERACIÓN PANEL SOLAR MODELO 1 [W] | | | | POTENCIA DE GENERACIÓN PANEL SOLAR MODELO 2 [W] | | | | POTENCIA DE GENERACIÓN PANEL SOLAR MODELO 3 [W] | | | |
|---|--------|-----------|---------|---|--------|-----------|---------|---|--------|-----------|---------|
| HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error | HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error | HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error |
| 17 | 2,72 | 9,62 | 4,63 | 17 | 5,04 | 9,62 | 3,07 | 17 | 29,61 | 9,62 | 13,41 |
| 18 | 0,15 | 1,32 | 0,78 | 18 | 0,44 | 1,32 | 0,59 | 18 | 7,53 | 1,32 | 4,17 |
| 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 19 | -0,04 | 0,00 | 0,03 | 19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 20 | -0,05 | 0,00 | 0,03 | 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 21 | -0,05 | 0,00 | 0,03 | 21 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 22 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 22 | -0,05 | 0,00 | 0,04 | 22 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 23 | -0,05 | 0,00 | 0,04 | 23 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 24 | -0,05 | 0,00 | 0,04 | 24 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Error Promedio | | | 4,54 | Error Promedio | | | 6,36 | Error Promedio | | | 10,58 |

La Tabla 9 muestra el cálculo de error promedio realizado para cada una de las simulaciones realizadas, arrojando resultados numéricos en el cual se puede observar que el menor porcentaje de error obtenido es el referente al modelo 1, por tanto este modelo se selecciona ya que es el más acorde con las necesidades del presente proyecto.

3.1.2. Modelo del generador eólico. La potencia entregada por una turbina eólica se determina por la velocidad promedio del viento en un rango de tiempo establecido cuya medición se realiza en el sitio donde será instalada la turbina a la altura del eje de la misma. Para esto, se necesita realizar un ajuste de los datos de la velocidad del viento recolectados a una altura referenciada para convertirlos a la altura del eje de la turbina.

La metodología empleada para seleccionar el modelo apropiado para el presente proyecto, sigue la misma temática empleada en la selección del panel solar, donde primero se realiza el modelado de la turbina eólica en Gridlab-D y luego se compara su resultado con los datos obtenidos de la simulación de los modelos expuestos en el anexo B.

Modelo Matemático

Una característica importante de la velocidad del viento corresponde al cizallamiento del viento, el cual es las variaciones tanto en la velocidad como en la dirección del viento, en distancias relativamente cortas. El cizalle del viento puede separarse en una componente horizontal y en otra vertical.

En particular se tiene sobre el frente de velocidades en la dirección vertical, por su fuerte efecto sobre la producción de potencia (la estimación de la velocidad en función de la altura es clave al seleccionar lugares de emplazamiento de generación eólica). En términos matemáticos, la velocidad en función de la altura tiene la siguiente forma [35].

$$v(h) = v_0 * \frac{\ln \left[\frac{h}{z_0} \right]}{\ln \left[\frac{h_0}{z_0} \right]}$$

Dónde:

$v(h)$, Velocidad en función de una altura h .

h , Altura donde se desea conocer la velocidad [m].

v_0 , Velocidad medida de viento a una altura h_0 .

h_0 , Altura para la que se conoce la velocidad [m].

z_0 , Parámetro de rugosidad (depende del terreno) [m].

Las variaciones en la velocidad del viento se deben a los cambios en la posición de la tierra en el sistema solar, este aspecto puede ser un fuerte modelo estacional.

Estas variaciones de velocidad, se pueden caracterizar por medio de funciones de probabilidad, como las que se presentan a continuación, que remite a la distribución de Weibull y a la distribución de Rayleigh respectivamente

$$F(h) = \Delta v * \frac{k}{c} * \left[\frac{v}{c} \right]^{k+1} * e^{-\left[\frac{v}{c} \right]^2}$$

$$F(h) = \Delta v * \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} * e^{-\frac{\pi}{4} \left[\frac{v}{\bar{v}} \right]^2}$$

Dónde:

$F(h)$, Frecuencia de ocurrencia asociada a cada velocidad v .

Δv , Ancho de cada clase de velocidad.

k , Parámetro de forma [adm].

c , Parámetro de escala [m/s].

\bar{v} , Velocidad promedio en el sitio de medición.

Uno de los indicadores estadísticos más utilizados para describir la turbulencia es el mostrado a continuación:

$$I(\bar{v}) = \frac{\sqrt{\frac{1}{1-N} * \sum_{f=1}^N (v_l - \bar{v})^2}}{\bar{v}} = \frac{\sigma}{\bar{v}}$$

Dónde:

$I(\bar{v})$, Intensidad de turbulencia.

σ , Desviación estándar de la media de velocidad.

\bar{v} , Velocidad media del tiempo en zona de interés.

La potencia extraíble del viento, es la energía cinética de una masa m moviéndose a una velocidad v y se muestra así:

$$E_0(v, m) = \frac{1}{2}mv^2$$

$$P(v, \delta) = \frac{1}{2}\Delta m v^2 = \frac{1}{2}(\delta A v)v^2 = \frac{1}{2}(\delta A)v^3$$

Dónde:

E_0 , Energía cinética.

m , masa de aire.

P , Potencia contenida en la masa de aire.

v , Velocidad del viento.

δ , Densidad del aire.

Como se utiliza la energía del viento para mover una turbina, parte de la masa de aire se debe transmitir, por ello la velocidad que sale v_2 de la turbina debe ser menor que la velocidad que entra a la turbina v_1 .

A continuación se presenta de manera matemática la potencia extraíble, que corresponde a la diferencia entre las velocidades antes nombradas (v_1 y v_2) [36].

$$P_{12}(v_1, \delta) = \frac{1}{2}\Delta m_{12}(v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2}\delta A\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)(v_1^2 - v_2^2)$$

$$= \frac{1}{2}\delta A v_1^3 \left(\frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)\left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2}{2}\right)$$

Y la Generación eólica promedio es la siguiente:

$$cp = \frac{P_{med}}{P_{inst}} = \frac{E_T}{T * P_{inst}}$$

Dónde:

c_p , Factor de planta

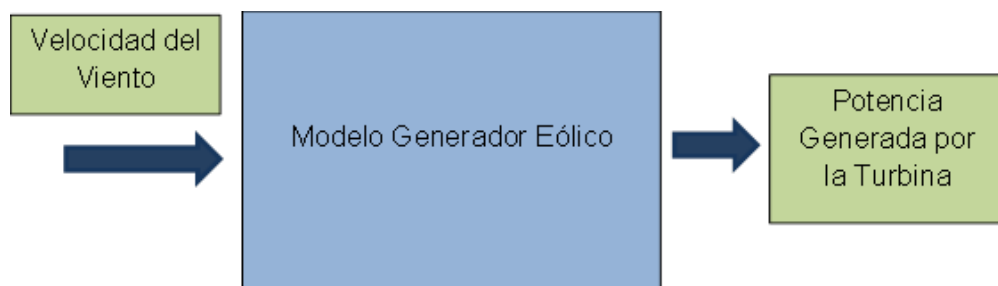
P_{med} , Potencia media de la central

P_{inst} , Potencia instalada en la central

E_T , Energía generada en un horizonte

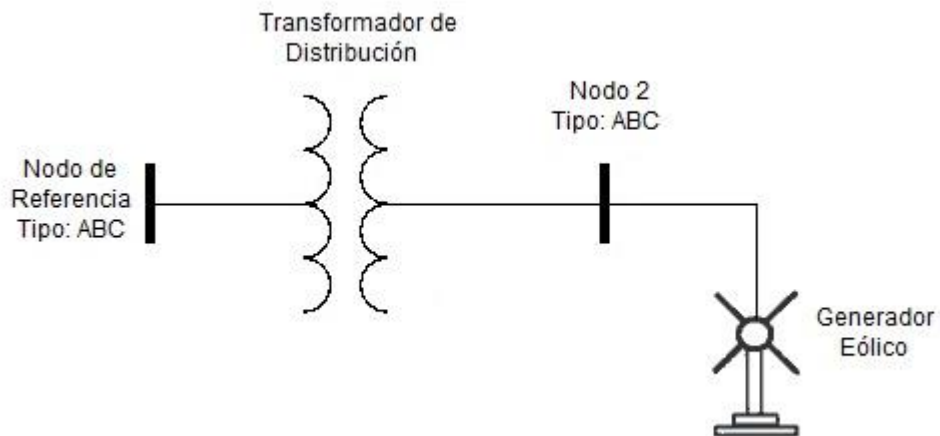
T , Horizonte de evaluación

Figura 9. Diagrama de Bloques Generador Eólico



Para poder crear la simulación en Gridlab-D, fue necesario seleccionar una turbina síncrona y el diagrama unifilar empleado se muestra en la Figura 10.

Figura 10. Diagrama Unifilar Generador Eólico en Gridlab-D



Los módulos empleados para la simulación del generador eólico son los mismos enunciados anteriormente, los resultados de la potencia suministrada por el

generador eólico simulados en Gridlab-D son mostrados en la Figura 11 y la comparación de este resultado es hecha con las Figuras 12 y 13 donde se selecciona el modelo a programarse en la interfaz gráfica basados en los mismos criterios empleados para la selección del panel solar.

Figura 11. Potencia suministrada por el generador eólico simulado en Gridlab-D

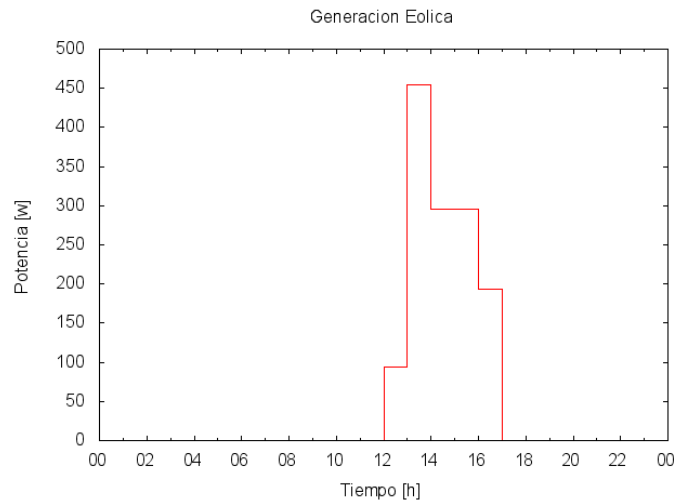


Figura 12. Potencia suministrada por el generador eólico modelo seleccionado.

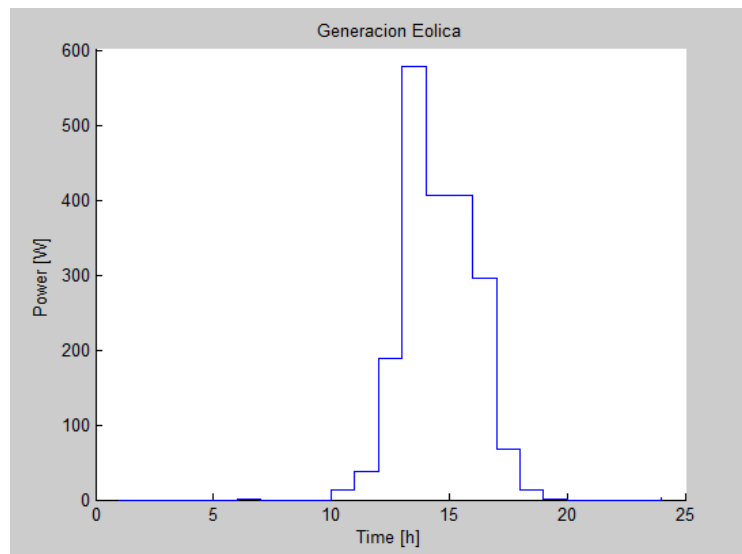
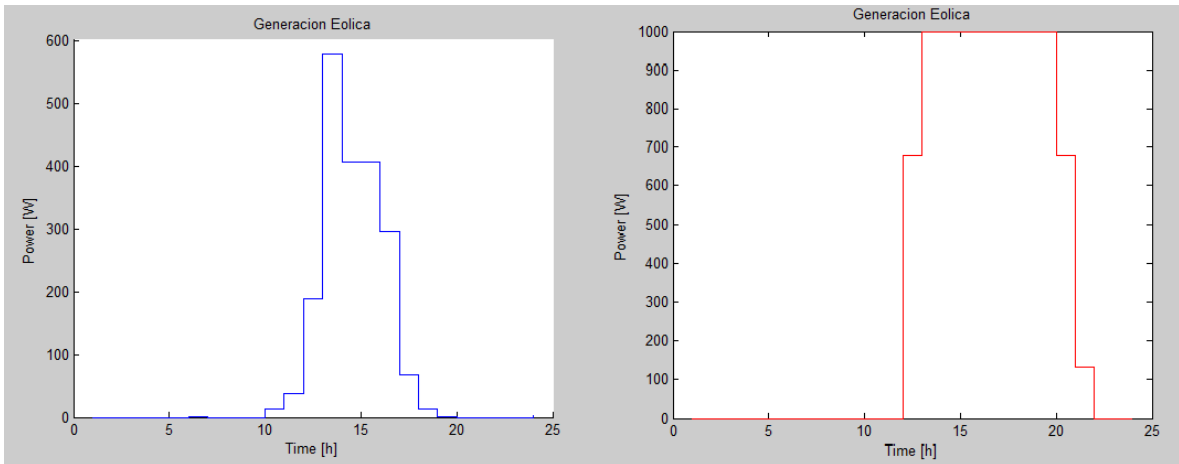


Figura 13. Representación Gráfica de la Potencia Suministrada por los Modelos 2 y 1 en Matlab



El comportamiento expuesto en la Figura 13, similar al comportamiento del generador eólico programado en Gridlab-D. La Tabla 10 permite observar el error promedio existente en los datos de los dos modelos programados en Matlab con relación a los datos obtenidos en la simulación en Matlab. La metodología empleada para el cálculo del error es la misma que se utilizó para el error en los datos de la potencia generada por los paneles solares.

Tabla 10. Calculo de Errores Promedio de los Modelos Eólicos

| POTENCIA DE GENERACIÓN EÓLICA MODELO 1 [W] | | | | POTENCIA DE GENERACIÓN EÓLICA MODELO 2 [W] | | | |
|--|--------|-----------|---------|--|--------|-----------|---------|
| HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error | HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0,41 | 0 | 0,09 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 7 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 9 | 0 | 0 | 0 |

| POTENCIA DE GENERACIÓN EÓLICA MODELO 1 [W] | | | | POTENCIA DE GENERACIÓN EÓLICA MODELO 2 [W] | | | |
|---|--------|-----------|------------|---|--------|-----------|------------|
| HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error | HORA | MATLAB | GRIDLAB-D | % Error |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 10 | 13,95 | 0 | 3,07 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 11 | 37,04 | 0 | 8,15 |
| 12 | 678,9 | 94,07 | 128,65 | 12 | 189,2 | 94,07 | 20,93 |
| 13 | 1000 | 454,58 | 119,98 | 13 | 578,71 | 454,58 | 27,31 |
| 14 | 1000 | 295,58 | 154,96 | 14 | 406,45 | 295,58 | 24,39 |
| 15 | 1000 | 295,58 | 154,96 | 15 | 406,45 | 295,58 | 24,39 |
| 16 | 1000 | 193,02 | 177,52 | 16 | 296,3 | 193,02 | 22,72 |
| 17 | 1000 | 0 | 219,98 | 17 | 67,62 | 0 | 14,88 |
| 18 | 1000 | 0 | 219,98 | 18 | 13,95 | 0 | 3,07 |
| 19 | 1000 | 0 | 219,98 | 19 | 0,41 | 0 | 0,09 |
| 20 | 1000 | 0 | 219,98 | 20 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 678,9 | 0 | 149,35 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 133,68 | 0 | 29,41 | 22 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 24 | 4,63 | 0 | 1,02 |
| Error Promedio | | | 74,782 | Error Promedio | | | 6,25 |

La diferencia entre el comportamiento de los modelos matemáticos programados en Matlab puede ser ocasionada porque Gridlab-D maneja diferentes tipos de turbinas que están predeterminadas por el software, de las cuales se utilizaron los modelos de turbina de baja potencia y se observó un comportamiento similar del modelo 2 de Matlab con la turbina de IND_SMALL de Gridlab-D.

3.1.3. Modelo de generación a partir de biomasa

Modelo matemático seleccionado

Este modelo fue desarrollado en base al Modelo Colombiano de Biogás versión 1.0 [34], el cual emplea una metodología para poder estimar la cantidad de biogás

capturado en rellenos sanitarios y posee características específicas para Colombia.

Para poder determinar el flujo de biogás esperado por año, es necesario conocer diferentes características del relleno, las cuales, dependiendo de las respuestas que los usuarios suministren, determinarán una serie de parámetros que llevarán a una mejor estimativa.

La ecuación que estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año se enuncia a continuación:

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2 * k * L_0 * \left[\frac{M_i}{10} \right] * (e^{-kt_{ij}}) * (MCF)$$

Tabla 11. Siglas empleadas en la ecuación de la estimativa de generación de biogás

| | |
|-------------|---|
| QLFG | Flujo de biogás máximo esperado (m3/año) |
| i | Incremento en tiempo de 1 año |
| n | Cantidad de años de recolección de residuos |
| j | Incremento de tiempo en 0.1 años |
| k | Índice de generación de metano (1/año) |
| Lo | Generación potencial de metano (m3/Mg) |
| Mi | Masa de residuos dispuestos en el primer año |
| tij | Edad de las selecciones j de la masa de residuos Mi dispuestas en el año i (años decimales) |
| MCF | Factor de corrección de metano |

Cada una de las constantes que se enuncian en esta ecuación, dependen de diferentes condiciones. A continuación se mostrarán las condiciones y

variabilidades que estas podrán tener dependiendo de las características que el usuario determina.

ÍNDICE DE GENERACIÓN DE METANO k

Para poder determinar el índice de generación de metano para residuos orgánicos k , es necesario conocer la rapidez de degradación de dichos residuos los cuales se clasifican en categorías.

Tabla 12. Categorías de residuos orgánicos según el tipo de degradación

| CATEGORÍA | TIPO DE DEGRADACIÓN |
|-----------|--|
| 1 | Residuos de degradación muy rápida |
| 2 | Residuos de degradación moderadamente rápida |
| 3 | Residuos de degradación moderadamente lenta |
| 4 | Residuos de degradación muy lenta |

Además de conocer la velocidad de degradación de estos residuos, el valor de k varía en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde se está realizando la captación de los residuos. Se contará con la opción de categorizar el clima en el sitio de captación en una de las 5 regiones climáticas basadas en la precipitación anual media:

Tabla 13. Categorías de Climas

| CLIMA | PRECIPITACIÓN |
|----------------------|----------------------------|
| SECO | < 500 [mm/año] |
| MODERADAMENTE SECO | Entre 500 y 900 [mm/año] |
| MODERADAMENTE HÚMEDO | Entre 1000 y 1499 [mm/año] |
| HÚMEDO | Entre 1500 y 1999 [mm/año] |
| EXCESIVAMENTE HÚMEDO | > 2000 [mm/año] |

Las categorías de clima para las ciudades más grandes en Colombia son:

Tabla 14. Clima en las principales ciudades de Colombia

| PRINCIPALES CIUDADES | TIPOS DE CLIMA |
|----------------------|-----------------------------|
| BOGOTÁ | Moderadamente Seco |
| MEDELLÍN | Húmedo |
| CALI | Moderadamente Húmedo |
| BARRANQUILLA | Moderadamente Seco |
| CARTAGENA | Moderadamente Seco / Húmedo |
| BUCARAMANGA | Moderadamente Húmedo |

Ya determinadas la caracterización de la rapidez de degradación de los residuos orgánicos y el clima donde estos se encuentran, los valores del Índice de Generación de Metano k son:

Tabla 15. Índice de Generación de Metano k

| CLIMA | CATEGORÍA DE RESIDUOS | | | |
|----------------------|-----------------------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Excesivamente Húmedo | 0.4 | 0.17 | 0.07 | 0.035 |
| Húmedo | 0.34 | 0.15 | 0.06 | 0.03 |
| Moderadamente Húmedo | 0.26 | 0.12 | 0.048 | 0.024 |
| Moderadamente Seco | 0.18 | 0.09 | 0.036 | 0.018 |
| Seco | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |

CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS Y GENERACIÓN POTENCIAL DE METANO L_0

El valor de la generación potencial de metano de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos

cuando esta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario. A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de Lo . Las unidades de Lo están en metros cúbicos por tonelada de residuos (m^3/Mg). Los valores teóricos de Lo varían entre 6.2 y $270 m^3/Mg$ de residuos.

Los valores de la generación potencial de metano por tipo de residuo están derivados de la caracterización de residuos de 57 ciudades que representan 21 departamentos. El promedio de la caracterización de los residuos fue calculado para cada departamento.

Los valores de Lo utilizados son mostrados en la tabla 16.

Tabla 16. Valores de la Generación Potencial de Metano (Lo) por Tipo de Residuo

| TIPOS DE RESIDUOS | GENERACIÓN POTENCIAL DE METANO |
|--------------------|--------------------------------|
| Alimenticios | 70 |
| Jardinería | 93-134 |
| Papel | 186 |
| Madera y Paja | 200 |
| Textiles & Pañales | 112 |

FACTOR DE CORRECCIÓN DE METANO –MCF

El factor de corrección de metano es un ajuste de la estimación de la generación de biogás que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. Este varía dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario como lo definen las prácticas de manejo. En sitios con manejo, se asume que la degradación es anaeróbica en los residuos. En sitios con

condiciones menos apropiadas para degradación anaeróbica, el MCF será menor para reflejar las condiciones anaeróbicas del sitio. Además de esto, los valores que puede tomar el MCF, depende de la profundidad de la recolección de residuos. La tabla 17 resume los valores de MCF aplicados por el modelo.

Tabla 17. Factor de Corrección de Metano (MCF)

| MANEJO DEL SITIO | PROFUNDIDAD < 5m | PROFUNDIDAD >= 5m |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| Sin Manejo | 0.4 | 0.8 |
| Con Manejo | 0.8 | 1.0 |
| Semi-aeróbico | 0.4 | 0.5 |
| Condición Desconocida | 0.4 | 0.8 |

La profundidad de residuos mayores a 5 metros promueve la degradación anaeróbica, en sitios menos profundos la degradación de los residuos es principalmente aeróbica. Un sitio con manejo está definido como un sitio que cuenta con la colocación controlada de los residuos y una o más de las siguientes condiciones: material de cobertura, compactación mecánica o conformación de residuos. Un sitio semi-aeróbico tiene colocación controlada de los residuos y todas las siguientes condiciones que puedan introducir aire en los residuos: material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviado, y sistema de venteo de biogás.

Enunciadas todas las características, el cálculo del flujo de biogás máximo esperado por año se convierte a la cantidad de flujo de biogás esperada por día y así se procede a realizar el cálculo de la energía eléctrica generada cuyo consumo de m³ de biogás por kWh es encontrado comúnmente como 0,7 m³/kWh. Esta energía es obtenida de la siguiente forma:

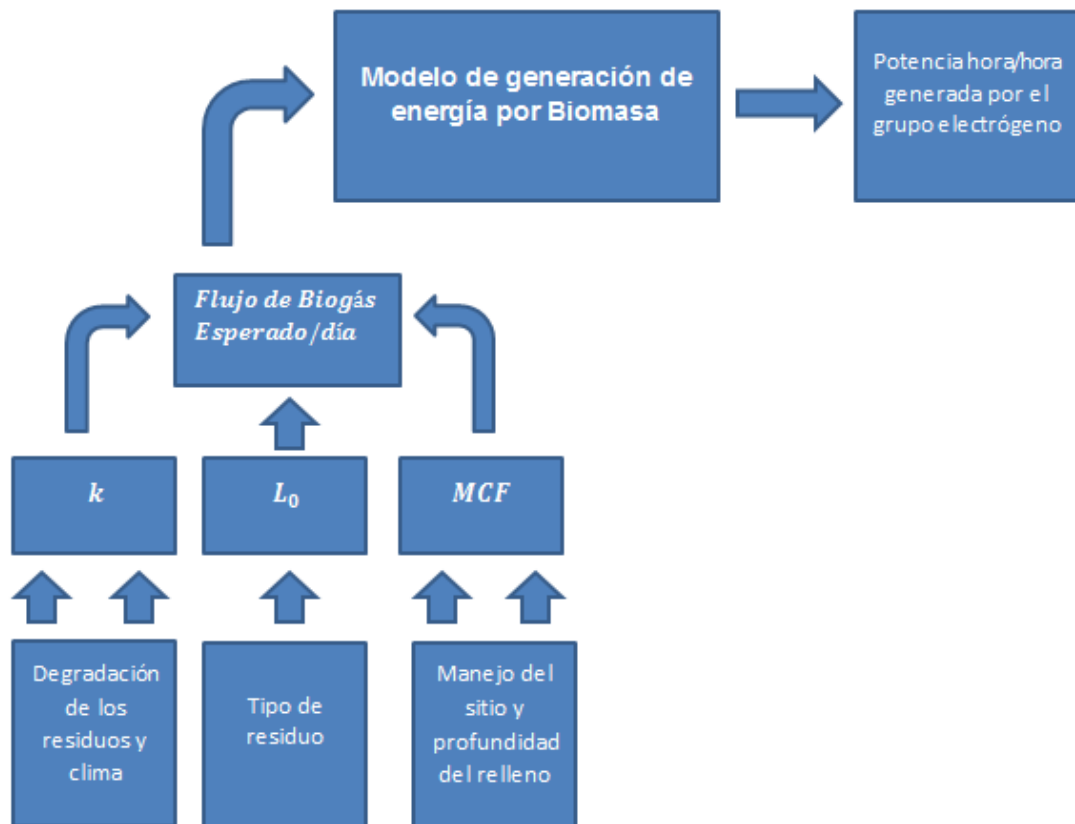
$$E_{gb} = \frac{Q_{LFGdia}}{0.7m^3/kWh}$$

Donde:

E_{gb} , es la energía generada a partir de la cantidad de biogás en kWh/día.

$Q_{LFGdía}$, es el biogás producido en m^3 por día.

Figura 14. Diagrama de bloques, Generador por Biomasa



3.2. MODELO MATEMÁTICO DE LOS ALMACENADORES DE ENERGÍA

El estado de operación de carga y descarga está descrito por las siguientes ecuaciones.

$$Q(t) = Q(t - 1) + [I(t) * \Delta t]$$

$$C(t) = \frac{1,67 * C_{NOMINAL}}{1 + 0,67 * \left(\frac{|I(t)|}{I_{NOMINAL}}\right)^{0,9}} * (1 + 0,005 * \Delta T)$$

$$I_{NOMINAL} = \frac{C_{NOMINAL}}{t_{NOMINAL}}$$

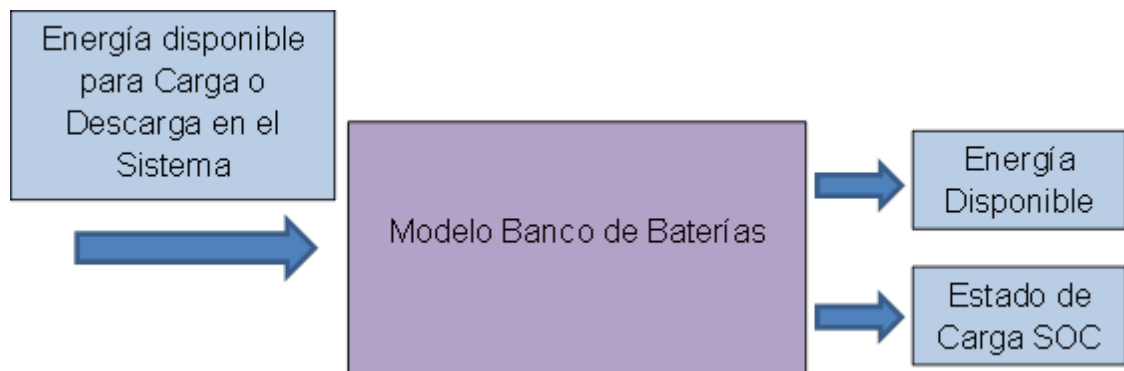
$$SOC_2 = SOC_1 + \frac{Q(t)}{C(t)}$$

$Q(t)$, Carga

SOC_2 , Estado de Operación de Carga

$C(t)$, Capacidad de la batería en un instante de tiempo.

Figura 15. Diagrama de Bloques, Banco de Baterías



Como se muestra en la Figura 15 para modelar las baterías se tomaron los parámetros de energía disponible en el sistema y el estado del banco de baterías, por ello se elige el segundo modelo presentado en esta investigación, pues comprende de una manera detallada la zona de carga y descarga de las baterías, lo cual es lo que se necesita en el desarrollo de este proyecto de grado.

No fue posible realizar la comparación del modelo de baterías seleccionado con el modelo de baterías de Gridlab-D debido a que, en el momento de realizar la simulación en Gridlab-D, el modelo presentaba características internas que alteraban el funcionamiento de las mismas cuando se ingresaba una carga variable. El sistema de almacenamiento por baterías fue seleccionado respetando los límites de potencia de entrega y abastecimiento para un conjunto de 4 baterías conectadas en serie a 60 A-h / 12 V cada una. La opción de aumento en el almacenamiento dependerá de la cantidad de conjunto de baterías en serie que el usuario ingrese en paralelo.

3.3. MODELO MATEMÁTICO DEL INVERSOR

El modelo del inversor se basa en una eficiencia (η) constante. Es decir para cualquier hora de estudio, independientemente de si el controlador de carga se encuentra operando a potencial nominal o no, la eficiencia será siempre la misma. Cabe recalcar que existen modelos cuya eficiencia varía de acuerdo a la potencia de trabajo y la potencia nominal, sin embargo, para el desarrollo de este proyecto no es necesario su estudio.

El modelo matemático del inversor se presenta de la siguiente manera [13]:

$$P_{si} = \eta_i * P_{ei}$$

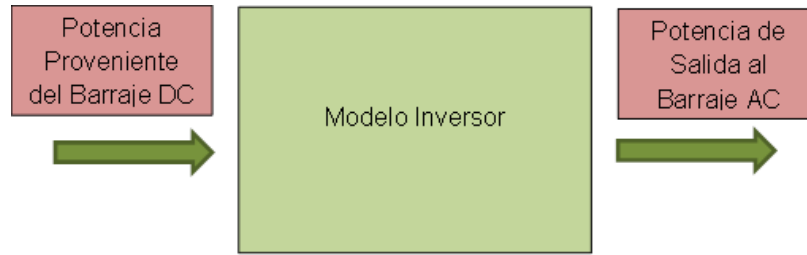
Donde:

P_{si} , Potencia de salida del inversor [W].

P_{ei} , Potencia de entrada al inversor [W].

η_i , Eficiencia del inversor.

Figura 16. Diagrama de bloques Inversor



3.4. MODELO MATEMÁTICO DEL CONTROLADOR DE CARGA

El modelo del controlador de carga se basa en una eficiencia (η) constante. Es decir para cualquier hora de estudio, independientemente de si el controlador de carga se encuentra operando a potencial nominal o no, la eficiencia será siempre la misma. El modelo matemático del controlador de carga se presenta de la siguiente manera [13]:

$$P_{sc} = \eta_c * P_{ec}$$

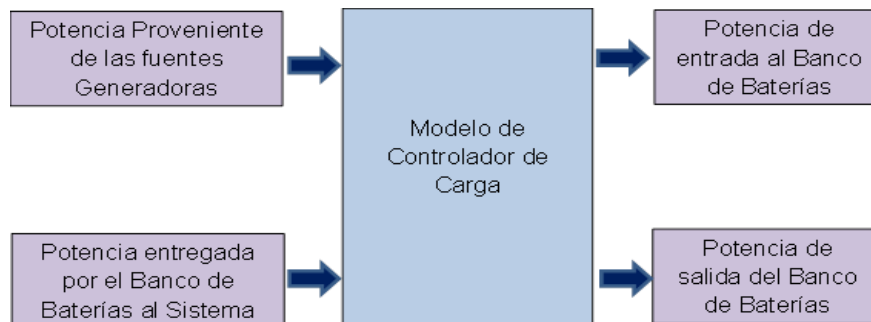
Donde:

P_{sc} , Potencia de salida del controlador de carga [W].

P_{ec} , Potencia de entrada al controlador de carga [W].

η_c , Eficiencia del controlador de carga.

Figura 17. Diagrama de Bloques Controlador de Carga



3.5. RESUMEN DE MODELOS SELECCIONADOS

Los modelos a integrarse en la interfaz gráfica se presentan en la Tabla 18

Tabla 18. Resumen modelos seleccionados.

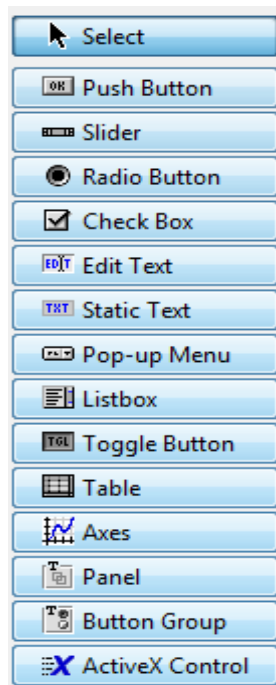
| Energía renovable | Fotovoltaico | Eólico | Biomasa | Baterías | Inversor | Controlador de Carga |
|------------------------------|---------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|
| Modelos especificados | Modelo 1 | Modelo 2 | Modelo 2 | Modelo 4 | Modelo Único | Modelo Único |

4. DESARROLLO DEL PROGRAMA BASE E INTEGRACIÓN A LA INTERFAZ GRÁFICA

Con el fin de darle un entorno visual agradable al usuario, se genera una interfaz gráfica, específicamente con el guide, el cual es un entorno de programación disponible en Matlab para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como visual basic o visual c++.

El GUI cuenta con un panel de funciones, en el cual se pueden encontrar botones como Push Buttons, Check Panel, Static Text Box, Pop-up menú y Axes, tal y como se muestra en la Figura 18.

Figura 18. Tablero de Botones GUI



La Figura 19 muestra el diseño de la interfaz gráfica presentada para este proyecto, seguida de una descripción de cada una de las funciones que en ella se encuentran.

Figura 19. Diseño de la Interfaz Gráfica

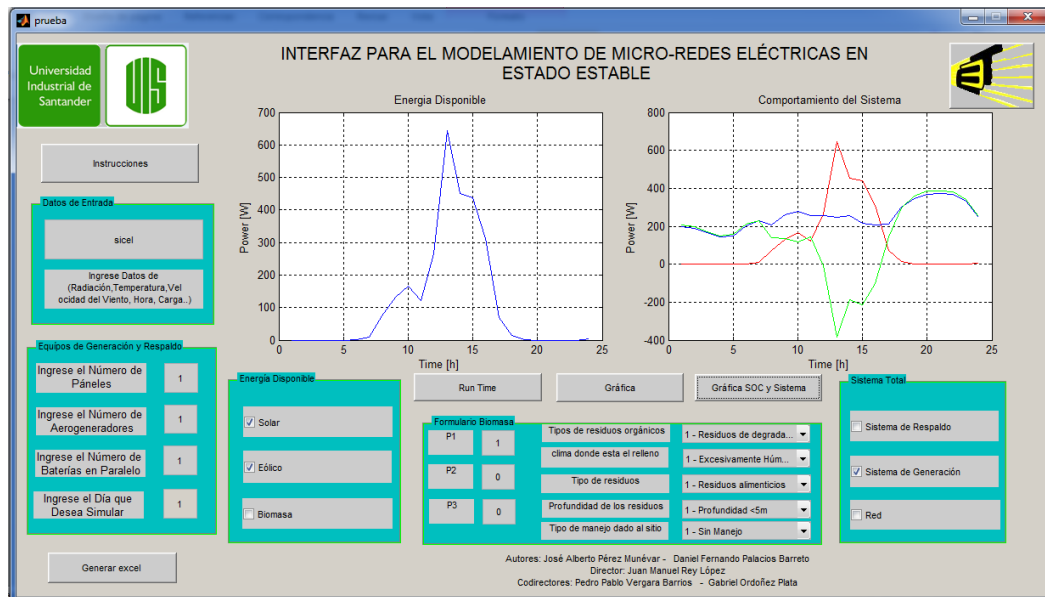


Tabla 19. Contenido Interfaz.

| DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES EMPLEADAS EN EL DESARROLLO DE LA INTERFAZ | | |
|--|----------------------------------|--|
| Tipo | Nombre | Función Desempeñada |
| Push Button | Instrucciones | Al presionarlo, despliega un archivo en formato PDF con las instrucciones de correcto uso del software |
| Panel | Datos de Entrada | Contiene un espacio donde se ingresan los datos y un texto con los tipos de datos |
| Edit Text | | Permite cargar el Excel que contiene los datos de entrada para la simulación |
| Static Text | | Permite visualizar una leyenda sobre algunos tipos de datos a ingresar |
| Panel | Equipos de Generación y Respaldo | Contiene los espacios donde se cargan el número de paneles, baterías etc. |

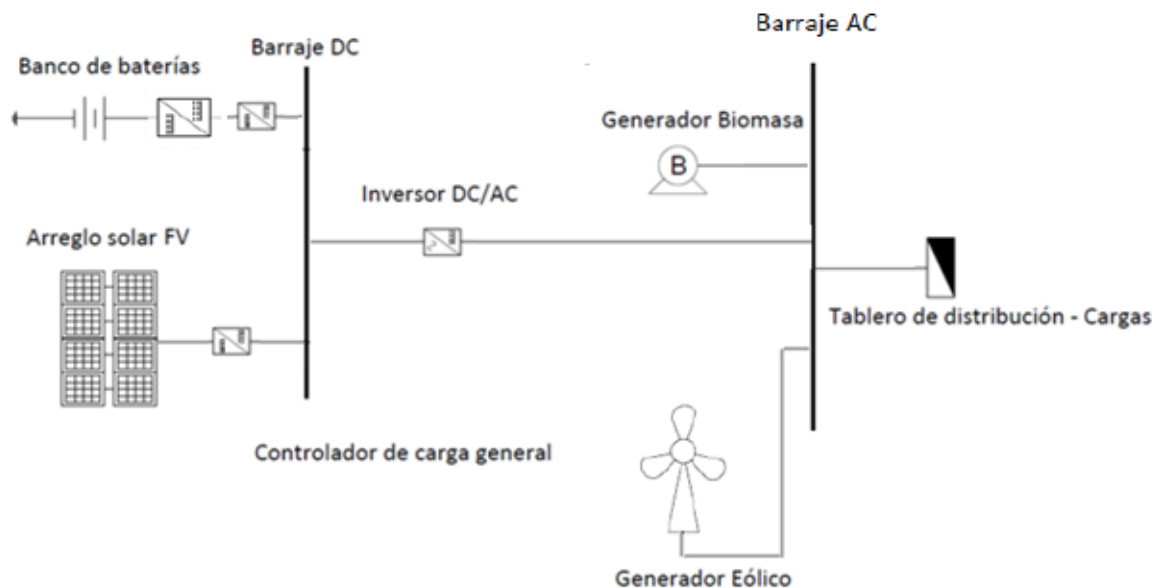
| DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES EMPLEADAS EN EL DESARROLLO DE LA INTERFAZ | | |
|--|------------------------|---|
| Tipo | Nombre | Función Desempeñada |
| Edit Text | | Permite cargar un dato numérico sobre el número de paneles, número de aerogeneradores, número de baterías, número de baterías en serie, respectivamente, ubicado en el panel "Equipos de Generación y Respaldo" |
| Static Text | | Permite visualizar una leyenda sobre el número de paneles disponibles, número de aerogeneradores, número de baterías en serie y número de baterías en paralelo, contenidos en el panel "Equipos de Generación y Respaldo" |
| Panel | Energía Disponible | Contiene los botones para modelar la energía renovables disponible |
| Check Box | Solar | Al ser activado, carga el modelo solar seleccionado para este proyecto |
| Check Box | Eólico | Al ser activado, carga el modelo eólico seleccionado para este proyecto |
| Check Box | Biomasa | Al ser activado, carga el modelo biomasa seleccionado para este proyecto |
| Panel | Sistema Total | Contiene los espacios donde se cargan el SOC(estado de carga), y donde se modela el sistema con respaldo |
| Check Box | Baterías | Al ser activado, carga el modelo de baterías seleccionado para este proyecto |
| Check Box | Sistema de Generación | Al ser activado, carga el modelo donde se realiza el análisis del sistema de generación, consumo y respaldo |
| Panel | Formulario Biomasa | Contiene los espacios para insertar de manera numérica las respuestas a las preguntas para modelar biomasa |
| Edit Text | | Permite cargar un dato numérico, el cual corresponde a las respuestas proporcionadas en el formulario de biomasa, P1, P2, P3 disponibles en el archivo instrucciones. |
| Static Text | | Contiene el orden de las preguntas hechas en el formulario de biomasa |
| Push Button | Run Time | Al presionarse, carga el vector que permite cargar los datos correspondientes a la energía disponible (sea solar, eólico, biomasa o combinaciones de estas) |
| Push Button | Grafica | Al presionarse, carga el código que permite graficar el comportamiento de la(s) energía(s) seleccionada |
| Push Button | Grafica SOC y Respaldo | Al presionarse carga el código que permite graficar el comportamiento de la(s) batería(s), que dependen del sistema de generación y de la carga del usuario |
| Axes | Axes1 | Muestra las gráficas correspondientes a las energías disponibles |
| Axes | Axes2 | Muestra las gráficas correspondientes al comportamiento del sistema y el SOC de las baterías |
| Pop-up Menú | Opciones desplegadas | Permite seleccionar las opciones desplegables para determinar las características del relleno empleado para generación por biomasa |

En la Tabla 19, se pueden observar las funciones y tipos de botones que se utilizan en el desarrollo de esta interfaz gráfica, la cual permite a partir de modelos matemáticos previamente programados y cargados en el código fuente del presente proyecto, permite visualizar la generación de energía solar, eólica y biomasa de forma gráfica, así como el SOC(estado de carga) de las baterías y el comportamiento de un sistema general que cuenta con generación, carga y respaldo, todo esto modelado a partir de los datos de ingreso proporcionados por el usuario final.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados de esta herramienta, se realiza mediante un ejemplo de aplicación donde se propone la simulación de un caso específico y se pone a prueba la efectividad de esta herramienta.

Figura 20. Diagrama Unifilar para el Ejemplo de Aplicación
EJEMPLO DE APLICACIÓN



Para realizar la simulación del ejemplo se emplearon las siguientes elementos:

- 1 Aerogenerador
- 3 Paneles Solares
- 2 Banco de Baterías de 4 baterías de 12 V conectadas en serie de 60A-h c/u
- 1 Generador por Biomasa

A continuación se muestran los datos utilizados para la simulación

Tabla 20. Datos de Ingreso al Sistema de Gestión de Energía Eléctrica

| DATOS DE INGRESO | | | | |
|-------------------------------|------------------|----------------------------|----------|-------------|
| Radiación [w/m ²] | Temperatura [°C] | Velocidad del viento [m/s] | Hora [h] | Consumo [W] |
| 0 | 21,8 | 0 | 1 | 310 |
| 0 | 21,1 | 1,8 | 2 | 260 |
| 0 | 20,4 | 1,3 | 3 | 270 |
| 0 | 20,7 | 0 | 4 | 310 |
| 0 | 20,7 | 0 | 5 | 330 |
| 0 | 20,3 | 0 | 6 | 380 |
| 56 | 20,3 | 0,4 | 7 | 370 |
| 180 | 21,8 | 0,4 | 8 | 410 |
| 348 | 22,3 | 1,3 | 9 | 470 |
| 188 | 22,6 | 1,8 | 10 | 530 |
| 377 | 23 | 3,1 | 11 | 550 |
| 518 | 24,2 | 3,6 | 12 | 540 |
| 408 | 25,3 | 2,7 | 13 | 500 |
| 399 | 25,8 | 3,1 | 14 | 470 |
| 310 | 25,8 | 4 | 15 | 420 |
| 123 | 24,7 | 3,1 | 16 | 520 |
| 38 | 24,1 | 2,2 | 17 | 610 |
| 16 | 23,1 | 2,2 | 18 | 920 |
| 0 | 22,2 | 4 | 19 | 1000 |
| 0 | 21,9 | 0,4 | 20 | 900 |
| 0 | 21,7 | 0,9 | 21 | 750 |
| 0 | 20,3 | 0,9 | 22 | 630 |
| 0 | 20,4 | 0,4 | 23 | 450 |
| 0 | 19,8 | 0 | 0 | 290 |

La Tabla 20, muestra la generación de energía eléctrica en [W] proveniente de la suma de la energía solar, eólica y biomasa, tal y como se muestra en la Figura 21

Figura 21. Generación de Energía Eléctrica

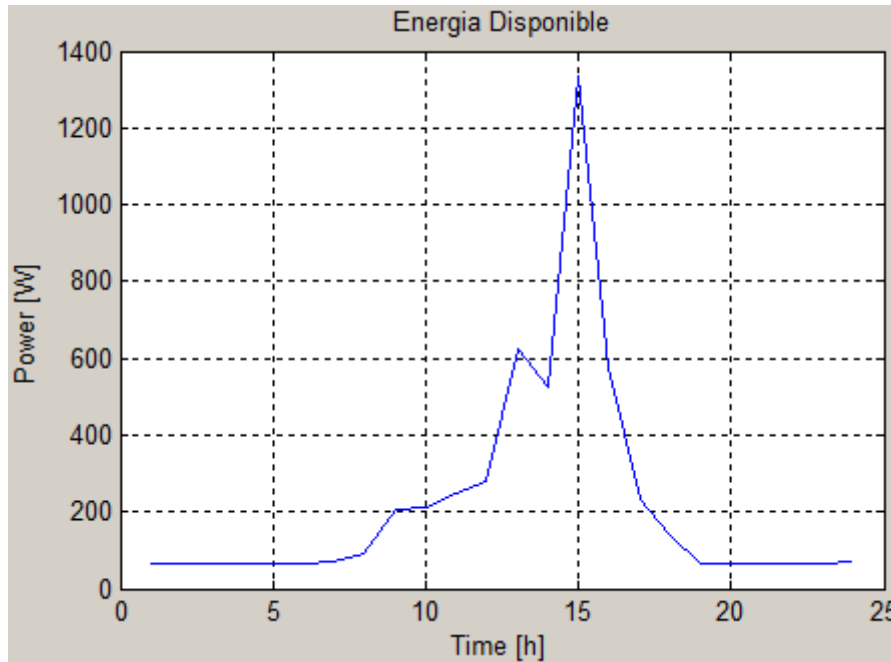


Figura 22. Ejecución del Ejemplo Propuesto. Comportamiento del Sistema

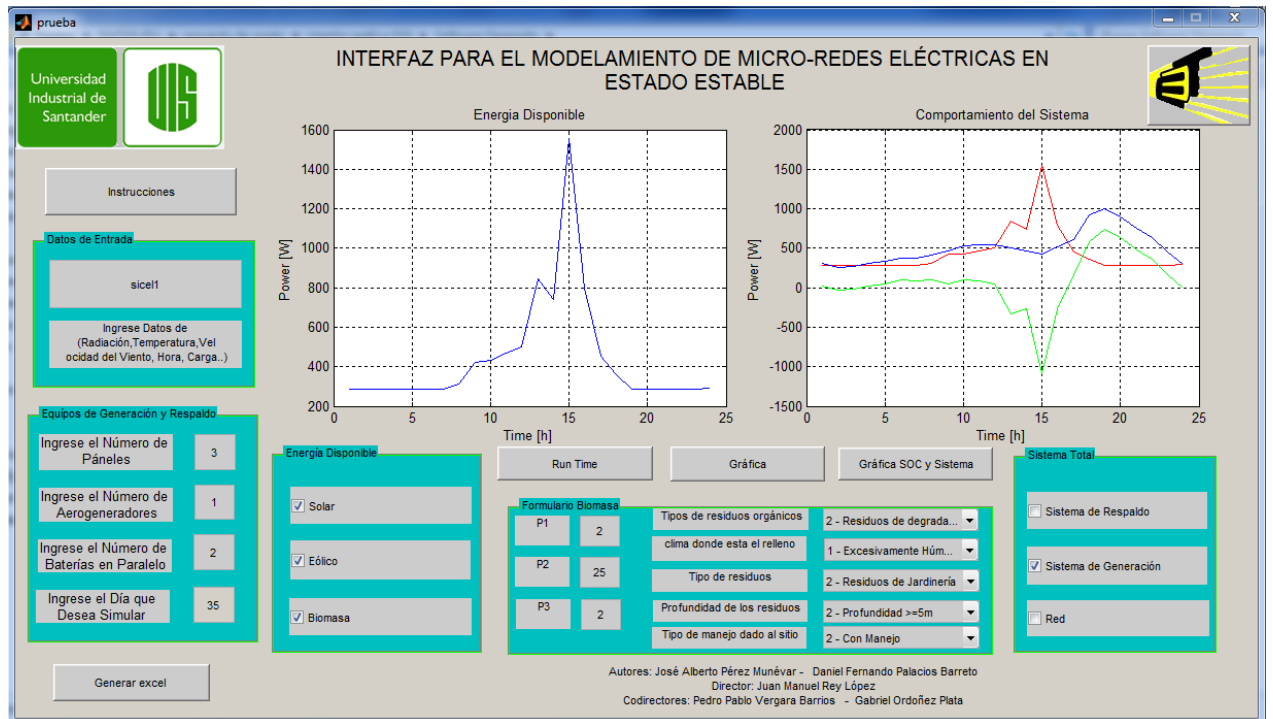


Figura 23. Ejecución del Ejemplo Propuesto. Permitiendo visualizar el Estado de Operación de Carga de las Baterías

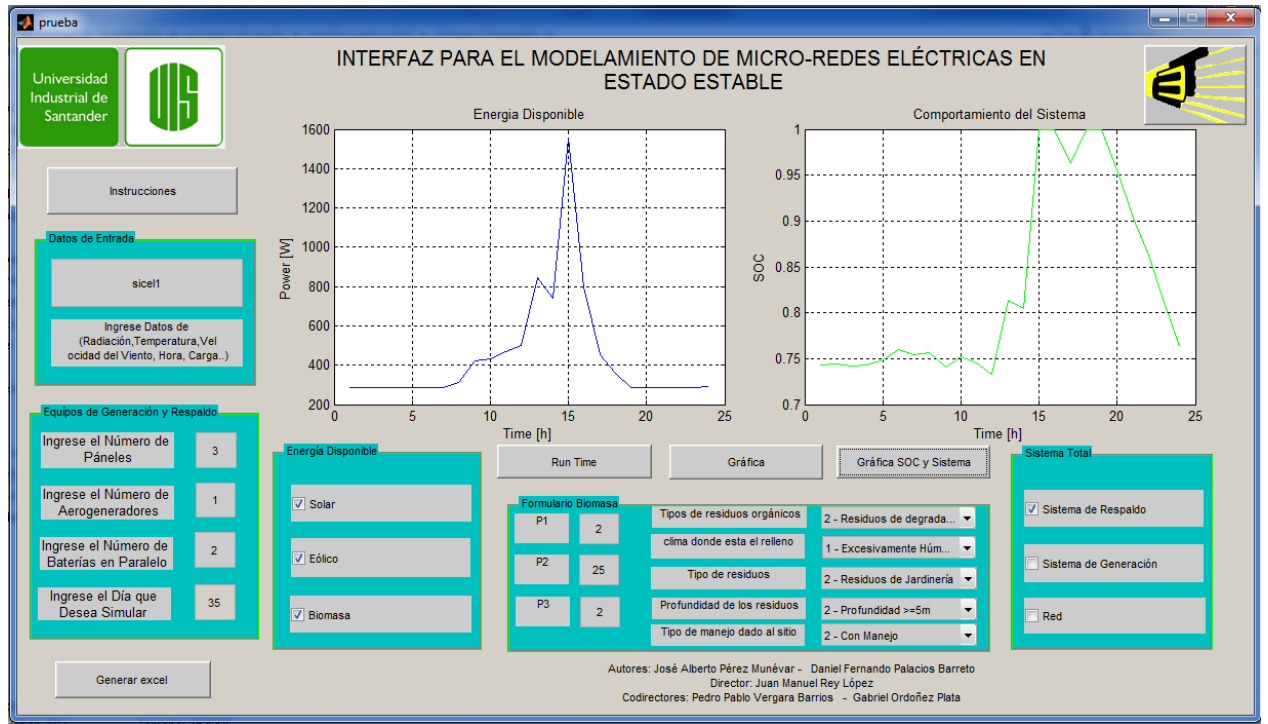
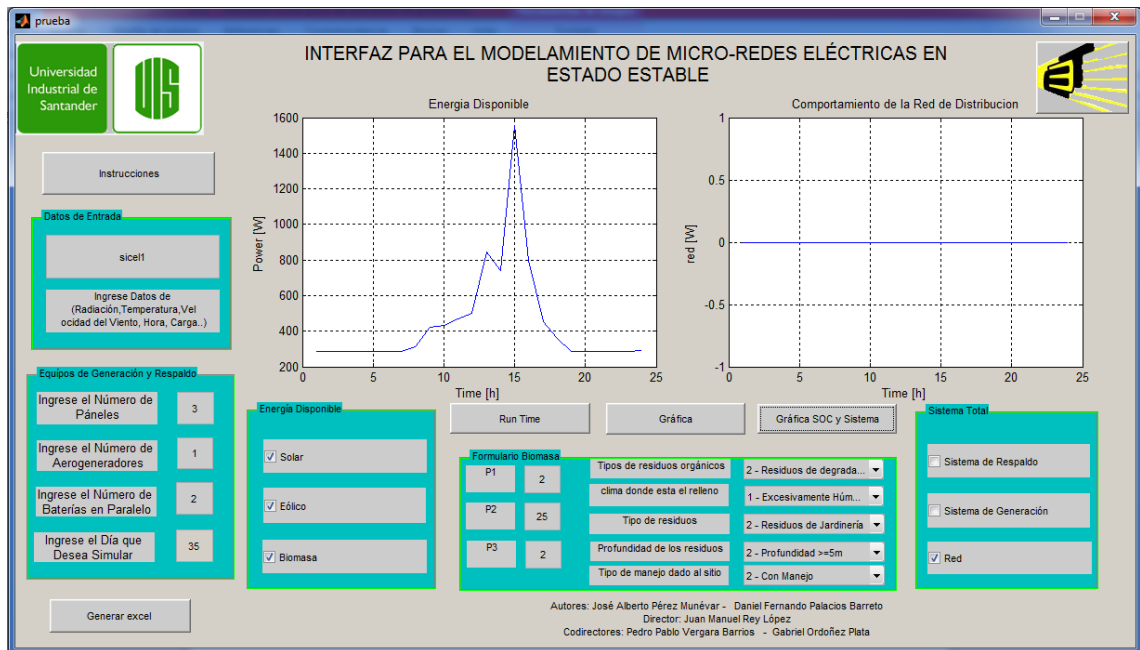


Figura 24. Ejecución del Ejemplo Propuesto. Comportamiento Red Eléctrica



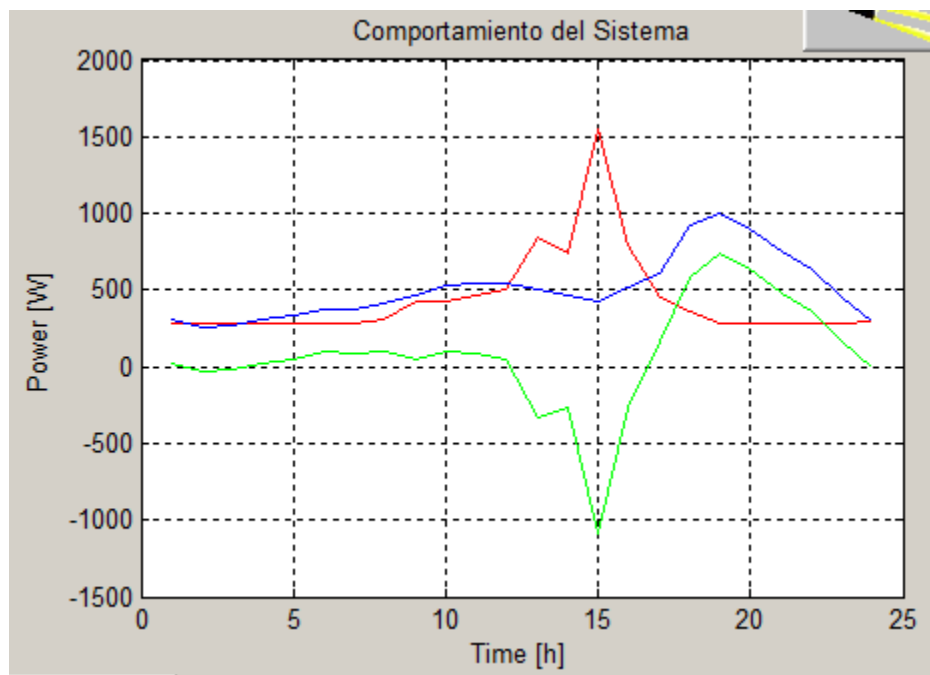
Una vez realizada la simulación del ejemplo propuesto, se procede a generar el archivo Excel que contiene los vectores de potencia arrojados por el software, tal y como se muestra en la Tabla 21

Tabla 21. Datos de Potencia de Salida

| DATOS DE SALIDA | | | | |
|--------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Potencia Solar [W] | Potencia Eólica [W] | Potencia Biomasa [W] | Potencia Generada [W] | Potencia Baterías [W] |
| 245,466 | 125,002 | 286,285 | 656,753 | -150,847 |
| 239,375 | 189,196 | 286,285 | 714,855 | -235,630 |
| 180,114 | 406,449 | 286,285 | 872,848 | -435,787 |
| 63,175 | 189,196 | 286,285 | 538,655 | -17,953 |
| 16,344 | 67,623 | 286,285 | 370,252 | 249,134 |
| 5,909 | 67,623 | 286,285 | 359,816 | 582,115 |
| 0,000 | 406,449 | 286,285 | 692,734 | 319,296 |
| 0,000 | 0,406 | 286,285 | 286,691 | -275,890 |
| 0,000 | 4,630 | 286,285 | 290,914 | 477,059 |
| 0,000 | 4,630 | 286,285 | 290,914 | 352,361 |
| 0,000 | 0,406 | 286,285 | 286,691 | 169,702 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | 3,861 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | 24,644 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | -25,294 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | -15,671 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | 24,644 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | 45,427 |
| 0,000 | 0,000 | 286,285 | 286,285 | 97,384 |
| 2,181 | 0,000 | 286,285 | 288,466 | 84,726 |
| 23,521 | 0,000 | 286,285 | 309,806 | 104,117 |
| 137,466 | 0,000 | 286,285 | 423,751 | 48,060 |
| 145,126 | 0,000 | 286,285 | 431,411 | 102,449 |
| 143,206 | 37,038 | 286,285 | 466,528 | 86,740 |
| 176,198 | 37,038 | 286,285 | 499,520 | 42,065 |

La Tabla 21, muestra los vectores de potencia, correspondientes a la generación de energía eléctrica de paneles solares, aerogeneradores y biomasa, así como también la potencia generada que es la suma de las potencias empleadas para este ejemplo y la potencia que entregan las baterías en cada instante de tiempo. Los valores de potencia de las baterías que aparecen negativos en la Tabla 21 representan la potencia que es inyectada a la batería en esos instantes de tiempo, mientras que los valores positivos, son instantes donde las baterías suministran la potencia necesaria para suplir la carga.

Figura 25. Comportamiento del Sistema



En la hora 1, la generación de energía eléctrica se reduce a la producida por el biodigestor como se puede observar en la Figura 25, de línea roja, en ella esta generación es capaz de suplir la carga en su totalidad, por ello se ve que el ingreso de las baterías no es necesario, así como tampoco es necesario el de la red.

Entre la hora 2 y la hora 3, la generación renovable, sigue sufriendo en su totalidad la demanda, pero en este caso esta generación es superior, por ello se observa que las baterías se cargan un poco.

Entre la hora 4 hasta la hora 9, la generación de energía eléctrica renovable no es suficiente para satisfacer la demanda, por ello es necesario que las baterías entren a suplir la potencia faltante.

Desde la hora 10 hasta la hora 15, la generación de energía eléctrica renovable, empieza a ascender, por ello el exceso de energía lo toman las baterías para almacenar potencia.

Entre la hora 15 y la hora 19 la generación por fuentes renovables decrece con el paso del tiempo, por ello las baterías entran de nuevo a suplir el faltante de energía, hasta que en la hora 20 la generación de energía se estabiliza y las baterías suplen el faltante de energía siguiendo el mismo comportamiento de la carga.

Después de la hora 12 y hasta la hora 15, la generación de energía eléctrica supera lo demandado y este restante se almacena en las baterías, después de esta hora las baterías empiezan a descargarse a medida que la generación de energía eléctrica se reduce, hasta que en la hora 17 es necesario la entrada de la red eléctrica para suplir la demanda de energía.

Vale la pena aclarar que para este caso específico las baterías de línea verde, son capaces de satisfacer la carga en todo momento, por ello el ingreso de la red eléctrica no es necesario, tal y como lo muestra la Figura 25; pero en caso de que las baterías no suplieran esta carga, la red eléctrica ingresaría a suplirla.

6. CONCLUSIONES

El presente proyecto de grado tiene como finalidad proporcionarle una herramienta computacional al Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL que permita visualizar el comportamiento operacional en estado estable de una micro-red compuesta por tres sistemas de generación y dos sistemas de respaldo. Además, esta herramienta se crea como base para que posteriormente se integren nuevas características operacionales y así obtener un software competitivo para análisis de micro-redes con propiedad intelectual del grupo de investigación y la Universidad Industrial de Santander.

Los modelos matemáticos de los paneles fotovoltaicos y turbinas eólicas fueron programados en Matlab y sus resultados fueron comparados con los resultados obtenidos por los modelos preestablecidos por Gridlab-D. El modelo matemático de los paneles fotovoltaicos consultado en [8], [29] presentó un porcentaje de error de 4,54% mientras que los modelos consultados en [33] y [32][35] presentaron un error de 6,36% y 10,58% respectivamente permitiendo concluir que el modelo consultado en [8],[29], refleja un comportamiento similar al obtenido en el modelo de Gridlab-D. El modelo matemático de la turbina eólica consultado en [36] presentó un error medio porcentual de 6,25% mientras que el modelo consultado en [8],[33] tuvo un error de 74,78% permitiendo concluir que el primer modelo simula el comportamiento de una turbina eólica de baja potencia cuyo comportamiento se asemeja al modelo de Gridlab-D, mientras que el segundo modelo lo hace para una turbina de mayor potencia presentando una diferencia amplia en relación a los resultados obtenidos por Gridlab-D.

Gridlab-D fue el software seleccionado para realizar la comparación y selección de los modelos matemáticos de paneles solares y turbinas eólicas debido a que,

principalmente, permitió el ingreso de datos de radiación, temperatura y velocidad del viento adquiridos en el estudio realizado al Parque Tecnológico de Guatiguará en [37] .

El modelo matemático del sistema de generación de energía eléctrica a partir de biomasa, permite que el usuario de la interfaz obtenga una estimación de la generación de energía eléctrica en base a esta fuente de una forma más próxima a la realidad, ya que este modelo fue programado en base al Modelo Colombiano de Biogás desarrollado por Landfill Methane Outreach Program (LMOP) de los Estados Unidos, el cual contiene parámetros propios de las diferentes regiones del territorio colombiano.

Se hace entrega de una herramienta computacional que permite realizar la simulación de tres tipos de fuentes no convencionales de generación de energía eléctrica que interactúan entre sí para satisfacer una demanda de energía establecida por el usuario final, permitiendo realizar la gestión de energía eléctrica mediante un banco de baterías visualizando instantes de tiempo donde el sistema de generación puede abastecer la demanda de forma autónoma, instantes de tiempo donde es necesario que el sistema de generación trabaje en conjunto con el banco de baterías e instantes donde es necesaria la intervención de la red eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

- A. CHACON, “Fuentes De Energía Alternativas: La Energía Solar Fotovoltaica Análisis Y Perspectivas.” p. 4.
- A. MAITRA, K. S. KOOK, J. TAYLOR, and A. Giumento, “Grid Impacts Of Plug-In Electric Vehicles On Hydro Quebec’s Distribution System,” in Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, 2010, pp. 1 – 7.
- A. SINHA, S. NEOGI, R. N. LAHIRI, S. P. CHOWDHURY, S. CHOWDHURY, and N. Chakraborty, “Smart Grids Initiative For Power Distribution Utility In India,” in Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011, pp. 1 – 8.
- B. S. BOROWY AND Z. M. SALAMEH, “Methodology For Optimally Sizing The Combination Of A Battery Bank A Pv Array In A Wind/Pv Hybrid System,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 11, no. 2, p. 9, 1996.
- B. S. BOROWY AND Z. M. SALAMEH, “Optimum Photovoltaic Array Size For A Hybrid Wind/Pv System,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 9, no. 3, p. 7, 1994.
- C. D. BURGOS MELLADO, “Estimación Del Estado De Carga Para Un Banco De Baterías Basada En Modelación Difusa Y Filtro Extendido De Kalman,” Universidad De Chile, 2013.

- D. Chassin, K. Schneider, and C. Gerkenmeyer, “Gridlab-D: An Open-Source Power System Modeling And Environment,” in Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, p. 5.
- D. GUASCH MURILLO, “Modelado Y Análisis De Sistemas Fotovoltaicos,” Universitat Politecnica De Catalunya, 2003.
- E. DEPARTAMENTO DE INDUSTRIA COMERCIO Y TURISMO GOBIERNO VASCO, “Plan Territorial Sectorial De La Energía Eólica De La Capv.” p. 20.
- E. SOUZA, P. JOTA, AND S. TAVARES, “Estudo Da Ferramenta Gridlab-D Para Simulação De Microrredes,” An. do XX Congr. Brasuleiro Automática, pp. 1879–1886, 2014.
- F. MILANO AND L. VANFRETTI, “State Of The Art And Future Of Oss For Power Systems,” in Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1 – 7.
- G. A. OSMAN PINTO, “Uso Racional De La Energia A Partir Del Diseño De Aplicaciones Sostenibles En El Edificio Electrica li De La Universidad Industrial De Santander,” Universidad Industrial De Santander, 2011.
- G. BARAKAT, R. BELFKIRA, AND L. ZHANG, “Wind/Pv/Diesel Energy System: Modeling And Sizing Optimization,” IEEE, vol. 1, p. 10, 2011.
- G. SEELING, “Optimisation Of Hybrid Energy Systems Sizing And Operation Control,” University Of Kassel, 1998.
- GRUPO NAP, “Energía Solar Fotovoltaica Energía Solar Fotovoltaica.” p. 122, 2007.

- H. GARZÓN, “Relación Entre La Producción Per Cápita De Residuos Sólidos Domésticos (Rsd) Con Algunos Factores Socioeconómicos De Los Habitantes Del Municipio De Circasia-Quindío,” 2012.
- H. LATAM, “Catálogo Técnico Para Sistemas SolARES,” vol. 27, no. 11, 2014.
- InterPSS,” 2010. .
- J. CARVACHO VILLANUEVA, “Integración De Generación Eólica En Estudios De Coordinación Hidrotérmica Mediano/Largo Plazo,” Universidad De Chile, 2011.
- J. COPETTI AND F. CHENLO, “Lead/Acid Batteries For Photovoltaic Applications. Test Results And Modelling,” Power Sources, vol. 47, pp. 109–118, 1994.
- J. M. REY LÓPEZ AND P. P. VERGARA BARRIOS, “Diseño De Una Microred De Baja Tension Para El Laboratorio De Integracion Energetica Del Parque Tecnologico De Guatiguara,” Universidad Industrial De Santander, 2012.
- J. P. FOSSATI, “Literature Review Of Microgrids,” vol. 9, 2011.
- K. P. Schneider, D. Chassin, Y. Chen, And J. C. Fuller, “Distribution Power Flow For Smart Grid Technologies,” IEEE Conf. Publ., pp. 1 – 7, 2009.
- M. MOFFET AND P. D. FRÉDÉRIC SIROIS, “Review Of Open Source Code Power Grid Simulation Tools For Long-Term Parametric Simulations,” CanmetEnergy Leadersh. eColInnovation, vol. 1, pp. 9 – 16, 2011.

- M. Pöchacker, A. Sobe, and W. Elmenreich, “SIMULATING THE SMART GRID,” p. 6, Apr. 2013.
- M. R. Patel, WIND AND SOLAR POWER SYSTEM DESIGN, ANALYSIS, AND OPERATION, Second. New York, U.S.A: Taylo & Francis, 2009, p. 448.
- M. V. Pilar Alcantar, “CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM REDE INTELIGENTE,” 2014.
- M. Zhou and S. Zhou, “Internet, Open-source and power System Simulation,” in Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp. 1 – 5.
- N. A. Rodríguez Miranda, “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE UTILIZACIÓN DE BIOMASA PARA SUPLIR NECESIDADES ENERGÉTICAS EN EL EDIFICIO DE BIENESTAR UNIVERSITARIO,” 2010.
- N. PENNER, C. V. N. DE ALBUQUERQUE, A. CARNIATO, J. A. CORTINA, R. Z. HOMMA, L. F. DO N. PASSOS, R. CALEFI, and F. H. Molina, “Design And Development Of An Integrated Computational Simulator For Analysis And Validation Of The Implementation Of Smart Grids In Brazilian Utilities,” in Power Engineering Conference (UPEC), 2014, p. 5.
- P. A. MURCIA GAMBOA AND C. A. VALDIVIESO GOMEZ, “Optimizacion De Generacion Hibrida Para El Sector Residencial,” Universidad Industrial De Santander, 2014.
- P. VERGARA AND J. REY, “Diseño De Una Microred De Baja Tensión Para El Laboratorio De Integración Energética Del Parque Tecnológico De Guatiguará.,” Univ. Ind. Santander, 2012.

- Q. HUANG, M. ZHOU, Y. ZHANG, AND Z. WU, “Exploiting Cloud Computing For Power System Analysis,” in Power System Technology (POWERCON), 2010, pp. 1 – 6.
- R. BELFKIRA, G. BARAKAT, T. NICOLAS, and C. Nichita, “Design Study And Optimization Of A Grid Independent Wind/Pv/Diesel System,” IEEE Conf. Publ., vol. 1, p. 10, 2009.
- R. C. DUGAN AND T. E. MCDERMOTT, “An Open Source Platform For Collaborating On Smart Grid Research,” in Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011, pp. 1 – 7.
- R. H. LASSETER AND P. PAIGI, “Microgrid: A Conceptual Solution,” 2004 IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf. (IEEE Cat. No.04CH37551), pp. 4285–4290, 2004.
- R. H. LASSETER, “Microgrids,” 2002 IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc. (Cat. No.02CH37309), vol. 1, pp. 305–308, 2002.
- R. T. GUTTROMSON, D. P. CHASSIN, AND S. E. WIDERGREN, “Residential Energy Resource Models For Distribution Feeder Simulation,” in Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2003, pp. 1 – 6.
- R. VELASQUEZ SANCHEZ, H. SARMIENTO URUCHURTU, J. SILVA FARIAS, G. VIDRIO LÓPEZ, and R. NIEVA GÓMEZ, “Introducción Al Concepto De Microrredes,” Bol. IIE, vol. 1, p. 7, 2010.
- S. DE P. E.-G. DE D. ENERGETICA, “Proyeccion de Demanda de Energia Electrica en Colombia,” 2013.

- S. S. S. R. DEPURU, L. WANG, AND V. DEVABHAKTUNI, “Smart Meters For Power Grid: Challenges, Issues, Advantages And Status,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 2736–2742, 2011.
- U. S. D. OF E. AT P. N. N. LABORATORY, “Gridlab-D.” .
- V. LUDWIG, “Manual Del Usuario Modelo Colombiano De Biogás,” 2009.

REFERENCIAS

- [1] S. de P. E.-G. de D. Energetica, “Proyeccion de Demanda de Energia Electrica en Colombia,” 2013.
- [2] R. Velasquez Sanchez, H. Sarmiento Uruchurtu, J. Silva Farias, G. Vidrio López, and R. Nieva Gómez, “INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE MICRORREDES,” *Bol. IIE*, vol. 1, p. 7, 2010.
- [3] R. H. Lasseter and P. Paigi, “MICROGRID: A CONCEPTUAL SOLUTION,” *2004 IEEE 35th Annu. Power Electron. Spec. Conf. (IEEE Cat. No.04CH37551)*, pp. 4285–4290, 2004.
- [4] R. H. Lasseter, “MICROGRIDS,” *2002 IEEE Power Eng. Soc. Winter Meet. Conf. Proc. (Cat. No.02CH37309)*, vol. 1, pp. 305–308, 2002.
- [5] A. Sinha, S. Neogi, R. N. Lahiri, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, and N. Chakraborty, “SMART GRIDS INITIATIVE FOR POWER DISTRIBUTION UTILITY IN INDIA,” in *Power and Energy Society General Meeting, IEEE*, 2011, pp. 1 – 8.
- [6] J. P. Fossati, “LITERATURE REVIEW OF MICROGRIDS,” vol. 9, 2011.
- [7] S. S. S. R. Depuru, L. Wang, and V. Devabhaktuni, “SMART METERS FOR POWER GRID: CHALLENGES, ISSUES, ADVANTAGES AND STATUS,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 2736–2742, 2011.
- [8] J. M. Rey López and P. P. Vergara Barrios, “DISEÑO DE UNA MICRORED DE BAJA TENSION PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACION ENERGETICA DEL PARQUE TECNOLOGICO DE GUATIGUARA,” UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2012.
- [9] C. D. Burgos Mellado, “ESTIMACION DEL ESTADO DE CARGA PARA UN BANCO DE BATERIAS BASADA EN MODELACION DIFUSA Y FILTRO EXTENDIDO DE KALMAN,” UNIVERSIDAD DE CHILE, 2013.

- [10] H. Latam, "CATÁLOGO TÉCNICO PARA SISTEMAS SOLARES," vol. 27, no. 11, 2014.
- [11] Grupo NAP, "Energía Solar Fotovoltaica ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA." p. 122, 2007.
- [12] A. Chacon, "FUENTES DE ENERGÍA ALTERNATIVAS: LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA ANÁLISIS Y PERSPECTIVAS." p. 4.
- [13] E. Departamento de Industria Comercio y Turismo Gobierno Vasco, "PLAN TERRITORIAL SECTORIAL DE LA ENERGÍA EÓLICA DE LA CAPV." p. 20.
- [14] M. R. Patel, *WIND AND SOLAR POWER SYSTEM DESIGN, ANALYSIS, AND OPERATION*, Second. New York, U.S.A: Taylo & Francis, 2009, p. 448.
- [15] P. A. Murcia Gamboa and C. A. Valdivieso Gomez, "OPTIMIZACION DE GENERACION HIBRIDA PARA EL SECTOR RESIDENCIAL," UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2014.
- [16] M. Pöchacker, A. Sobe, and W. Elmenreich, "SIMULATING THE SMART GRID," p. 6, Apr. 2013.
- [17] M. V. Pilar Alcantar, "CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM REDE INTELIGENTE," 2014.
- [18] N. Penner, C. V. N. de Albuquerque, A. Carniato, J. A. Cortina, R. Z. Homma, L. F. do N. Passos, R. Calefi, and F. H. Molina, "DESIGN AND DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED COMPUTATIONAL SIMULATOR FOR ANALYSIS AND VALIDATION OF THE IMPLEMENTATION OF SMART GRIDS IN BRAZILIAN UTILITIES," in *Power Engineering Conference (UPEC)*, 2014, p. 5.
- [19] U. S. D. of E. at P. N. N. Laboratory, "GRIDLAB-D." .
- [20] E. Souza, P. Jota, and S. Tavares, "ESTUDO DA FERRAMENTA GRIDLAB-D PARA SIMULAÇÃO DE MICRORREDES," *An. do XX Congr. Brasuleiro Automática*, pp. 1879–1886, 2014.
- [21] R. T. Guttromson, D. P. Chassin, and S. E. Widergren, "RESIDENTIAL ENERGY RESOURCE MODELS FOR DISTRIBUTION FEEDER

- SIMULATION,” in *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 2003, pp. 1 – 6.
- [22] K. P. Schneider, D. Chassin, Y. Chen, and J. C. Fuller, “DISTRIBUTION POWER FLOW FOR SMART GRID TECHNOLOGIES,” *IEEE Conf. Publ.*, pp. 1 – 7, 2009.
- [23] M. Moffet and P. D. Frédéric Sirois, “REVIEW OF OPEN SOURCE CODE POWER GRID SIMULATION TOOLS FOR LONG-TERM PARAMETRIC SIMULATIONS,” *CanmetEnergy Leadersh. eColInnovation*, vol. 1, pp. 9 – 16, 2011.
- [24] D. . Chassin, K. Schneider, and C. Gerkenmeyer, “GRIDLAB-D: AN OPEN-SOURCE POWER SYSTEM MODELING AND ENVIRONMENT,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008, p. 5.
- [25] “InterPSS,” 2010. .
- [26] Q. Huang, M. Zhou, Y. Zhang, and Z. Wu, “EXPLOITING CLOUD COMPUTING FOR POWER SYSTEM ANALYSIS,” in *Power System Technology (POWERCON)*, 2010, pp. 1 – 6.
- [27] M. Zhou and S. Zhou, “Internet, Open-source and power System Simulation,” in *Power Engineering Society General Meeting*, 2007, pp. 1 – 5.
- [28] F. Milano and L. Vanfretti, “STATE OF THE ART AND FUTURE OF OSS FOR POWER SYSTEMS,” in *Power & Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1 – 7.
- [29] R. C. Dugan and T. E. McDermott, “AN OPEN SOURCE PLATFORM FOR COLLABORATING ON SMART GRID RESEARCH,” in *Power and Energy Society General Meeting, IEEE*, 2011, pp. 1 – 7.
- [30] A. Maitra, K. S. Kook, J. Taylor, and A. Giumento, “GRID IMPACTS OF PLUG-IN ELECTRIC VEHICLES ON HYDRO QUEBEC’S DISTRIBUTION SYSTEM,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES*, 2010, pp. 1 – 7.
- [31] G. A. Osman Pinto, “USO RACIONAL DE LA ENERGIA A PARTIR DEL DISEÑO DE APLICACIONES SOSTENIBLES EN EL EDIFICIO ELECTRICA

II DE LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER,” UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2011.

- [32] G. Barakat, R. Belfkira, and L. Zhang, “WIND/PV/DIESEL ENERGY SYSTEM: MODELING AND SIZING OPTIMIZATION,” *IEEE*, vol. 1, p. 10, 2011.
- [33] R. Belfkira, G. Barakat, T. Nicolas, and C. Nichita, “DESIGN STUDY AND OPTIMIZATION OF A GRID INDEPENDENT WIND/PV/DIESEL SYSTEM,” *IEEE Conf. Publ.*, vol. 1, p. 10, 2009.
- [34] V. Ludwig, “MANUAL DEL USUARIO MODELO COLOMBIANO DE BIOGÁS,” 2009.
- [35] D. Guasch Murillo, “MODELADO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS,” UNIVERSITAT POLITECNICA DE CATALUNYA, 2003.
- [36] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, “OPTIMUM PHOTOVOLTAIC ARRAY SIZE FOR A HYBRID WIND/PV SYSTEM,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 9, no. 3, p. 7, 1994.
- [37] P. Vergara and J. Rey, “DISEÑO DE UNA MICRORED DE BAJA TENSIÓN PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DEL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ,” *Univ. Ind. Santander*, 2012.
- [38] G. Seeling, “OPTIMISATION OF HYBRID ENERGY SYSTEMS SIZING AND OPERATION CONTROL,” UNIVERSITY OF KASSEL, 1998.
- [39] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, “METHODOLOGY FOR OPTIMALLY SIZING THE COMBINATION OF A BATTERY BANK A PV ARRAY IN A WIND/PV HYBRID SYSTEM,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 11, no. 2, p. 9, 1996.
- [40] J. CARVACHO VILLANUEVA, “INTEGRACIÓN DE GENERACION EÓLICA EN ESTUDIOS DE COORDINACIÓN HIDROTÉRMICA MEDIANO/LARGO PLAZO,” UNIVERSIDAD DE CHILE, 2011.
- [41] J. Copetti and F. Chenlo, “LEAD/ACID BATTERIES FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS. TEST RESULTS AND MODELLING,” *Power Sources*, vol. 47, pp. 109–118, 1994.

- [42] N. A. Rodríguez Miranda, “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE UTILIZACIÓN DE BIOMASA PARA SUPLIR NECESIDADES ENERGÉTICAS EN EL EDIFICIO DE BIENESTAR UNIVERSITARIO,” 2010.
- [43] H. Garzón, “RELACIÓN ENTRE LA PRODUCCIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS (RSD) CON ALGUNOS FACTORES SOCIOECONÓMICOS DE LOS HABITANTES DEL MUNICIPIO DE CIRCASIA-QUINDÍO,” 2012.

ANEXOS

Anexo A. Modelos Matemáticos de Páneles Solares

Primer modelo:

Para poder modelar los paneles solares es preciso conocer las constantes mostradas en la Tabla 6.1 [8], [27].

| | |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Constante de Boltzman (k) | $1,318 \times 10^{-23}$ [J/K] |
| Temperatura de referencia (Tr) | 25 [°C] |
| Carga eléctrica del electrón (q) | $1,602 \times 10^{-19}$ [C] |

Tabla A1. Constantes requeridas para el modelo del panel solar

También es preciso conocer las especificaciones técnicas entregadas por cada fabricante, la cual se encuentra en las fichas técnicas de los equipos.

| | |
|---------------|--|
| V_{mpr} | Tensión de máxima potencia en STC ¹ |
| I_{mpr} | Corriente de máxima potencia en STC |
| V_{ocr} | Tensión de circuito abierto en STC |
| I_{scr} | Corriente de cortocircuito en STC |
| N_s | Número de celdas del panel solar |
| I_{mp800} | Corriente de máxima potencia en NOCT ² |
| T_{NOCT} | Temperatura NOCT |
| α_{sc} | Coefficiente térmico porcentual de corriente de corto circuito |
| β_{oc} | Coefficiente térmico porcentual de tensión de circuito abierto |

Tabla A2. Especificaciones técnicas del panel solar

Las siglas SCT y NOCT hacen referencia a las condiciones estándar de medición (Standar Test Conditions) y a la temperatura de operación nominal de la celda (Normal Operating Cell Temperature) respectivamente.

Conocidos estos datos, es posible obtener los siguientes parámetros:

Potencial térmico

$$V_T = \frac{n * k * (T_r + 273)}{q}$$

Tensión de circuito abierto normalizada:

$$V_{oc} = \frac{V_{OCr}}{V_T * N_s}$$

Factor de forma:

$$FF_o = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0,72)}{1 + V_{OC}}$$

Potencia máxima nominal

$$P_{máxr} = V_{mpr} * I_{mpr}$$

Resistencia serie:

$$R_s = \frac{V_{OCr}}{I_{SCR}} - \frac{P_{maxr}}{FF_o * I_{SCR}^2}$$

Coefficiente térmico de corriente de máxima potencia:

$$\alpha_{mp} = \left(\frac{I_{mp800}}{0,8 * I_{mpr}} - 1 \right) * \left(\frac{1}{T_{NOCT} - T_r} \right)$$

Temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas

$$T_{cell} = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} G$$

Corriente de corto circuito en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$I_{SC} = I_{SCr} * \frac{G}{1000} * (1 + \alpha_{SC} * (T_{cell} - T_r))$$

Corriente de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$I_m = I_{mpr} * \frac{G}{1000} * (1 + \alpha_{mp} * (T_{cell} - T_r))$$

Tensión de circuito abierto en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V_{OC} = V_{OCr} * (1 + \beta_{OC} * (T_{cell} - T_r)) + V_T * N_s * \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_{SCr}}\right)$$

Tensión de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V_m = V_T * N_s * \ln\left(1 + \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} \left(e^{\frac{V_{OC}}{V_T * N_s}} - 1\right)\right) - I_m * R_s$$

Tensión del panel solar en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V = V_T * N_s * \ln\left(1 + \frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} \left(e^{\frac{V_{OC}}{V_T * N_s}} - 1\right)\right) - I * R_s$$

Potencia real del panel solar en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$P_m = V_m * I_m$$

Eficiencia porcentual del panel solar:

$$\eta = \frac{P_{maxr}}{G * A} * 100\%$$

Los valores de T_{cell} , I_{SC} , I_m , V_{OC} , V_m , y P_m varían las 24 horas del día mostrando hora tras hora el comportamiento real de los parámetros del panel solar, los cuales normalmente difieren de los obtenidos bajo condiciones SCT.

Segundo Modelo:

La potencia de salida de un panel fotovoltaico se puede calcular por medio de un modelo analítico planteado por France Lasnier y Tony Gan Ang, que define las relaciones corriente-voltaje basado en las características eléctricas del panel fotovoltaico. Este modelo incluye los efectos de nivel de radiación y temperatura. Con un seguidor del punto de máxima potencia (MPPT), la potencia de salida de un panel fotovoltaico se da como [30]:

$$P_{PV}(t) = V_{mpp}(t) * I_{mpp}(t)$$

$$V_{mpp}(t) = V_{mpp,ref} + \mu_{V,oc}(T_c(t) - T_{c,ref})$$

$$I_{mpp}(t) = I_{mpp,ref} + I_{sc,ref} \left(\frac{G_T(t)}{G_{ref}} \right) + \mu_{I,sc}(T_c(t) - T_{c,ref})$$

Dónde:

P_{PV} , energía del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia en [W].

V_{mpp} , tensión del panel fotovoltaico en el punto de máxima potencia [V].

$V_{mpp,ref}$, V_{mpp} en condiciones nominales [V].

I_{mpp} , corriente del panel en el punto de máxima potencia [A].

$I_{mpp,ref}$, I_{mpp} en condiciones nominales [A].

$I_{sc,ref}$, corriente de cortocircuito en condiciones nominales [A].

G_T , irradiancia por hora [W/m²].

G_{ref} , irradiancia de 1000 [W/m²] en las condiciones nominales.

$\mu_{V,oc}$, coeficiente de temperatura para la tensión de circuito abierto [V/°C].

$\mu_{I,sc}$, coeficiente de temperatura corriente de cortocircuito [A/°C].

$T_{c,ref}$, temperatura del panel a 25 [°C] en condiciones nominales.

T_c , temperatura de funcionamiento del panel [°C].

T_c , se puede expresar de la siguiente manera:

$$T_c(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800} * G_t(t)$$

Dónde:

$T_a(t)$, temperatura ambiente (° C) del sitio de ubicación.

NOCT (Temperatura de funcionamiento Normal de la Célula), se define como la temperatura de la célula cuando el panel fotovoltaico opera bajo 800 [W/m²] de irradiancia solar y 20 ° C de temperatura ambiente.

NOCT se encuentra por lo general en un intervalo de temperatura de [42 - 46] [°C]

Los paneles solares se conectan en serie, formando cuerdas y así sumar la energía necesaria para satisfacer una demanda [33]:

$$N_{PV,s} = \frac{U_{bus}}{U_{PV,nom}}$$

Dónde:

$N_{PV,s}$, numero de paneles en serie.

U_{bus} , voltaje de la barra.

$U_{PV,nom}$, voltaje nominal del panel solar.

Tercer Modelo

El cuarto método para el modelado del panel solar se describe a continuación [32].

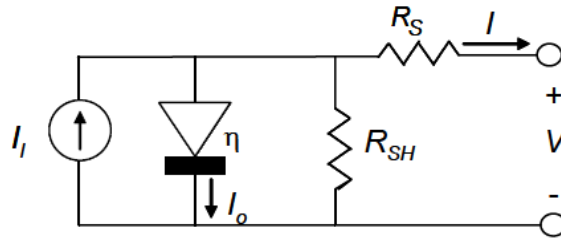


Figura A1. Modelo básico célula solar

Partiendo de la Figura A1, se desprenden las ecuaciones características de este modelo:

$$I = I_l - I_0 \left[e^{\frac{V+R_S \cdot I}{\eta V_t}} - 1 \right] - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{SH}}$$

$$I_l = Area * \left[\left[J_{sc} \frac{G}{1000} \right] + \alpha_{J_{sc}} [T - 27] \right]$$

$$I_0 = \left[\frac{J_{sc} * Area * T_k^3 * e^{-\frac{E_g}{V_t}}}{\left[e^{\frac{V_{oc}}{\eta V_t'}} - 1 \right] * 300^3 * e^{-\frac{E_g'}{V_t'}}} \right]$$

$$V_t = \left[\frac{K * T_k}{q} \right], V_t' = V_t |_{T_k=300}$$

$$E_g = E_{g0} - \left[\frac{\alpha_{gap} * T_k^2}{\beta_{gap} + T_k} \right], E_g' = E_g |_{T_k=300}$$

$$T_k = T + 273$$

Dónde:

I , Corriente de Salida del Panel Solar [A].

I_l , Corriente Fotogenerada [A].

$Area$, en [cm^2].

I_0 , Corriente de Saturación [A].

V , Tensión del Panel Solar [V].

R_S , Resistencia de Perdidas [Ω].

R_{SH} , Resistencia de Perdidas [Ω].

J_{sc} , Densidad de Corriente de Cortocircuito [A/cm^2].

G , Irradiancia [W/cm^2].

$\alpha_{J_{sc}}$, Factor de Temperatura [$A/^\circ C * cm^2$].

T , Temperatura de Trabajo [$^\circ C$].

T_k , Temperatura en kelvin.

V_{oc} , Tensión de Circuito Abierto [V].

V_t , Tensión Térmica [V].

η , Factor de Idealidad del Diodo.

E_g , La energía del GAP.

E_g' , Particularización de la Expresión a $0[^\circ C]$.

E_{g0} , Energía del GAP a $0[^\circ C]$.

V_t' , Temperatura de $0[^\circ C]$.

α_{gap} , Coeficiente de Temperatura.

β_{gap} , Coeficiente de Temperatura.

K , Constante de Boltzmann.

q , Carga del Electrón.

Cuarto Modelo

El tercer método para el modelado del panel fotovoltaico es el siguiente [34], [30]:

$$I(V) = I_{sc} * \left[1 - C_1 \left[\exp \frac{V + \Delta V}{C_2 * V_{oc}} \right] - 1 \right] + \Delta I$$

Con

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mp}}{V_{oc} - 1}}{\ln \left[1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right]}$$

$$C_1 = \left[1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right] * \exp \left[\frac{-V_{mp}}{C_2 * V_{oc}} \right]$$

$$\Delta I = \alpha * \left[\frac{S}{S_{ref}} \right] \Delta T + \exp \left[\frac{S}{S_{ref}} - 1 \right] * I_{sc}$$

$$\Delta V = -\beta * \Delta T - R_s * \Delta I$$

$$\Delta T = T - T_{ref}$$

$$T = T_A + 0.02 * S$$

Dónde:

α , Coeficiente de Cambio de Corriente por Temperatura Referente a la Insolación [V/°C]

β , Coeficiente de Cambio de Voltaje por Temperatura Referente a la Insolación [V/°C]

I , Corriente del panel [A].

I_{mp} , máxima corriente del panel [A].

I_{sc} , corriente de corto circuito del panel [A].

S , Insolación total con inclinación.

S_{ref} , Insolación nominal.

R_s , Resistencia serie del panel [Ω].

T , Temperatura de la celda [°C].

T_A , Temperatura ambiente [°C].

T_{ref} , Temperatura Nominal [°C].

ΔT , Cambio de Temperatura [°C].

V , Voltaje del Módulo [V].

V_{mp} , Máximo Voltaje del Módulo [V].

V_{oc} , Voltaje de Circuito Abierto del Módulo [V].

Anexo B. Modelos Matemáticos de Generadores Eólicos

Primer Modelo

Conociendo la velocidad promedio del viento variable hora tras hora en el sitio de interés a la altura del eje de la turbina, se puede determinar la potencia de la turbina eólica que también varía hora tras hora, y las características de potencia de salida del aerogenerador. Para esto, se necesita realizar un ajuste de los datos de la velocidad del viento recolectados a una altura referenciada para convertirlos a la altura del eje de la turbina. A través de la siguiente expresión, es posible realizar este cambio [28], [30], :

$$v = v_{hr} * \left(\frac{h}{h_r}\right)^\alpha$$

Dónde:

v : Velocidad del viento a la altura del eje de la turbina eólica [m/s].

v_{hr} : Velocidad del viento a la altura de referencia (a la altura del anemómetro) [m/s].

h : Altura de la torre hasta el eje de la turbina eólica [m].

h_r : Altura de referencia (altura del anemómetro) [m].

α : Coeficiente exponencial de Hellman.

El coeficiente exponencial de Hellman varía de acuerdo a parámetros como la hora del día, estación del año, naturaleza del terreno, velocidad del viento y temperatura; razón por la cual la determinación de α cobra gran importancia. Para lugares donde no se encuentra información específica es usual tomar el valor del coeficiente como $\frac{1}{7}$.

El modelo a emplearse para el presente proyecto el cual determinará las variables de salida antes mencionadas en función de la velocidad del viento variable hora tras hora en concordancia con [29], es [30]:

$$P_{WT} = \begin{cases} a * v^3 - b * P_R & v_{ci} < v < v_r \\ P_R & v_{ci} < v < v_r \\ 0 & v_{ci} < v < v_{co} \end{cases}$$

$$a = \frac{P_R}{v_r^3 - v_{ci}^3}$$

$$b = \frac{v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}$$

Donde

P_{WT} , es la potencia de salida del aerogenerador [W].

P_R , es la potencial nominal del aerogenerador [W].

v , es la velocidad del viento corregida a la altura del eje de la turbina [m/s].

v_{ci} , es la velocidad de arranque del aerogenerador [m/s].

v_r , es la velocidad de operación nominal del aerogenerador [m/s].

v_{co} , es la velocidad de parada del aerogenerador [m/s].

La Figura B.1 muestra la curva característica de potencia del aerogenerador en función de la velocidad del viento.

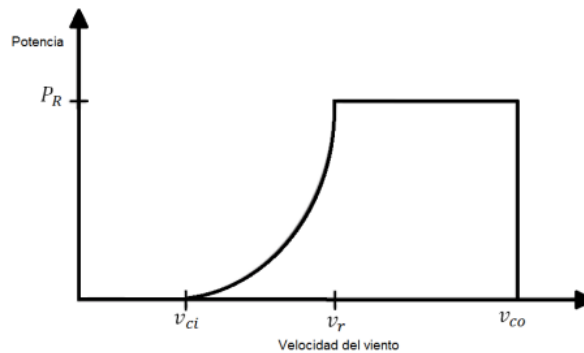


Figura B1. Potencia del Aerogenerador en Función de la Velocidad del Viento

Segundo modelo.

Una característica importante de la velocidad del viento corresponde al cizallamiento del viento, el cual es las variaciones tanto en la velocidad como en la

dirección del viento, en distancias relativamente cortas. El cizalle del viento puede separarse en una componente horizontal y en otra vertical.

En particular se tiene sobre el frente de velocidades en la dirección vertical, por su fuerte efecto sobre la producción de potencia (la estimación de la velocidad en función de la altura es clave al seleccionar lugares de emplazamiento de generación eólica). En términos matemáticos, la velocidad en función de la altura tiene la siguiente forma [35].

$$v(h) = v_0 * \frac{\ln \left[\frac{h}{z_0} \right]}{\ln \left[\frac{h_0}{z_0} \right]}$$

Dónde:

$v(h)$, Velocidad en función de una altura h .

h , Altura donde se desea conocer la velocidad [m].

v_0 , Velocidad medida de viento a una altura h_0 .

h_0 , Altura para la que se conoce la velocidad [m].

z_0 , Parámetro de rugosidad (depende del terreno) [m].

Las variaciones en la velocidad del viento se deben a los cambios en la posición de la tierra en el sistema solar, este aspecto puede ser un fuerte modelo estacional.

Estas variaciones de velocidad, se pueden caracterizar por medio de funciones de probabilidad, como las que se presentan a continuación, que remite a la distribución de Weibull y a la distribución de Rayleigh respectivamente

$$F(h) = \Delta v * \frac{k}{c} * \left[\frac{v}{c} \right]^{k+1} * e^{-\left[\frac{v}{c} \right]^2} \quad Ec 2.2.2.2$$

$$F(h) = \Delta v * \frac{\pi v}{2 \bar{v}^2} * e^{-\frac{\pi v}{4[\bar{v}]^2}} \quad \text{Ec 2.2.2.3}$$

Dónde:

$F(h)$, Frecuencia de ocurrencia asociada a cada velocidad v .

Δv , Ancho de cada clase de velocidad.

k , Parámetro de forma [adm].

c , Parámetro de escala [m/s].

\bar{v} , Velocidad promedio en el sitio de medición.

Uno de los indicadores estadísticos más utilizados para describir la turbulencia es el mostrado a continuación:

$$I(\bar{v}) = \frac{\sqrt{\frac{1}{1-N} * \sum_{f=1}^N (v_l - \bar{v})^2}}{\bar{v}} = \frac{\sigma}{\bar{v}}$$

Dónde:

$I(\bar{v})$, Intensidad de turbulencia.

σ , Desviación estándar de la media de velocidad.

\bar{v} , Velocidad media del tiempo en zona de interés.

La potencia extraíble del viento, es la energía cinética de una masa m moviéndose a una velocidad v y se muestra así:

$$E_0(v, m) = \frac{1}{2} m v^2$$

$$P(v, \delta) = \frac{1}{2} \Delta m v^2 = \frac{1}{2} (\delta A v) v^2 = \frac{1}{2} (\delta A) v^3$$

Dónde:

E_0 , Energía cinética.

m , masa de aire.

P , Potencia contenida en la masa de aire.

v , Velocidad del viento.

δ , Densidad del aire.

Como se utiliza la energía del viento para mover una turbina, parte de la masa de aire se debe transmitir, por ello la velocidad que sale v_2 de la turbina debe ser menor que la velocidad que entra a la turbina v_1 .

A continuación se presenta de manera matemática la potencia extraíble, que corresponde a la diferencia entre las velocidades antes nombradas (v_1 y v_2) [36].

$$\begin{aligned} P_{12}(v_1, \delta) &= \frac{1}{2} \Delta m_{12} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \delta A \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) (v_1^2 - v_2^2) \\ &= \frac{1}{2} \delta A v_1^3 \left(\frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right)^2}{2} \right) \end{aligned}$$

Y la Generación eólica promedio es la siguiente:

$$cp = \frac{P_{med}}{P_{inst}} = \frac{E_T}{T * P_{inst}}$$

Dónde:

cp , Factor de planta

P_{med} , Potencia media de la central

P_{inst} , Potencia instalada en la central

E_T , Energía generada en un horizonte

T , Horizonte de evaluación

Anexo C. Modelos Matemáticos de Almacenadores de Energía

Primer modelo

La diferencia que existe entre la energía generada por fuentes renovable y la carga demandada, define si el banco de baterías se encuentra en un estado de carga o descarga.

El estado de carga de la batería se define por la siguiente ecuación [28], [30]:

$$SOC(t) = SOC[t - 1] * [1 - \delta_{bat}(t)] + \left[\frac{P_B(t)}{V_{bus}} * \eta_{bat} * \Delta t \right]$$

El valor de $\delta_{bat}(t)$, tiene un valor de 0.007% por hora, y la η_{bat} se encuentra por lo general en el rango de valores (0,8 a 1).

De esta manera se definen los límites máximos y mínimos del banco de baterías, es decir el valor mínimo que adopta el banco una vez es utilizada toda su carga y un valor máximo que no puede superar una vez termina su etapa de carga.

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

La tasa de máxima carga en el banco de baterías es el límite superior que toma, la cual se puede expresar de la siguiente manera [30]:

$$SOC_{max} = C_n = \frac{N_{BAT}}{N_{BAT,S}} * C_B$$

Para poder llegar a la tensión DC deseada en el barraje es necesario conectar las baterías en serie, esta operación se define por la siguiente formula:

$$N_{BAT,s} = \frac{V_{bus}}{V_{BAT,nom}}$$

El estado mínimo de carga permitido en el banco de baterías se da por la siguiente expresión:

$$SOC_{min} = (1 - DOD) * SOC_{max}$$

Dónde:

SOC , Estado de Carga [%]

SOC_{max} , Estado de Carga Máximo Permisible [%]

SOC_{min} , Estado de Carga Máximo de Profundidad Permisible [%]

δ_{bat} , Rango de Auto-Descarga [%].

P_B , Potencia Nominal de la Batería [W].

V_{bus} , Tensión del Barraje [V].

$V_{BAT,nom}$, Tensión Nominal de la Batería [V].

η_{bat} , Eficiencia de la Bateria.

N_{BAT} , Numero de Baterías.

$N_{BAT,s}$, Numero de Baterías Serie.

C_n , Capacidad Nominal en [Ah].

C_B , Capacidad Nominal de Cada Bateria [Ah].

DOD , Profundidad Maxima de Descarga.

Segundo Modelo:

Zona de Carga

Los fabricantes recomiendan que la corriente de carga del banco de baterías no sea superior al 20% de su corriente nominal para prolongar su vida útil. Por esta razón, existen varias alternativas para la corriente de carga del banco de baterías, que son las siguientes [13]:

$$I_{CBD} = \frac{E_d}{V_{sist}} * \eta_{cont}$$

$$I_{CBR} = 0.2 * Ah_n * N_{batp}$$

$$I_{CBC} = I_{cont} * N_{contp}$$

$$I_{CB} = \begin{matrix} I_{CBR} & I_{CBR} < I_{CBC} < I_{CBD} \\ I_{CBC} & I_{CBC} < I_{CBR} < I_{CBD} \\ I_{CBD} & I_{CBD} < I_{CBC} & I_{CBD} < I_{CBR} \end{matrix}$$

I_{CBD} , corriente de carga disponible del sistema [A].

I_{CBR} , corriente de carga recomendada para el banco de baterías [A].

I_{CBC} , corriente de carga máxima que entrega el controlador de carga [A].

I_{CB} , corriente de carga para el banco de baterías [A].

I_{cont} , corriente de carga máxima entregada por el controlador de carga [A].

E_d , energía disponible para carga de baterías en el sistema [Wh].

η_{cont} , Eficiencia del controlador de carga.

Ah_n , Amperes- hora nominales por batería [Ah].

N_{batp} , numero de baterías en paralelo.

N_{contp} , numero de controladores de caega en paralelo.

Zona de Descarga

La corriente de descarga del banco de baterías se representa de la siguiente manera:

$$I_{DB} = \frac{E_r}{V_{sist} * \eta_{cont}}$$

Dónde:

I_{DB} , es la corriente de descarga de la batería [A].

E_r , es la energía requerida por el sistema [Wh].

V_{sist} , es el voltaje nominal de DC del sistema [V].

η_{Cont} , es la eficiencia del controlador de carga.

Estado de Carga SOC

A continuación se presentan el modelo matemático que representa el SOC [13]:

$$E_{bat}(t) = [SOC(t) * E_{total\ bat}] + [V_{sist} * I(t)]$$

$$SOC(t + 1) = \frac{E_{bat}(t)}{E_{total\ bat}}$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max}$$

$$I(t) = \begin{matrix} I_{CB} & \text{Zona de Carga} \\ I_{DB} & \text{Zona de Descarga} \end{matrix}$$

Dónde:

t , es el tiempo en horas.

E_{bat} , es la energía del banco de baterías para una hora específica [Wh]. SOC , es el estado de carga de las baterías para una hora específica [%]. $SOC_{máx}$, es el estado de carga máximo para el banco de baterías (100%).

$SOC_{mín}$, es el estado de carga mínimo para el banco de baterías (% máximo de la profundidad de descarga).

$E_{total\ bat}$, es la energía total del banco de baterías al 100% [Wh].

V_{sist} , es el voltaje nominal de DC del sistema [V].

I , es la corriente de carga o descarga para una hora específica [A].

Tercer modelo

El tercer modelo refiere al presentado por Copetti y Chenlo, el cual es una ampliación del modelo de Shepherd, que corrige los problemas en las zonas de carga y sobrecarga, la Figura 6.3 muestra el modelo ya enunciado [9], [31].

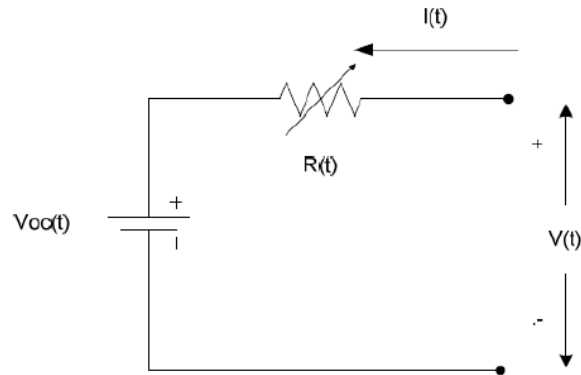


Figura C1. Modelo Copetti & Chenlo

Para plantear el modelo se asume lo siguiente:

$$R = f(I(t), SOC(t), T)$$

$$V_{oc} = f(SOC(t))$$

Calculo del SOC [32]:

$$SOC(t) = \frac{1}{C(t)} * \int_{-\infty}^t \eta(w)I(w)dw$$

Calculo de la capacidad instantánea de la batería:

$$C(t) = \frac{C_n C_c}{1 + A_c \left[\frac{I(t)}{I_n} \right]^{B_c}} * (1 + q_{1c} \Delta T + q_{2c} \Delta T^2)$$

$$\eta(t) = \frac{1}{1 - e^{\frac{E_a}{I(t)+E_b}[1-SOC(t)]}} \quad \begin{array}{l} I(t) < 0 \text{ descarga} \\ I(t) \text{ Carga} \end{array}$$

Zona de Descarga

$$V_d(t) = V_{0d} - K_{0d}[1 - SOC(t)] - \frac{|I(t)|}{C_{10}} \left[\frac{P_{1d}}{1 + |I(t)|^{P_{2d}}} + \frac{P_{3d}}{SOC(t)^{P_{4d}}} * P_{5d} \right] (1 - q_d T)$$

El termino, $V_{0d} - K_{0d}[1 - SOC(t)]$, es el encargado de modelar la curva SOC v/s de la batería.

Zona de Carga

$$V_c(t) = V_{0c} - K_{0c}[1 - SOC(t)] - \frac{|I(t)|}{C_{10}} \left[\frac{P_{1c}}{1 + |I(t)|^{P_{2c}}} + \frac{P_{3c}}{SOC(t)^{P_{4c}}} * P_{5c} \right] (1 - q_c T)$$

Zona de Transición

$$V_t(t) = \left[\frac{V_c|I_d - V_d|I_d}{2I_d} \right] I(t) + \frac{V_c|I_d + V_d|I_d}{2}$$

Dónde:

$C(t)$, Capacidad Instantánea

Cuarto Modelo

El estado de operación de carga y descarga está descrito por las siguientes ecuaciones.

$$Q(t) = Q(t - 1) + [I(t) * \Delta t]$$

$$C(t) = \frac{1,67 * C_{NOMINAL}}{1 + 0,67 * \left(\frac{|I(t)|}{I_{NOMINAL}}\right)^{0,9}} * (1 + 0,005 * \Delta T)$$

$$I_{NOMINAL} = \frac{C_{NOMINAL}}{t_{NOMINAL}}$$

$$SOC_2 = SOC_1 + \frac{Q(t)}{C(t)}$$

$Q(t)$, Carga

SOC_2 , Estado de Operación de Carga

$C(t)$, Capacidad de la batería en un instante de tiempo.

Anexo D: Modelos de Generación por Biomasa

Primer modelo

El presente modelo es basado en la consulta realizada en [13] y [38] quienes inicialmente estiman la producción de biogás diaria a partir de recursos orgánicos (en este caso, residuos de comida) para poder estimar el consumo de biogás por kWh de un grupo electrógeno específico.

Para poder estimar la producción de biogás diaria es necesario especificar que para este caso se limita a dos tipos de residuos; los residuos cocidos y no cocidos. Cabe recalcar la clasificación de estos residuos, ya que la producción de biogás es diferente para cada tipo de residuo.

El modelo empleado por [38] está descrito por la siguiente ecuación:

$$PG = MPC * \%SV * P$$

Dónde:

PG , es el biogás producido en m^3 por día.

MPC , es el peso de la biomasa en kg por día.

$\%SV$, es el porcentaje de sólidos volátiles de acuerdo al tipo de residuo.

P , es la producción aproximada de m^3 de biogás por 1 kg de sólidos volátiles.

Los parámetros necesarios para estimar la producción de biogás a partir del tipo de residuo, es descrita en la Tabla D1

| Tipo de Biomasa | %SV | $m^3_{\text{biogás}}/\text{kgSV}$ |
|--|-------|-----------------------------------|
| Residuos de comida antes de la cocción | 10.30 | 0.35 |
| Residuos de comida después de la cocción | 26.35 | 0.25 |

Tabla D1 Parámetros característicos para la producción de biogás por tipo de residuo

Para determinar la producción de residuos de comida por persona en una vivienda, es necesario determinar la cantidad de residuos sólidos domésticos promedio per cápita que son clasificados en los diferentes estratos socioeconómicos de Colombia. En este caso, se asume que toda la materia orgánica de desperdicio es producto de desechos de comida. Para determinar la cantidad de residuos cocidos y no cocidos, se establece la misma proporción que en [39]. La Tabla D2 muestra el promedio de producción de residuos sólidos domésticos per cápita para una vivienda en los diferentes estratos socioeconómicos.

| Estrato Socioeconómico | Promedio de la producción per cápita de RSD Kg/persona-día | Valor Máximo | Valor Mínimo |
|------------------------|--|--------------|--------------|
| 1 | 0.6271 | 0.8125 | 0.45 |
| 2 | 0.9676 | 1.198 | 0.75 |
| 3 | 1.767 | 3.16 | 1.36 |
| 4 | 1.904 | 3.44 | 1.3 |
| Promedio General | 1.316 | | |

Tabla D2. Producción de RSD Kg/Persona-día por estrato

La composición promedio de residuos sólidos es otro factor importante a considerarse en el momento de estimar el peso de la biomasa; su valor porcentual varía dependiendo del estrato socioeconómico en que se encuentra y la Tabla D3 muestra los valores discriminados por estratos.

| Estrato | RSD de Materia Orgánica |
|----------|-------------------------|
| 1 | 28,01% |
| 2 | 31,23% |
| 3 | 38,32% |
| 4 | 44,51% |
| Promedio | 35,50% |

Tabla D3. Composición promedio de RSD de materia orgánica Kg/persona-día

Conocidos estos parámetros, es posible determinar la producción de kilogramos de biomasa por residuos de comida diaria para una vivienda. Las ecuaciones presentadas a continuación, discriminan la producción de biomasa clasificados por residuos de comida cocida y no cocida.

$$MPC_{rc} = n * RSD * \%MO * \%RC$$

$$MPC_{rnc} = n * RSD * \%MO * \%RNC$$

Dónde:

MPC_{rc} , es el peso de la biomasa en kilogramos por día para residuos de comida cocida.

MPC_{rnc} , es el peso de la biomasa en kilogramos por día para residuos de comida no cocida.

n , es el número de habitantes por vivienda.

$\%MO$, es el porcentaje de materia orgánica de los RSD.

$\%RC$, es el porcentaje de residuos de comida cocida.

$\%RNC$, es el porcentaje de residuos de comida no cocida.

Los porcentajes de comida cocida y no cocida son de 78% y 22% respectivamente.

Para determinar la energía generada a partir de la biomasa de residuos de comida se emplea la siguiente ecuación:

$$E_{gb} = \frac{PG}{0,7 \text{ m}^3/\text{kWh}}$$

Donde:

E_{gb} , es la energía generada a partir de la cantidad de biogás en kWh/día.

Q_{LFGdia} , es el biogás producido en m^3 por día.

Segundo modelo

Este modelo fue desarrollado en base al Modelo Colombiano de Biogás versión 1.0, el cual emplea una metodología para poder estimar la cantidad de biogás

capturado en rellenos sanitarios y posee características específicas para Colombia[40].

Para poder determinar el flujo de biogás esperado por año, es necesario conocer diferentes características del relleno, las cuales, dependiendo de las respuestas que los usuarios suministren, determinarán una serie de parámetros que llevarán a una mejor estimativa[40].

La ecuación que estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año se enuncia a continuación:

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2 * k * L_0 * \left[\frac{M_i}{10} \right] * (e^{-kt_{ij}}) * (MCF)$$

| | |
|-------------|---|
| QLFG | Flujo de biogás máximo esperado (m3/año) |
| i | Incremento en tiempo de 1 año |
| n | Cantidad de años de recolección de residuos |
| j | Incremento de tiempo en 0.1 años |
| k | Índice de generación de metano (1/año) |
| Lo | Generación potencial de metano (m3/Mg) |
| Mi | Masa de residuos dispuestos en el primer año |
| tij | Edad de las selecciones j de la masa de residuos Mi dispuestas en el año i (años decimales) |
| MCF | Factor de corrección de metano |

Tabla D3 Siglas empleadas en la anterior ecuación

Cada una de las constantes que se enuncian en esta ecuación, dependen de diferentes condiciones. A continuación se mostrarán las condiciones y variabilidades que estas podrán tener dependiendo de las características que el usuario determina.

ÍNDICE DE GENERACIÓN DE METANO k [40]

Para poder determinar el índice de generación de metano para residuos orgánicos k , es necesario conocer la rapidez de degradación de dichos residuos los cuales se clasifican en categorías.

| CATEGORÍA | TIPO DE DEGRADACIÓN |
|-----------|--|
| 1 | Residuos de degradación muy rápida |
| 2 | Residuos de degradación moderadamente rápida |
| 3 | Residuos de degradación moderadamente lenta |
| 4 | Residuos de degradación muy lenta |

Tabla D4 Categorías de residuos orgánicos según el tipo de degradación

Además de conocer la velocidad de degradación de estos residuos, el valor de k varía en base a la precipitación promedio anual en el clima de la región donde se está realizando la captación de los residuos. Se contará con la opción de categorizar el clima en el sitio de captación en una de las 5 regiones climáticas basadas en la precipitación anual media:

| CLIMA | PRECIPITACIÓN |
|----------------------|----------------------------|
| SECO | < 500 [mm/año] |
| MODERADAMENTE SECO | Entre 500 y 900 [mm/año] |
| MODERADAMENTE HÚMEDO | Entre 1000 y 1499 [mm/año] |
| HÚMEDO | Entre 1500 y 1999 [mm/año] |
| EXCESIVAMENTE HÚMEDO | > 2000 [mm/año] |

Tabla D5 Categorías de Climas

Las categorías de clima para las ciudades más grandes en Colombia son:

| PRINCIPALES CIUDADES | TIPOS DE CLIMA |
|----------------------|-----------------------------|
| BOGOTÁ | Moderadamente Seco |
| MEDELLÍN | Húmedo |
| CALI | Moderadamente Húmedo |
| BARRANQUILLA | Moderadamente Seco |
| CARTAGENA | Moderadamente Seco / Húmedo |
| BUCARAMANGA | Moderadamente Húmedo |

Tabla D6 Clima en las principales ciudades de Colombia

Ya determinadas la caracterización de la rapidez de degradación de los residuos orgánicos y el clima donde estos se encuentran, los valores del Índice de Generación de Metano k son:

| CLIMA | CATEGORÍA DE RESIDUOS | | | |
|----------------------|-----------------------|------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Excesivamente Húmedo | 0.4 | 0.17 | 0.07 | 0.035 |
| Húmedo | 0.34 | 0.15 | 0.06 | 0.03 |
| Moderadamente Húmedo | 0.26 | 0.12 | 0.048 | 0.024 |
| Moderadamente Seco | 0.18 | 0.09 | 0.036 | 0.018 |
| Seco | 0.1 | 0.05 | 0.02 | 0.01 |

Tabla D7 Índice de Generación de Metano k

CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS Y GENERACIÓN POTENCIAL DE METANO L_o [40]

El valor de la generación potencial de metano de los residuos describe la cantidad total de gas metano potencialmente producida por una tonelada de residuos cuando esta se degrada y depende casi exclusivamente de la caracterización de los residuos en el relleno sanitario. A un contenido mayor de celulosa le corresponde un valor mayor de L_o . Las unidades de L_o están en metros cúbicos por tonelada de residuos (m^3/Mg). Los valores teóricos de L_o varían entre 6.2 y 270 m^3/Mg de residuos.

Los valores de la generación potencial de metano por tipo de residuo están derivados de la caracterización de residuos de 57 ciudades que representan 21 departamentos. El promedio de la caracterización de los residuos fue calculado para cada departamento.

Los valores de Lo utilizados son mostrados en la Tabla D8.

| TIPOS DE RESIDUOS | GENERACIÓN POTENCIAL DE METANO |
|--------------------|--------------------------------|
| Alimenticios | 70 |
| Jardinería | 93-134 |
| Papel | 186 |
| Madera y Paja | 200 |
| Textiles & Pañales | 112 |

Tabla D8 Valores de la Generación Potencial de Metano (Lo) por Tipo de Residuo

FACTOR DE CORRECCIÓN DE METANO -MCF [40]

El factor de corrección de metano es un ajuste de la estimación de la generación de biogás que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. Este varía dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de relleno sanitario como lo definen las prácticas de manejo. En sitios con manejo, se asume que la degradación es anaeróbica en los residuos. En sitios con condiciones menos apropiadas para degradación anaeróbica, el MCF será menor para reflejar las condiciones anaeróbicas del sitio. Además de esto, los valores que puede tomar el MCF, depende de la profundidad de la recolección de residuos. La Tabla D9 resume los valores de MCF aplicados por el modelo.

| MANEJO DEL SITIO | PROFUNDIDAD < 5m | PROFUNDIDAD >= 5m |
|-----------------------|------------------|-------------------|
| Sin Manejo | 0.4 | 0.8 |
| Con Manejo | 0.8 | 1.0 |
| Semi-aeróbico | 0.4 | 0.5 |
| Condición Desconocida | 0.4 | 0.8 |

Tabla D9 Factor de Corrección de Metano (MCF)

La profundidad de residuos mayores a 5 metros promueve la degradación anaeróbica, en sitios menos profundos la degradación de los residuos es principalmente aeróbica. Un sitio con manejo está definido como un sitio que cuenta con la colocación controlada de los residuos y una o más de las siguientes

condiciones: material de cobertura, compactación mecánica o conformación de residuos. Un sitio semi-aeróbico tiene colocación controlada de los residuos y todas las siguientes condiciones que puedan introducir aire en los residuos: material de cobertura permeable, sistema de drenaje de lixiviado, y sistema de venteo de biogás.

Enunciadas todas las características, el cálculo del flujo de biogás máximo esperado por año se convierte a la cantidad de flujo de biogás esperada por día y así se procede a realizar el cálculo de la energía eléctrica generada cuyo consumo de m³ de biogás por kWh es encontrado comúnmente como 0,7 m³/kWh[38]. Esta energía es obtenida de la siguiente forma:

$$E_{gb} = \frac{Q_{LFGdia}}{0.7m^3/kWh}$$

Donde:

E_{gb} , es la energía generada a partir de la cantidad de biogás en kWh/día.

Q_{LFGdia} , es el biogás producido en m³ por día.

Anexo E: Perfiles de Ingreso a la Interfaz

Datos de entrada usados en la interfaz

| DATOS DE INGRESO | | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------|----------------|
| Radiación [w/m ²] | Temperatura [°C] | Velocidad del viento [m/s] | Hora [h] | Consumo [W] |
| 0 | 21,8 | 0 | 1 | 310 |
| 0 | 21,1 | 1,8 | 2 | 260 |
| 0 | 20,4 | 1,3 | 3 | 270 |
| 0 | 20,7 | 0 | 4 | 310 |
| 0 | 20,7 | 0 | 5 | 330 |
| 0 | 20,3 | 0 | 6 | 380 |
| 56 | 20,3 | 0,4 | 7 | 370 |
| 180 | 21,8 | 0,4 | 8 | 410 |
| 348 | 22,3 | 1,3 | 9 | 470 |
| 188 | 22,6 | 1,8 | 10 | 530 |
| 377 | 23 | 3,1 | 11 | 550 |
| 518 | 24,2 | 3,6 | 12 | 540 |
| 408 | 25,3 | 2,7 | 13 | 500 |
| 399 | 25,8 | 3,1 | 14 | 470 |
| 310 | 25,8 | 4 | 15 | 420 |
| 123 | 24,7 | 3,1 | 16 | 520 |
| 38 | 24,1 | 2,2 | 17 | 610 |
| 16 | 23,1 | 2,2 | 18 | 920 |
| 0 | 22,2 | 4 | 19 | 1000 |
| 0 | 21,9 | 0,4 | 20 | 900 |
| 0 | 21,7 | 0,9 | 21 | 750 |
| 0 | 20,3 | 0,9 | 22 | 630 |
| 0 | 20,4 | 0,4 | 23 | 450 |
| 0 | 19,8 | 0 | 0 | 290 |

Tabla E1 Datos de Entrada Interfaz.

Perfil de radiación

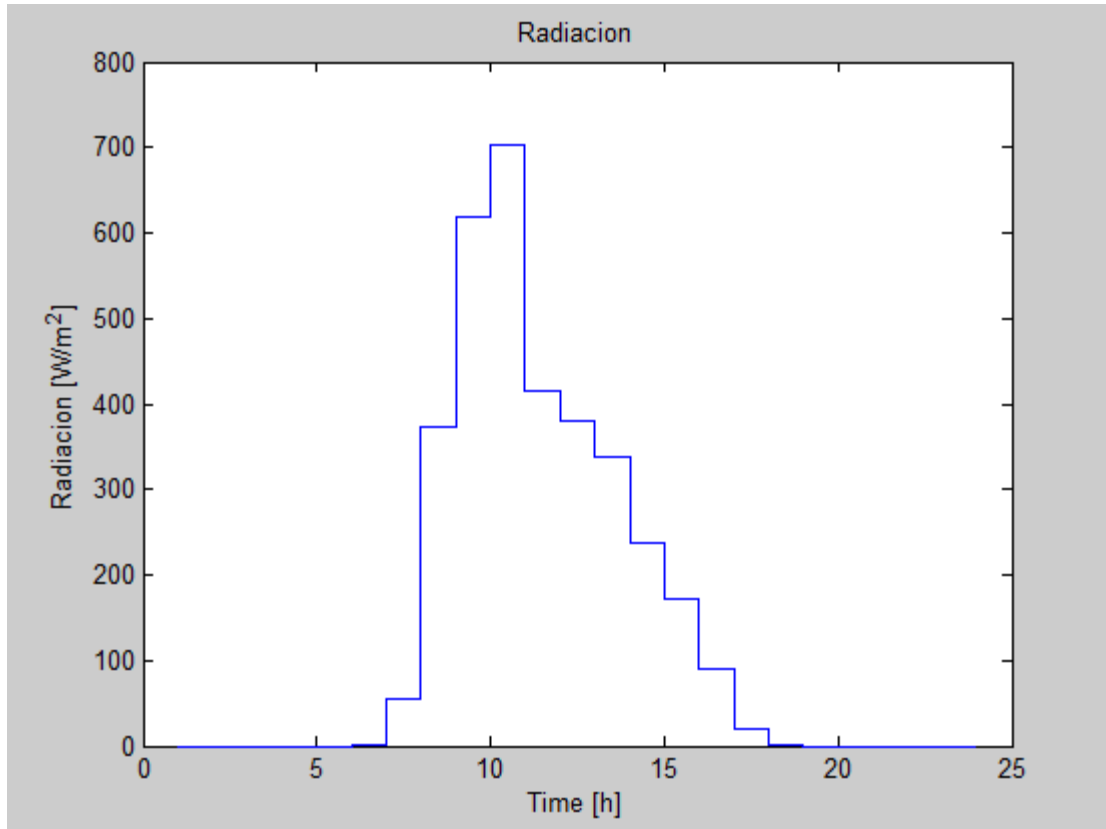


Figura E1 Perfil de Radiación.

En la Figura E1, se muestra el perfil de radiación, que corresponde a los datos de entrada utilizados en el desarrollo de este proyecto, provenientes de la Tabla E1, esto corresponde a los primeros 24 (un día).

Como se puede observar, realizando una comparación hora a hora de forma visual, la tendencia presentada por la gráfica se asemeja a los resultados arrojados por el modelo seleccionado para el panel solar.

Perfil de temperatura

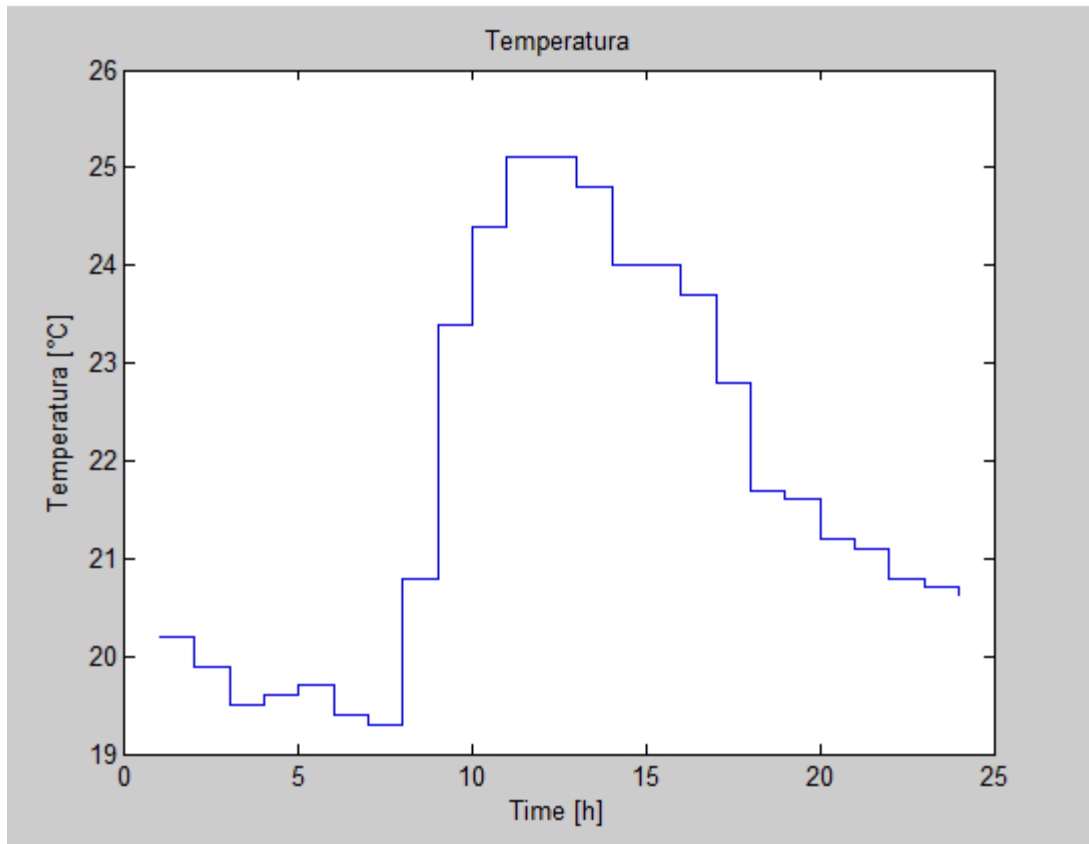


Figura E2 Perfil de Temperatura

En la Figura E2, se muestra el perfil de temperatura, que corresponde a los datos de entrada utilizados en el desarrollo de este proyecto, provenientes de la Tabla E1, esto corresponde a los primeros 24 (un día).

Perfil de velocidad del viento

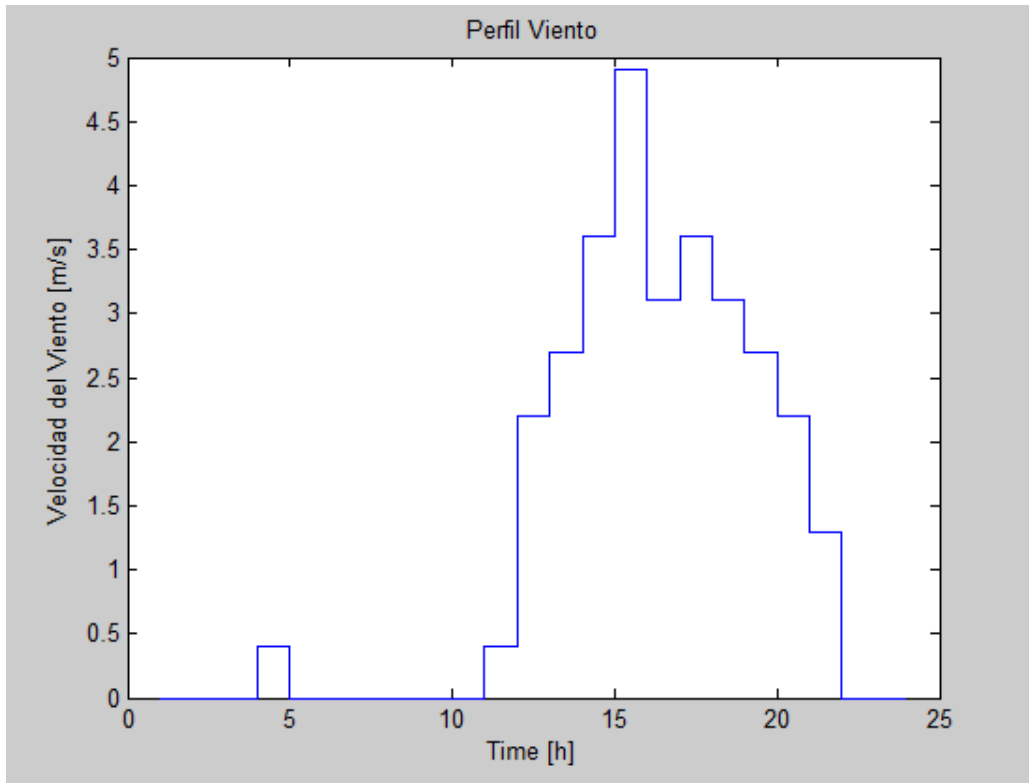


Figura E3 Perfil Velocidad del Viento

En la Figura E3, se muestra el perfil de velocidad del viento, que corresponde a los datos de entrada utilizados en el desarrollo de este proyecto, provenientes de la Tabla E1, esto corresponde a los primeros 24 (un día).

Como se puede observar, realizando una comparación visual, la tendencia presentada por la gráfica se asemeja a los resultados arrojados por el modelo seleccionado para el aerogenerador, no obstante, las diferencias que se puedan presentar se deben al tipo de modelo seleccionado para el aerogenerador .

Perfil de carga

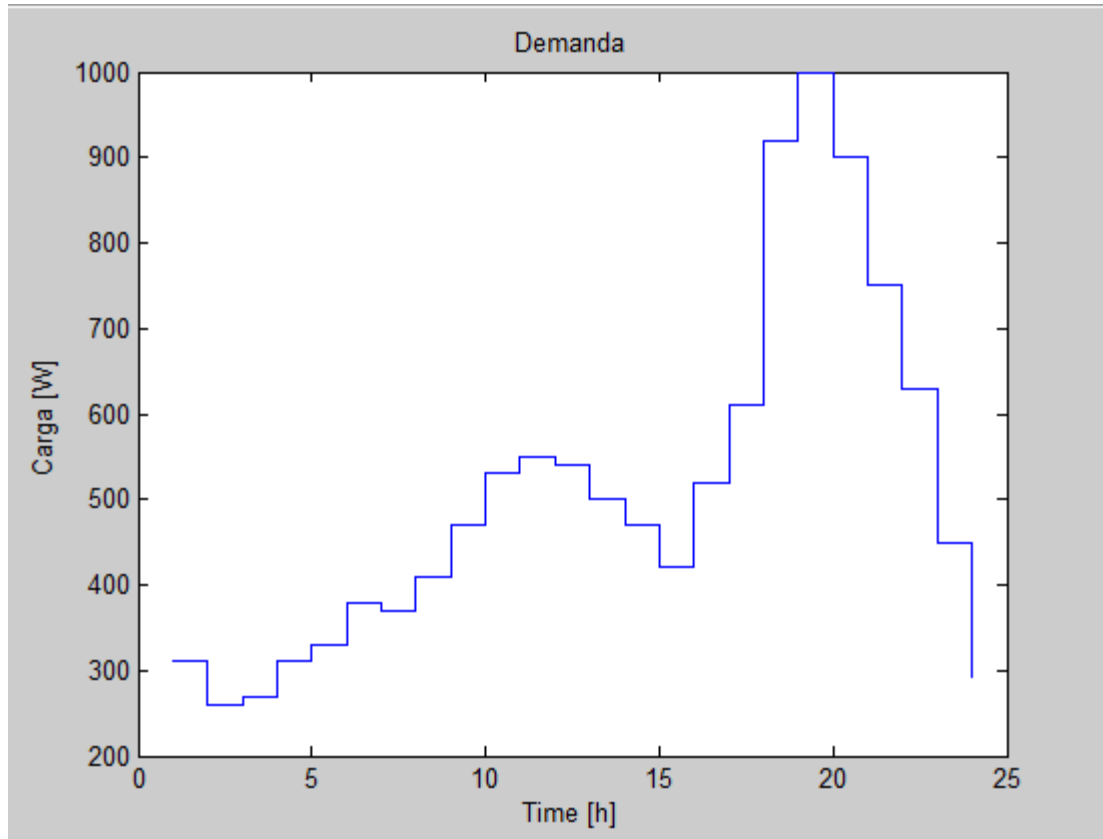


Figura E4 Perfil de Consumo Promedio

La Figura E4, muestra el consumo de energía para un día promedio tomado para la realización de la simulación del software.

Anexo F: Instalación del Software

Pasos para la instalación del software

A continuación se muestran los pasos necesarios para realizar la adecuada instalación del software para simulación de micro-redes eléctricas.

1. Doble click en el archivo de nombre “*microred_pkg*”.

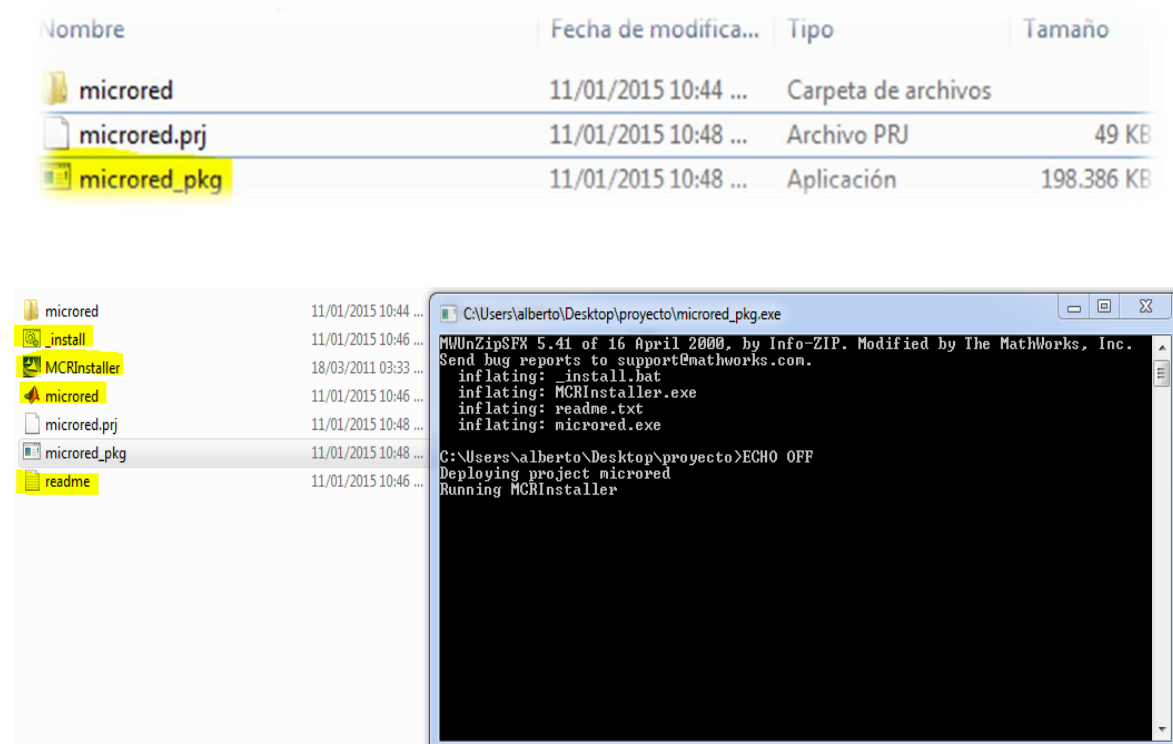


Figura F1 Instalación del software.

Una vez ejecutado este archivo, aparecerá la consola de trabajo de Windows y aparecerán los archivos mostrados en la parte izquierda de la figura 6.8.

Si se cuenta con Matlab en el ordenador, el archivo de nombre “*microred*” que aparece con el icono de Matlab abrirá la interfaz gráfica.

Los pasos descritos a continuación deben realizarse en caso de no contar con alguna versión de Matlab en el ordenador.

2. Aparecerá la ventana de selección de idioma, seleccionar y dar “ok”,

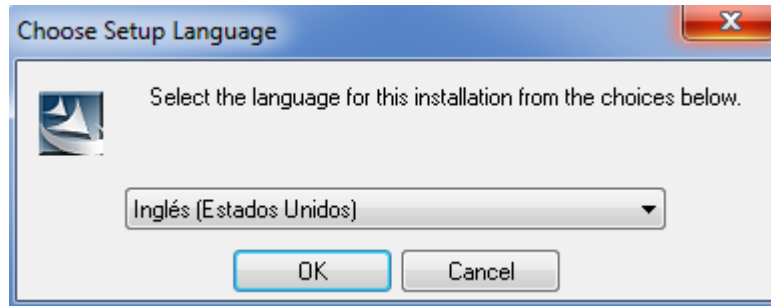


Figura F2 Selección de idioma.

3. Presione “install”.

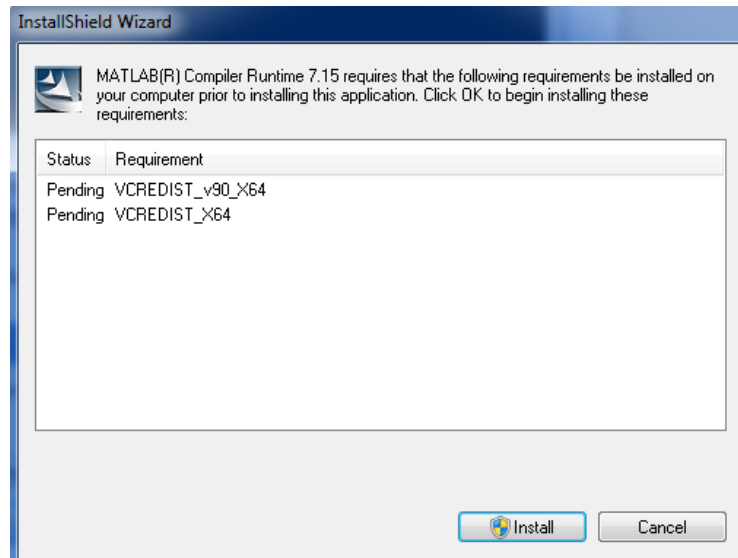


Figura F3 Pasos de instalación software.

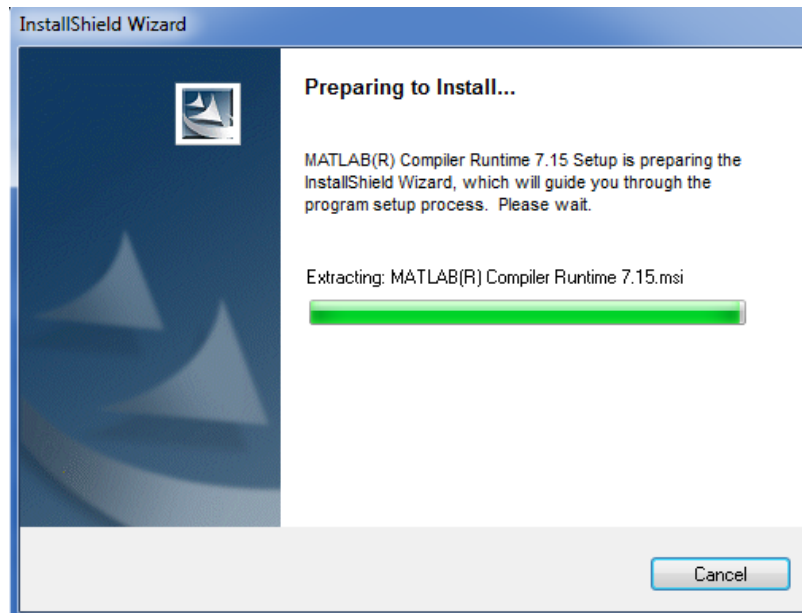


Figura F4 Extracción de archivos.

4. Una vez terminada la preparación de la instalación, aparecerá una pantalla como se muestra en la Figura F5.

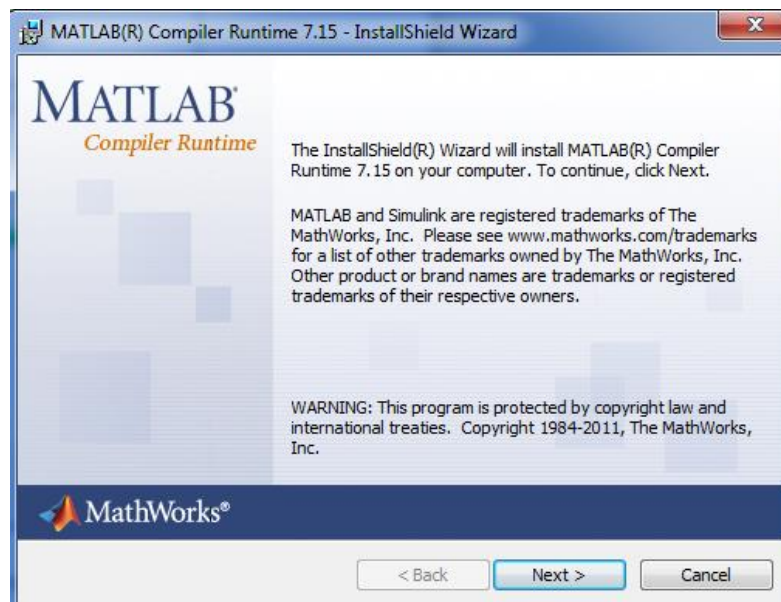


Figura F5 Instalador MATLAB Compiler Runtime.

A continuación presionar en “*next*”, escoger la ruta de instalación y finalmente presionar “*install*”

5. Espere que la instalación del software se complete y presionar “*finsh*”.

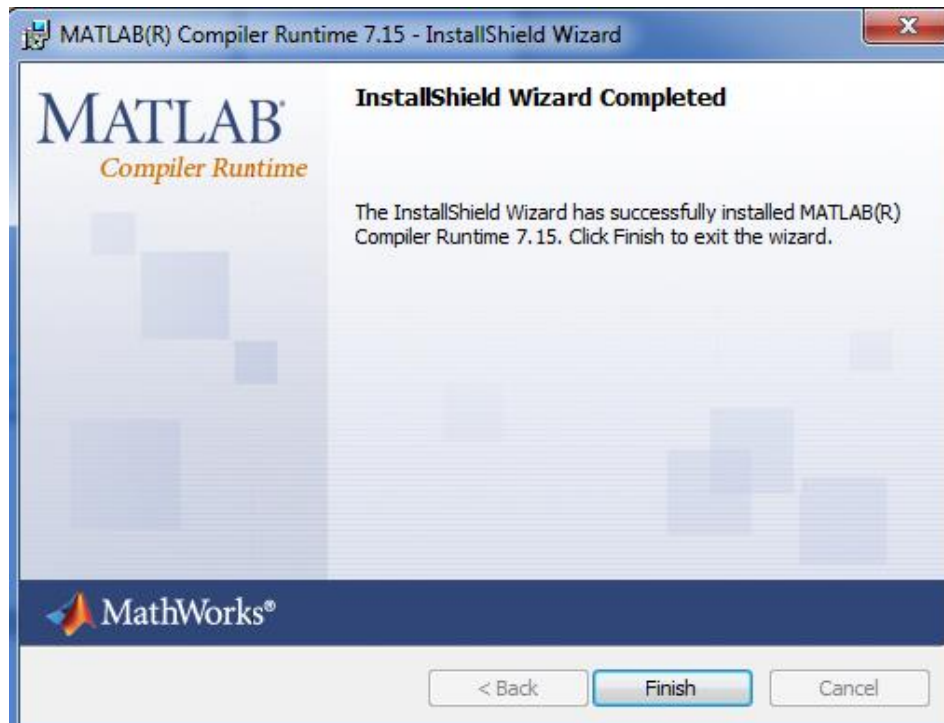


Figura F6 Instalador MATLAB Compiler Runtime

Para iniciar en la interfaz gráfica que permite modelar micro redes en estado estable, una vez ejecutado presione el botón “*instrucciones*”, este archivo le permitirá al usuario sacar la mayor eficiencia del software adquirido.

Archivo de instrucciones

INSTRUCCIONES DE USO SOFTWARE DE MICRO-REDES

Se ha realizado la instalación del software para el análisis de micro-redes eléctricas, tenga en cuenta que este software trabaja con modelos en estado estable, a continuación se explica la mejor manera de usar este software, así como también las funciones que cumple cada uno de los botones presentes en esta interfaz, tal y como muestra la Figura F7.

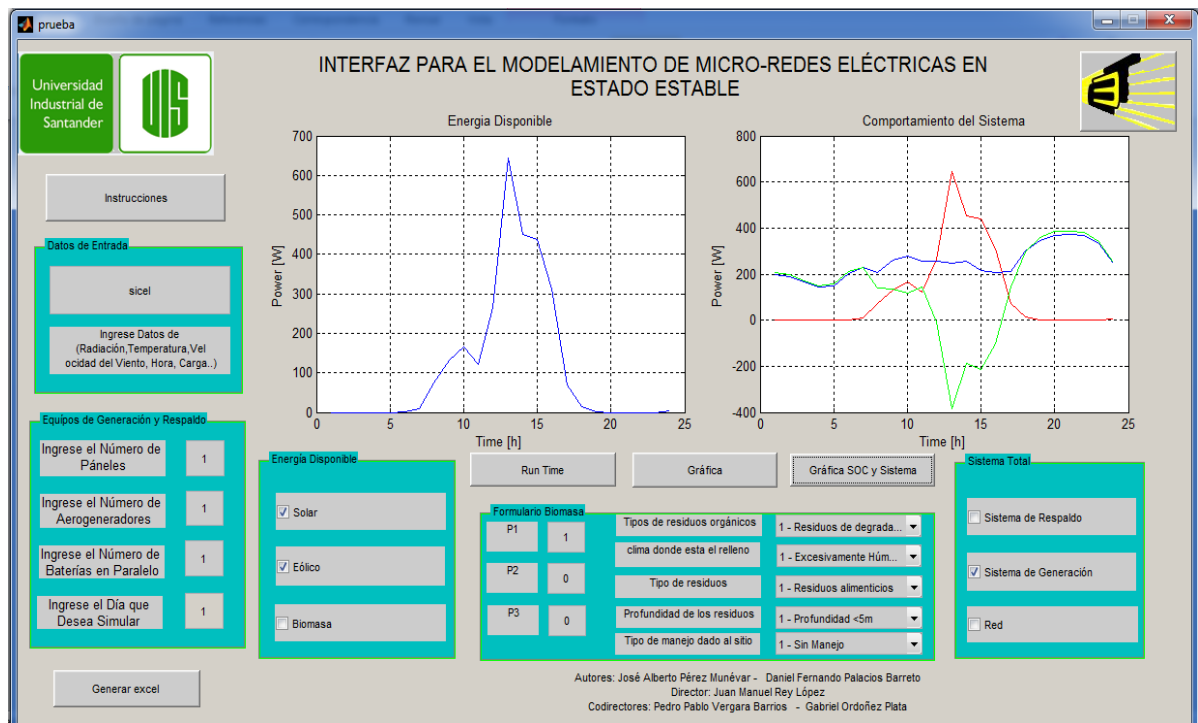


Figura F7 Entorno de trabajo del software de micro-redes.

1. El panel denotado "Ingreso de Datos", es un espacio en el cual se deben cargar los datos de entrada del sistema, los cuales deben presentarse en un archivo Excel en orden vertical, siendo la primera columna los datos de

radiación solar, la segunda columna los datos de temperatura, la tercera los datos de velocidad de viento y la cuarta la hora de toma de los datos.

Además de lo anterior el documento debe llevar consigo los datos de la carga a analizar, ingresando los datos de carga del año completo, si el usuario posee los datos de consumo de un día, puede replicar esta información, es decir copiarlos hasta completar el año, así tendrá un promedio de carga anual, estos datos deben ser ubicados en la quinta columna del archivo Excel de entrada siguiendo las especificaciones del párrafo anterior.

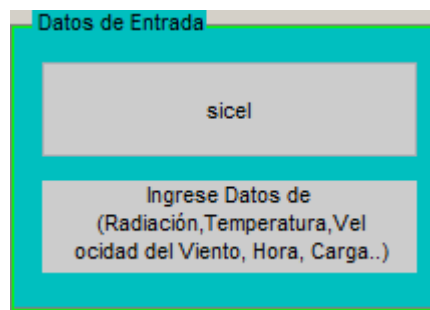


Figura F8 Panel de Ingreso de Datos.

Ubique el cursor sobre el espacio en blanco, aquí escriba el nombre el archivo Excel en el cual se encuentran cargados los datos para realizar la simulación.

Este archivo de Excel debe estar ubicado en la carpeta donde se encuentra el ejecutable, de lo contrario no reconocerá los datos y no se podrá realizar la simulación.

2. En el panel denotado “*Equipos de Generación y Respaldo*”, ingrese cada uno de los datos requeridos allí, recuerde que deben ser datos numéricos.

| Equipos de Generación y Respaldo | |
|---|----|
| Ingrese el Número de Páneles | 1 |
| Ingrese el Número de Aerogeneradores | 1 |
| Ingrese el Número de Baterías en Paralelo | 2 |
| Ingrese el Día que Desea Simular | 45 |

Figura F9 Equipos de Generación y Respaldo

Ubique el cursor sobre el recuadro frente a cada pregunta, seleccione el valor de equipos con los que cuenta, y finalmente oprima la tecla ENTER para carga los datos.

NOTA 1: si el usuario no cuenta con algún tipo de los equipos que aparecen en el panel “*Equipos de Generación y Respaldo*”, debe carga el espacio con un valor de CERO, de lo contrario los modelos internos quedaran incompletos y no se podrá realizar la simulación.

NOTA 2: El modelo de las baterías, es un modelo para una batería de 12 [V], ya que para las simulaciones la tensión de la barra DC es de 48 [V], es necesario tener 4 baterías en serie, por ende el usuario debe recordar que en la pregunta formulada para el numero de baterías en paralelo, por cada batería en paralelo, se tienen 4 baterías de 12 [V] en serie, es decir si el usuario ingresa 2 baterías en paralelo, en realidad tiene un total de 8 baterías.

3. El panel denotado “Energía Disponible”, cuenta con 3 *Check Box* de nombre “Solar, Eólica, Biomasa”, respectivamente, y como se muestra en la Figura F10.

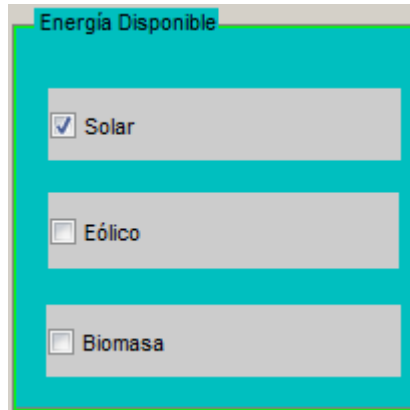


Figura F10 Panel de Energías Disponibles

Si el usuario selecciona (clic) el botón “Solar”, debe contar con los datos de radiación y temperatura, además del número de paneles a utilizar en la simulación, los cuales deben ser previamente cargados en el archivo Excel mencionado anteriormente, Si el usuario selecciona (clic) el botón “Eólica debe contar con los datos de velocidad del viento, además del número de aerogeneradores a utilizar en la simulación, y finalmente si el usuario selecciona “Biomasa”, se debe tener en cuenta que este modelo de biomasa es un aproximado por año por tanto representa una línea constante para el análisis, para la cual previamente se debe responder en valores numéricos a las preguntas hechas a continuación:

P1: Ingrese el número de años que duró la recolección de residuos.

P2: Ingrese la cantidad de masa de residuos dispuestos en el primer año (Valor en Mg [Mega gramos]

P3: Cual es el crecimiento estimado en la disposición anual de residuos esperado (valor en porcentaje %).

Por ejemplo, si su recolección de residuos dura 4 años, y anualmente aumenta un 5% la cantidad de residuos, ingrese 5 en esta casilla.

P4: Tipos de degradación de residuos

Digite:

- 1 - Residuos de degradación muy rápida
- 2 - Residuos de degradación moderadamente rápida
- 3 - Residuos de degradación moderadamente lenta
- 4 - Residuos de degradación muy lenta

P5: Tipo de clima donde se encuentra el relleno

Digite:

- 1 - Excesivamente Húmedo
- 2 - Húmedo
- 3 - Moderadamente Húmedo
- 4 - Moderadamente Seco
- 5 - Seco

P6: Tipo de residuos para determinación del valor de la generación potencial de metano:

Digite:

- 1 - Residuos alimenticios
- 2 - Residuos de Jardinería
- 3 - Papel

4 - Madera y paja

5 - Textiles & Pañales Desechables

P7: Profundidad de los residuos

Digite:

1 - Profundidad <5m

2 - Profundidad >=5m

P8: Tipo de manejo dado al sitio

Digite:

1 - Sin Manejo.

2 - Con Manejo.

3 - Semi-aeróbico.

4 - Condición Desconocida.

Responda estas preguntas en los espacios que aparecen en el panel “Formulario Biomasa”, tal y como se muestra en la Figura F11:

| Formulario Biomasa | | | |
|--------------------|---|------------------------------|----------------------------|
| P1 | 1 | Tipos de residuos orgánicos | 1 - Residuos de degrada... |
| | | clima donde esta el relleno | 1 - Excesivamente Húm... |
| P2 | 0 | Tipo de residuos | 1 - Residuos alimenticios |
| P3 | 0 | Profundidad de los residuos | 1 - Profundidad <5m |
| | | Tipo de manejo dado al sitio | 1 - Sin Manejo |

. Figura F11 Formulario Biomasa.

NOTA: si el usuario no cuenta con la generación de energía eléctrica por medio de Biomasa, cargue con la tecla ENTER los valores que vienen predeterminados en el panel “Formulario Biomasa”, correspondientes a las preguntas P1, P2, P3 si el usuario no cuenta con esta generación y cambia estos datos predeterminados, modificara internamente el software y no realizara ningún tipo de simulación.

4. Una vez seleccionada la generación renovable con la que se cuenta, se debe presionar el botón de nombre “Run Time”, con el cual se cargan los modelos matemáticos de cada tipo de generación.

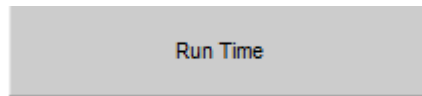


Figura F12 Botón para Cargar los Modelos

Luego se debe presionar el botón de nombre “Gráfica”, el cual arroja la gráfica correspondiente a la simulación realizada.

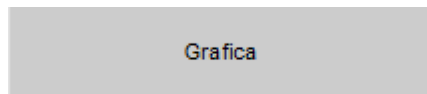


Figura F13 Botón para Graficar

Se debe tener en cuenta que cada vez que se quiera hacer una simulación se deben seguir los pasos anteriores en orden, es decir si primero cargue solar y realice la respectiva simulación, pero ahora quiero solar y eólica al tiempo, debo elegir en el panel las respectivas generaciones presionar Run Time y Graficar, esto con el fin de que la interfaz limpie y cargue los nuevos valores a simular.

5. El panel denotado “Sistema Total”, cuenta con 2 Check Box de nombre “Sistema de Respaldo” y “Sistema de Generación”, tal como se muestra en la Figura F14.

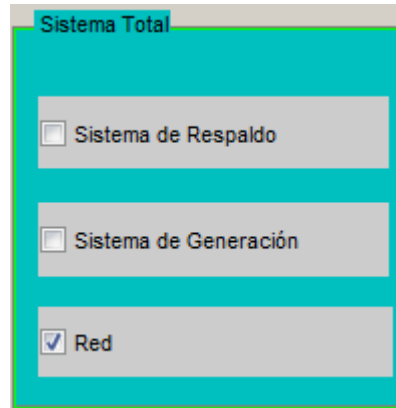


Figura F14 Sistema Total.

Si el usuario selecciona (clic) el botón “Sistema de Respaldo”, carga el número de baterías definido anteriormente en el paso 2, luego seleccionar el botón de nombre “Grafica SOC y Sistema” para poder visualizar en la gráfica ubicada en el lado derecho el Comportamiento de Estado de Carga (SOC), Si el usuario selecciona (clic) el botón “Sistema de Generación” podrá visualizar en el mismo espacio de la gráfica anterior el comportamiento total del sistema (generación total, carga y potencia de las baterías) y si el si el usuario selecciona (clic) el botón “Red” podrá visualizar en el mismo espacio de la gráfica anterior el comportamiento de la red eléctrica, el usuario debe recordar que solo uno de los tres debe estar seleccionado, es decir uno a la vez.

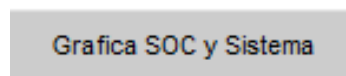


Figura F15 Grafica SOC y Respaldo

6. Como último paso de este software se presentan 2 graficas, la primera de ellas (izquierda), está relacionada con los resultados arrojados al presionar un de los botones del panel denotado “Energías Disponibles” y la segunda (derecha), está relacionada con los resultados arrojados al presionar un de los botones del panel denotado “Sistema Total”

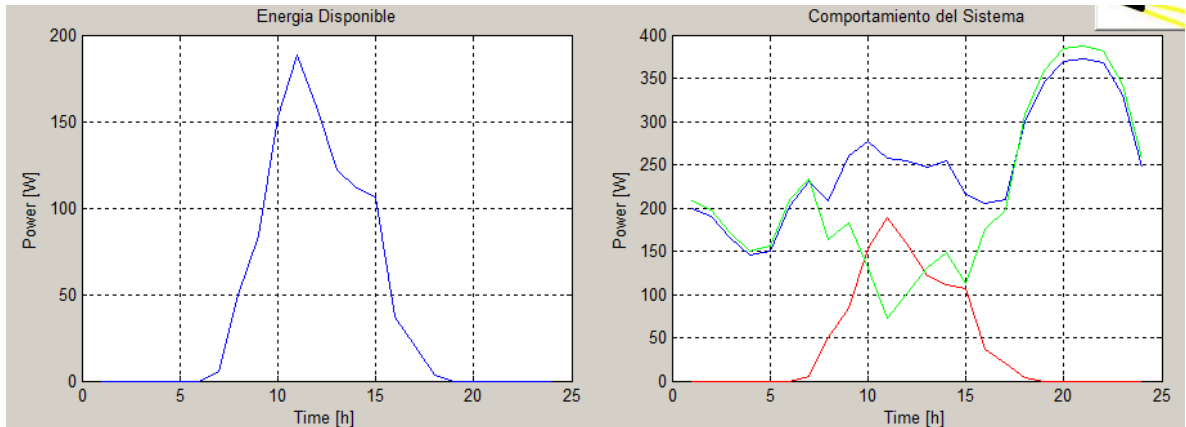


Figura F16 Gráficas de Potencia.

Mostrando en cada una de ellas respectivamente la gráfica de potencia relacionadas con los datos de entrada suministrados por el usuario.

Recuerde que al final de cada simulación o trabajo, si el usuario desea ver de manera numérica los vectores de potencia generados (solar, eólico, biomasa, potencia total generada y potencia de las baterías y la red), debe oprimir el botón de nombre “Generar Excel”, y aparecerá en la carpeta donde se está realizando la simulación, un archivo de nombre “Vectores de Potencia”, el cual contiene toda la información de la simulación realizada.

Como última recomendación el usuario no debe olvidar que se deben seguir paso a paso las instrucciones descritas anteriormente, para el correcto uso de este software y tener en cuenta las notas al final de los ítems.