



Disertación

Mestrado em Engenharia Electrotécnica

***Aprovechamiento de la Energía Eólica en Ambientes
Urbanos***

Diego Patricio Peña Banegas

Leiria, *octubre 3 de 2017*



Disertación

Mestrado em Engenharia Electrotécnica

***Aprovechamiento de la Energía Eólica en Ambientes
Urbanos***

Diego Patricio Peña Banegas

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor **Pedro José Franco Marques**, Professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação do Doutor **Julio César López Quizhpi** Professor da escola de Engenharia Elétrica da Universidad de Cuenca.

Leiria, *octubre 3 de 2017*

Dedicatoria

A mis padres Patricio y Rosalía, pilares fundamentales en mi vida, con mucho amor y cariño, les dedico todo mi esfuerzo, en reconocimiento a todo el sacrificio entregado para hacer de mí una mejor persona.

A mi hermana por enseñarme a levantarme ante cualquier adversidad, a mis sobrinos Odalys y Leonel quienes a su corta edad llegaron a ser mi fuente de motivación e inspiración, a mi Tía Carmita por su apoyo incondicional y estar siempre a mi lado como una segunda madre.

A mi familia, amigos, y personas especiales en mi vida que confiaron en mi brindándome palabras de aliento para que este sueño se haga realidad.

Diego Peña.

Agradecimientos

Hoy, al culminar una meta más de mi vida académica quiero dar gracias a cada una de las personas que fueron participes en este proceso, porque de una u otra forma, me han presidido para la realización de este proyecto.

Por ello, en primer lugar, agradezco a Dios por ser mi fuente de fortaleza y confianza para establecer mis metas, superando obstáculos y dificultades que se me han presentado a lo largo de mi vida.

A mis queridos padres por darme el mejor ejemplo de vida. Su constancia y fuerza personal se ve reflejada en mi día a día, aprendiendo que con esfuerzo y perseverancia todo es posible.

A mis tutores de tesis, Pedro Marques y Julio López por toda su dedicación, esfuerzo y orientación en el desarrollo de este proyecto. Sus consejos y sugerencias me han ayudado significativamente para elaborar este trabajo investigativo.

Al Instituto Politécnico de Leiria por su acogida, que me impartió los mejores conocimientos a través de sus docentes para ayudarme crecer como profesional.

Al programa de becas SENESCYT – Ecuador, que me ha dado la oportunidad de enriquecer conocimientos y principios imperecederos de calidad educativa fuera del país, para cumplir con su objetivo de formar grandes profesionales para el crecimiento del país.

A la Universidad de Cuenca, a más de ser mi universidad de pre-grado, por la apertura brindada para facilitar la información necesaria en el desarrollo del presente proyecto.

A todos ustedes. ¡Gracias!

Diego Peña.

Resumen

Esta tesis presenta la utilización de un modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM) a través de la metodología *DistFlow* para la operación óptima de la micro red con el fin de observar la contribución que tiene la integración del recurso del viento en los ambientes urbanos. Para ello, se realizó la parametrización de las variables de viento en condiciones atmosféricas y geográficas propias del sitio de estudio, utilizando la distribución de *Weibull*, ampliamente usada para la estimación del viento. Se exhibe dos casos de estudio reales de micro redes en la ciudad de Cuenca. El primer caso de estudio está conformado por cargas residenciales y comerciales de un edificio pequeño, el segundo caso presenta el análisis de una micro red que abastece energía eléctrica para una urbanización. Para los dos casos de estudio se plantea una función objetivo que minimiza los costos de energía de la red de distribución a través de diferentes escenarios; estos escenarios estudian el comportamiento del sistema cuando existe o no el recurso del viento y un sistema de almacenamiento (baterías).

El uso de la energía eólica en la parte urbana de la ciudad abarca beneficios para mitigar problemas en la red de distribución como son las pérdidas de energía y la disminución del consumo energético externo de la red mediante el uso de funciones de optimización específicas.

Palabras claves: energía eólica, micro red, optimización, red de distribución.

Abstract

This thesis presents the use of a mixed integer nonlinear programming model (PNLEM) through *DistFlow* methodology for the optimal operation of the microgrid with the purpose of observing the contribution of the integration of the wind resource in urban environments. For this, the parameterization of the wind variables in atmospheric and geographic conditions of the study site was done, using the *Weibull* distribution, widely used for wind estimation. It's presented in two real case study of a microgrid in the city of Cuenca. The first case study is composed of residential and commercial loads of a small building, the second case presents the analysis of a microgrid that supplies electrical energy for an urbanization. For the two cases studies an objective function is proposed that minimizes the energy costs of the distribution network through different scenarios; these scenarios study the behavior of the system when there is or not a wind resource and a storage system (batteries).

The use of wind energy in the urban part of the city includes benefits to mitigate problems in the distribution network such as energy losses and decrease of external energy consumption through the use of specific optimization functions.

Keywords: wind energy, microgrid, optimization, distribution network.

Lista de figuras

Figura 1	Velocidad y Dirección del viento medido en el mundo real	29
Figura 2	Turbina Eólica tipo HAWT instalada en el medio urbano	31
Figura 3	Micro Red Típica	34
Figura 4	Sistema radial	39
Figura 5	Función de densidad de la distribución de Weibull	45
Figura 6	Función CDF e inversa de la distribución de Weibull	45
Figura 7	Curva característica del viento de un año en la ciudad de Cuenca	46
Figura 8	Ubicación del lugar de Estudio (Caso de Estudio A).....	48
Figura 9	Micro red (Caso de Estudio A)	50
Figura 10	Demanda Total de la Micro red (Potencia Activa) - Caso A	51
Figura 11	Demanda Total de la Micro red (Potencia Reactiva) Caso A	52
Figura 12	Ubicación (Caso de Estudio 2)	53
Figura 13	Demanda Total de la Micro red (Potencia Activa y Reactiva) - Caso B.....	55
Figura 14	Esquema micro red caso B.....	56
Figura 15	Metodología.....	60
Figura 16	Pérdidas de energía en la micro red para los tres días – Escenario 1	63
Figura 17	Potencia del Transformador Activa y Reactiva para los tres días – Escenario 1	64
Figura 18	Potencial Eólico para el estudio del Escenario 2	65
Figura 19	Pérdidas de energía en la micro red para los tres días – Escenario 2	66
Figura 20	Potencia Activa del Transformador (P-Sub), Demanda del sistema (P-Dem) y Potencial Eólico (P-EE) - Escenario 2	67
Figura 21	Pérdidas Totales del sistema con y sin recurso eólico	68
Figura 22	Potencia de la subestación (Pss) con y sin recurso eólico.....	69
Figura 23	Perfil de Tensiones Escenarios 1 y 2	70
Figura 24	Efecto de carga y descarga de las baterías – Escenario 3.....	71
Figura 25	Rendimiento del 50% de la batería – Escenario 3.....	75
Figura 26	Rendimiento del 60% de la batería – Escenario 3.....	75
Figura 27	Rendimiento del 100% de la batería – Escenario 3.....	75
Figura 28	Potencial Eólico – Escenario 1 Caso B.....	75
Figura 29	Perdidas del sistema – Escenario 1 Caso B.....	77
Figura 30	Potencia del Transformador caso B	78
Figura 31	Rendimiento del 60 % de la batería Caso B.....	79
Figura 32	Rendimiento del 90 % de la batería Caso B.....	80
Figura 33	Rendimiento del 100 % de la batería Caso B.....	80
Figura 34	Perfil de tensiones caso B	81

Lista de tablas

Tabla 1 - Análisis comparativo de los datos técnicos principales de Catalogue of Europe an Urban Wind Turbine Manufacturers.....	33
Tabla 2 Coordenadas del lugar de medición	43
Tabla 3 Frecuencia de velocidades.....	44
Tabla 4 Parámetros de la Distribución de Weibull.....	46
Tabla 5 Condiciones ambientales de los sitios a estudiar.....	48
Tabla 6 Características de la Turbina (Caso de Estudio A).....	49
Tabla 7 Energía estimada por el recurso eólico para el Caso A	49
Tabla 8 Parámetros de las líneas - Caso A	50
Tabla 9 Tipo de Batería para Caso de estudio A	53
Tabla 10 Estrato de Consumo mensual de los clientes - Centro Sur	54
Tabla 11 Consumo por día y mensual caso B	54
Tabla 12 Parámetros de las líneas Caso B.....	56
Tabla 13 Características de la Turbina - Caso de Estudio B	57
Tabla 14 Energía Promedio (Caso de Estudio B).....	57
Tabla 15 Tipo de Batería para Caso B	58
Tabla 16 Costos de Inversión Caso A y B	59
Tabla 17 Costo de Operación y Mantenimiento Caso A y B	59
Tabla 18 Costos del sistema sin recurso eólico	62
Tabla 19 Pérdidas de la red totales por día - Escenario 1.....	62
Tabla 20 Costo Total y por día de la red de distribución – Escenario 2.....	66
Tabla 21 Pérdidas totales del sistema por día – Escenario 2.....	67
Tabla 22 Cuadro comparativo de las pérdidas del sistema entre el escenario 1 y 2	68
Tabla 23 Costos y Pérdidas totales del sistema para los diferentes rendimientos de la batería.....	75
Tabla 24 Costos del sistema – Escenario 1 caso B.....	76
Tabla 25 Pérdidas Totales por día Escenario 1 Caso B.....	76
Tabla 26 Costos Caso B con EDS.....	78

Lista de siglas

AMPL Lenguaje de Programación Matemática

ARCONEL Agencia de Regulación y Control de Electricidad

BT Baja Tensión

CDF Función de Distribución

CONELEC Consejo Nacional de Electricidad

CFD Dinámica de fluidos computacionales

ESD Sistema de Almacenamiento de Energía

GD Generación Distribuida

HAWT Turbinas de eje horizontal

IEC Comisión Electrotécnica Internacional

MT Media Tensión

OPF Flujos de Potencia Optimo

PCC Punto de Acoplamiento Común

PDF Función de Densidad

PNLEM Programación no lineal entero mixto

SE Subestación Eléctrica

TGM Tablero General de Medición

VAWT Turbinas de eje vertical

Índice

DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTOS	VII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABLAS	XV
LISTA DE SIGLAS	XVII
ÍNDICE	XIX
CAPITULO I	23
INTRODUCCIÓN GENERAL	23
1.2 Justificación	24
1.3 Problema	25
1.4 Alcance	25
1.5 Metodología	25
1.6 Objetivo	26
1.6.1 Objetivos Específicos	26
1.7 Hipótesis	26
CAPITULO II	27
ESTADO DEL ARTE	27
2.1 Introducción	27
2.2 Estimación del Recurso Eólico	27
2.3 Evaluación del Recurso Eólico	29
2.4 Tecnologías Eólicas en Ambientes Urbanos	30
2.5 Micro Redes	33
2.6 Optimización multi objetivo en Sistemas de Potencia	35
CAPÍTULO III	37
METODOLOGÍA	37
3.1 Introducción	37
3.2 Modelo Matemático	37
3.2.1 Estructura del Modelo Matemático	37
3.2.2 Formulación del modelo matemático	38

3.2.2.1	Parámetros del modelo matemático	39
3.2.2.2	Modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM)	41
3.2.3	Sistema de Almacenamiento de Energía	42
3.4	Estimación y Evaluación del Recurso Eólico	43
3.4.1	Clasificación de velocidades	44
3.5	Potencial Eólico	47
3.6	Casos de Estudio	47
3.6.1	Caso de Estudio A	48
3.6.2	Caso de Estudio B	53
3.7	Costos	58
3.7.1	Costos de implementación Caso A y B	59
CAPITULO IV		61
ANÁLISIS DE RESULTADOS		61
4.1	Introducción	61
4.2	Resultados Caso A	61
4.2.1	Escenario 1	62
4.2.1.1	Costos	62
4.2.1.2	Pérdidas en la micro red	62
4.2.1.3	Potencia de la Subestación (Transformador)	63
4.2.2	Escenario 2	64
4.2.2.1	Potencial Eólico	64
4.2.2.2	Costos	65
4.2.2.4	Pérdidas en la micro red	66
4.2.2.5	Potencia de la Subestación	67
4.2.3	Comparación de Escenarios 1 y 2	68
4.2.4	Escenario 3	70
4.2.4.1	Comportamiento de la micro red según diferentes valores de rendimiento en el sistema de almacenamiento.	71
4.3	Resultados Caso Estudio B	75
4.3.1	Escenario 1 Caso B	75
4.3.1.1	Potencial Eólico	75
4.3.1.2	Costos	76
4.3.1.3	Perdidas en la red	76
4.3.1.5	Potencia de la subestación (Caso B)	77

4.3.2 Escenario 2 Caso B	78
4.3.3 Perfil de Tensiones Caso B	79
CAPITULO V	83
CONCLUSIONES	83
TRABAJOS FUTUROS	85
BIBLIOGRAFIA	87
ANEXOS	90

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

El desarrollo de las fuentes de generación de energía limpia y renovable en los últimos años en los países de Sudamérica ha tenido un crecimiento simbólico con un objetivo mundial que es reducir los niveles de contaminación en el medio ambiente y tratar de compensar la creciente demanda de energía eléctrica que hoy afrontan grandes ciudades.

El recurso del viento es una fuente de energía renovable del cual el hombre tiene conocimiento desde épocas muy antiguas, sin embargo, se ha inclinado a la generación de energía más contaminantes. El aprovechamiento del recurso del viento es una fuente alterna para tratar de resolver el problema energético y reducir la dependencia de los escasos y caros combustibles fósiles.

En la actualidad, la producción de energía eléctrica a través de la energía eólica en ambientes urbanos está teniendo un apogeo significativo debido a los grandes avances tecnológicos en el diseño de las micro turbinas. La transición no solo implica un cambio de fuente de energía, sino más bien en que sea una fuente de energía rentable, sustentable y beneficiosa para el desarrollo del entorno. Ciudades alrededor del mundo están comprometidas a usar un alto porcentaje de energía limpia.

La generación de energía eólica en el ambiente urbano por sus características fue definida originalmente para cubrir pequeñas demandas de electricidad en residencias, por lo general en electrodomésticos con altos índices de consumo. Sin embargo, hoy en día, este tipo de generación en ciudades tiene pocos ejemplos de adaptación debido a que el potencial eólico en estas zonas tiene peculiaridades que dificultan el uso de la energía eólica, a estas peculiaridades se puede mencionar una alta turbulencia por las obstrucciones que producen los edificios, viviendas, árboles o cualquier tipo de edificación que tenga a su alrededor pues el flujo de aire depende de las características de la morfología de la arquitectura, a esto también se agrega la cercanía de los equipos con las personas, el ruido, entre otros que hacen que esta tecnología sea peculiar. **(Aragão Teixeira 2010)**

Ecuador al ser un país en desarrollo, la explotación de energías renovables ha crecido significativamente en estos últimos años, por lo general estos proyectos se han enfocado en la utilización del recurso hídrico, entre ellos y el más importante ha sido el proyecto COCA CODO SINCLAIR entrando en operación en el año 2016. Sin embargo, el aprovechamiento del recurso eólico es considerablemente bajo en el país. Por lo tanto, en

este proyecto es necesario hacer una investigación en el ámbito energético con casos de estudios reales para conocer la viabilidad del recurso eólico en la ciudad, así como observar los beneficios que aportaría en el lugar al instalar este tipo de tecnología.

Por ello esta tesis, está estructurada en 5 capítulos. En el primer capítulo está conformado de los detalles más relevantes del proyecto como es la justificación, alcance, problemas y los objetivos a realizar. En el capítulo 2 se realiza un estado del arte acotando lo más selecto de una revisión bibliográfica con referencia a los temas del aprovechamiento del recurso del viento implementado en micro redes. El capítulo 3 está basado en la metodología del proyecto, donde el punto fundamental es, realizar la formulación de un modelo de optimización matemático aplicando el método *DistFlow* en micro redes de distribución radial, a más de esto en este capítulo se adaptan los parámetros del viento en las condiciones atmosféricas y geográficas propias de la ciudad de Cuenca para la caracterización de la curva de viento existente que se aplicará en los casos de estudio. En el capítulo 4 se realiza el análisis de los resultados del modelo matemático en referencia a cada caso de estudio a través de una función objetivo para obtener una solución óptima. Finalmente, en el capítulo 5 se emiten conclusiones y recomendaciones del proyecto.

1.2 Justificación

La energía eólica es una fuente de energía viable, con amplio espacio para la generación distribuida y dado que la mayoría de la población del mundo vive en áreas urbanas de la ciudad, la implementación del recurso eólico en este ambiente tiene un elevado potencial sustentable que puede contribuir positivamente para los objetivos renovables de un país proporcionando una alternativa de generación distribuida, que ayuda significativamente en las reducciones de emisiones del CO₂. Según algunos estudios realizados como (**Baller 2011**) las ciudades son responsables en un 72% de emitir estas emisiones. Otro beneficio que ofrece esta tecnología aplicada en ambientes urbanos es el evitar los costos de transporte de energía, eliminar la industrialización de las zonas rurales e invasión de paisajes naturales.

En los países de primer mundo como Estados Unidos, Alemania, Rusia, China, entre otros que ya se ha implementado la producción de energía eólica en partes urbanas de la ciudad, estos proyectos han representado una válida y eficiente solución de abastecimiento energético, pues surge un nuevo paradigma de distribución de energía para el consumidor ya que pasa a tener el papel de productor de su propia energía.

Así pues, con la integración de esta tecnología en las ciudades aumenta una fuente de información y de interés en las personas para que estas acoplen y confíen en este sistema en sus vidas cotidianas.

1.3 Problema

Mas allá de los beneficios que abarca la utilización de las energías renovables para la generación de electricidad, la producción de energía sobre todo de la energía eólica en ambientes urbanos tiene varios problemas, entre ellos se puede mencionar: la variación del flujo del viento no es constante a lo largo del año, el tipo de la turbina debe ser eficiente para producir energía a bajas velocidades de viento y soportar altos niveles de turbulencia ya que se encuentra cerca de grandes obstáculos. La procreación de ruido producida por las turbinas es un factor a tomar en cuenta puesto que éstas son instaladas muy cerca de las personas y finalmente el precio de implementación de esta tecnología, todo esto implica retos y desafíos para el usuario y fabricante.

1.4 Alcance

La utilización de la micro generación distribuida mediante energías renovables en Ecuador en ambientes urbanos tiene muy poca aplicabilidad con porcentajes mínimos, el país en los últimos años se ha enfocado en mayor parte en la implementación de centrales hidroeléctricas pues es el recurso renovable hoy en día que mayor beneficios entrega al país.

Por lo mismo, este estudio está limitado únicamente en el aprovechamiento del recurso eólico en ambientes urbanos de la ciudad de Cuenca donde se analizarán dos casos de estudio de pequeñas micro redes de uso residencial en determinados lugares de la ciudad para observar su comportamiento con la implementación de este tipo de tecnología.

1.5 Metodología

Para evaluar la implementación del recurso eólico en micro redes de la ciudad de Cuenca, será importante realizar algunos parámetros que intervienen en dicho estudio, para ello se ejecutaran los siguientes pasos a seguir:

- ✓ **Recopilación de Información:** Obtención de datos del recurso del viento y de demanda energética de los casos de estudio;
- ✓ **Práctico:** Implementación del modelo matemático de optimización utilizando herramientas de optimización matemática;

- ✓ **Analítico:** Observación del comportamiento de la micro red a través de los casos de estudio implementados según la función objetivo planteada en el modelo de optimización;
- ✓ **Deductivo:** Según los datos obtenidos y estudios realizados se podrá dar conclusiones del sistema implementado.

1.6 Objetivo

El proyecto tiene como fin analizar la viabilidad del uso de la micro generación eólica en la parte urbana de la ciudad de Cuenca ubicada en el centro sur de la República del Ecuador.

1.6.1 Objetivos Específicos

- Analizar e identificar los sitios potenciales de viento cuyo propósito es realizar el estudio energético de los casos de estudio, implementando el recurso eólico en la parte urbana de la ciudad de Cuenca;
- Desarrollar un modelo de optimización matemático que represente el problema propuesto y permita obtener resultados confiables, los cuales garanticen la operación óptima de la micro red obteniendo beneficios técnicos-económicos para el consumidor y la red de distribución;
- Resolver el problema de minimización de los costos de energía de la red de distribución para los dos casos de estudio planteados;
- Analizar resultados, realizar conclusiones y recomendaciones en base a la evaluación del problema de optimización.

1.7 Hipótesis

¿El potencial eólico de la ciudad de Cuenca podrá ser lo suficientemente aceptable para satisfacer las necesidades energéticas de los casos de estudio?

¿Es económicamente viable la utilización de esta tecnología a largo plazo en las ciudades?

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La Energía Eólica produce energía eléctrica de manera amigable con el medio ambiente, por ser limpia y menos contaminante como las otras fuentes de energía de uso tradicional, es por ello que en los últimos años el aumento de la energía eólica a nivel mundial ha sido considerablemente alto.

Para su estimación amerita realizar algunos estudios previos de monitoreo, entre ellos el más importante es determinar la velocidad y el potencial que existe en el lugar. Por lo tanto, la evaluación del recurso eólico es vital para obtener información clara y precisa para la implementación de un proyecto. Estudios de la evaluación del viento realizado por (**Street & Vic 2009**) han demostrado que el mejor aprovechamiento del viento se da en zonas adyacentes a la costa, sin embargo, en la zona urbana puede obtener un aprovechamiento considerable para obtener el mejor recurso eólico de la zona.

A fin de mejorar la problemática que conlleva hoy en día las redes eléctricas de distribución tradicionales, han surgido en los últimos años una nueva arquitectura de red eléctrica autónoma y escalable basada en las micro redes que utiliza fuentes de generación distribuida.

Por lo mismo, en este proyecto, el recurso del viento es considerado como un integrante primordial para producción de energía en el medio urbano para ser aprovechado en una micro red de distribución.

2.2 Estimación del Recurso Eólico

Los factores que influyen en la velocidad del viento en las zonas urbanas tiene dos aspectos principales según (**Bañuelos Ruedas 2011**) los cuales son: uno, a capas muy bajas de la atmosfera las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción de la superficie terrestre. Dos, la topografía local y los patrones climáticos influyen para el aprovechamiento de este recurso. Como consecuencia de lo anterior, se puede mencionar algunos de estos factores que afectan en el aprovechamiento de la velocidad del viento, especialmente en los ambientes urbanos que son más propensos a obstáculos como los edificios y viviendas, a más de los factores climáticos para que no se dé la explotación máxima de este recurso.

Para la estimación del recurso eólico urbano (**Karthikeya et al. 2016**) cita algunos métodos de estimación, en dicho estudio se argumenta que el potencial de viento en áreas urbanas puede ser evaluado utilizando anemometría estándar en el lugar, Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) y experimentos de túnel de viento en el modelo físico de un edificio.

Como una estimación preliminar varios estudios de diferentes autores comentan que se puede realizar mediante un reconocimiento físico visual de los indicadores ecológicos del viento, los cuales los más notables son los que brinda la vegetación. Los árboles y arbustos deformados por la acción del viento son registros muy valiosos de la velocidad y de la dirección del viento dominante. Sin embargo, esto es más aplicado en el medio rural donde existe mayor velocidad de viento por estar expuestos a áreas más abiertas y sin mucho obstáculo.

El viento urbano se caracteriza por tener fluctuaciones significativas en la dirección del viento y la velocidad del viento según se comenta en el estudio de (**Bertényi & Young 2009**), esto se representa mediante una figura de una historia de 200 segundo del viento urbano en el mundo real, el cual es medida con un anemómetro ultrasónico a una velocidad de 4 mediciones por segundo. Esto se ilustra en la **Figura 1**, en el cual se observa que la velocidad del viento considerablemente esta entre 4m/s y 14m/s en un periodo relativamente corto. En este estudio, etiquetan las fluctuaciones en 3 puntos. El punto “uno” corresponde a las fluctuaciones muy rápidas pero pequeñas en magnitud, el punto “dos” corresponde a fluctuaciones con cambios suaves que se dan durante decenas de segundos, y finalmente el punto “tres” se da cuando ocurre fluctuaciones con cambios bruscos regulares, evidentes por el salto instantáneo de velocidad de 5m/s a 12 m/s como se observa en la figura, además señala que el mecanismo físico para que se den estos cambios abruptos es el paso de un movimiento grade, que por lo general son los remolino que vienen en una amplia gama de escalas y son en gran parte los responsables de los cambios significativos en la dirección.

Estudio de (**Mertens 2006**) manifiesta que mediante el principio de continuidad la velocidad de viento es nula al nivel de superficie terrestre y tiende a aumentar con la altura. Además, el perfil de velocidad de viento se pronuncia más con el aumento de la rugosidad del suelo y la velocidad disminuye, dando origen al denominado perfil vertical de la velocidad del viento.

La determinación del perfil de velocidad de viento es importante en proyectos eólicos, pues la sensibilidad de salida de energía según la posición de la micro turbina y la altura de montaje con respecto a la edificación puede influenciar fuertemente con pequeños cambios

en la ubicación donde se puede tener impactos dramáticos en el rendimiento según comenta (Sunderland et al. 2013).

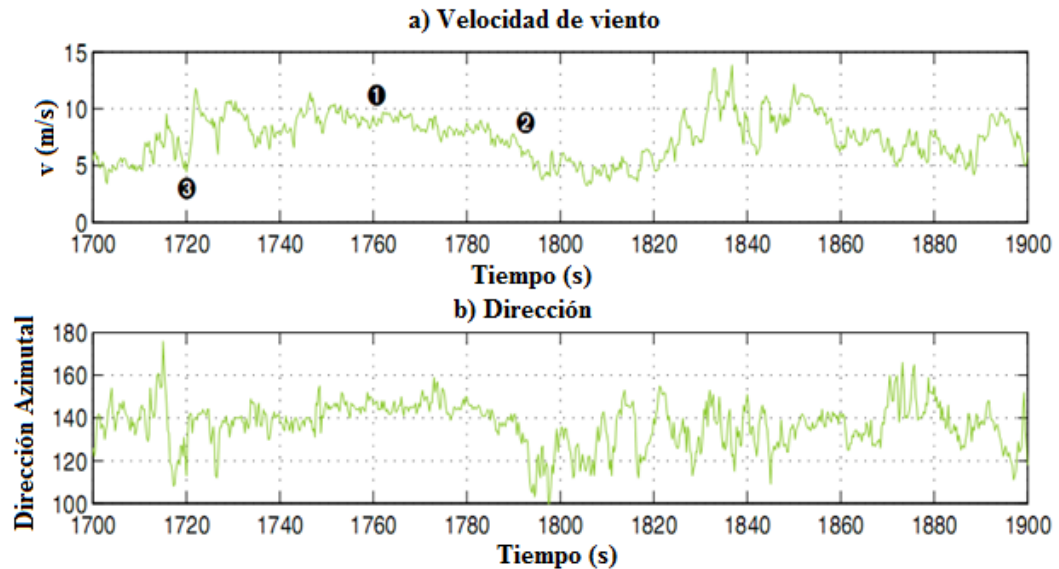


Figura 1 - Velocidad y Dirección del viento medido en el mundo real

Fuente: *Power Electronics Solutions for Vertical Axis Urban Wind Turbines*

En el estudio de (De Wit et al. 2002) utilizan un factor de escala para estimar el viento en ciudades tomadas en un sitio meteorológico estándar, ubicado en un aeropuerto cercano pero concluyen que sigue siendo necesaria la observación de la velocidad del viento cerca de los tejados o azoteas en el medio urbano para evaluar el viento disponible de mejor forma.

2.3 Evaluación del Recurso Eólico

Para la evaluación del recurso eólico se puede realizar a través de métodos estadísticos, entre ellos y los más frecuentes a ser utilizados son las distribuciones de frecuencia cuyo objetivo es tener la pauta para ver la viabilidad del aprovechamiento en la zona. Por lo general, es necesario tener mediciones de un periodo de tiempo establecido, donde lo más recomendado es por lo menos de un año.

En temas de la utilización de la distribución de las velocidades del viento, el autor (Fernando et al. 2013) explica en su estudio ciertas ventajas que ofrece esta distribución en determinados emplazamientos puesto que, proporcionan una fuente de información al saber cómo se distribuye la velocidad del viento, es decir con qué frecuencia se observa una cierta velocidad de este recurso en un determinado lugar.

(Díez 2008) menciona que la velocidad del viento se representa como una variable aleatoria. Donde permite analizar las probabilidades de ocurrencia, las cuales puedan

ajustarse con algún tipo de distribución continua, permitiendo encontrar una expresión matemática para calcular la energía eólica en función del tiempo.

Autor como **(Villanueva, 2004)** comenta que, el cálculo de la producción de energía se realiza fundamentalmente a través de la metodología tradicional del cálculo donde la distribución de *Weibull* y *Rayleigh* son los más frecuentes a utilizar.

Análisis de datos de viento que fueron realizados en Kutahya, Turquía por **(Kose et al. 2004)** a alturas de 10 y 30 metros encuentran que el modelo probabilístico de *Weibull* predice la energía del disponible por viento de mejor manera que los resultados que se logran con la distribución de *Rayleigh*.

(Bufanio et al. 2012) menciona de igual manera que para representar probabilidades de velocidades de viento, la distribución estadística que se presenta con mayor frecuencia y de mejor manera es la distribución de *Weibull*.

La distribución de *Weibull* depende de dos parámetros c y k . El factor de escala c (m/s) indica la velocidad promedio del lugar de estudio, y el factor de forma k es un índice de dispersión de los datos y la frecuencia con la que se presenta la velocidad promedio como define **(Anderson 2013)**. Para el cálculo de estos parámetros, se puede aplicar diferentes métodos como el de mínimos cuadrados, cuyas ecuaciones están basadas mediante la transformación de la distribución acumulativa. **(Karthikeya et al. 2016)**

2.4 Tecnologías Eólicas en Ambientes Urbanos

Las condiciones de implementación de las turbinas eólicas en zonas urbanas son diferentes a las de las zonas rurales que tradicionalmente han sido el mando para la generación en parques eólicos, por eso **(Ayhan & Sağlam 2012)** en su estudio mencionan que la generación de energía producida por turbinas eólicas de pequeña escala se puede definir como micro generación, la cual ha sido implementada en el uso residencial para satisfacer pequeñas demandas y en estos últimos años las pequeñas turbinas de generación eólica han causado un gran interés para ser integradas en los edificios, donde ha implicado desafíos para este tipo de generación independiente.

Dificultades para la implementación de turbinas en el entorno urbano, como bajas velocidades de viento y mayores niveles de turbulencia son algunos problemas que plantea **(Mertens 2006)** en su modelo de CFD para simular el flujo de viento alrededor de un edificio con micro turbinas eólicas instaladas a alturas óptimas.

Sin embargo, estudios de prueba como el de **(Sunderland et al. 2016)** manifiesta que la micro generación de energía eólica da por una tentativa optimista al proyecto, es decir, la

tecnología puede funcionar correctamente si se instala en lugares apropiados, además el impacto ambiental que causa esta nueva alternativa de generación de energía para consumidores residencial o comerciales es inferior a la energía suministrada por la subestación o red eléctrica. Además, las turbinas eólicas son más sostenibles desde el punto de vista medioambiental que las fotovoltaicas para siete de 11 impactos, que van desde un 7,5% de eutrofización hasta un 85% menos de agotamiento de la capa de ozono, como señala el autor.

Las turbinas micro eólicas se clasifican en términos de tamaño o área de barrido por parte de la misma. Por consiguiente, tienen potencias nominales de hasta 10 kW como menciona **(James et al. 2010)**. Se clasifican en turbinas de eje horizontal (HAWT) y turbinas de eje vertical (VAWT). Las turbinas VAWT pueden ser mejor aprovechadas en ambientes urbanos que las HAWT por su eje de rotación que está en forma perpendicular con respecto al suelo lo que hace que acepte el viento en cualquier dirección, Este tipo de turbina son clasificadas en tres subtipos los cuales son: *Savonius*, *Darrieus*, y *Giromill* según como menciona **(Wekesa et al. 2014)**.

No obstante, las turbinas HAWT han sido las más eficientes en términos de aprovechamiento de energía, pues están alrededor del 45 y 50% de eficiencia según los autores **(Cochancela & Astudillo 2012)**. Su funcionamiento se basa en una máquina rotacional, donde su principal característica es el eje de rotación que se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del eje. Los rotores de estas turbinas generalmente están constituidos por hélice de 2 o 3 palas para trabajar de forma uniforme. Su gama de potencias es muy amplia, va desde modelos de 0,5kW. Un ejemplo de este tipo de turbina se puede observar en la **Figura 2**.



Figura 2 - Turbina Eólica tipo HAWT instalada en el medio urbano

Fuente: *Implication of the UK field trial of building mounted horizontal axis micro wind turbine*

(Correa 2014) explica que las turbinas de tipo *Darrieus* son las más comunes para los de la clase VAWT, sin embargo, en el diseño tienen un problema donde el ángulo de atracción al viento cuando la turbina gira, produce un torque máximo a dos puntos del ciclo (anverso y reverso de la turbina), lo cual puede crear resonancia. El autor también menciona en su estudio que las turbinas de tipo *Savonius*, se usan cuando los costos o fiabilidad son muchos más importantes que la eficiencia. Por ejemplo, la mayoría de anemómetros son de tipo *Savonius*, porque la eficiencia es irrelevante para su aplicación ya que poseen una velocidad de giro pequeño por la razón que está constituida por dos o más semicilindros colocadas opuestamente alrededor del eje.

El termino turbina híbrida se aplica cuando existe la combinación de los dos tipos de tecnología, donde se emplea el rotor *Darrieus* como dispositivo principal y el rotor *Savonius* para el funcionamiento de la misma.

Fabricantes como *Swift* y *WindSave* hablan sobre su gama de turbinas que están entre 0,6 kW y 1,5 kW, los cuales han elaborado más de 10 diferentes modelos de turbinas HAWT, por el contrario, para el tipo VAWT por lo menos tienen fabricados unos 5 modelos, esto por dar un ejemplo del mercado que se pueden considerar aptos para la instalación en el entorno urbano.

El ruido es un factor de preocupación en la planificación y funcionamiento continuo para los fabricantes en la instalación de las micro turbinas eólicas en el medio urbano como hace referencia (Sustainabiliy Victoira 2010). El método más reconocido para medir las emisiones de ruido de una turbina se describe en la Norma Internacional IEC 61400: 11 si bien está dirigido a grandes turbinas, proporciona un método estandarizado de pruebas que aplicable para cualquier tamaño de turbina.

El “*Catalogue of Europe an Urban Wind Turbine Manufacturers*” recogió datos técnicos de la mayoría de los modelos presentes en el mercado como se muestra en la **Tabla 1**, los cuales hasta en esa fecha existían 57 modelos de turbinas eólicas urbanas en el mercado, lo que corresponde a un 65% de turbinas de eje horizontal y un 35% representan a turbinas de eje vertical. Analizando los datos técnicos presentados en el catálogo, las turbinas se clasifican en relación a la potencia nominal, las cuales están dentro de 100 W a 10 kW con velocidades nominales de 11 a 13m/s. El 47% de los modelos tienen velocidades de arranque inferiores a 3m/s. Los niveles de presión sonora medidos en el punto de emisión, para velocidades de viento entre 11 y 13 m/s está representada en un 37% a un ruido menor a 40 dB y su vida útil esta entre 20 a 25 años con un 68%. (Intelligent Energy - Europe 2005)

Tabla 1 - Análisis comparativo de los datos técnicos principales de *Catalogue of Europe an Urban Wind Turbine Manufacturers*

Fuente: *Catalogue of Europe an Urban Wind Turbine Manufacturers*

Velocidad nominal del viento		Velocidad de cut in		Velocidad de cut on		Ruido (v=5m/s)		Vida Útil	
[m/s]	[%]	[m/s]	[%]	[m/s]	[%]	[dB]	[%]	[años]	[%]
$v \leq 11$	26	Sin	0	Sin	54	Sin	26	$a \geq 25$	5
$11 \leq v \leq 13$	46	$v \leq 3$	47	$v \geq 20$	36	$i_p \leq 40$	37	$20 \leq a \leq 25$	68
$13 \leq v \leq 17$	21	$3 \leq v \leq 4$	38	$15 \leq v \leq 20$	7	$40 \leq i_p \leq 60$	24	$15 \leq a \leq 20$	20
$v \geq 17$	7	$v \geq 24$	14	$10 \leq v \leq 15$	3	$60 \leq i_p \leq 80$	13	$10 \leq a \leq 15$	7

Un punto a tener en cuenta, son las curvas de potencia que por lo general estima el fabricante, ya que en su mayoría son erróneas en comparación con el rendimiento en sitios reales. El autor (**Warwick 2009**) desarrollo un estudio en Gran Bretaña, donde evaluó datos de 26 micro turbinas eólicas instaladas en edificios de 5 fabricantes distintos, el estudio muestra que las curvas de potencia siempre son sobreestimadas para altas velocidades del viento (por encima de 7 m/s), pero en el caso para bajas velocidades de viento son razonablemente precisas.

2.5 Micro Redes

Las redes actuales de distribución eléctrica enfrentan problemas en su operación ya que, en ciertas circunstancias trabajan en sus niveles máximos de capacidad según comenta (**Bordons et al. 2015**). Últimamente ha tenido impactos considerables estas redes de distribución por la penetración de sistemas de generación renovable (eólica y fotovoltaica que son las más comunes). Tradicionalmente, estas redes no han sido diseñadas para ese fin y esto implica retos a niveles técnicos como la variación de la magnitud de tensión y en el desbalance de potencia activa y reactiva entre las fuentes de generación renovable. (**Kruimer et al. 2011**)

En los últimos años surge el prototipo de la micro red, cuya misión es realizar generación de pequeña escala acompañada de un conjunto de cargas, recursos energéticos y dispositivos de almacenamiento de energía en niveles de baja tensión para suministrar electricidad de forma fiable (**Solanki et al. 2016**). La **Figura 3** muestra un ejemplo típico de una micro red.

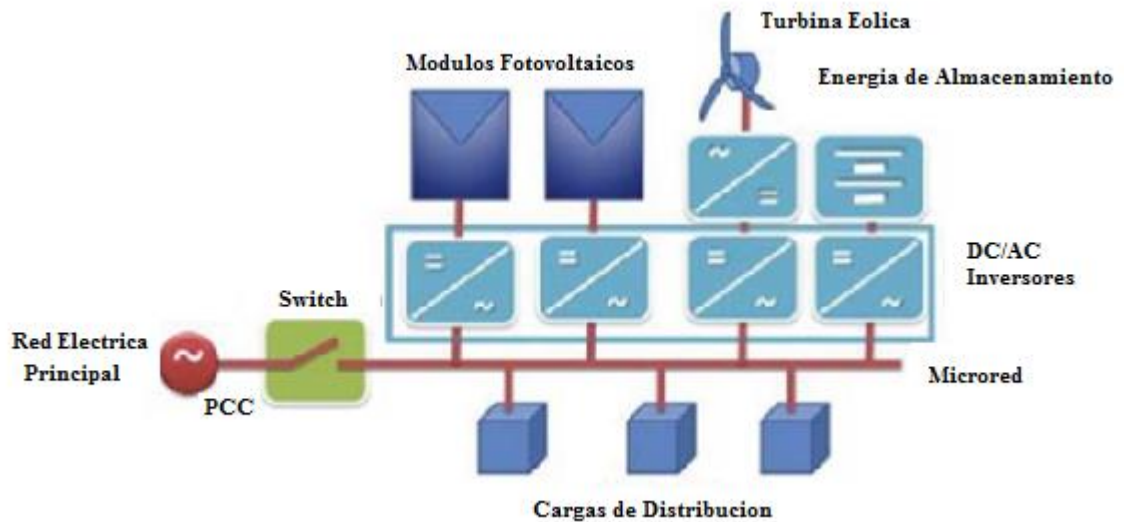


Figura 3 Micro Red Típica

Fuente: *Optimal Power Flow in microgrids with energy storage*

Una micro red puede operar de dos modos, el primero puede operar conectado a la red de distribución principal a través del denominado *Point of Common Coupling* (PCC) y el segundo en modo aislado, en este último modo de conexión el objetivo principal es la autonomía del sistema junto con la estabilización del mismo en términos de frecuencia y tensión. Para el modo conectado a la red tiene objetivos varios, entre ellos: minimizar el precio de importación de energía para mejorar el factor de potencia, optimizar el perfil de tensión dentro de la micro red, entre otros. (Levron et al. 2013)

Ante posibles fallos de la red de distribución, los usuarios pueden ser desconectados de la misma y ser abastecidos por la propia micro red. Además, la red pública se beneficiaría de estos pequeños sistemas de generación ya que apoyarían en su operación teniendo beneficios técnicos – económicos para el usuario y la compañía.

No obstante, el aporte energético viene limitado por el carácter intermitente y variable que tienen estos recursos renovables ya que en ciertos periodos del día se dispondrá de un alto potencial de energía y, en otros casos, se tendrá niveles bajos o incluso nulos de aporte energético por parte de estas fuentes renovables (Gil 2012). Es por ello, que se hace necesario el uso de sistemas de almacenamiento para crear un sistema de generación más autónomo y fiable.

En la literatura, varios estudios han mostrado el uso de los sistemas de almacenamiento de energía en micro redes. El autor (Bordons et al. 2015) discute en su estudio que existen sistemas de almacenamiento como supercondensadores, baterías, entre otros. En modo aislado deben conseguir el balance de potencia inyectado o absorbiendo potencia activa de

forma proporcional a la desviación de la frecuencia, es decir, compensar los desbalances entre generación y consumo.

En **(Levron et al. 2013)** explican que el dispositivo de almacenamiento funciona como un mediador de generación de energía. La generación de energía total está optimizada para ser tan constante como sea posible, reduciendo los costos de combustible y la capacidad de almacenamiento.

2.6 Optimización multi objetivo en Sistemas de Potencia

Varios algoritmos de optimización se proponen para resolver el problema de suministro de energía en la micro red, tales como evolutivos y genéticos considerando un modelo matemático, cuyo modelo debe encontrar la mejor combinación posible a fin de tener una solución que brinde calidad y eficiencia **(Andersson 2001)**. En el transcurso de los últimos años se ha trabajado con funciones mono o multi objetivo sobre el uso de sistemas de potencia. Algunos investigadores muestran formulaciones matemáticas para Flujos de Potencia Optimo (OPF), entre ellas las más selectas se mencionan a continuación:

(Rosehart, 2003) formula una función multi objetivo de un OPF, donde utiliza el método de sumas ponderadas de los costos de reactivos y los márgenes de cargabilidad en un sistema de potencia para la solución del modelo.

Para la minimización del costo de combustible y el impacto de emisiones. **(Chen, 1997)** desarrolla un modelo de optimización multi objetivo, el cual es resuelto mediante ecuaciones de Newton acoplado.

Utilizando el método de las restricciones (ϵ - constraint) **(Carpinelli, 2005)** desarrolla una formulación mono objetivo para reducir pérdidas en las líneas.

(Mao et al. 2010) propone un modelo objetivo para el despacho de micro redes, el utiliza como función objetivo la minimización del costo de producción y el costo de reducción de emisiones. Como conclusiones el autor señala que se obtiene mejoras en los objetivos de desconexión de carga y emisiones.

(Paudyal et al. 2011) plantea un modelo de optimización para 3 objetivos, el cual optimiza la operación de transformadores, reguladores, capacitores y el costo de energía de la red cuyo modelo está definido como un problema de Programación No Lineal Entera Mixta (PNLEM). Donde concluyen que el algoritmo es capaz de obtener una solución óptima para cada alimentador en tiempo real.

Existe una gran cantidad de modelos mono y multi objetivo de Flujos de Potencia Optimo (OPF) en el campo de la investigación. En este proyecto se utilizará la metodología *DistFlow* para modelar la micro red de los casos de estudio.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Introducción

Una de las herramientas que actualmente proporciona decisiones más fiables es la optimización, campo en el que confluyen las Matemáticas y las Ciencias de la Computación (Merino 2013). Cuya misión es el resolver de forma efectiva modelos matemáticos, donde se debe tomar la mejor solución entre un conjunto de soluciones factibles.

La estructura de un modelo matemático es conformada por una función objetivo y una serie de restricciones, estas restricciones dependen del modelo a trabajar, en el caso de modelos eléctricos estas pueden estar basadas en los límites de capacidad, límites mínimos y máximos de corriente, tensiones, entre otros en base al comportamiento de los perfiles de demanda y producción.

Como prioridad en este capítulo se formula un modelo de optimización aplicado a la gestión de la potencia eléctrica en una micro red que intente cumplir con el objetivo incluyendo la caracterización de la curva de viento que tiene la ciudad de Cuenca, recurso renovable a utilizar en este proyecto.

3.2 Modelo Matemático

Se construye un modelo de optimización teniendo en cuenta que las variables de decisión y restricciones estén dentro de los limitantes máximos y mínimos para la seguridad del sistema. Para la implementación del modelo se utiliza una plataforma de software de base matemática denominada *A Mathematical Programming Language* (AMPL).

3.2.1 Estructura del Modelo Matemático

Para definir el planteamiento del problema de optimización en el *software* hay que tomar en cuenta la siguiente organización según como plantea (Escobar Vargas et al. 2012):

- **Definición de conjuntos:** formado por los elementos del problema que definen el tamaño de los vectores y matrices que son ingresados al solver. Para la micro red de este sistema se definieron como conjuntos el número de barras, número de líneas, y número de micro turbinas eólicas instaladas en el sistema;
- **Definición de parámetros:** Son valores constantes característicos del sistema. Se puede mencionar a los parámetros más relevantes que se definió en este problema son:

valores de la demanda de la barra, parámetros de la línea como resistencia, reactancia, y corriente máxima, parámetros de la subestación, potencia máxima suministrada por la microturbina, costos de operación y número de días a ser analizado el sistema;

- **Declaración de variables:** Son las incógnitas del problema a resolver. Para este problema se declararon como variables el flujo de potencia activa y reactiva de la línea, magnitud de tensión en la barra, magnitud de corriente de la línea, capacidad de la batería, potencia activa y reactiva suministrada por la red, etc;
- **Definición de la función objetivo:** Es la función que relaciona las variables del problema a ser optimizadas;
- **Definición de restricciones:** Son expresiones matemáticas de igualdad o desigualdad que limitan el valor de las variables del problema. Para este modelo se definieron como restricciones el flujo óptimo de carga, límites de generación, tensión y corriente.

3.2.2 Formulación del modelo matemático

Se formula como un problema de optimización usando un modelo de programación no lineal entero mixto para la operación óptima de la micro red con el fin de observar la contribución que tiene la integración del recurso del viento en los ambientes urbanos para la parte operativa de la micro red. Por lo tanto, el modelo puede verse como una función objetivo de minimización de costos de la red de distribución para los dos casos de estudio. Las restricciones se formulan teniendo en cuenta lo planteado en (Macedo et al. 2015) para flujos de carga óptimos. Las redes de distribución están configuradas, en su gran mayoría en forma radial donde se tiene presente las siguientes consideraciones:

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

Bajo las siguientes consideraciones se muestra el sistema radial en la **Figura 4**.

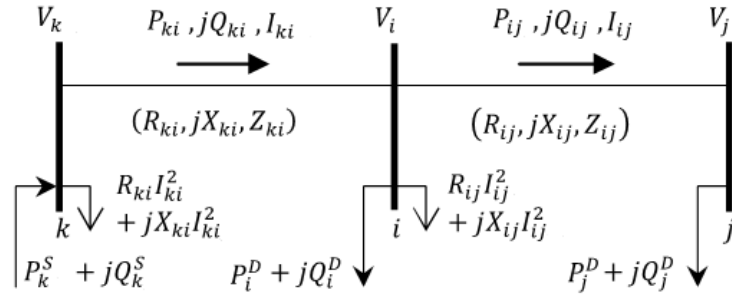


Figura 4 Sistema radial

Fuente: (Macedo et al. 2015)

Donde:

V_i : Magnitud de tensión en el nodo inicial i;

V_j : Magnitud de tensión en el nodo final j;

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

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

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

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

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

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

3.2.2.1 Parámetros del modelo matemático

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

Conjuntos:

Ω_b : Conjunto de Barras;

Ω_l : Conjunto de Líneas;

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

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

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

Parámetros:

$i, j, k = \acute{I}$ ndices de barras;

Bus: Número de Barras en el sistema;

T : Número de muestras en el periodo de 24 horas;
 D : Número de Días;
 Δt_i : Tiempo de duración de la demanda (h);
 $S_{i,max}^{SE}$: Límite de potencia máxima aparente de la subestación en la barra i (kVA);
 P_i^{d-} ; P_i^{d+} : Potencia mínima y máxima de descarga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kW);
 P_i^{c-} ; P_i^{c+} : Potencia mínima y máxima de carga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kW);
 E_i^{b-} ; E_i^{b+} : Energía de almacenamiento mínima y máxima del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kWh);
 n_i^c ; n_i^d : Rendimiento de carga y descarga del dispositivo de almacenamiento en el nodo i (kWh);
 kVA_{base} : Potencia Base del sistema;
 P_i^D : Potencia Activa de la carga en la barra i ;
 Q_i^D : Potencia Reactiva de la carga en la barra i ;
 $P_{i,max}^W$: Potencia Activa máxima suministrada por el aerogenerador en la barra i [KW];
 $v_{i,min}$: Magnitud de Tensión mínima en la barra i (V);
 $v_{i,max}$: Magnitud de Tensión máxima en la barra i (V);
 $I_{i,max}$: Magnitud de Corriente máxima en la barra i (A);
 $S_{i,max}$: Potencia Aparente máxima de la subestación (kVA);
 c_{SE} : Costo de la energía que proviene de la subestación (\$/kWh);
 c_w : Costo de la energía eólica (\$/kWh).

Variables

P_i^{SE} : Potencia Activa generada por la subestación, inyectada en la barra i (kW);
 Q_i^{SE} : Potencia Reactiva generada por la subestación, inyectada en la barra i (kW);
 P_i^W : Potencia Activa generada por el aerogenerador (kW);
 P_i^b : Potencia Activa generada por el dispositivo del almacenamiento (kW);
 E_i^b : Energía generada por el dispositivo del almacenamiento (kWh);
 P_i^{sd} : Potencia Activa inyectada por el sistema de almacenamiento (kW);
 v_i : Magnitud de tensión en barra i (kV);
 I_{ij} : Magnitud de corriente en la línea i - j (A).

Variables Binarias

e_i^b : Estado de operación del dispositivo de almacenamiento.

3.2.2.2 Modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM)

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

- Función Objetivo:

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

- Restricciones:

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

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

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d,t} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d,t} + X_{ij} * I_{ij,d,t}^2) + Q_{i,d,t}^{SE} = Q_{i,d,t}^D \quad (3)$$

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

$$V_{i,d,t}^2 - 2(R_{ij} * P_{ij,d,t} + X_{ij} Q_{ij,d,t}) - Z_{ij}^2 * I_{ij,d,t}^2 - V_{j,d,t}^2 = 0 \quad (4)$$

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

$$V_{j,d,t}^2 I_{ij,d,t}^2 = P_{ij,d,t}^2 + Q_{ij,d,t}^2 \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (5)$$

- Límite para variables:

$$V_{i,\min}^2 \leq V_{i,d,t} \leq V_{i,\max}^2 \quad \forall_i \in \Omega_b, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (6)$$

$$0 \leq I_{ij,d,t} \leq I_{i,\max}^2 \quad \forall_{ij} \in \Omega_l, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,d,t}^w \leq P_{i,d,t,\max}^w \quad \forall_i \in \Omega_{wps}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (8)$$

$$P_{i,d,t}^{SE2} + Q_{i,d,t}^{SE2} \leq S_{i,\max}^{SE2} \quad \forall_i \in \Omega_{wps}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (9)$$

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

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

$$Z_{ij} = \sqrt{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (11)$$

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

3.2.3 Sistema de Almacenamiento de Energía

Los beneficios de la incorporación de un sistema de almacenamiento de energía abarcan ciertas ventajas. Según la referencia (**Poonpun et al. 2008**) menciona algunos de ellas como:

- ✓ El almacenamiento puede reducir las fluctuaciones en la producción de energía eólica y permite la venta de energía renovable en tiempos de alto valor;
- ✓ El sistema de almacenamiento ofrece fiabilidad y calidad de energía de suministro;
- ✓ La descarga de los sistemas de almacenamiento de energía durante los tiempos de demanda máxima reduce la capacidad necesaria de la Generación Distribuida (DG);
- ✓ Mayor estabilidad del sistema mejorando su eficiencia

Según (**Levron & Shmilovitz 2010**) comentan que es apropiado almacenar energía cuando la energía de las fuentes renovables está en exceso en el sistema o cuando los costes de compra de energía de la red de distribución son bajos. El autor menciona que la energía almacenada se puede consumir durante horas pico, cuando la energía es costosa y la carga es alta.

Por lo tanto, cuando el modelo matemático incluye almacenamiento de energía se formulan las siguientes ecuaciones:

$$0 \leq P_{i,d,t}^d \leq P_i^{d-} * e_{i,d,t}^b \quad \forall_i \in \Omega_{sd}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (12)$$

$$0 \leq P_{i,d,t}^c \leq P_{i,d,t}^{c-} (1 - e_{i,d,t}^b) \quad \forall_i \in \Omega_{sd}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (13)$$

$$E_i^{b-} \leq E_{i,d,t}^{b-} \leq E_i^{b+} \quad \forall_i \in \Omega_{sd}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (14)$$

$$P_i^b \leq P_{i,d,t}^d - P_{i,d,t}^c \quad \forall_i \in \Omega_{sd}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (15)$$

$$e_{i,d,t}^b \in \{0,1\} \quad \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T \quad (16)$$

$$E_{i,d,t}^b - E_{i,d,t-1}^b = \Delta_t \left(n_i^c P_{i,d,t}^c - \frac{P_{i,d,t}^d}{n_i^d} \right) \quad (17)$$

$$\forall_i \in \Omega_{sd}, \forall_d = 1..D, \forall_t = 1..T$$

Las restricciones (12) - (13) representan los límites de potencia de carga y descarga de los dispositivos de almacenamiento. La expresión (14) representa el límite de energía de carga y descarga de la batería y (15) indica el límite de potencia de la batería. La restricción (16) (variable binaria) restringe que la batería no se cargue y descargue al mismo tiempo. Finalmente, la restricción (17) indica la conservación de energía de la batería. En el **Anexo 1** se representa el modelo matemático programado en el software de optimización.

3.4 Estimación y Evaluación del Recurso Eólico

La generación eólica es por naturaleza variable, pero puede ser predecible en un largo periodo mediante funciones de distribución de una manera confiable. Para poder saber la disponibilidad del potencial eólico en cualquier zona de estudio, es importante tener un registro de la velocidad de los vientos presentes en el sitio de interés, es por ello, que los datos obtenidos para realizar este proyecto fueron proporcionados por el departamento Promas de la Universidad de Cuenca cuyo responsable de monitoreo está a cargo por el Ing. Marco Ramírez. La ubicación del estudio se muestra en la **Tabla 2**:

Tabla 2 Coordenadas del lugar de medición

Fuente: Elaboración propia

Ubicación	UTM x	UTM y	Cota
	m	m	m s.n.m
	721175	9679144	2550

Los resultados obtenidos son de los primeros ocho meses de registro, donde la fecha de monitoreo comenzó el 19 de febrero del 2016 con escala de información temporal, diaria y mensual hasta el 28 de noviembre del 2016. Durante el periodo temporal existen registros

de datos cada hora, y registros cada 10 min para algunos días. Tomando el registro de datos por hora se logra tener un total de 6768 registros.

3.4.1 Clasificación de velocidades

Se realiza la clasificación de velocidades dentro de un rango específico con los datos, para obtener la probabilidad de ocurrencia, frecuencia acumulada y duración del viento del sector. La **Tabla 3** muestra la clasificación de la frecuencia de velocidades registradas con la que ocurrieron cada una de ellas para determinar el potencial existente de la zona.

Tabla 3 Frecuencia de velocidades

Fuente: *Elaboración propia*

i	Intervalo	Punto medio	F. Acum	Número de Datos	Frecuencia
1	<0	0	0,0000	0	0%
2	[0,1]	0,5	0,1745	1181	17%
3	(1,2]	1,5	0,5847	2776	41%
4	(2,3]	2,5	0,8883	2055	30%
5	(3,4]	3,5	0,9885	678	10%
6	(4,5]	4,5	0,9997	76	1%

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

Por lo tanto, la función de densidad (PDF) de los datos del sector se ve representada en la **Figura 5**.

Para tener una mejor apreciación de la curva del viento con la distribución de *Weibull* en un largo periodo, se puede realizar la generación de muestras de variables aleatorias, a través del método de inversión obteniendo así una mejor tasación del recurso.

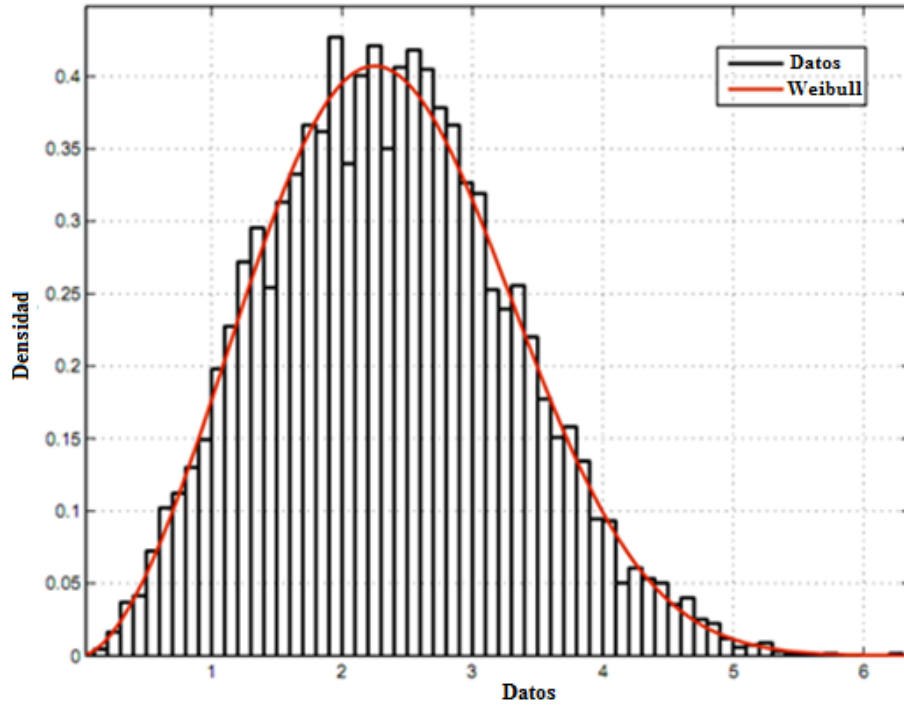


Figura 5 Función de densidad de la distribución de *Weibull*

Fuente: Elaboración propia

La **Figura 6** muestra la gráfica CDF y la función inversa CDF de los datos.

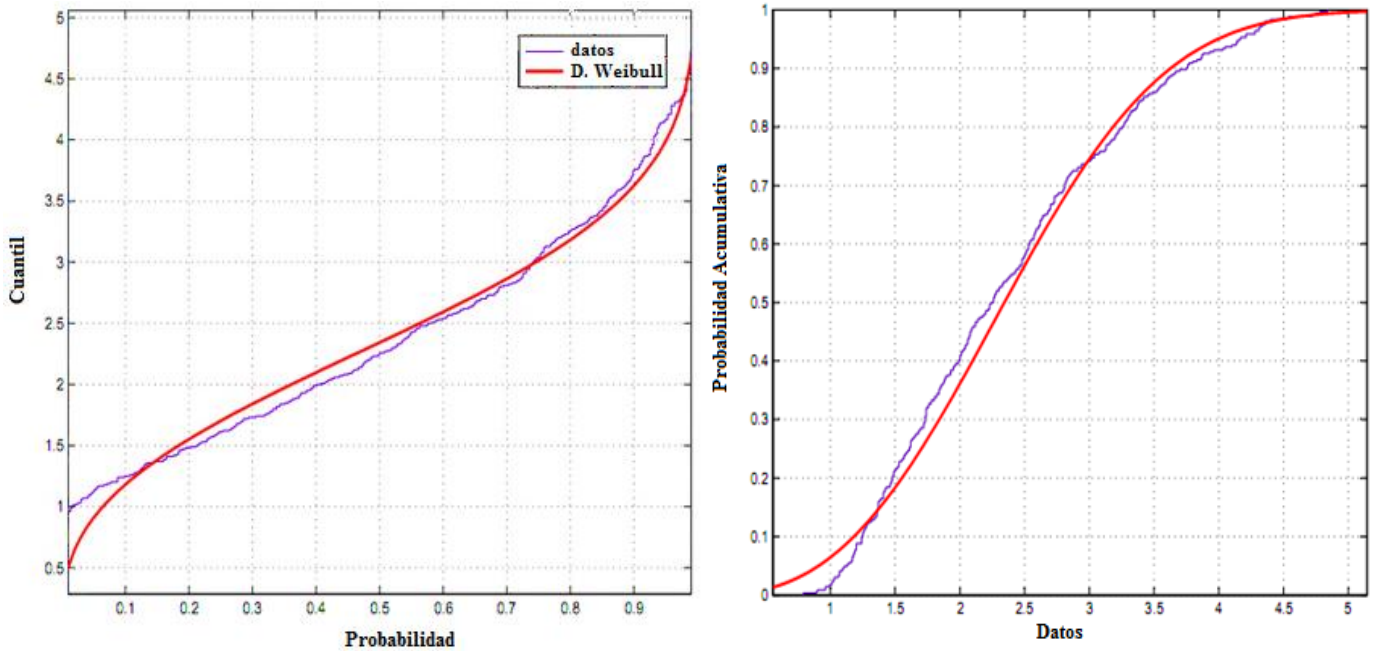


Figura 6 Función CDF e inversa de la distribución de *Weibull*

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el potencial eólico de la zona de estudio según lo calculado se presenta en la **Tabla 4**.

Tabla 4 Parámetros de la Distribución de *Weibull*

Fuente: Elaboración propia

Parámetros de la Distribución de <i>Weibull</i>		
Estación	Factor de forma k	Factor de escala c
Universidad de Cuenca	2,65	2,41

No obstante, para los casos de estudio se trabaja con velocidades de viento en intervalos de 10 min que corresponde a 144 muestras para completar un día (24 horas). Por lo tanto, se escoge 3 días para su evaluación, uno de ellos corresponde a un día de agosto, mes que mayor velocidad de viento tiene, y los otros dos restantes están entre el día promedio.

Para tener una mejor apreciación de la variación del viento en la ciudad del Cuenca se muestra gráficamente en la **Figura 7** la curva característica del viento diaria de un año. La línea horizontal de color rojo indica la velocidad media total del viento para todos los valores registrados en la ciudad de Cuenca con un valor de 2,4 m/s.

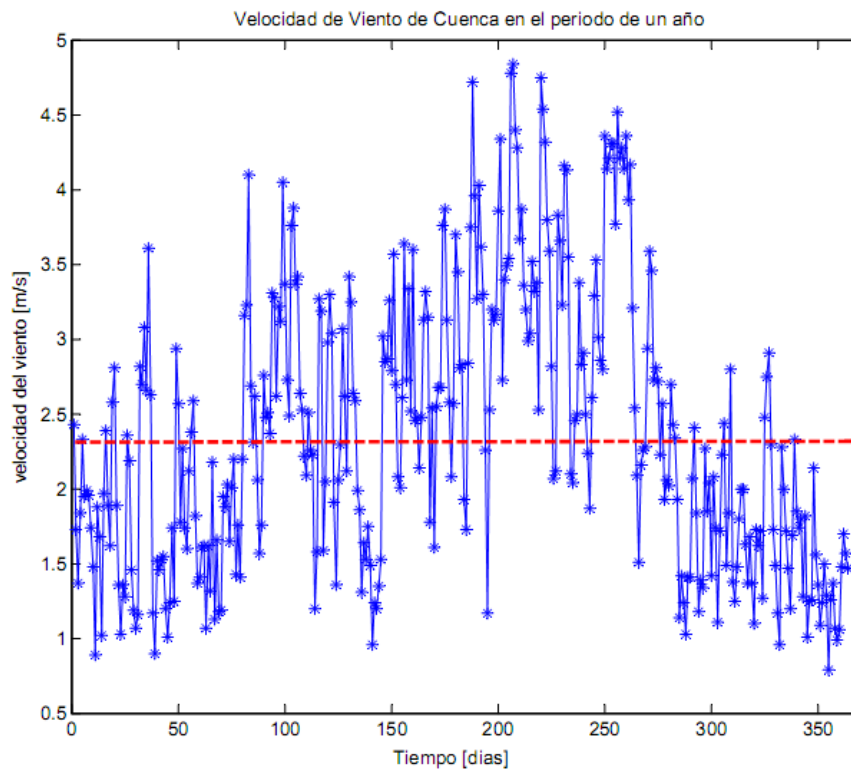


Figura 7 Curva característica del viento de un año en la ciudad de Cuenca

Fuente: Elaboración propia

3.5 Potencial Eólico

La cantidad de energía que puede producir una turbina eólica depende esencialmente de las características del viento del lugar de estudio, es por ello que la potencia es expresada mediante la siguiente ecuación:

$$P_d = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v^3 \text{ [w]} \quad (18)$$

Donde (C_p) es el coeficiente de rendimiento de la turbina, (ρ) de la densidad de aire, (A) el área barrida por la turbina proyectada en la dirección del viento y (v) la velocidad del viento. La variación de la densidad en el lugar de estudio está determinada por la siguiente ecuación: **(Fernando et al. 2013)**

$$\rho = 1.225 e^{\left[\left(\frac{-Z}{8435}\right) - \left(\frac{T-15}{288}\right)\right]} \quad (19)$$

Z es el valor de la altura en msnm y T es la temperatura promedio en °C. Debido que la potencia generada por parte de la turbina es proporcional al cubo de la velocidad del viento, cuando existe mínimas variaciones en la velocidad provoca un impacto significativo en la producción de la turbina.

Según la ley de *Betz*, sólo el 59,25% de la energía eólica cinética puede convertirse teóricamente en potencia mecánica **(Sunderland et al. 2016)**. El área depende del tipo y tamaño de la micro turbina, por lo mismo el área de barrido para turbinas de tipo VAWT es de forma rectangular. De tal modo su fórmula es expresada de la siguiente manera:

$$A = d * h \quad (20)$$

Donde A es el área, d es la diámetro y h la altura de las aspas. Para la elección del tipo de micro turbina para los casos de estudio se realizó una amplia búsqueda en el mercado teniendo en cuenta aspectos técnicos y económicos. Proveedores en Ecuador como RENOVAENERGIA S.A o PROVIENTO S.A ofertan una pequeña gama de turbinas para la instalación en ambientes rurales o urbanos puesto que el recurso del viento no es aun explotado como en Estados Unidos o países de Europa pues poseen una mayor cantidad de tipos de turbinas con tecnología de punta, pero con precios elevados si se desea exportar hasta el país.

3.6 Casos de Estudio

Como ya se explicó con anterioridad el estudio está basado en la operación de la micro red a través del aprovechamiento del recurso del viento de la ciudad de Cuenca.

Por ello se realizará dos casos de estudio:

- ❖ **Caso A:** Edificio pequeño conformado por cargas residenciales y comerciales.
- ❖ **Caso B:** Conjunto de 10 viviendas de cargas residenciales (Urbanización).

Teniendo en cuenta que los datos de las cargas han sido proporcionados por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur en términos de Potencia Activa y Reactiva en periodos de diez minutos. La **Tabla 5** muestra los valores de las condiciones ambientales de la ciudad de Cuenca que se aplicara en los dos casos de estudio.

Tabla 5 Condiciones ambientales de los sitios a estudiar

Fuente: Elaboración propia

Altitud sobre el nivel del mar	2550 msnm
Temperatura Ambiente	15 °C
Densidad del Aire	0,9054

3.6.1 Caso de Estudio A

Se propone trabajar con una micro red basada en las cargas de un edificio pequeño. Este edificio está ubicado en la ciudad de Cuenca - Ecuador, Parroquia San Blas, en la calle La Republica entre García Moreno y Gonzalo Zaldumbide (**Figura 8**), cuyas coordenadas son: -2.898978, -78.994659.

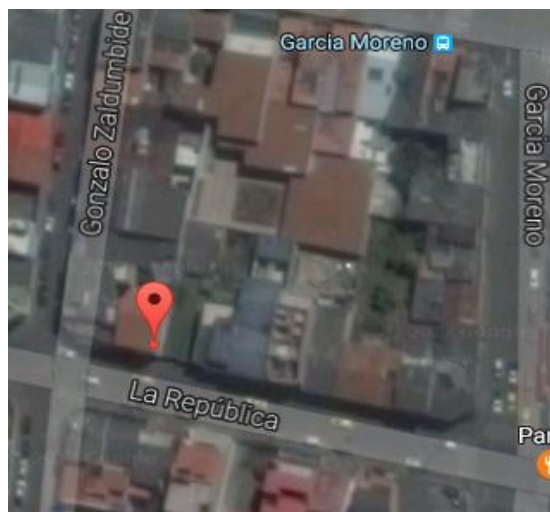


Figura 8 Ubicación del lugar de Estudio (Caso de Estudio A)

Fuente: Google Maps

La instalación de la turbina se considera a la misma altura de medición ya que está estandarizada para alturas de hasta 15 m. Para este estudio se considera trabajar con una

micro turbina de eje vertical AEOLOS – V que puede generar energía a bajas velocidades con una potencia nominal de 1 kW cuyas características son especificadas en el **Anexo 2**. Sin embargo, las más relevantes características son especificadas en la **Tabla 6**.

Tabla 6 Características de la Turbina (Caso de Estudio A)

Fuente: Elaboración propia

Especificaciones	
Tipo	3 fases (Imán Permanente)
Rotor Altura	2,8 m
Rotor Anchura	2,0 m
Peso	173 lb
Área	5,6 m ²
Funcionamiento	
Potencia nominal	1000 W
<i>cut in</i>	1,5 m/s
<i>cut on</i>	10 m/s

Trabajando con una micro turbina de estas características, se calcula el potencial eólico que genera la turbina en base a la frecuencia de la distribución de *Weibull* para estimar la energía que produce al largo del año. (Ver **Tabla 7**).

La energía estimada es de 262,51 kWh para un año. No obstante, el potencial diario que genera la turbina es de 0,72 kWh.

Tabla 7 Energía estimada por el recurso eólico para el Caso A

Fuente: Elaboración propia

Velocidad (m/s)	Potencia (kW)	Horas Equivalentes (h/año)	Energía Estimada (kWh/año)	
1	0,00155	2037	3,16	
2	0,02142	3720	79,66	
3	0,04183	2216	92,69	
4	0,09914	692	68,61	
5	0,19364	95	18,4	
<u>Total</u>		8760	262,51	Anual
			0,72	Diario

La micro red para este caso se representada en la **Figura 9**, la misma que está constituida por cargas residenciales y una comercial. El edificio consta de tres plantas, la

planta baja está formada por el garaje, una tienda pequeña, lavandería y una zona general para barbacoa, las otras dos plantas poseen un departamento respectivamente.

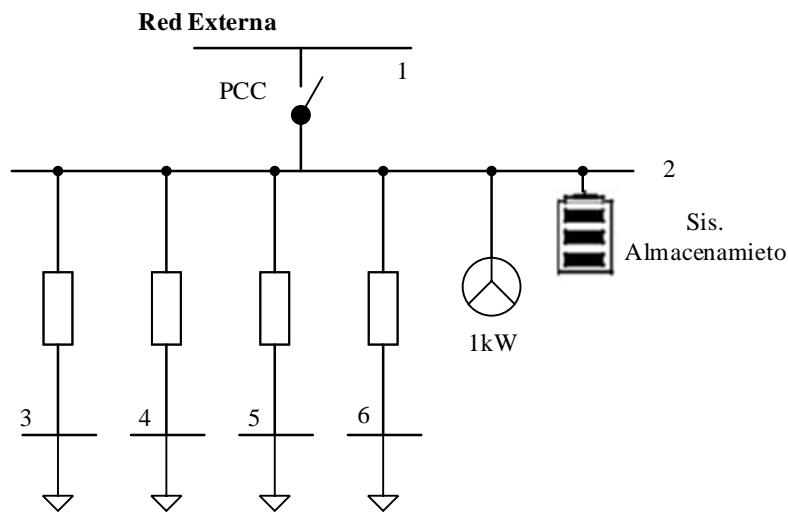


Figura 9 Micro red (Caso de Estudio A)

Fuente: Elaboración propia

Por la parte frontal de la edificación se tiene una red eléctrica trifásica, perteneciente al alimentador 324 de propiedad de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur cuyo calibre tiene una configuración 3x1/0 ACSR en MT y 3x1/0(1/0) ACSR en BT respectivamente, las mismas pasan por el poste #22105 que se encuentra frente a la edificación.

La acometida en baja tensión se dispondrá desde la estación de transformación de 15 kVA ubicada en el poste #22105, hasta el Tablero General de Medición (TGM). La acometida es monofásica, tres hilos, y adosada al poste, con configuración de conductor 2x1/0(2) THHN, 600V, (soporta 155 A, a 90°C). Los medidores de energía son bifásicos a 3 hilos y los conductores que llegan al medidor de energía son de calibre #8 AWG, del tipo THHN/600V, cableado 7 hilos, con configuración 2x8(8). Por lo tanto, los parámetros del sistema se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8 Parámetros de las líneas - Caso A

Fuente: Elaboración propia

Línea	Origen	Destino	R (Ω) / Km	X (Ω) / Km	I _{max} (A)
1	1	2	0,0196	0,00604	100
2	2	3	0,0128	0,00085	60
3	2	4	0,064	0,0042	60
4	2	5	0,0768	0,0051	60
5	2	6	0,0204	0,00136	60

El sistema está diseñado para evaluar la producción de energía en el modelo de optimización para 3 tipos de días. Estos días corresponden a un día laboral, un día de fin de semana y un día festivo, sin una fecha específica del año. Se justifica estos días puesto que son tres típicos ejemplos de consumo de demanda de energía eléctrica a lo largo del año. Por consiguiente, se muestra la carga total representada en los tres días a trabajar en la Potencia Activa **Figura 10** y **Figura 11** Potencia Reactiva del caso de estudio A.

El consumo máximo de la red en los tres días se da en las horas picos entre las 19:00 y 20:00 horas de la noche. El día uno (día laboral) es el día que mayor consumo demandan sus cargas. Se registra el máximo consumo con 6,4 kW para el día 3 (día festivo) y en base al consumo de los reactivos de la micro red es relativamente alto para los días 1 y 2 con registros de 1,2 y 1,4 kVAR respectivamente.

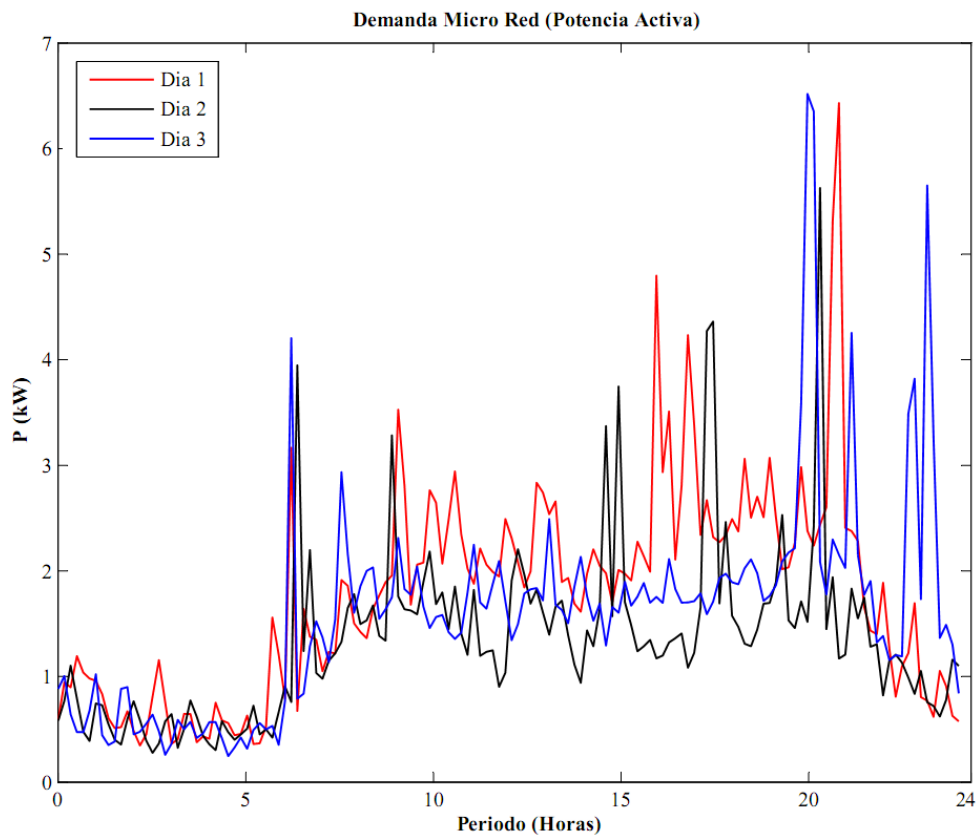


Figura 10 Demanda Total de la Micro red (Potencia Activa) - Caso A

Fuente: Elaboración propia

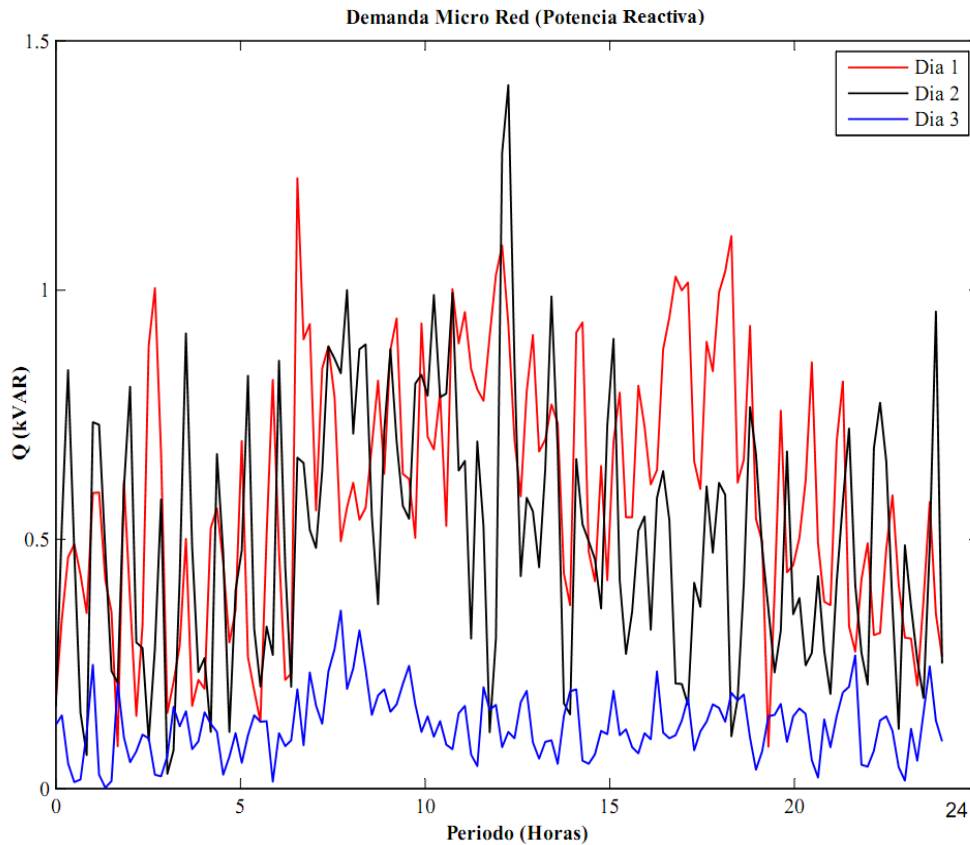


Figura 11 Demanda Total de la Micro red (Potencia Reactiva) Caso A

Fuente: Elaboración propia

Cuando se incorpora el sistema de almacenamiento de energía en la micro red es importante tener el dimensionamiento de la capacidad de la batería para el estudio, en base al total de energía de la instalación del sistema micro eólico. La capacidad C del banco de baterías será la siguiente (Roitman et al. 2015):

$$C = \frac{E * N}{V * P_D} \quad (21)$$

Donde:

E = Demanda real de energía estimada de instalación. (kWh);

N = Número de días de autonomía de la instalación;

V = Tensión del sistema (V);

P_D = Profundidad de descarga.

De tal modo, la **Tabla 9** muestra la capacidad de la batería instalada acompañada de algunas especificaciones requeridas para el modelo matemático.

Tabla 9 Tipo de Batería para Caso de estudio A

Fuente: Elaboración propia

Energía Estimada (Wh)	720 Wh
Capacidad nominal que debe tener	50 Ah
Tensión nominal de la Instalación	24 V
Modelo de la Batería	DG12-60
Rendimiento de carga y descarga	0,6 – 0,9
Energía Nominal	1440 Wh
Potencia de carga	948 W
Potencia de descarga	98 W

3.6.2 Caso de Estudio B

El segundo caso de estudio se basa en una micro red conformada por cargas residenciales de una urbanización de 10 viviendas. Las coordenadas geográficas de la ubicación de análisis son: -2,860887; -78,93144 parte Norte de la ciudad de Cuenca (**Figura 12**).



Figura 12 Ubicación (Caso de Estudio 2)

Fuente: *Google Maps*

El consumo de las cargas residenciales de la micro red conforma los estratos D y C. Estos estratos por lo general son los típicos consumos promedios que existe en la ciudad de Cuenca según el catastro proporcionado por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Tabla 10 Estrato de Consumo mensual de los clientes - Centro Sur

Fuente: Elaboración propia

Categoría de Consumo	Estrato de Consumo (kWh / mes)
E	0-100
D	101-150
C	151-250
B	250-351
A	351-500
A1	>500

Además, las cargas son tratadas al igual que el anterior caso, en un periodo de 144 muestras que representa un día en intervalos de 10 minutos. En este caso solo se trabaja con dos días, un día laboral y día correspondiente a un fin de semana. No obstante, la **Tabla 11** da una visión más clara del perfil de consumo promedio de las cargas de esta micro red, cuyos datos fueron adquiridos por el Geoportal¹.

Tabla 11 Consumo por día y mensual caso B

Fuente: www.geoportal.centrosur.gob.ec

Carga	Consumo por día (kWh)	Consumo por mes (kWh)
1	4,59	137
2	0,87	5
3	5,04	169
4	4,99	168
5	3,11	106
6	3,04	101
7	5,88	195
8	2,93	101
9	2,73	71
10	1,56	41

De igual manera, se presenta la demanda total de la micro red en la **Figura 13** en términos de potencia activa y reactiva para los dos días especificados anteriormente.

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

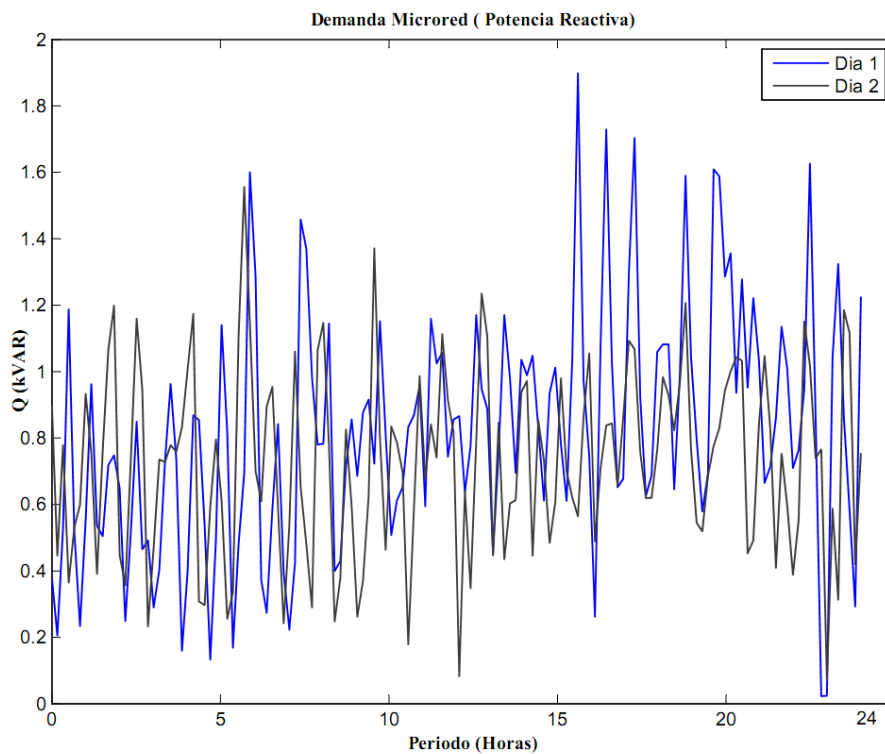
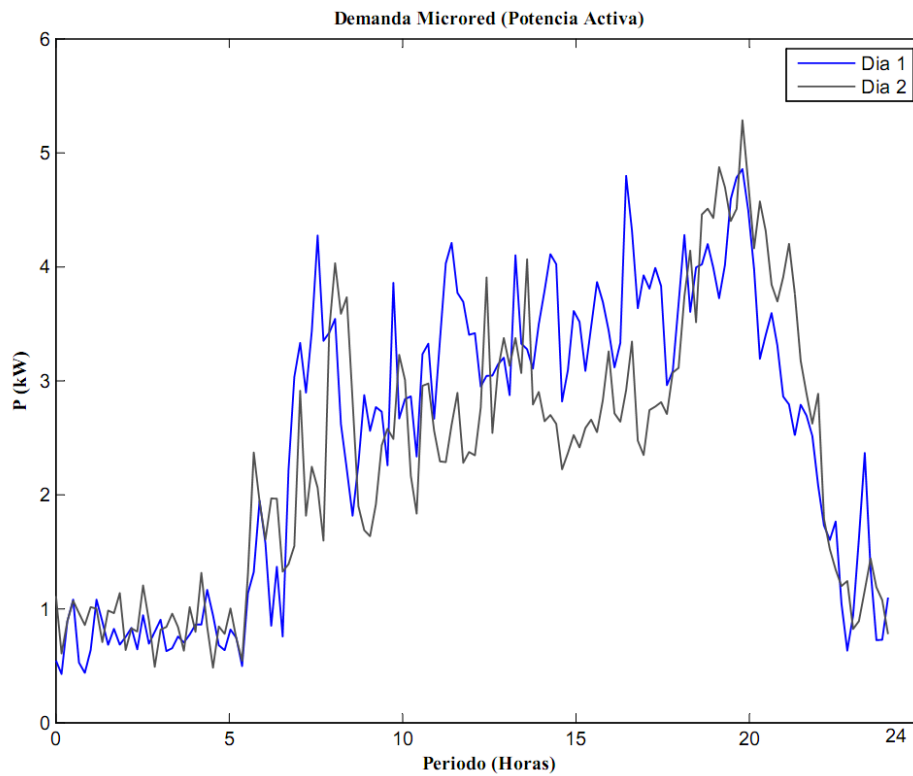


Figura 13 Demanda Total de la Micro red (Potencia Activa y Reactiva) - Caso B

Fuente: Elaboración propia

Las cargas que conforman la micro red están conectadas al transformador #20182 de 25 kVA propiedad de la Centro Sur que pertenece al alimentador 702, la acometida va desde la estación de transformación hasta el (TGM). Los calibres de los conductores son iguales al caso A. Por lo tanto, la **Figura 14** muestra la topología de la micro red.

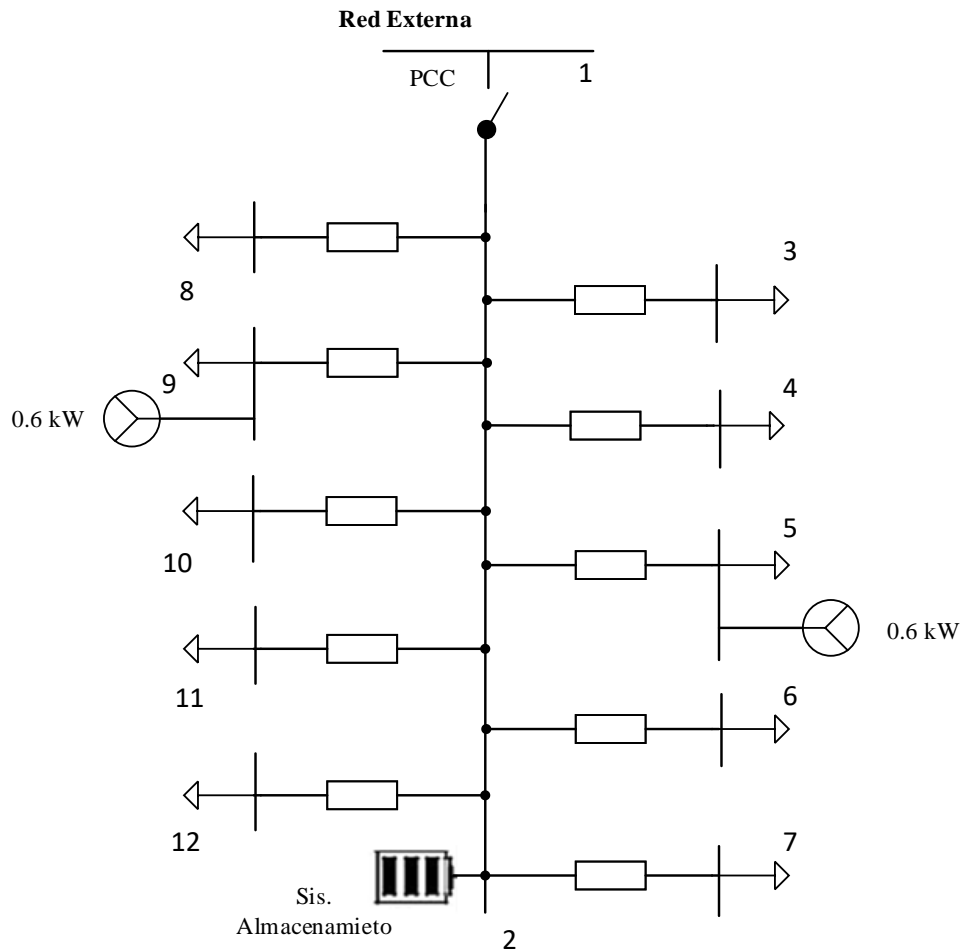


Figura 14 Esquema micro red caso B

Fuente: Elaboración propia

La **Tabla 12** indica los parámetros de las líneas conformado por las 10 viviendas.

Tabla 12 Parámetros de las líneas Caso B

Fuente: Elaboración propia

Línea	Origen	Destino	R (Ω /Km)	X (Ω /Km)	I _{max} (A)
1	1	2	0,00196	0,0006	100
2	2	3	0,0204	0,0014	60
3	2	4	0,0435	0,0029	60
4	2	5	0,0667	0,0044	60
5	2	6	0,0896	0,0059	60
6	2	7	0,1126	0,0075	60
7	2	8	0,0460	0,0031	60
8	2	9	0,0690	0,0046	60
9	2	10	0,0920	0,0062	60

10	2	11	0,1152	0,0076	60
11	2	12	0,1402	0,0080	60

Para este caso de estudio, se utilizará dos microturbinas de eje vertical AEOLOS V-600W. Cuyas características más notables se mencionan en la **Tabla 13** y en el **Anexo 3** el resto de las especificaciones.

Tabla 13 Características de la Turbina - Caso de Estudio B

Fuente: Elaboración propia

Especificaciones	
Tipo	3 fases (Imán Permanente)
Rotor Altura	2,0 m
Rotor Anchura	1,6 m
Peso	173 lb
Área	3,92 m ²
Funcionamiento	
Potencia nominal	600 W
<i>cut in</i>	1,5 m/s
<i>cut on</i>	10 m/s

La **Tabla 14** indica al igual que en el caso A la estimación de energía según el potencial de la turbina instalada. La energía anual para una turbina es de 126,96 kWh. Sin embargo, en este caso se trabaja con dos tipos de micro turbina del mismo tipo por lo que la energía total anual adquirida para la micro red será la suma de estas la cual es 253,92 kWh y diaria es de 0,695 kWh.

Tabla 14 Energía Promedio (Caso de Estudio B)

Fuente: Elaboración propia

Velocidad (m/s)	Potencia (kW)	Horas Equivalentes (h/año)	Energía Estimada (kWh/año)	
1	0,00086	2037	1,75	
2	0,00687	3720	25,57	
3	0,02319	2216	51,40	
4	0,05498	692	38,05	
5	0,10738	95	10,20	
<u>Total</u>		8760	126,96	Anual
			0,35	Diario

De igual modo, la **Tabla 15** muestra la capacidad de las 2 baterías instalada acompañada de algunas especificaciones requeridas para el modelo matemático.

Tabla 15 Tipo de Batería para Caso B

Fuente: Elaboración propia

Energía Estimada (Wh)	695 Wh
Capacidad nominal que debe tener	48,6 Ah
Tensión nominal de la Instalación	24 V
Modelo de la Batería	DG12-60
Rendimiento de carga y descarga	0,6 – 0,9
Energía nominal de carga	1440 Wh
Potencia de carga	950 W
Potencia de descarga	38 W

Es necesario, que los datos estén el sistema por unidad para su simulación, por lo tanto, se tiene:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (22)$$

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \quad (23)$$

Donde:

V_b : Voltaje Base;

I_b : Corriente Base;

Z_b : Impedancia Base;

S_b : Potencia Base;

3.7 Costos

Para el análisis de costo se tiene en cuenta el tarifario por parte de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad de Servicio Público que está a cargo de las Empresas Eléctricas de cada ciudad donde establecen que toda persona natural o jurídica que se beneficia de la prestación del servicio público de energía eléctrica, debe pagar su tarifa según su consumo. Para los dos casos de estudio su tarifa está basada para baja tensión plan residencial cuyo valor es \$0,0945 centavos del dólar (Arconel 2017). Esto aplica cuando la micro red tenga que depender de la energía de la red de distribución. Posterior a esto también

se considera el precio para la energía eólica que es de 9,13 centavos de dólar (\$0,0913) según como indica (CONELEC n.d.)

3.7.1 Costos de implementación Caso A y B

Para la implementación del proyecto es necesario saber los costos de ejecución, montaje y mantenimiento, sin considerar la infraestructura física existente del edificio.

Tabla 16 Costos de Inversión Caso A y B

Fuente: Elaboración propia

Materiales	Caso A	Caso B
Kit microturbina	\$2.941,00	\$3.768,00
Poste metálico 5 m	\$200,00	\$400,00
Accesorios Poste	\$60,00	\$60,00
Baterías	\$230,00	\$460,00
Varios	\$100,00	\$100,00
Montaje del Sistema	\$50,00	\$50,00
Costo Total Sistema Micro Eólico	<u>\$3.581,00</u>	<u>\$4.838,00</u>

El kit consta de la microturbina, controlador e inversor los cuales deben ser armados para un sistema micro eólico con conexión a la red. Hay que tener en cuenta que en el caso B trabaja con dos micro turbinas y dos baterías. Los gastos de operación y mantenimiento del sistema serán a un 2,5% del costo total del sistema micro eólico.

Tabla 17 Costo de Operación y Mantenimiento Caso A y B

Fuente: Elaboración propia

Costo	Caso A	Caso B
Costo M&O semestral básico	\$89,53	\$120,95
Costo mantenimiento anual	\$179,05	\$241,90

Hay que tener en cuenta que los precios de los equipos varían según el proveedor a elegir. Es por ello que los precios están relacionados a un precio promedio para adquirirlos en Ecuador.

A modo de resumen se plantea un diagrama en la **Figura 15** que muestra la metodología planteada para este proyecto. Este algoritmo consta como primera etapa definir

un lugar de estudio. Este proceso concreta el sitio de estudio para evaluar el potencial eólico de la ciudad, y la demanda eléctrica de las micro redes de los sitios de estudio.

Luego se construye el modelo matemático dado por las ecuaciones (1) – (17) incluyendo la función objetivo a optimizar, posterior a esto se resuelve en el *software* matemático AMPL.

Finalmente, en los análisis de los resultados se evalúa el problema de optimización según los escenarios planteados para dar sus respectivas conclusiones.

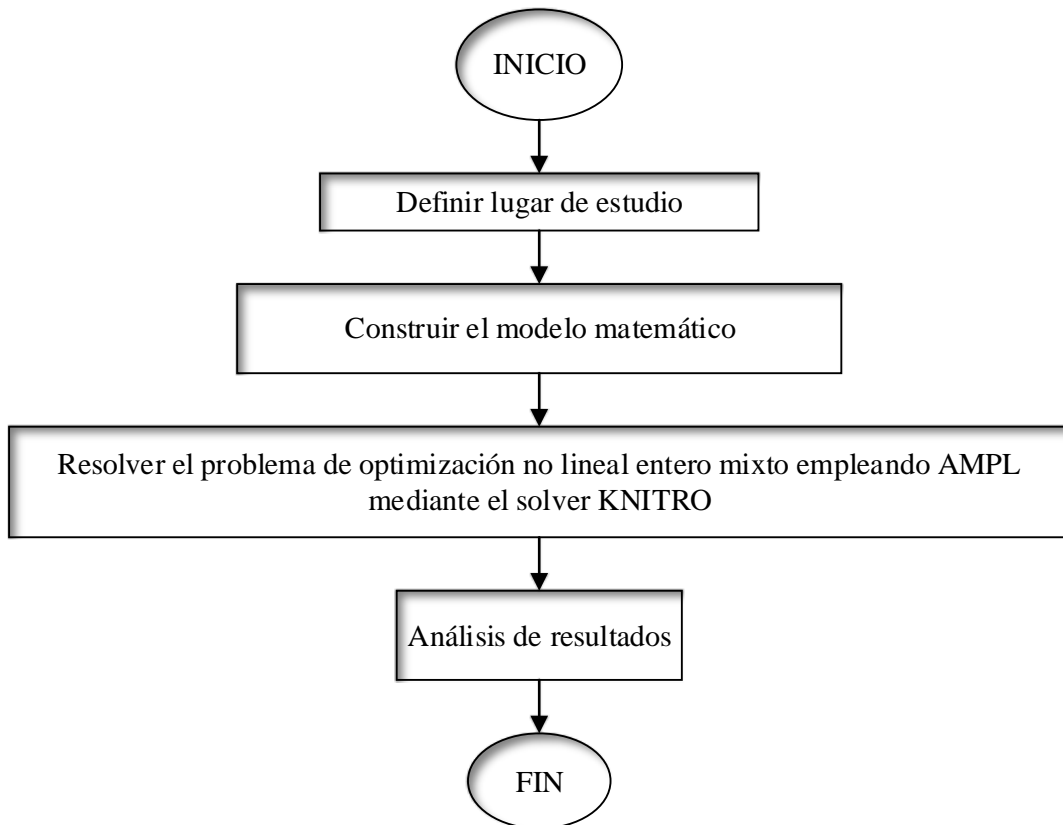


Figura 15 Metodología

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En el capítulo anterior se presentó un modelo de programación no lineal entero mixto (PNLEM) mediante el método *DistFlow* para el aprovechamiento del recurso eólico en los ambientes urbanos. El modelo fue representado a partir del lenguaje de modelamiento matemático AMPL usando un paquete de optimización (solver) KNITRO.

KNITRO es un solver especializado en problemas de optimización matemática de programación no lineal, el cual cuenta con algoritmos básicos para solucionar los problemas de optimización como: técnicas de descomposición no lineales, punto interior, técnicas de penalización, etc. (Escobar Vargas et al. 2012)

Para observar el comportamiento y la robustez del modelo de optimización, se eligió dos sistemas (micro redes) de 6 y 12 nodos basados en sistemas reales de la ciudad de Cuenca ubicados en la parte urbana.

En este capítulo se exponen y se analizan los resultados obtenidos según el modelo de optimización matemático planteado en el capítulo anterior. Los resultados se basan en los diferentes escenarios planeados según la función objetivo.

4.2 Resultados Caso A

Con el fin de observar la contribución de la micro generación eólica en la micro red, se trabaja para este caso de estudio con 3 escenarios, los cuales se enumeran a continuación;

1. Minimizar los costos de energía de la red de distribución sin incluir el recurso del viento;
2. Minimizar los costos de energía de la red de distribución incluyendo la generación eólica;
3. Minimizar el costo total de energía de la red principal con la integración de un sistema de almacenamiento (baterías) y el recurso eólico.

El objetivo de estas funciones es observar la producción de energía eólica en micro redes en términos de minimización de costos de la red de distribución para beneficio del usuario y la empresa pública en sus diferentes escenarios propuestos.

Es por ello que se realiza un análisis de sus variables y datos relevantes entregados por el modelo para cada escenario referente.

4.2.1 Escenario 1

$$\text{minimize } z: \sum_i^{SS} \sum_j^D \sum_t^T P_{i,d,t}^{SE} * C_{SE} * \Delta t \quad (24)$$

4.2.1.1 Costos

El sistema entrega los costos del sistema por día teniendo en cuenta el valor de venta de energía por parte de la Empresa Eléctrica.

Tabla 18 Costos del sistema sin recurso eólico

Fuente: Elaboración propia

Costo de energía del sistema por día	
Dia 1	\$8,0879
Dia 2	\$6,1334
Dia 3	\$6,2359

Indudablemente los días laborales son los que mayor costo representaran a la micro red debido a su mayor consumo energético.

4.2.1.2 Pérdidas en la micro red

Las pérdidas totales del sistema por día se ven representada en la **Tabla 19**. Y en la **Figura 16** se muestra las pérdidas de energía en la red en intervalos de 10 minutos para los tres días respectivos. Por lo general, entre las 14:00 a 16:00 horas de la tarde es donde se registran los mayores valores de pérdidas para el sistema según como muestra la figura.

Tabla 19 Perdidas de la red totales por día - Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

Pérdidas en la red por día	
Dia 1 [kWh]	0,0377
Dia 2 [kWh]	0,045
Dia 3 [kWh]	0,0285

El día 2 para el escenario 1 representa mayores pérdidas en la micro red con 0,045 kWh. Sin embargo, la diferencia es mínima para los días 1 y 3.

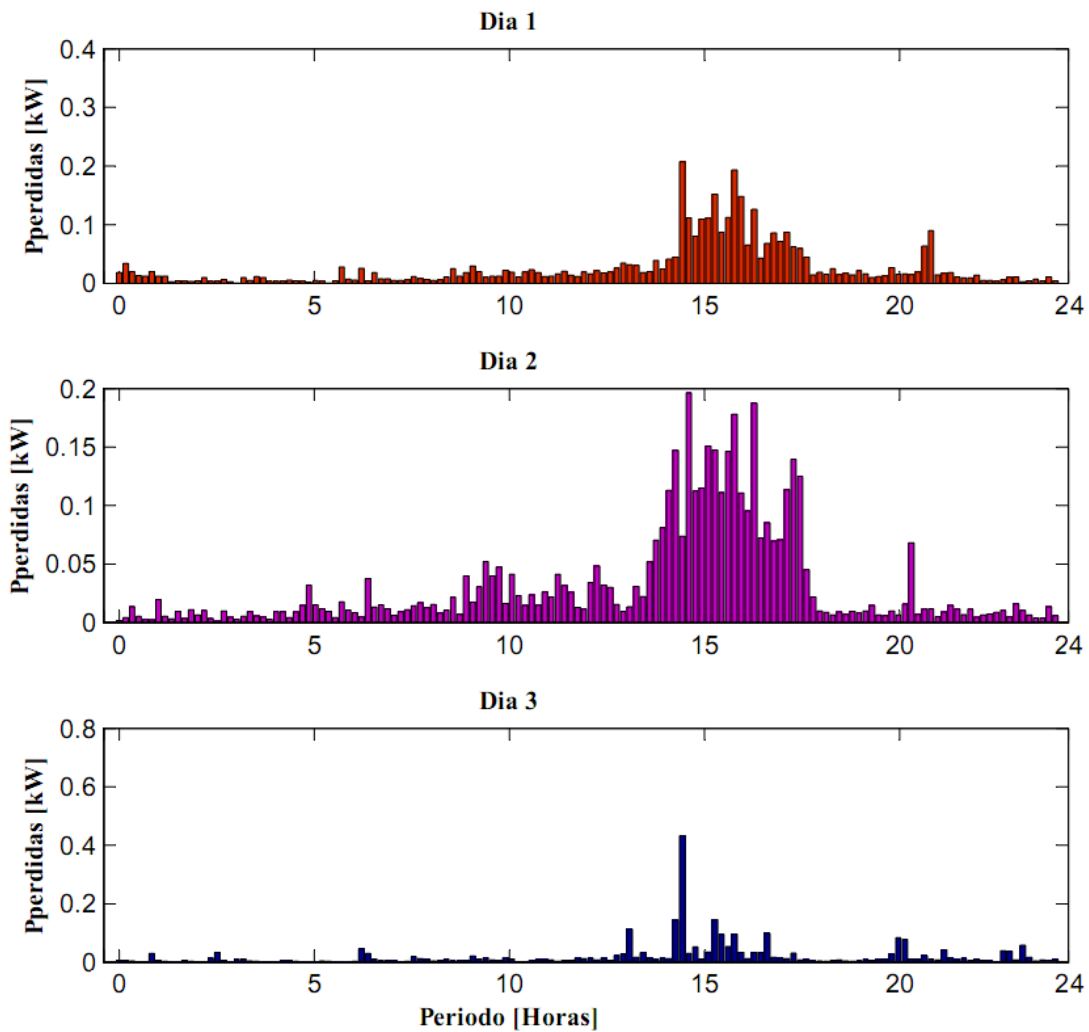


Figura 16 Pérdidas de energía en la micro red para los tres días – Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.3 Potencia de la Subestación (Transformador)

La potencia activa y reactiva que entrega el transformador de la red y alimenta a la micro red se representan en la **Figura 17**. El transformador realiza su mayor aporte de potencia a la micro red en el día 1 para satisfacer la demanda de sus cargas. En general se registran los valores máximos en horas picos cuyo valor esta alrededor de los 6,5 kW entre las 19:00 y 21:00 horas. El aporte de reactivos al sistema es considerable alto al largo del día debido a que existe una carga comercial, en horas del día y la noche se registra sus mayores valores de potencia.

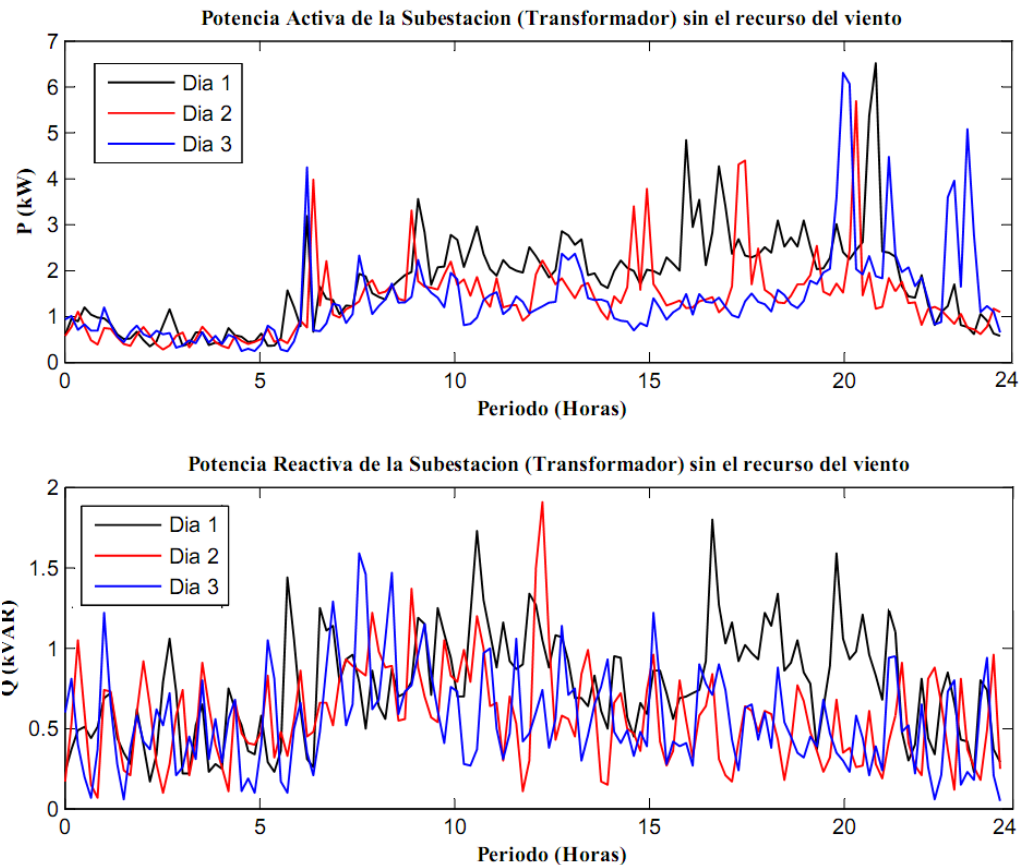


Figura 17 Potencia del Transformador Activa y Reactiva para los tres días – Escenario 1

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Escenario 2

Para este caso se aplica la misma función objetivo planteada en el anterior caso, pero con la incorporación del recurso del viento en el modelo de optimización con sus respectivas restricciones especificadas en el capítulo anterior.

4.2.2.1 Potencial Eólico

Al realizar la minimización de los costos por la potencia de la red de distribución, la idea es tratar de maximizar la autonomía del sistema, siempre y cuando el potencial eólico entregado por la micro turbina sea lo suficientemente alto. Lo ideal sería que la micro red ante un posible fallo en la red de distribución se desconecte y dependa únicamente del recurso eólico. Sin embargo, esto no es dable por el recurso en la zona y la potencia instalada, ya que no es competentemente alta para cubrir la demanda de energía de la micro red.

La potencia que entrega el recurso del viento a la micro red se ve representada en la **Figura 18**, al igual que la demanda, está también se muestra para 3 días, los mismos que corresponden a tiempos meteorológicos distintos de diferentes meses del año (febrero,

agosto y diciembre). Se puede observar cuando el sistema está trabajando con energía eólica su producción a través de una turbina de eje vertical es mínima, teniendo sus mayores registros de producción en horas de la tarde entre las 14:00 y 15:00 dependiendo del día. La producción máxima que entrega la micro turbina está alrededor de los 0,195 kW que corresponde al día 1, el cual representa un día de agosto donde se registran las mayores velocidades de viento.

Teniendo en cuenta la potencia entregada por la micro turbina, el sistema siempre estará conectado a la red de distribución para poder satisfacer la demanda de las cargas eléctricas.

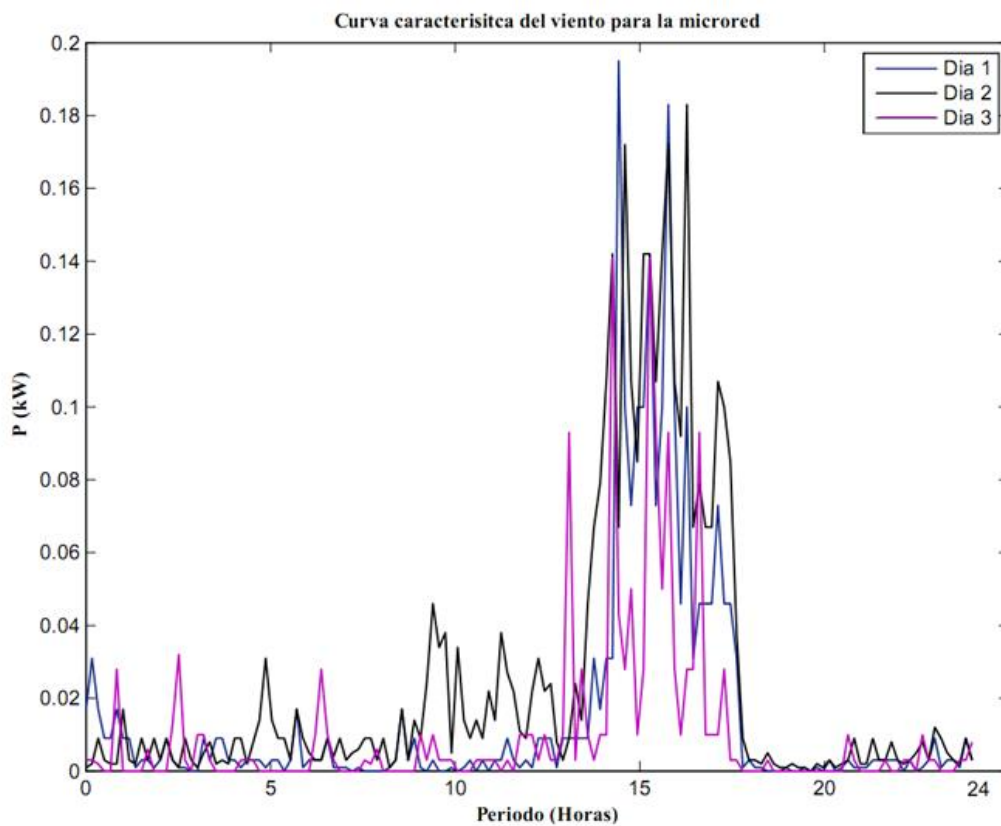


Figura 18 Potencial Eólico para el estudio del Escenario 2

Fuente: Elaboración propia

4.2.2.2 Costos

El costo de energía de la red de distribución al incluir micro generación eólica se ve representado en la **Tabla 20**. Al igual que el anterior caso, el día 1 es el que mayor costo representa al sistema con un valor de \$ 8,02.

Tabla 20 Costo Total y por día de la red de distribución – Escenario 2

Fuente: Elaboración Propia

Costo de energía del sistema por día	
Día 1	\$8,0175
Día 2	\$6,0197
Día 3	\$6,1787

4.2.2.4 Pérdidas en la micro red

Las pérdidas de potencia por día del sistema cada 10 minutos para el escenario 2 se ve representado en la **Figura 19**. Según como indica la **Tabla 21**, el día 1 posee el mayor valor de pérdidas que produce al sistema con 0,0153 kWh.

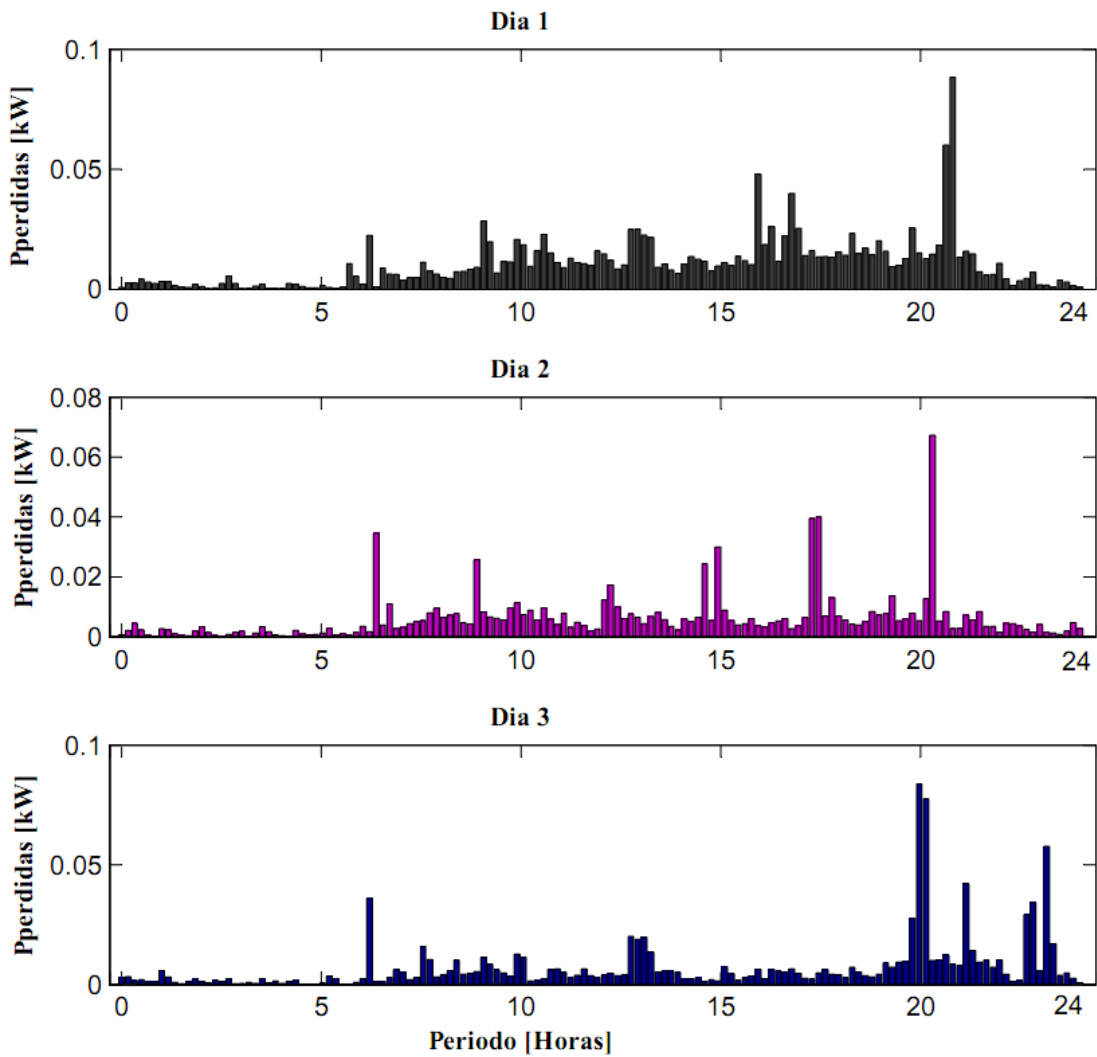


Figura 19 Pérdidas de energía en la micro red para los tres días – Escenario 2

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 21 Pérdidas totales del sistema por día – Escenario 2

Fuente: Elaboración Propia

Pérdidas en la red por día	
Día 1 [kWh]	0,0153
Día 2 [kWh]	0,0089
Día 3 [kWh]	0,0104

4.2.2.5 Potencia de la Subestación

La demanda máxima (P-Dem) de la red para los tres días se da en las horas picos pasado las 20:00 horas. Por lo general, entre las 8:00 am a 14:00 pm el sistema tiene un consumo de energía moderado. No obstante, su comportamiento energético difiere para cada día, teniendo un consumo menor para el día 3 (Día festivo). La aportación de potencia activa por parte de la micro turbina eólica (P-EE) al sistema es mínima como se observa en la **Figura 20**. La potencia del transformador en la figura está representada como (P-Sub) aportando mayor energía en el día laboral (Día 1) en sus horas picos cuyo valor esta alrededor de los 6,5 kW.

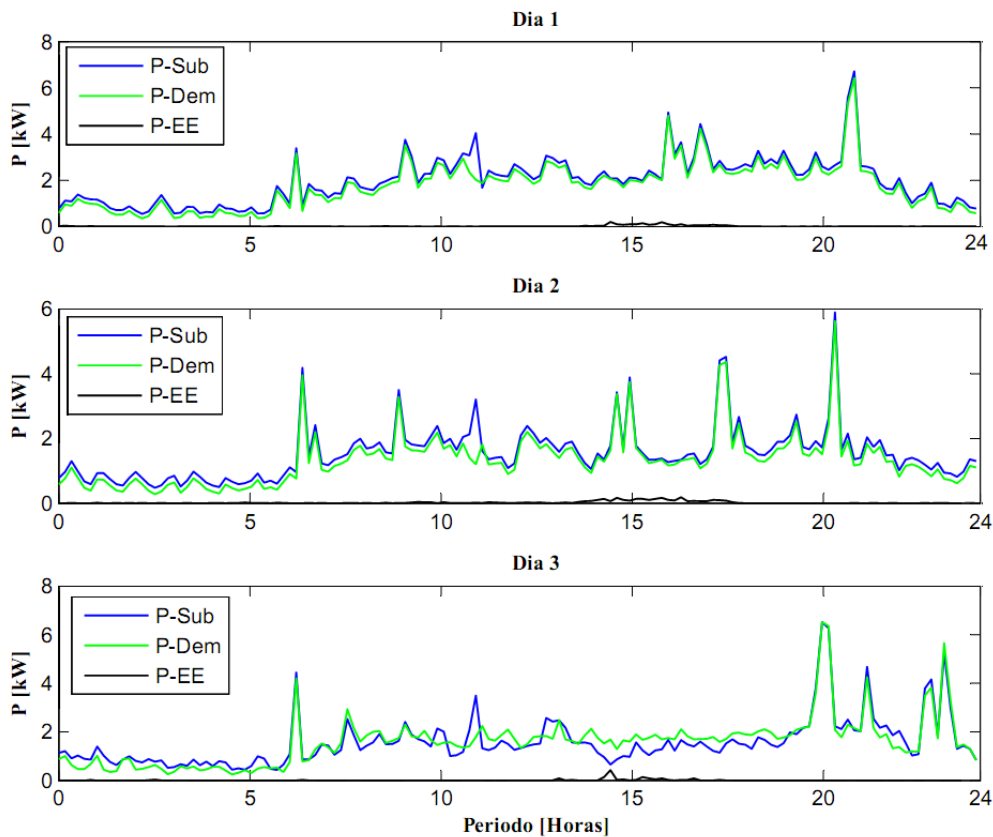


Figura 20 Potencia Activa del Transformador (P-Sub), Demanda del sistema (P-Dem) y Potencial Eólico (P-EE) - Escenario 2

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3 Comparación de Escenarios 1 y 2

Se puede observar la diferencia de costos totales para los 3 días entre el escenario 1 y 2 es pequeño cuyo valor apenas es de 6 o 7 centavos de dólar aproximadamente. Sin embargo, la implementación de la micro generación eólica aporta provechosamente en las pérdidas de la red puesto que al incluir este tipo de generación sus pérdidas totales se reducen considerablemente (Ver **Tabla 22**). El costo de implementación de esta tecnología es relativamente alto como se analizó en el capítulo 3. No obstante, aporta beneficiosamente en la contribución de energía de la red pública.

Tabla 22 Cuadro comparativo de las pérdidas del sistema entre el escenario 1 y 2

Fuente: Elaboración Propia

Día	Sin E. Eólica [kWh]	Con E. Eólica [kWh]
1	0,0377	0,0153
2	0,045	0,0089
3	0,0285	0,0104

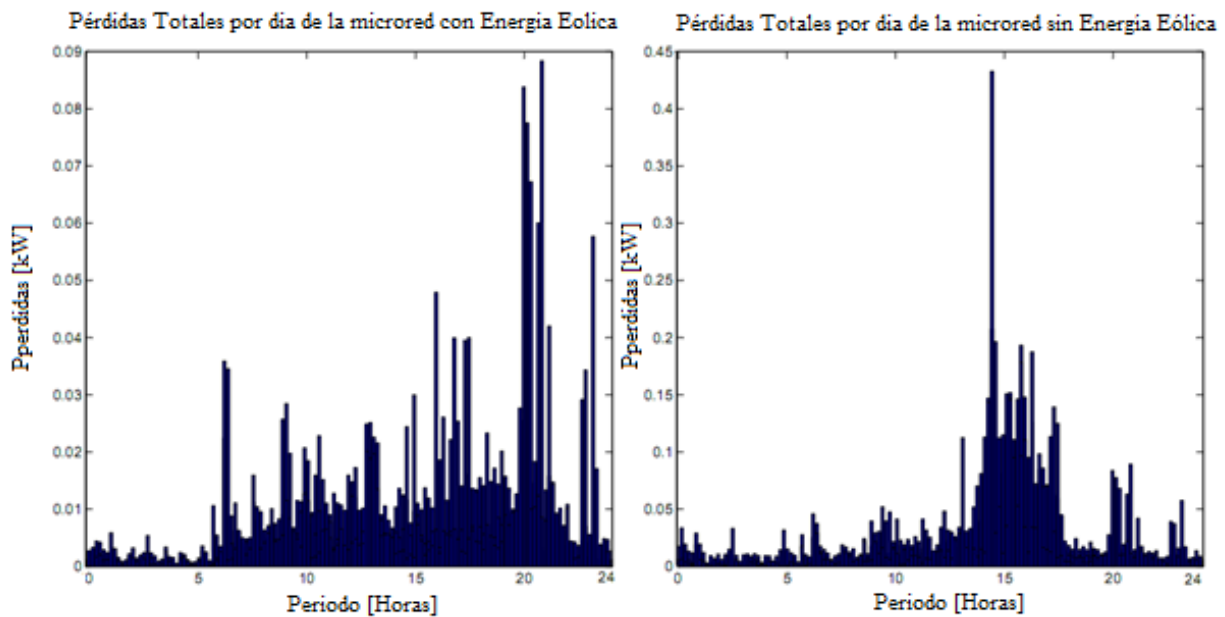


Figura 21 Pérdidas Totales del sistema con y sin recurso eólico

Fuente: Elaboración Propia

También se realiza una comparación de la potencia activa entregada por el transformador de la red de distribución cuando existe el recurso del viento o no, esto se ve representado en la **Figura 22**. La línea verde representa al sistema cuando no se trabaja con el recurso del viento y la línea azul cuando si existe la aportación de micro turbina a la red,

se observa que la diferencia es mínima teniendo valores semejantes de potencia activa debido a que el potencial eólico aportado en la zona es mínimo.

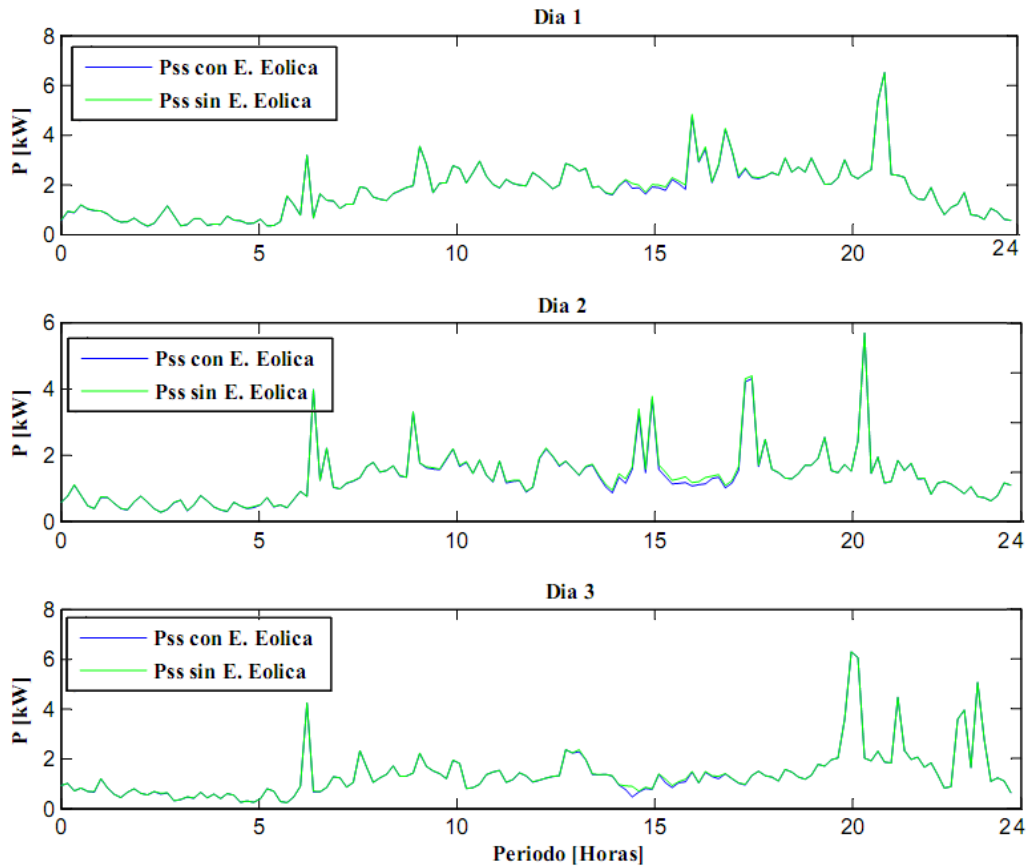


Figura 22 Potencia de la subestación (Pss) con y sin recurso eólico

Fuente: Elaboración Propia

El perfil de tensiones para los dos escenarios es igual teniendo una variación mínima en los últimos decimales, dicho perfil se presenta en la **Figura 23** para los tres días estipulados. Con un límite establecido del $\pm 5\%$ según lo que establece la norma para la variación de tensiones en la red de distribución, se realiza el análisis de tensiones en las barras. Se puede apreciar que el mínimo valor de tensión se da en la barra 3 para los 3 días con un valor alrededor de los 118,3 V (0,985 pu) cuyo registro por lo general se da en horas pico. Sin embargo, las variaciones de las tensiones en las barras por cada periodo no tienen cambios bruscos y permanecen en sus límites establecidos sin alterar el control de la red.

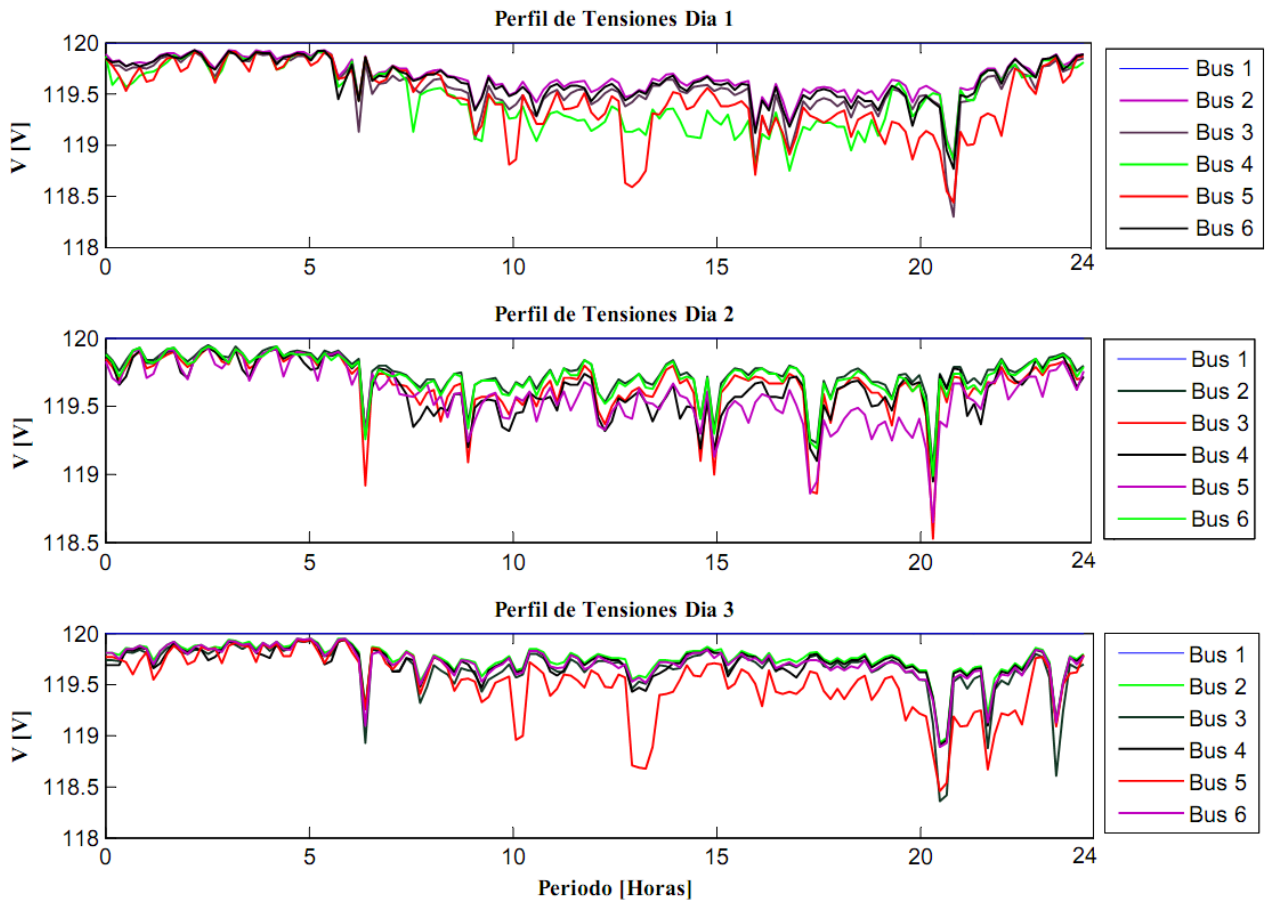


Figura 23 Perfil de Tensiones Escenarios 1 y 2

Fuente: Elaboración Propia

4.2.4 Escenario 3

Se aplica la misma función objetivo de los dos escenarios anteriores, la cual es minimizar el costo de energía de compra de la red de distribución, pero con la inclusión de un sistema de almacenamiento cuyas ecuaciones son especificadas en el capítulo 3. El sistema de almacenamiento de energía proporciona un medio para mejorar la eficiencia de la micro red cuando existe diferencias entre la aportación y la demanda.

En la **Figura 24** se observa la aportación de energía que entrega el sistema de almacenamiento a la micro red cuando están trabajando en un rendimiento del 100%. A más de esto se muestra la aportación de potencia activa del transformador y las pérdidas que representa al sistema para los tres días analizados. Estas graficas reflejan el aporte energético de las baterías que no supera los 4 kWh.

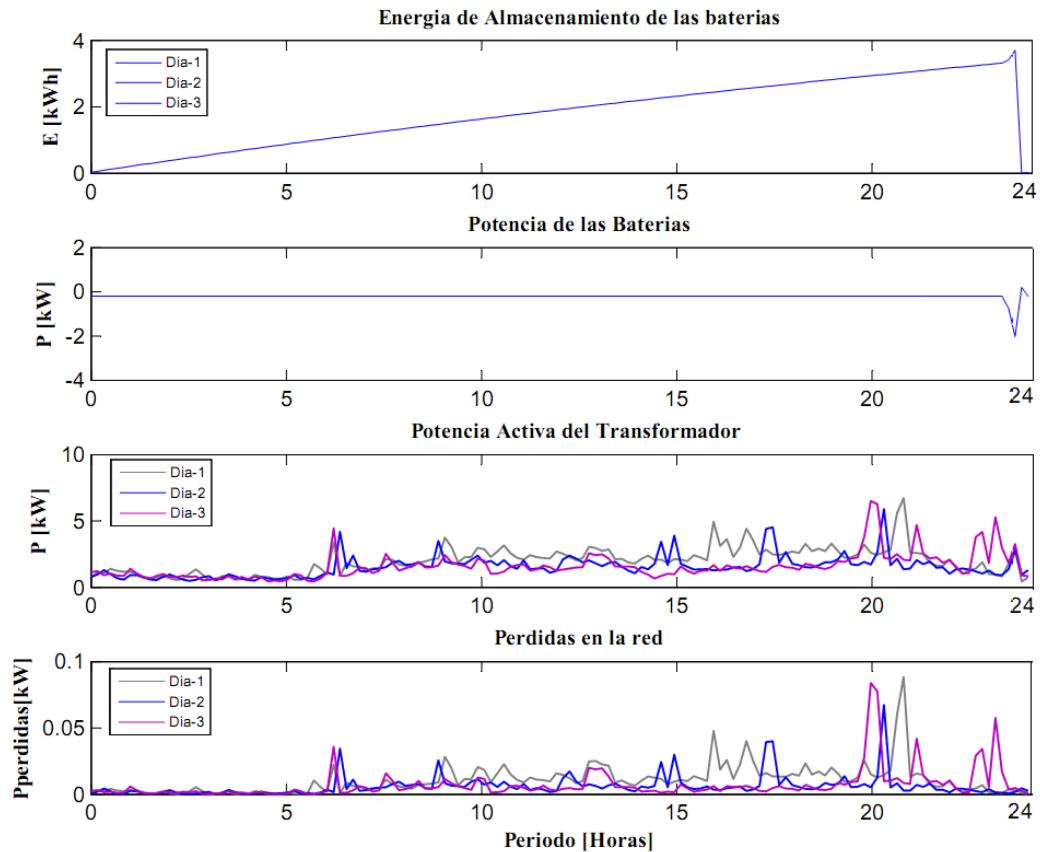


Figura 24 Efecto de carga y descarga de las baterías – Escenario 3

Fuente: Elaboración Propia

4.2.4.1 Comportamiento de la micro red según diferentes valores de rendimiento en el sistema de almacenamiento.

Se realiza un análisis para varios casos de rendimientos de carga y descarga en la batería utilizada en el escenario 3.

Estos rendimientos son del 50, 60 y 100% los cuales son representados en la **Figura 25**, **Figura 26** y **Figura 27** respectivamente. Las figuras muestran el total de energía almacenado por ESD (batería) **(a)**, la potencia total inyectada o extraída por la batería **(b)**, la potencia activa inyectada por la subestación (transformador) **(c)** y las pérdidas totales en la red **(d)**, para los 3 días de trabajo.

En el caso cuando la batería trabaja con un rendimiento del 50%, se observa la relación que existe entre la energía y potencia de la batería. La cantidad de energía almacenada tiene un crecimiento de 1,60 kWh hasta las 18:00 pm, después de esta hora aumenta considerablemente alcanzando un valor máximo de 6,67 kWh. Entre las 18:00 y las 23:40 de la noche se extrae mayor energía del sistema. Cuando se inyecta potencia al sistema (en un intervalo pequeño de 10 minutos entre las 23:40 y las 23:50 pm) la energía disminuye, en

los tres días analizados. Generalmente como la batería está extrayendo mayor energía en el sistema (periodo anteriormente especificado), se producen mayores pérdidas para este intervalo. En este caso el transformador aporta mayor potencia activa al sistema para los 3 días con valores de 8,5; 7,7 y 8,3 kW respectivamente.

Para un rendimiento $n = 60$ el análisis es similar que el anterior, diferenciándose de los valores máximos e intervalos de carga y descarga. Entre las 20:30 y las 23:40 de la noche el sistema almacenada mayor cantidad de energía, alcanzando el valor máximo de 5,3 kWh; Se inyecta potencia en el sistema de 0,2 kW en el periodo de 23:40 a 23:50 de la noche. Las mayores pérdidas se dan en el día 1 con 0,08 kWh.

Finalmente, en el último caso con una eficiencia de $n=100$, el almacenamiento se carga a plena capacidad logrando un valor máximo de 3,72 kW. El proceso de descarga se da a las 23:50 pm. La potencia activa que entrega el transformador difiere según el día. La generación de energía aparente máxima en este caso, es de 6,77 kVA, 5,9 kVA, y 6,52 kVA respectivamente para los días laboral, fin de semana y festivo.

La evaluación de los dos primeros casos de potencias para valores de eficiencia de almacenamiento de las baterías de 50 y 60%, difiere considerable al caso ideal con la eficiencia del (100%).

4.2.4.2 Costos Totales y Pérdidas totales

Los costos y pérdidas totales por día para el escenario 3 son representados en la para los tres rendimientos especificados. Es evidente que si la batería trabajara en el caso ideal representaría los menores costos en el sistema. Sin embargo, los costos bajan considerablemente cuando posee un sistema de almacenamiento. Las pérdidas en la micro red para los tres casos son semejantes teniendo una variación en el tercer decimal. No obstante, las pérdidas son mayores cuando el sistema trabaja baterías en comparación a los dos casos ya analizados anteriormente.

Tabla 23 Costos y Pérdidas totales del sistema para los diferentes rendimientos de la batería

Fuente: Elaboración Propia

Día	Costo [\$]		
	n50	n60	n100
1	1,72	1,59	1,41
2	1,40	1,27	1,10
3	1,43	1,29	1,12

Día	Pérdidas[kWh]		
	n50	n60	n100
1	0,152857	0,152787	0,152782
2	0,089253	0,08917	0,089177
3	0,104327	0,104245	0,104251

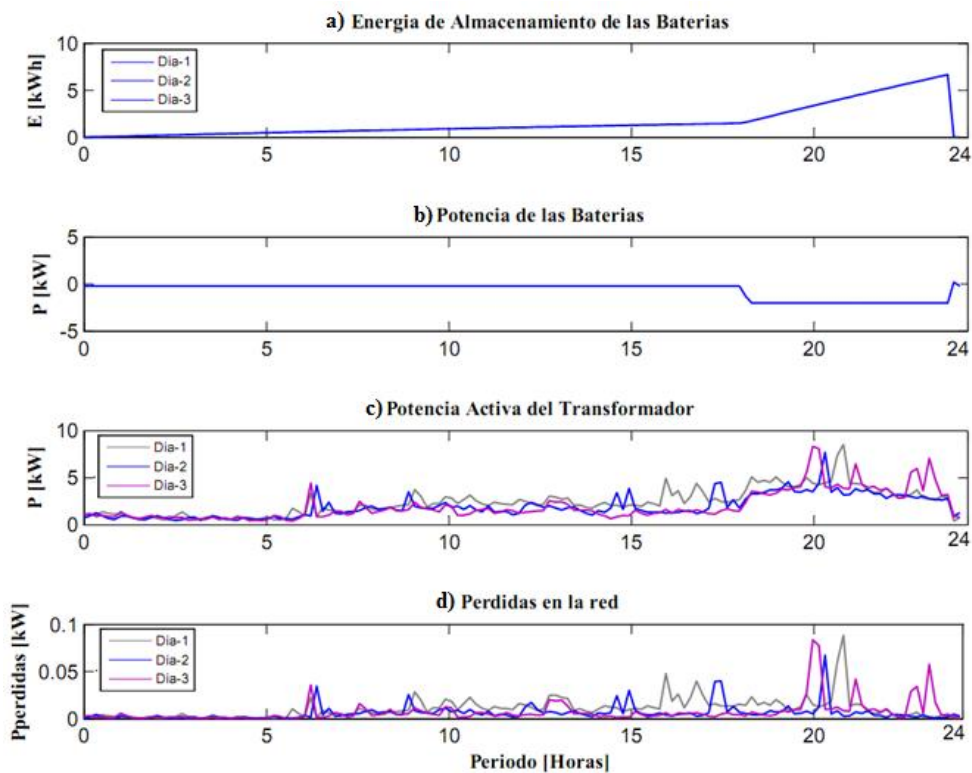


Figura 25 Rendimiento del 50% de la batería – Escenario 3

Fuente: Elaboración Propia

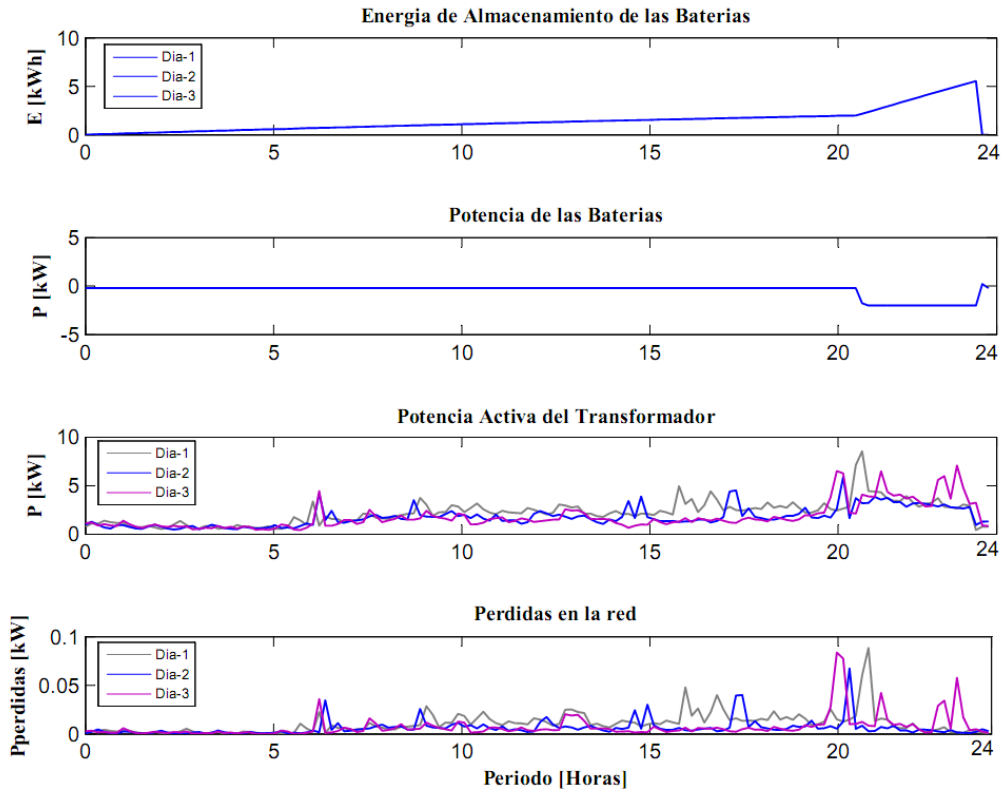


Figura 26 Rendimiento del 60% de la batería – Escenario

Fuente: Elaboración Propia

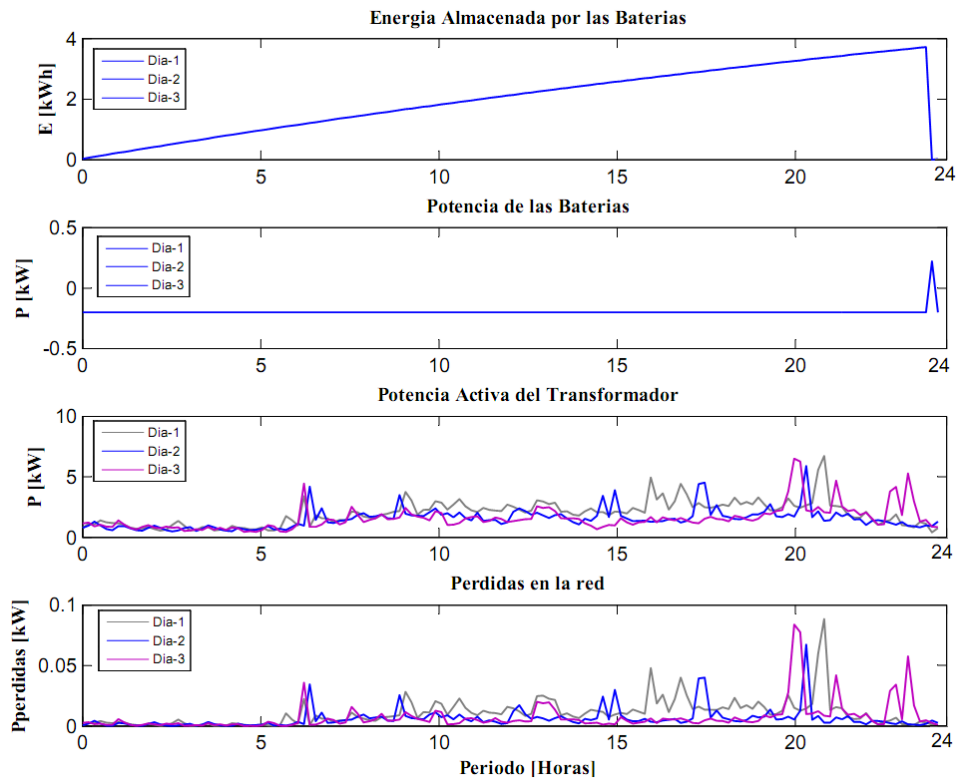


Figura 27 Rendimiento del 100% de la batería – Escenario 3

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Resultados Caso Estudio B

Para este caso de estudio también se resuelve el problema de operación de la micro red a través de la función objetivo de la minimización del costo de energía procedente de la red pública de distribución. Se analizan dos escenarios:

1. Cuando la micro red solo está conformada solo por el potencial eólico;
2. Cuando la micro red está conformada por micro turbinas eólicas y un sistema de almacenamiento.

4.3.1 Escenario 1 Caso B

Aplicando las ecuaciones del capítulo 3 sin almacenamiento con sus respectivas restricciones y límites de capacidad se muestra la solución óptima obtenida en AMPL. Se analiza los resultados para dos días, el uno corresponde a un día laboral y el otro a un día correspondiente a un fin de semana.

4.3.1.1 Potencial Eólico

El potencial eólico producido por la turbina utilizada en este caso se ve representada en la **Figura 28**. En este estudio se trabaja con dos micro turbinas de la misma capacidad para aportar potencia activa a la micro red.

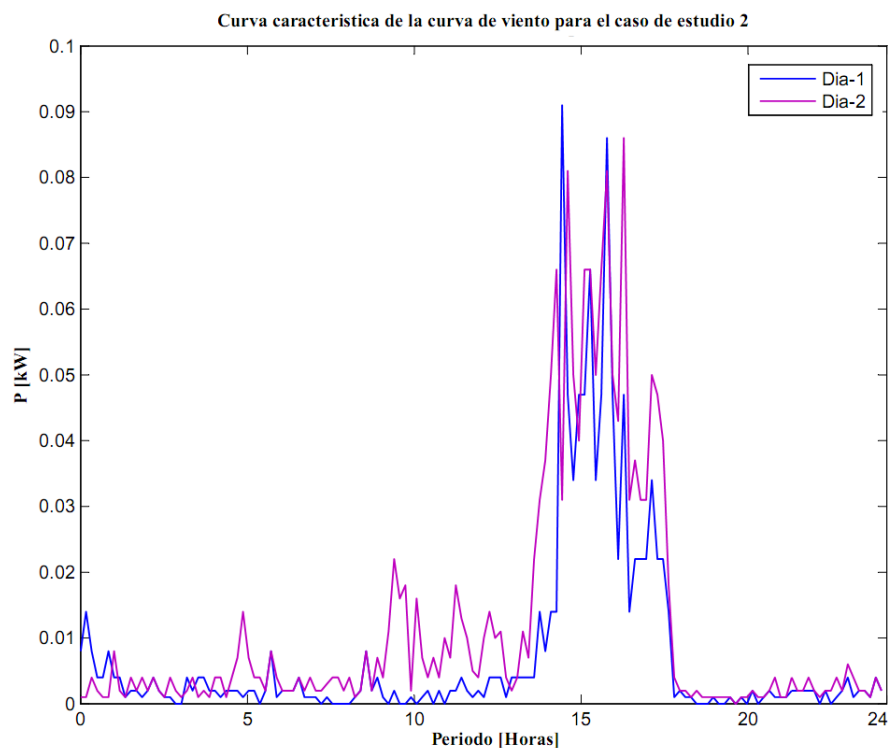


Figura 28 Potencial Eólico – Escenario 1 Caso B

Fuente: Elaboración Propia

Igualmente, cuando el sistema está trabajando con energía eólica su producción es mínima. Los mayores valores de producción se registran entre las 14:00 y las 16:00 horas de la tarde para los 2 días. Los dos días escogidos para el aprovechamiento del potencial eólico corresponde a un día de velocidades bajo el promedio y el otro encima del promedio diario de 2,4 m/s respectivamente. La producción máxima que entrega la micro turbina este alrededor de los 0,101 kW que corresponde al día 2. En general, en horas del mañana la micro red no recibe aportaciones de potencia activa por las velocidades bajas que se registran en esas horas.

4.3.1.2 Costos

El modelo matemático con su respectiva función objetivo muestra los costos optimizados para la segunda micro red planteada, cuyos valores están expuestos en la

Tabla 24 .

Tabla 24 Costos del sistema – Escenario 1 caso B

Fuente: Elaboración Propia

Costo de energía del sistema por día	
Día 1	\$5,65
Día 2	\$5,23

La diferencia de costos entre los dos días es mínima imponiéndose el día laborar con \$5,65 debido a su mayor demanda que produce.

4.3.1.3 Pérdidas en la red

Las pérdidas totales por día están representadas en la **Tabla 25** generando mayores pérdidas al sistema el día 1 con 0,1159 kWh. Se puede observar las perdidas en intervalos de 10 minutos en la **Figura 29**.

Tabla 25 Pérdidas Totales por día Escenario 1 Caso B

Fuente: Elaboración Propia

Pérdidas en la red por día	
Día 1 [kWh]	0,115887
Día 2 [kWh]	0,100792

Por lo general, se producen las mayores pérdidas en los dos días entre las 19:30 y las 20:30 de la noche. Sin embargo, para un día laboral el sistema tiene sus mayores valores de pérdidas en horas picos del día.

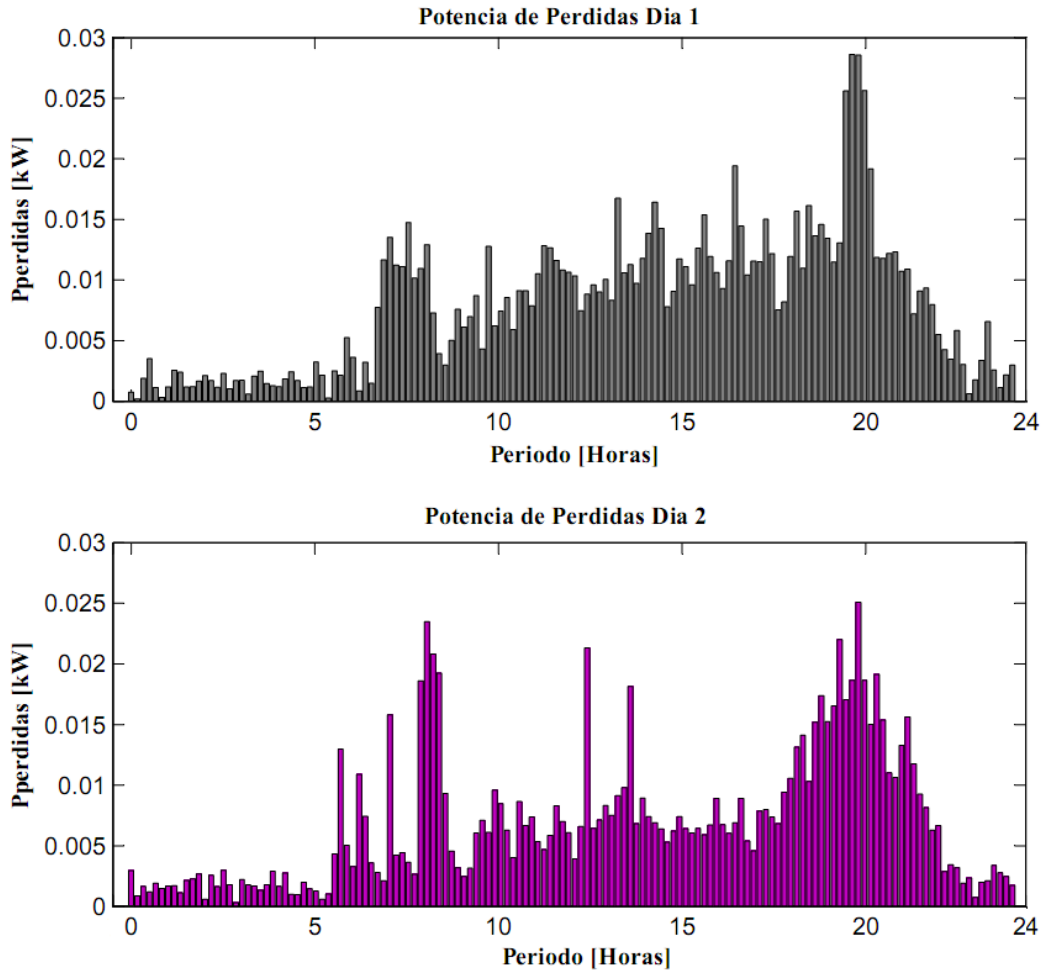


Figura 29 Perdidas del sistema – Escenario 1 Caso B

Fuente: Elaboración Propia

4.3.1.5 Potencia de la subestación (Caso B)

El transformador aporta potencia activa y reactiva a la micro red para la compensación de la demanda de las cargas. La mayor contribución de potencia activa al sistema se da por lo general en horas picos cuando se consume mayor energía en la micro red, este valor esta alrededor de los 5 kW para los dos días en horas de la noche. En cuestión de los reactivos, el sistema entrega mayor cantidad de potencia para los días laborales.

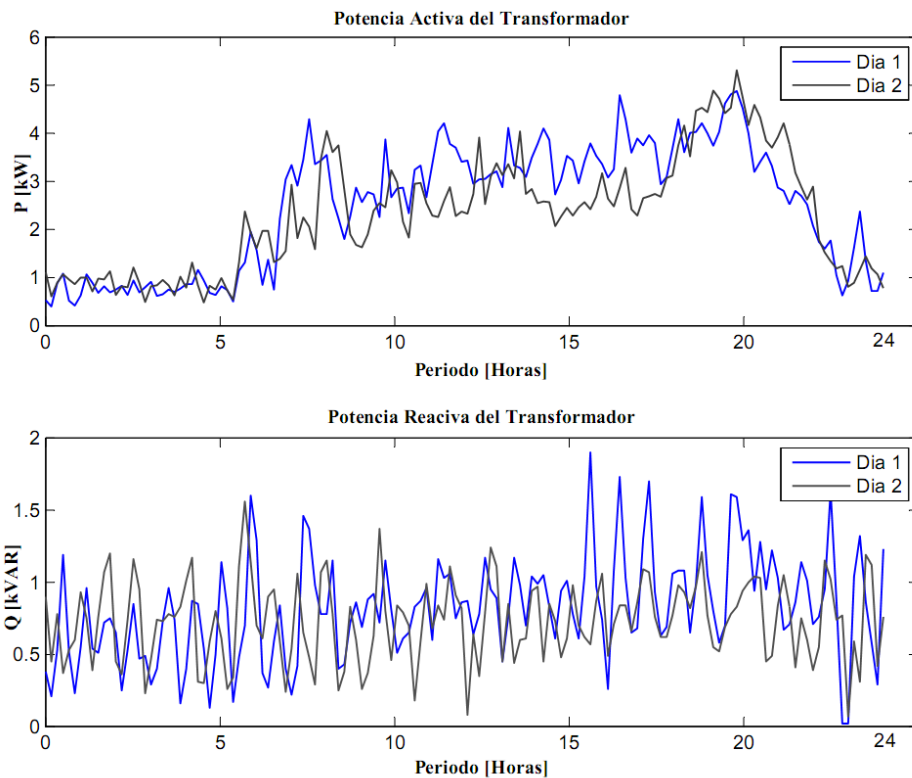


Figura 30 Potencia del Transformador caso B

Fuente: Elaboración Propia

4.3.2 Escenario 2 Caso B

Las soluciones consisten en el análisis considerando los rendimientos de carga y descarga por defecto de las baterías en sus diferentes rendimientos 100% 90% y 60%, de la misma forma como se realizó en el caso de estudio A. Para el caso de estudio B se instalan dos baterías de las mismas características en las barras 1 y 2 cuyas especificaciones ya fueron mencionadas en el capítulo anterior.

Se presentan los resultados según el rendimiento de carga y descarga de las baterías para ambos casos. La **Tabla 26** muestra los costos y la potencia de pérdidas del sistema representado para cada rendimiento de la batería.

Tabla 26 Costos Caso B con EDS

Fuente: Elaboración Propia

Dia	Costo [\$]		
	n60	n90	n100
1	7,63	6,62	6,62
2	7,21	6,20	6,20

Dia	Pérdidas[kWh]		
	n60	n90	n100
1	0,120601	0,117926	0,117926
2	0,105683	0,102747	0,102747

La **Figura 31** al igual como se analizó en el anterior caso, muestra la energía total almacenada en las ESDs (baterías) **(a)**, la potencia total inyectada y extraída por las ESDs (baterías) **(b)**, la potencia aparente inyectada por el transformador de la red de distribución **(c)**, las pérdidas de potencia activa en las líneas para un rendimiento **(d)** del 60% de carga y descarga. La cantidad de energía almacenada de la batería alcanza un valor de 2,17 kWh hasta las 20:20 pm, después de esta hora aumenta extrae mayor energía al sistema alcanzando la carga completa en un valor máximo de 5,56kWh. La energía disminuye a partir de las 23:30 pm en los dos días analizados. Sus pérdidas son significativas a las 20:00 horas de la noche. La **Figura 32** y **Figura 33** muestran la solución óptima las eficiencias de 90 y 100% de carga y descarga de las baterías. Estas graficas contienen la misma información, de la que se pueden extraer las mismas conclusiones, cuyo valor máximo de energía llega a los 3,8 kWh extrayendo mayor potencia de la batería en los últimos 20 minutos del día considerando una mayor aportación de potencia activa por parte del transformador.

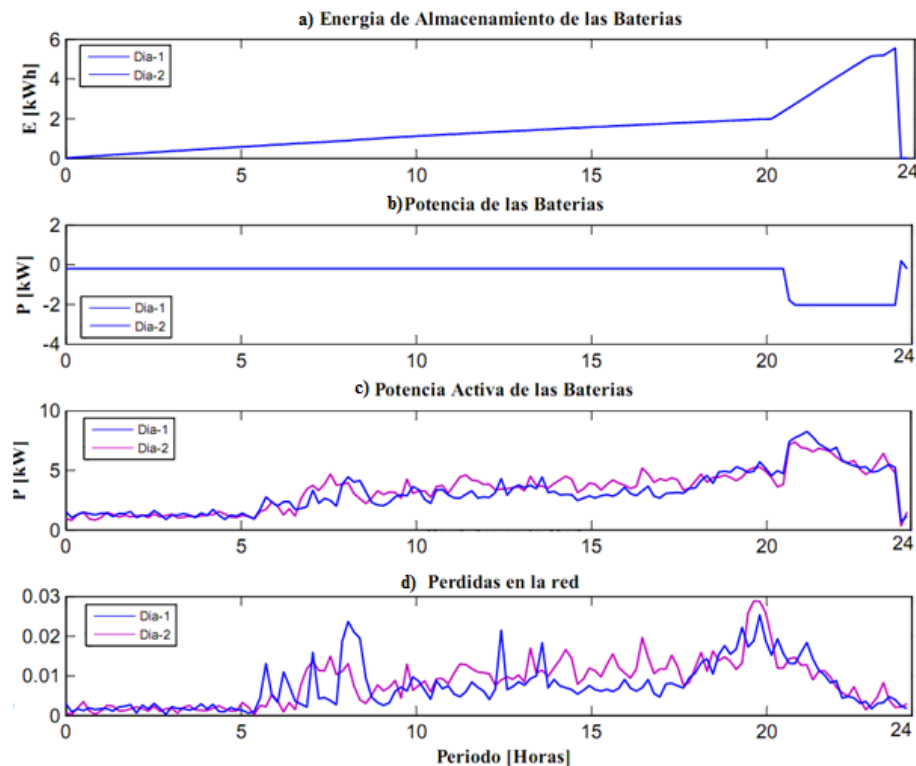


Figura 31 Rendimiento del 60 % de la batería Caso B

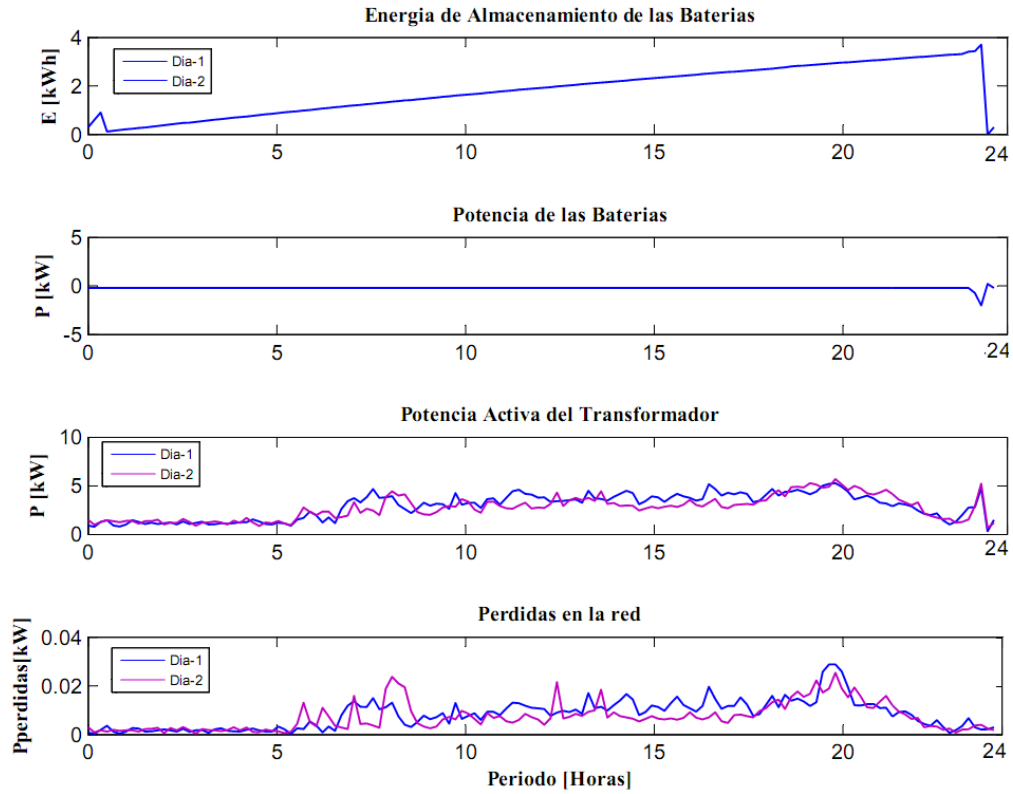


Figura 32 Rendimiento del 90 % de la batería Caso B

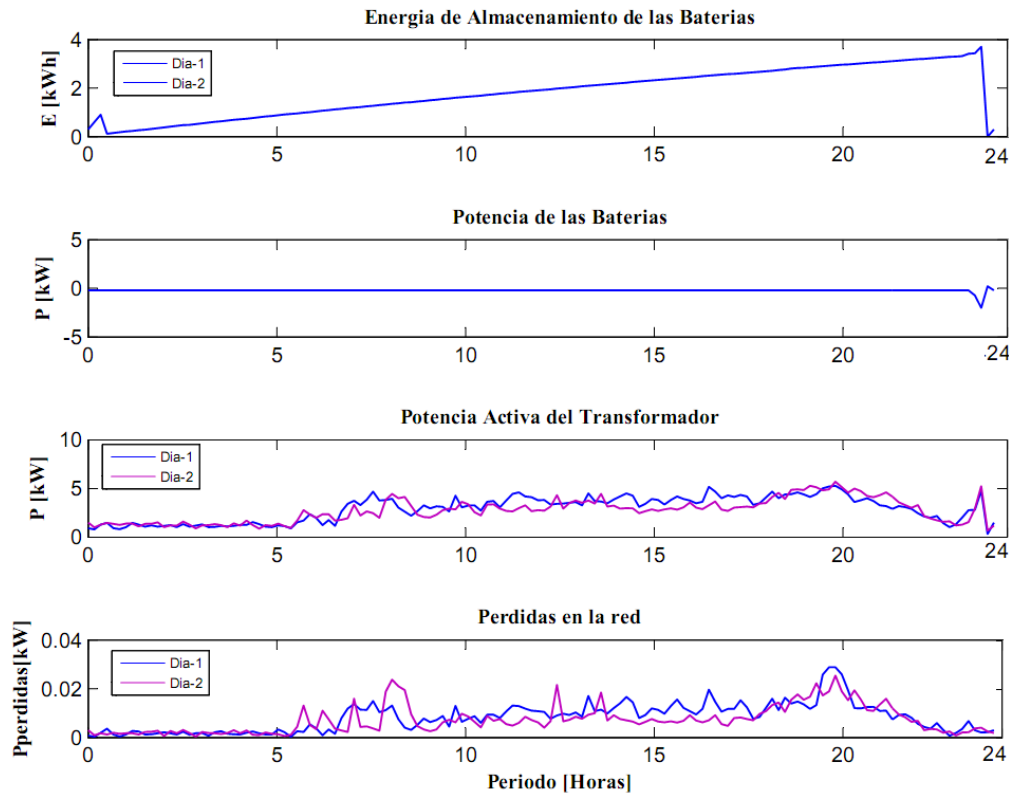
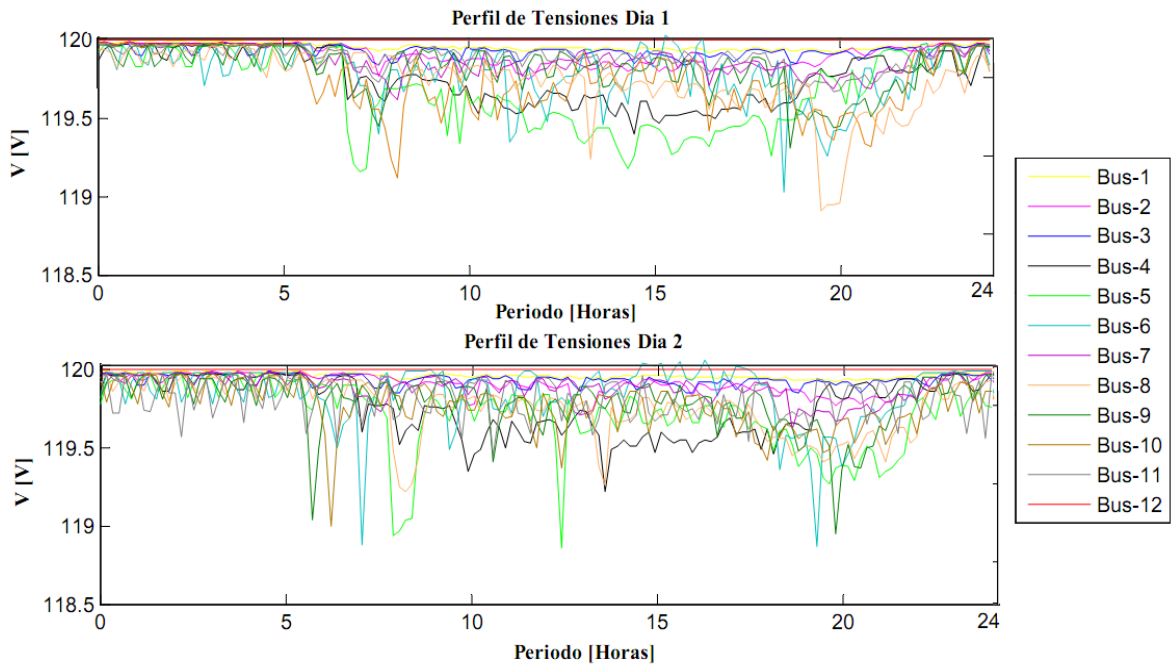


Figura 33 Rendimiento del 100 % de la batería Caso B

Fuente: Elaboración Propia

4.3.3 Perfil de Tensiones Escenario 1 y 2 caso B

El perfil de tensiones se muestra en la **Figura 34** para los dos días estipulados, se observa un comportamiento similar en las tensiones de cada barra, teniendo variaciones mínimas en sus últimos decimales. Del mismo modo, todos los voltajes en el sistema están dentro de sus límites establecidos.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 34 Perfil de tensiones caso B

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

El uso de la energía eólica en la parte urbana de la ciudad es una forma decente de mitigar problemas en la red de distribución y consumo energético mediante el uso de funciones de optimización.

El comportamiento de los datos de viento registrados en la ciudad de Cuenca a través de la distribución de *Weibull* presentó un factor de forma de 2,65 y un factor de escala de 2,41.

La velocidad promedio del viento obtenida en el lugar de estudio es de 2,4 m/s. El proceder de la velocidad del viento a lo largo del día es intermitente y variable, entre las 14:00 y 15:00 pm se registra las mayores velocidades de viento, alcanzando valores de hasta 5 m/s en referencia a los datos obtenidos.

A través del método DistFlow se planteó el modelo de optimización de flujos óptimos para aplicar a dos micro redes de casos de estudio reales ubicados en la ciudad de Cuenca.

Se estimó la energía diaria y anual que aportarían las turbinas eólicas a las micro redes en cada caso de estudio. La energía diaria y anual para el primer caso es de 0,72 kWh y 262 kWh respectivamente con una micro turbina de 1 kW. Al instalar dos micro turbinas de 0,6 kW para el segundo caso de estudio la energía diaria que aportaría sería de 0,35 kWh y 126 kWh anual según la ley de *Betz* y la velocidad de viento promedio.

El potencial eólico aprovechado por las micro turbinas es minúsculo aportando sus máximas potencias de 0,19 kW y 0,10 kW respectivamente para cada caso de estudio.

Los costos de implementación de esta tecnología en el entorno urbano son aproximadamente de \$3760 y \$5180 correspondientemente para cada caso de estudio.

Al tener cargas de origen comercial como es el caso de estudio A, el consumo de reactivos es alto teniendo un máximo de 1,4 kVAR para el tamaño de la micro red planteada.

Al plantear una función objetivo de minimizar los costos totales de energía procedente de la red de distribución, en cada caso de estudio se obtiene las siguientes conclusiones:

Caso A

La diferencia de costos de energía es mínima cuando el sistema trabaja o no con tecnología eólica. Con una diferencia de 5 a 6 centavos de dólar de ahorro por día cuando se aplica el recurso del viento a la micro red. No obstante, se obtiene una economía de compra de energía a la red de distribución del 22,55% cuando las baterías están presentes en el sistema.

Las pérdidas en la red se reducen considerablemente cuando la tecnología eólica aporta potencia activa a la micro red.

El nivel de tensiones en los nodos mejora en cifras minúsculas en el cuarto decimal para los 3 escenarios planteados siendo la mayor caída de tensión de 0,9853 V en el Bus 3.

El análisis para varios casos de rendimientos de carga y descarga en la batería muestra que al trabajar con un rendimiento del 100% en la batería se obtiene una mayor economía. El almacenamiento se carga durante periodos de carga ligera y se descarga durante tiempos de alta carga.

Caso B

Se evidencia una pequeña reducción de las pérdidas de potencia activa durante las horas pico, mientras que se presenta un aumento de estas durante las horas valle debido al proceso de carga de las baterías. En términos económicos el costo es mayor cuando se implementa el sistema de almacenamiento teniendo costos de \$6,20 por día en el mejor de los casos.

En general se justifica la decisión de instalación del sistema de almacenamiento, ya que más allá de si es económicamente beneficioso o no, lo importante de tener este banco de baterías en instalaciones con tecnología renovable es para reducir la incertidumbre de éstas, es decir cuando no exista viento se puede tener energía almacenada en las baterías con ello garantizando la confiabilidad de la red.

La metodología propuesta en este trabajo es eficiente debido a que permite obtener buenos resultados mejorando los problemas operativos de la red como las pérdidas de potencia en la red aportando beneficios satisfactorios.

Trabajos Futuros

El modelo de optimización se puede modelar como una función multi objetivo de orden lineal, cuyo modelo debe encontrar la mejor combinación posible a fin de tener una solución que brinde calidad y eficiencia a través de métodos matemáticos como el de ponderaciones, e-method, etc. Esto conllevaría a ver el comportamiento del sistema a través de funciones específicas que se desee trabajar.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, B.A., 2013. The (Lost) Art of Wind Turbine Technology Selection Cost , Brand Aren t the Only Factors to Consider. , (1), pp.4–8.
- Andersson, J., 2001. Multiobjective Optimization in Engineering Design: Applications to Fluid Power Systems,
- Aragão Teixeira, A.R., 2010. Micro-turbinas instaladas em ambiente urbano , desenvolvimento de uma metodologia para identificação e Micro-turbinas instaladas em ambiente urbano , desenvolvimento de uma metodologia para identificação e.
- Arconel, 2017. Pliego-y-Cargos-Tarifarios- ENERGIA 2016-01-02-2016.pdf. , p.28.
- Ayhan, D. & Sağlam, A., 2012. A technical review of building-mounted wind power systems and a sample simulation model. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1), pp.1040–1049.
- Baller, C., 2011. Urban Wind Energy.
- Bañuelos ruedas, F., 2011. Impacto de la Generacion Electrica usando Fuentes de Energia Eolica en la red Electrica Nacional.
- Bertényi, T. & Young, T., 2009. Power electronics solutions for vertical axis urban wind turbines. 2009 IEEE Electrical Power and Energy Conference, EPEC 2009, pp.1–7.
- Bordons, C., García-Torres, F. & Valverde, L., 2015. Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable. RIAI - Revista Iberoamericana de Automatica e Informatica Industrial, 12(2), pp.117–132.
- Bufanio, R. et al., 2012. Estimación de potencia anual generada por un generador eólico. Seminario Nacional Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza - Instituto Regional de Estudios Sobre Energía. Eficiencia Energética, pp.0–10.
- Cochancela, J. & Astudillo, P., 2012. Análisis energético de centrales eólicas. Available at: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/5022/1/Tesis.pdf>.
- CONELEC (2004) Regulación No. CONELEC 004/04 Página 1 de 7. , pp.1–7. Available at:<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2015/12/CONELEC-PreciosRenovables3.pdf>
- Correa, J., 2014. Desarrollo en Aerogeneradores Eólicos de eje vertical Funlam, ed.,
- Díez, P.F., 2008. Fundamentos aerodinámicos. Energía eólica, pp.1–135. Available at: <http://www.termica.webhop.info/>.

Escobar Vargas, L.M. et al., 2012. Planeamiento de sistemas de transmisión de energía eléctrica usando AMPL. *Scientia et Technica*, 2(51), pp.22–27. Available at: <http://200.21.217.140/index.php/revistaciencia/article/view/7139>.

Fernando, W. et al., 2013. Aplicación de la Ecuación de Weibull para determinar el potencial eólico en Tunjá, Colombia. , pp.11–15.

Gil, I., 2012. DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN BATERÍAS Y SUPERCONDENSADORES PARA SU INTEGRACIÓN EN MICROREDES ELÉCTRICAS. , pp.7–19.

Intelligent Energy - Europe, 2005. Catalogue of European Urban Wind Turbine Manufacturers. , p.23. Available at: <http://www.urbanwind.net/downloads.html>.

James, P.A.B. et al., 2010. Implications of the UK field trial of building mounted horizontal axis micro-wind turbines. *Energy Policy*, 38(10), pp.6130–6144. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.070>.

Karthikeya, B.R., Negi, P.S. & Srikanth, N., 2016. Wind resource assessment for urban renewable energy application in Singapore. *Renewable Energy*, 87, pp.403–414. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.10.010>.

Kose, R. et al., 2004. The analysis of wind data and wind energy potential in Kutahya, Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8(3), pp.277–288.

Kruimer, B. et al., 2011. Integration Issues of Distributed Generation in Distribution Grids. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), pp.28–39.

Levron, Y., Guerrero, J.M. & Beck, Y., 2013. Optimal power flow in microgrids with energy storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), pp.3226–3234.

Levron, Y. & Shmilovitz, D., 2010. Optimal Power Management in Fueled Systems With. , 57(8), pp.2221–2231.

Macedo, L.H. et al., 2015. Considering Energy Storage Devices. , 6(6), pp.2825–2836.

Mao, M. et al., 2010. Multi-objective economic dispatch model for a microgrid considering reliability. 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, PEDG 2010, pp.993–998.

Merino, M., 2013. Técnicas Clásicas de Optimización. Programación Continua Lineal y no Lineal, pp.7–77. Available at: www.ehu.es/mae/html/prof/Maria_archivos/plnlapuntes.pdf.

Mertens, S., 2006. Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings

Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings. , pp.1–180.

Paudyal, S., Canizares, C. a. & Bhattacharya, K., 2011. Optimal Operation of Distribution

- Feeders in Smart Grids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(10), pp.4495–4503.
- Poonpun, P., Member, S. & Jewell, W.T., 2008. Analysis of the Cost per Kilowatt Hour to Store Electricity. , 23(2), pp.529–534.
- Roitman, M., Mestrallet, A. & Rossi, R., 2015. Dimensionamiento de un sistema de energía para una vivienda familiar de la Ciudad de Córdoba. , 2(2).
- Solanki, A. et al., 2016. A New Framework for Microgrid Management: Virtual Droop Control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(2), pp.554–566.
- Street, M. & Vic, M., 2009. An Evaluation of the Wind Resource At Port Phillip Bay The City of Port Phillip June 2009 Table of Contents Table of Figures.
- Sunderland, K.M. et al., 2016. The cost of energy associated with micro wind generation: International case studies of rural and urban installations. *Energy*, 109, pp.818–829. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.045>.
- Sunderland, K.M., Mills, G. & Conlon, M.F., 2013. Estimating the wind resource in an urban area: A case study of micro-wind generation potential in dublin, ireland. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 118, pp.44–53. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.04.002>.
- Sustainability Victoria, 2010. Victorian Consumer Guide to Small wind Turbine Generation. , (July), p.30.
- Warwick, E., 2009. Warwick Wind Trials. , (May), pp.178–200. Available at: <http://www.warwickwindtrials.org.uk/>.
- Wekesa, D.W. et al., 2014. Wind resource assessment and numerical simulation for wind turbine airfoils. 15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics(REM),pp.1–9.Availableat: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6920224>.
- De Wit, M.H., Stathopoulos, T. & Wisse, J.A., 2002. Airport wind speeds used for the design in urban environments: The Eindhoven case. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(11), pp.1289–1298.

ANEXOS

ANEXO 1

```
#-----
# Instituto Politecnico de Leiria
# "Use of Wind Energy in Urban Environments"
# Diego Peña Banegas
#-----
# Voltage in Sources [kV]
param VS;

# Voltage limits definition
param VMIN;
param VMAX;

# Voltage base (kV)
param kVbase;

# Base value kVA definition
param kVAbase;

# Bus type definition
param SLK;
param PQ;

#-----PERIOD AND SCENARIOS PARAMETERS-----
param D > 0;
param T > 0;
#-----BUS PARAMETERS-----
set BUS;
param BUSTYPE {BUS} >= 0;
param BNAME {BUS} >= 0;
param PD {BUS} >= 0;
param QD {BUS} >= 0;
#-----BRANCH PARAMETERS-----
set BRANCH;
param FBUS {BRANCH} >= 0; #origen linea
param TBUS {BRANCH} >= 0; #destino linea
param R {BRANCH} >= 0;
param X {BRANCH} >= 0;
param LNAME {BRANCH} >= 0;
param IMAX {BRANCH} >= 0;
#-----SUBSTATION PARAMETERS-----
set SS;
param SMAX {SS} >= 0;
param CSS {SS} >= 0;
param BSS {SS} >= 0;
#-----WIND POWER GENERATION PARAMETERS-----
set WPS;
#-----WIND GENERATION IN STAGE PARAMETERS-----
param Pwmax {WPS,1..D,1..T} >=0;
#-----ACTIVE POWER DEMAND IN STAGE PARAMETERS-----
-#
param PDS {BUS,1..D,1..T};
#-----REACTIVE POWER DEMAND IN STAGE PARAMETERS-----
-#
param QDS {BUS,1..D,1..T} >=0;
```

```

#-----#
set SD;
param nbc{SD} >=0;
param nbd{SD} >=0;
param Pbc{1..SD,1..D,1..T} >=0;
param Pbd{1..SD,1..D,1..T} >=0;
param Pbcmin;
param Pbdmin;
param Ebmax;
param Ebmin;
#-----#
#                                     Variables
#-----#
---#
var Pss {i in SS,m in 1..D,p in 1..T};
var Qss {i in SS,m in 1..D,p in 1..T};
var v {BUS,1..D,1..T};
var P {i in BRANCH,m in 1..D,p in 1..T};
var Pb {i in SD,m in 1..D,p in 1..T};
var Eb {i in SD,m in 1..D,p in 1..T};
var PW {i in WPS,m in 1..D,p in 1..T} >= 0;
var Q {i in BRANCH,m in 1..D,p in 1..T};
var I {i in BRANCH,m in 1..D,p in 1..T};
var eb {i in SD},binary;
param w;
#-----#
#                                     Calculation Z
#-----#
param Z {i in BRANCH,m in 1..D,p in 1..T} = sqrt(R[i]^2+X[i]^2);
#-----#
#                                     Target
#-----#

minimize zi: sum{i in SS, d in 1.. D, t in 1..T}Pss[i,d,t]*CSS[i];

#-----#
#                                     RESTRICTIONS
#-----#

subject to R1 {i in BUS, m in 1..D, p in 1..T}:
sum{k in BRANCH:(TBUS[k]=i)}P[k,m,p] - sum{k in BRANCH:(FBUS[k]=i)}(P[k,m,p] +
R[k]*I[k,m,p]^2) + sum{k in SS:BSS[k]=i}Pss[k,m,p] + sum{k in WPS}PW[k,m,p] =
PDS[i,m,p];

subject to R2 {i in BUS, m in 1..D, p in 1..T}:
sum{k in BRANCH:(TBUS[k]=i)}Q[k,m,p] - sum{k in BRANCH:(FBUS[k]=i)}(Q[k,m,p] +
X[k]*I[k,m,p]^2) + sum{k in SS:BSS[k]=i}Qss[k,m,p] = QDS[i,m,p];

subject to R3 {i in BRANCH, m in 1..D, p in 1..T}:
sum{k in BUS:k=FBUS[i]}v[k,m,p]^2 - sum{k in BUS:(k=TBUS[i])}v[k,m,p]^2 =
2*(R[i]*P[i,m,p] + X[i]*Q[i,m,p]) + (Z[i,m,p]^2*I[i,m,p]^2);

subject to R4 {i in BRANCH, m in 1..D, p in 1..T}:
sum{k in BUS:(k=FBUS[i])}v[k,m,p]^2 * I[i,m,p]^2 = ((P[i,m,p])^2 + (Q[i,m,p])^2);

```

```

# Limit variables

subject to R5 {m in 1..D, p in 1..T}:
    v[SLK,m,p]=1;

subject to R6 {i in BUS,m in 1..D, p in 1..T}:
    VMIN <= v[i,m,p] <= VMAX ;

subject to R7 {i in BRANCH,m in 1..D,p in 1..T}:
    0 <= I[i,m,p] <= IMAX[i] ;

subject to R8 {i in WPS,m in 1..D, p in 1..T}:
    PW[i,m,p] <= (PWmax[i,m,p]);

subject to R9 {i in SS,m in 1..D, p in 1..T}:
    (Pr[i,m,p])^2 + (Qr[i,m,p])^2 <= (SMAX[i])^2 ;

#-----
#                               Storage device
#-----
subject to R10 {i in SD,m in 1..D}:
    sum{p in 1..T}Eb[i,m,p] - sum{p in 1..T-1}Eb[i,m,p]^2 = (nbc{i}*sum{p in
    1..T}Pbc{i,m,p} - Pbd{i,m,p}/nbd{i});

subject to R11 {i in SD,m in 1..D,p in 1..T}:
    0 <= Pbd[i,m,p] <= Pbdmin*eb[i,m,p];

subject to R12 {i in SD,m in 1..D,p in 1..T}:
    0 <= Pbc[i,m,p] <= Pbcmin*(1-eb[i,m,p]);

subject to R13 {i in SD,m in 1..D,p in 1..T}:
    Ebmin <= Eb[i,m,p] <= Ebmax ;

subject to R14 {i in SD,m in 1..D,p in 1..T}:
    Pb[i,m,p] <= Pbd[i,m,p]-Pbc[i,m,p] ;

option solver knitroampl;

```

ANEXO 2



Specification

Generator Type:	Three Phase Permanent Magnet
Rotor Height:	2.8 m (9.19 ft)
Rotor Width:	2.0 m (6.56 ft)
Turbine Weight:	78 kg (173.37 lbs)
Blades Material:	Aluminum Alloy
Blade Quantity:	3 pcs
Working Temperature:	-20 °C to 50 °C
Design Lifetime:	20 years

Performance

Rated Power:	1000 W
Max Output Power:	1500 W
Cut In Wind Speed:	2.0 m/s (4.46 mph)
Rated Wind Speed:	10 m/s (22.3 mph)
Survival Wind Speed:	50 m/s (111.5 mph)
Generator Efficiency:	96%
Noise Level:	< 45 dB(A)
Warranty:	5 year

Safety

Blades RPM Limitation:	320 RPM
PWM Dump Load:	2kW Box
Mechanical Brake:	Manual

Optional

Remote Monitoring System (Internet/Wireless)	
Auto Hydraulic Brake System (Unattended Site)	
Off Grid:	48 V
Grid Tie:	220 V



Aeolos-V 1kW Wind Turbine Annual Energy Output

Wind Speed(m/s)	Annual Energy Output (kWh)	Wind Speed(m/s)	Annual Energy Output (kWh)
3 m/s	307 kWh	8 m/s	5080 kWh
4 m/s	748 kWh	9 m/s	7008 kWh
5 m/s	1314 kWh	10 m/s	8760 kWh
6 m/s	1927 kWh	11 m/s	10512 kWh
7 m/s	3504 kWh	12 m/s	12088 kWh



ANEXO 3



V 300W Specification

Generator Type: Three Phase Permanent Magnet
 Rotor Height: 1.6 m (5.25 ft)
 Rotor Width: 1.2 m (3.94 ft)
 Blades Material: Aluminum Alloy
 Safety Control: Electronic Dump Loading
 Blades Rotation Limitation 360 rpm

Performance

Rated Power: 300 W
 Max Output Power: 400 W
 Cut In Wind Speed: 1.5 m/s (3.35 mph)
 Rated Wind Speed: 10 m/s (22.3 mph)
 Survival Wind Speed: 50 m/s (111.5 mph)
 Noise Level: < 45 dB(A)



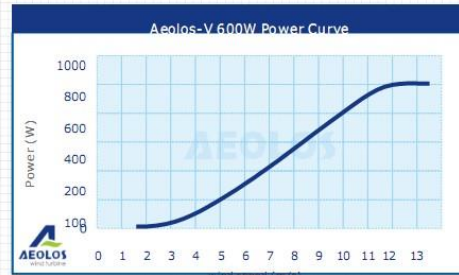
Wind Speed (m/s)	Annual Energy Output (kWh)	Wind Speed (m/s)	Annual Energy Output (kWh)
3 m/s	88 kWh	8 m/s	1576 kWh
4 m/s	227 kWh	9 m/s	2102 kWh
5 m/s	438 kWh	10 m/s	2628 kWh
6 m/s	683 kWh	11 m/s	3241 kWh
7 m/s	919 kWh	12 m/s	3504 kWh

V 600W Specification

Generator Type: Three Phase Permanent Magnet
 Rotor Height: 1.8 m (5.91 ft)
 Rotor Width: 1.6 m (5.25 ft)
 Blade Material: Aluminum Alloy
 Safety Control: Electronic Dump Loading
 Blades Rotation Limitation 360 rpm

Performance

Rated Power: 600 W
 Max Output Power: 800 W
 Cut In Wind Speed: 1.5 m/s (3.35 mph)
 Rated Wind Speed: 10 m/s (22.3 mph)
 Survival Wind Speed: 50 m/s (111.5 mph)
 Noise Level: < 45 dB(A)



Wind Speed (m/s)	Annual Energy Output (kWh)	Wind Speed (m/s)	Annual Energy Output (kWh)
3 m/s	131 kWh	8 m/s	3328 kWh
4 m/s	481 kWh	9 m/s	4292 kWh
5 m/s	876 kWh	10 m/s	5256 kWh
6 m/s	1401 kWh	11 m/s	6394 kWh
7 m/s	1752 kWh	12 m/s	7008 kWh



5 YEAR WARRANTY 
AUSTRALIAN WIND AND SOLAR
 Head Office: 11/15 Thackray St
 Port Melbourne, VICTORIA
 Tel: 1300 736 458
www.australianwindandsolar.com

