



UNIVERSIDAD DE CUENCA

UNIVERSIDAD DE CUENCA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE ELÉCTRICA



“MODELACIÓN DINÁMICA DE LA OFERTA - DEMANDA DE UNA MICRO RED-ELÉCTRICA”

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

AUTORES: Andrés Eulalio Cabrera Tacuri
Hugo Xavier Cueva Camacho

DIRECTOR: Ing. Rodrigo Efraín Sempértegui Álvarez

CUENCA - ECUADOR
NOVIEMBRE DE 2014



RESUMEN

En el presente trabajo¹ se propone un modelo dinámico de simulación, con el fin de pronosticar la oferta y demanda de energía eléctrica que tendría una micro-red eléctrica, compuesta por una vivienda con generación propia a través de módulos fotovoltaicos (FV) y un micro aerogenerador, es decir, un sistema híbrido, que tiene como carga la demandada por la vivienda a lo largo del día.

El pronóstico de la oferta se lo determina considerando los parámetros tanto físicos como climáticos y del adecuado dimensionamiento del sistema híbrido. Para el subsistema de generación a través de módulos FV, se plantean tres métodos, los mismos que indican la cantidad de radiación solar que se logra obtener en una superficie captadora, cada uno presenta diferentes eficiencias y cualquiera de los tres se puede aplicar en el estudio de la micro-red. El subsistema de generación a través de un micro aerogenerador, toma en cuenta como fuente principal el viento, el mismo que se modela por medio de la distribución de Weibull, la cual nos permite obtener la probabilidad de tener cierta velocidad del viento en un instante dado, con esto se determina la capacidad de generación.

Para la determinación de la demanda se considera el equipamiento de la vivienda, tanto de aparatos que estén relacionados con la actividad de sus residentes, así como los aparatos que tienen un consumo no relacionado con la actividad de ellos.

Todo esto permitirá integrar las curvas de carga y generación diaria que tendría la micro-red, con dichas curvas se aprecia las ventajas que representa tener generación propia en una vivienda.

PALABRAS CLAVE

Generación Distribuida (GD), Oferta, Demanda, Redes Inteligentes, Micro-Red, Dimensionamiento, Sistemas Híbridos, Modelación Dinámica, Solar, Eólica.

¹ Este trabajo es parte del proyecto de investigación "Control Óptimo de la Demanda y la Generación de una Micro-red eléctrica mediante Sistema de Control de Red", financiado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca - DIUC



ABSTRACT

In this paper², it propose a dynamic simulation model, in order to prognosticate the supply and demand of electric energy that would have a microgrid, consisting of a house with its own generation through solar PV modules and A micro wind turbine, that's a hybrid system, whose load is the demand of the house throughout the day.

The prognosis is determined by considering the physical parameters such as climate and proper sizing of the hybrid system. For the subsystem of generation through PV modules, three methods are raised, they indicate amount of radiation that can be obtained on a useful surface, each has different efficiencies and any of the three may be applied to the microgrid study. The generation subsystem through a micro turbine, considering the wind as the main source, that is modeled by the Weibull distribution, which allows us to obtain the probability of having a certain wind speed at a given instant, with it determined the generation capacity

For demand determination is considered the equipment of the house, such as devices are connected with the residents activities, as well devices that have a consumption activity not related to them. With this it will integrate the load curves and daily generation would have the microgrid, which can demonstrate the improvement of the final daily load curve.

KEYWORDS

Distributed Generation (DG), Supply, Demand, Smart Grids, Microgrid Dimensioning, Hybrid Systems, Dynamic Modeling, Solar, Win

² This work is part of the research project "Optimal Control of Demand Generation and Microgrid using Network Control System", funded by the Research Division of the University of Cuenca - DIUC



ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO I.....	15
1 ESTADO DEL ARTE	16
1.1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 ANTECEDENTES	16
1.3 JUSTIFICACIÓN	17
1.4 OBJETIVOS	21
1.4.1 Objetivo General.....	21
1.4.2 Objetivos específicos	21
1.5 ALCANCE	21
1.6 ASPECTOS GENERALES DE UNA RED INTELIGENTE	22
1.7 ACTUALIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO ECUATORIANO	24
1.7.1 Característica de la demanda eléctrica en el Ecuador.	24
1.7.2 Proyectos de eficiencia energética en el Ecuador.....	27
1.7.3 Proyección de la demanda en el Ecuador.....	30
CAPÍTULO II.....	34
2 CONCEPTOS GENERALES.....	35
2.1 SMART GRIDS	35
2.2 MICRO-REDES (Microgrids)	36
2.3 GENERACION DISTRIBUIDA.....	38
2.4 ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES (ERN)	39
2.4.1 Energía eólica.....	42
2.5 SISTEMAS HIBRIDOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	42
2.6 PROGRAMACIÓN DINÁMICA	44
CAPÍTULO III.....	45
3 MICRO-RED: DEMANDA Y OFERTA.....	46
3.1 CONSIDERACIONES EN LA DEMANDA	46
3.1.1 Electrodomésticos	47
3.1.2 Ocupantes de la vivienda.....	48
3.1.3 Actividad de los ocupantes y el uso de los electrodomésticos	49
3.1.4 Uso simultaneo de electrodomésticos.....	49
3.1.5 Consumo de reactivos	50
3.1.6 Características de consumo	50
3.1.7 Características de potencia	50
3.2 CONSIDERACIONES EN LA OFERTA.....	54
3.2.1 Energía solar	54
3.2.1.1 Movimiento solar	54
3.2.1.2 Posición del sol.....	55
3.2.1.3 Ángulo de incidencia de la radiación solar	56
3.2.1.4 Radiación solar	58
3.2.1.5 Radiación en las diferentes partes del mundo	59
3.2.2 Energía solar fotovoltaica	59
3.2.2.1 Parámetros fundamentales de la célula solar	60
3.2.2.2 Panel solar	60



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.2.2.3	Rendimiento del panel	61
3.2.2.4	Almacenamiento (batería).....	62
3.2.2.4.1	Tipos de baterías.....	63
3.2.2.5	Regulación de carga.....	63
3.2.2.6	Inversor	64
3.2.2.7	Seguidores solares.....	64
3.2.3	Aspectos para la generación eólica	66
3.2.3.1	Clasificación de los aerogeneradores	66
3.2.3.2	Componentes del aerogenerador de pequeña potencia	66
3.2.3.3	Densidad del viento	67
3.2.3.4	Curva de potencia del aerogenerador.....	68
3.2.3.5	Perfil vertical del viento.....	69
3.2.4	Sistemas híbridos	71
3.2.4.1	Componentes de un sistema híbrido	71
3.2.4.2	Configuración de un sistema híbrido.....	72
3.2.4.2.1	Sistema fotovoltaico con grupos electrógenos.....	72
3.2.4.2.2	Sistema fotovoltaico con sistemas eólicos.....	73
3.2.4.2.3	Sistema fotovoltaico con sistemas eólicos y grupos electrógenos	74
3.2.4.3	Análisis de los factores que influyen en un sistema híbrido	74
CAPÍTULO IV		76
4.	MODELOS MATEMÁTICOS	77
4.1	CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	77
4.2	MODELOS DE CURVAS DE CARGAS RESIDENCIALES	78
CAPÍTULO V		80
5	MODELACIÓN DE LA OFERTA DE LA MICRO-RED	81
5.1	ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA	81
5.1.1	Radiación solar para una superficie fija	83
5.1.2	Radiación solar para un seguidor con un eje	91
5.1.3	Radiación solar para una superficie que es rastreada con dos ejes..	93
5.1.4	Comparación de los resultados de los tres modelos	94
5.1.5	Cálculo de la energía generada por el panel	96
5.1.6	Demostración de las horas pico solar igual a la irradiación.....	96
5.2	DIMENSIONAMIENTO DEL BLOQUE GENERADOR	99
5.2.1	Determinación del mes más desfavorable	99
5.2.2	Elección del tipo y número de módulos fotovoltaicos.....	99
5.2.3	Estimación de la conexión	100
5.3	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	101
5.4	RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL NÚMERO DE PANELES Y DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN.	102
5.5	DIMENSIONAMIENTO DEL REGULADOR.	105
5.6	DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR.	106
5.7	CURVA DE LA ENERGÍA QUE GENERA EL PANEL EN FUNCIÓN DEL MODELO ESTABLECIDO PARA LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.	106
5.8	MODELO DE GENERACIÓN EÓLICO	109
5.8.1	Modelo del viento.....	109



UNIVERSIDAD DE CUENCA

5.8.2	Potencia promedio aprovechada por el rotor de la máquina (potencia eólica)	111
5.8.3	Densidad de potencia	112
5.8.4	Potencia eléctrica generada por el micro aerogenerador	113
CAPÍTULO VI		115
6	MODELACIÓN DE LA DEMANDA (CARGA)	116
6.1	ESTRUCTURA DEL MODELO	117
6.2	PERFILES DE ACTIVIDAD DIARIA	118
6.3	APARATOS INSTALADOS	120
6.4	ASIGNACIÓN DE ACTIVIDAD A CADA EQUIPO	120
6.5	ENCENDIDO DE CADA APARATO	121
6.6	ESCALA DE CALIBRACIÓN	122
6.7	SIMULACIÓN DEL MODELO	122
	COCINA	123
	ENTRETENIMIENTO	123
	ILUMINACIÓN	124
CAPÍTULO VII		125
ESTRUCTURA DEL MODELO DINÁMICO DE LA MICRO-RED		125
7	ESTRUCTURA DEL MODELO DINÁMICO DE LA MICRO-RED	126
7.1	ESTRUCTURA DEL MODELO DE GENERACIÓN	126
1.1	Radiación solar para una superficie fija	126
1.2	Radiación solar para un seguidor con un eje	126
1.3	Radiación solar para un seguidor con un eje	126
1.1	Radiación solar para una superficie fija	127
7.2	ESTRUCTURA DEL MODELO DE LA DEMANDA	132
7.3	RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OFERTA Y DEMANDA	133
7.3.1	Resultados de la oferta	133
7.3.2	Resultados de la demanda	135
7.3.2.1	Curva de demanda diaria	135
7.3.2.2	Factor de potencia	137
7.4	INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS	140
CAPÍTULO VIII		143
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		143
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	144
8.1	TRABAJOS FUTUROS	145
BIBLIOGRAFÍA		147
ANEXOS		148
ANEXO 1		149
PARTE A		149
1A.1	MÉTODO SIMPLIFICADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO	149
1A.2	CÁLCULO DE LA ENERGIA QUE GENERA UN PANEL FOTOVOLTAICO	149



UNIVERSIDAD DE CUENCA

1A.3 CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	153
1A.3.1 Restricciones para la elección del número de módulos fotovoltaicos, dimensionamiento del banco de baterías y regulador de carga	154
PARTE B.....	156
1B.1 OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO DEL MICRO AEROGENERADOR.....	156
1B.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA QUE GENERA UN MICRO AEROGENERADOR EN FUNCIÓN DEL MODELO DE GENERACIÓN EÓLICO	160
1B.3 EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR.....	168



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo.	19
Ilustración 2. Pérdidas anuales de energía eléctrica.	20
Ilustración 3. Evolución del consumo de energía eléctrica del sistema nacional interconectado (SNI).	24
Ilustración 4. Tasa de crecimiento anual del consumo de energía eléctrica (Consumo total del SNI).	25
Ilustración 5. Consumo Nacional por sectores GWh (2010).	25
Ilustración 6. Consumo Eléctrico y Número de Abonados Sector Residencial.	26
Ilustración 7. Usos finales de la energía Eléctrica (Región Costa y Sierra).	26
Ilustración 8. Consumo Eléctrico y Número de Abonados Sector Comercial.	27
Ilustración 9. Consumo Eléctrico y Número de Abonados Sector Industrial.	27
Ilustración 10. Proyección de la generación y demanda eléctrica en el Ecuador.	32
Ilustración 11. Evolución del consumo de energía en el SNI.	32
Ilustración 12. Diagrama de Smart Grids.	36
Ilustración 13. Diagrama de la arquitectura de una micro-red.	37
Ilustración 14. Esquema de una Micro-red.	38
Ilustración 15. Energías Renovables.	40
Ilustración 16. Parque Eólico Villonaco ubicado en Loja-Ecuador.	41
Ilustración 17. Atlas Solar de Ecuador.	41
Ilustración 18. Partes de un Aerogenerador.	42
Ilustración 19. Sistema híbrido autónomo.	43
Ilustración 20. Sistema híbrido conectado a la red.	44
Ilustración 21. Modelo Bottom-up y Top-down.	47
Ilustración 22. Ciclo de funcionamiento de la lavadora Fuente: [9].	52
Ilustración 23. Perfil de carga de la refrigeradora.	53
Ilustración 24. Zonas y movimiento planetario.	55
Ilustración 25. Posición del Sol.	55
Ilustración 26. Ángulo de incidencia.	56
Ilustración 27. Espectro luminoso.	58
Ilustración 28. Panel Solar.	60
Ilustración 29. Variación de la corriente y tensión con la irradiación y la temperatura según la potencia nominal.	61
Ilustración 30. Curva característica de un panel fotovoltaico.	62
Ilustración 31. Conexión del regulador.	64
Ilustración 32. Micro-red autónoma con generación fotovoltaica.	66
Ilustración 33. Elementos de un aerogenerador de pequeña potencia (micro aerogenerador).	67
Ilustración 34. Curva de potencia de un aerogenerador.	68
Ilustración 35. Perfil vertical del viento en función de la longitud de rugosidad.	70
Ilustración 36. Rugosidad del Terreno del Ecuador.	71
Ilustración 37. Configuración típica de un sistema híbrido.	71
Ilustración 38. Configuración de un sistema fotovoltaico con grupo electrógeno.	73
Ilustración 39. Configuración de un sistema fotovoltaico-eólico.	73
Ilustración 40. Configuración de un sistema fotovoltaico-eólico y grupo electrógeno.	74



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Ilustración 41. Factores que afectan a un sistema híbrido de generación.	75
Ilustración 42. Gráfica de los ángulos que definen la posición del Sol.	82
Ilustración 43. Representación de la declinación.	85
Ilustración 44. Radiación para una superficie inclinada a diferentes ángulos.	91
Ilustración 45. Valores de radiación para un seguidor a un eje.	93
Ilustración 46. Valores de radiación para un seguidor con dos ejes.	94
Ilustración 47. Comparación de los métodos de captación solar.	96
Ilustración 48. Curva de radiación diaria.	97
Ilustración 49. Horas pico de radiación.	97
Ilustración 50. Demostración de las horas picos.	98
Ilustración 51. Demostración de radiación diaria promedio, igual a las horas picos.	99
Ilustración 52. Curva de generación del panel.	106
Ilustración 53. Curva de radiación mensual de Cuenca en el 2013.	107
Ilustración 54. Curva de radiación sobre una superficie con seguidor a un eje.	108
Ilustración 55. Curva diaria de radiación final del simulador.	108
Ilustración 56. Curva de la función de probabilidad de Weibull, con $c=1$ y variando k para distintos valores.	109
Ilustración 57. Gráfica de comparación de potencias.	112
Ilustración 58. Curva de densidad de Potencia.	113
Ilustración 59. Curva de Generación del micro aerogenerador.	114
Ilustración 60. Estructura del Modelo de la Demanda.	117
Ilustración 61: Perfil de la actividad “cocinar” para 2 y 4 ocupantes en un día de laborable.	119
Ilustración 62: Perfil ampliado de la actividad “cocinar” para 2 y 4 ocupantes en un día laborable, de 11:00 a 14:00.	119
Ilustración 63: Estructura del Modelo de la Encendido de cada aparato Elaboración: Los Autores. Fuente: Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model [6].	121
Ilustración 64: Demanda diaria para Cocción de alimentos.	123
Ilustración 65: Demanda diaria para Entretenimiento.	123
Ilustración 66: Demanda diaria para Iluminación.	124
Ilustración 67. Curva de generación con 6 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W.	134
Ilustración 68. Curva de generación con 1 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W.	134
Ilustración 69: Curva promedio para el sector residencial de la ciudad de Cuenca.	135
Ilustración 70: Curva promedio para el sector residencial de la ciudad de Cuenca para un día laborable.	136
Ilustración 71: Curva promedio para el sector residencial de la ciudad de Cuenca para un día no laborable.	136
Ilustración 72: Potencia máxima y mínima que tiene una micro-red.	137
Ilustración 73: Factor de Potencia para un día laborable.	138
Ilustración 74: Factor de Potencia para un día no laborable.	138
Ilustración 75: Usos finales de energía usado en la ciudad de Cuenca según el modelo.	139
Ilustración 76: Usos finales de energía en la ciudad de Cuenca según [7]	140
Ilustración 77. Curva de la oferta con 1 módulo FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, la demanda especificada.	141



Ilustración 78. Curva de la oferta con 6 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, la demanda especificada. 142

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de la demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional.....	18
Tabla 2. Pérdidas anuales de energía en los sistemas de distribución.....	19
Tabla 3. Proyección del consumo unitario anual del servicio eléctrico. (Escenario de crecimiento medio).....	33
Tabla 4. Clientes por estrato del Cantón Cuenca.....	48
Tabla 5: Características de potencia.....	51
Tabla 6: Parámetros de la refrigeración [9].....	53
Tabla 7. Características de los principales tipos de baterías.....	63
Tabla 8. Densidad del aire.....	68
Tabla 9. Clases y Longitudes de rugosidad.....	70
Tabla 10. Días característicos de año [13].....	88
Tabla 11. Radiación directa y difusa para una superficie horizontal.....	89
Tabla 12. Redición sobre una superficie para diferentes ángulos de inclinación.	89
Tabla 13. Radiación anual para inclinaciones de 5 y 10 grados.....	90
Tabla 14. Radiación sobre una superficie con seguidor a un eje.....	92
Tabla 15. Radiación sobre una superficie con seguidor con dos ejes.....	93
Tabla 16. Comparación de resultados de los tres modelos.....	95
Tabla 17. Modelo dinámico de la micro-red.....	142



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Yo, Andrés Eulalio Cabrera Tacuri, autor de la tesis “MODELACIÓN DINÁMICA DE LA OFERTA - DEMANDA DE UNA MICRO RED-ELÉCTRICA”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Eléctrico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 18 de Noviembre de 2014



Andrés Eulalio Cabrera Tacuri
C.I: 0705386969



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Yo, Andrés Eulalio Cabrera Tacuri, autor de la tesis "MODELACIÓN DINÁMICA DE LA OFERTA - DEMANDA DE UNA MICRO RED-ELÉCTRICA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de Noviembre de 2014


Andrés Eulalio Cabrera Tacuri
C.I: 0705386969



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Yo, Hugo Xavier Cueva Camacho, autor de la tesis “MODELACIÓN DINÁMICA DE LA OFERTA - DEMANDA DE UNA MICRO RED-ELÉCTRICA”, reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Eléctrico. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 18 de Noviembre de 2014



Hugo Xavier Cueva Camacho
C.I: 01104269798



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Yo, Hugo Xavier Cueva Camacho, autor de la tesis "MODELACIÓN DINÁMICA DE LA OFERTA - DEMANDA DE UNA MICRO RED-ELÉCTRICA", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 18 de Noviembre de 2014


Hugo Xavier Cueva Camacho
C.I.: 01104269798



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradecemos a Dios, ya que en el transcurso de nuestras vidas hemos recibido tantas bendiciones.

Agradecemos a nuestras familias que han sido el pilar fundamental en nuestras vidas: de manera especial a nuestro director de Tesis, Ing. Rodrigo Sempértegui Álvarez, que nos ha sabido orientar, ayudar y corregir, en el desarrollo del presente trabajo.

Un agradecimiento inmenso a todos los maestros, que con sus experiencias, lecciones y entrega como docentes, fueron guías en nuestra formación como futuros profesionales. Agradecemos de manera especial los Ingenieros Juan Leonardo Espinoza, Diego Ochoa, Andrea Guevara por la inmensa ayuda y apoyo que nos supieron brindar en la realización del presente trabajo de tesis.

A nuestros amigos agradecerles de manera infinita ya que compartimos tantos días de estudios, sufrimientos y alegrías.

Los Autores



DEDICATORIA

Con mucho cariño a mis padres Rosa y German, quienes con su apoyo incondicional y perseverancia son el pilar fundamental en mi formación personal y académica.

A mí amada esposa Lilian y mi hija Andrea que son mi inspiración y soporte emocional para lograr éste objetivo que juntos nos hemos planteado.

A mis herman@s Richard, Jenny, Toty y Diana, mis sobrin@s, ti@s, prim@s con mucho cariño para ustedes y como dice Dianita “Familia que crece unida permanece unida” que así sea siempre.

Andrés Cabrera



DEDICATORIA

A mi adorada madre y amado padre, Martha y Hugo, quienes siempre han sabido aconsejarme y apoyar incondicionalmente en cada instante de mi vida. Las personas a quienes les debo todo lo que soy y lo que algún día seré.

A mis hermanos, Andrea, Luis y John, de manera especial a John, con quien he compartido la mayor parte de mi vida, quien además de ser mi querido hermano es mi mejor amigo.

A mi pequeña y hermosa familia, mi amada esposa, quien ha sido el bastón que me ha permitido levantarme y seguir adelante. A mi hija cuya existencia ha sido el motor de incansables noches de estudio.

Hugo Cueva



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE



1 ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN

En la última década se ha incentivado el uso de energías renovables como una medida de solución al crecimiento de la demanda de energía eléctrica, tanto a nivel nacional como mundial. Actualmente el gobierno tiene la política de promover un cambio en la Matriz Energética del Ecuador, además, el crecimiento inminente de las redes de distribución, nos hace pensar en otros caminos para el abastecimiento de energía eléctrica, como son las micro-redes.

La incorporación de energías renovables en los hogares, cambia la participación del sector residencial en el sistema eléctrico de distribución, pasando de ser consumidores a ser también generadores de energía eléctrica, dependiendo de las condiciones climáticas; esto conlleva una compleja operación del sistema, lo que demanda la incorporación de inteligencia en la red para que ésta sea segura y eficiente al menor costo posible.

En el presente trabajo se proponen herramientas matemáticas, con el fin de pronosticar la oferta y demanda de energía eléctrica que tendría una micro-red, compuesta por una vivienda con generación propia a través de paneles fotovoltaicos y un micro aerogenerador, teniendo como carga la demanda que posee la vivienda a lo largo del día.

El pronóstico de la oferta (generación) se lo determina considerando para cada fuente los parámetros tanto físicos como climáticos que determinan la capacidad de generación de cada una de ellas; para la determinación de la demanda se considera el equipamiento de la vivienda, tanto aparatos que estén relacionados con la actividad de sus residentes, así como los aparatos que tienen un consumo no relacionado con la actividad de ellos. Todo esto nos permitirá determinar la curva de carga y generación diaria que tendría la micro-red.

1.2 ANTECEDENTES

La situación energética mundial se encuentra actualmente sustentada y dominada por la explotación de fuentes de combustible fósil. Sin embargo, si se mantuviese este sistema de consumo de energía, el planeta tal y como lo conocemos caería en



UNIVERSIDAD DE CUENCA

una crisis incontrolable debido a la actual ineficiencia energética y a la futura escasez e incremento de los precios de los combustibles. Actualmente, a inicios de un declive por el agotamiento de este recurso no renovable, se están buscando nuevas alternativas que sean capaces de mantener la estabilidad de todos los sectores de consumo.

Por otro lado, la demanda de energía en países en continuo desarrollo como: Asia, África, Oriente Medio y América Latina, se espera que crezca a la par de la población y el aumento del nivel de vida entre los estratos más pobres de estas sociedades. La demanda de energía eléctrica está creciendo mucho más rápido en éstas economías nacientes, incluso a tasas mayores a las de expansión de las redes eléctricas convencionales en el mundo industrializado.

Un estudio realizado por Pike Research (2012) estima que las micro-redes son ideales para ayudar a satisfacer este apetito creciente de energía, sin aumentar las emisiones de carbono.

Según el CONELEC, a la fecha en el Ecuador el 46% de la energía eléctrica generada es producida por fuentes hídricas y el 49,6% proviene de combustibles fósiles. Por ello, el Estado ecuatoriano, a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), busca cambiar esta realidad, con la intención de llegar al año 2022 con una producción del 86% en hidroelectricidad, complementada por un 8% en energías renovables como la solar o la eólica, tendiendo este propósito a incrementar dicho porcentaje con la introducción de pequeños sistemas de generación distribuida nacientes en el sector residencial del país.³

1.3 JUSTIFICACIÓN

El incremento del consumo de energía eléctrica en el Ecuador, se aprecia en la tabla y figura 1, donde tiene como mayor consumidor el sector residencial, siendo el sector industrial el segundo mayor consumidor de energía. De esta manera comprendemos la importancia indiscutible de manejar la oferta-demanda en el sector residencial en nuestro país.

³ Plan maestro de electrificación 2013-2022



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tabla 1. Tabla de la demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional.⁴

Año	Medidas						Variación (%)
	Facturación (GWh)						
	Grupo Consumo						Grupo Consumo
Todos	Alumbrado Público	Comercial	Industrial	Otros	Residencial	Todos	
Todos	180.510,093	11.636,17	35.634,39	52.669,79	17.128,31	63.441,414	
1999	7.730,69	593	1.263,99	2.072,556	841	2.960,304	
2000	7.904,293	620	1.362,007	2.218,428	900	2.803,321	224,56%
2001	8.010,249	634	1.432,415	2.139,393	889	2.915,741	134,05%
2002	8.612,434	664	1.496,524	2.460,192	894	3.098,3	751,77%
2003	9.151,318	675	1.805,042	2.589,588	812	3.269,645	625,71%
2004	9.994,291	697	2.051,335	2.792,609	938	3.515,636	921,15%
2005	10.810,729	716	2.377,566	3.052,408	963	3.702,236	816,90%
2006	11.636,802	741	2.598,147	3.332,517	1.068,811	3.896,087	764,12%
2007	12.189,254	765	2.633,773	3.478,32	1.216,518	4.095,187	474,74%
2008	12.653,441	806	2.519,613	3.418,365	1.524,203	4.384,857	380,82%
2009	13.217,919	820	2.532,705	4.147,864	1.045,501	4.672,282	446,11%
2010	14.076,614	812	2.672,33	4.416,76	1.061,304	5.114,184	649,64%
2011	15.248,799	883	2.955,818	4.797,848	1.261,215	5.350,949	832,72%
2012	16.174,893	913	3.209,489	5.012,476	1.411,179	5.628,671	607,32%
2013	17.069,851	964	3.485,547	5.013,34	1.727,411	5.879,838	553,30%
2014	6.028,513	333	1.238,096	1.727,128	576	2.154,176	-6468,33%

⁴ http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4227

Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo (GWh)

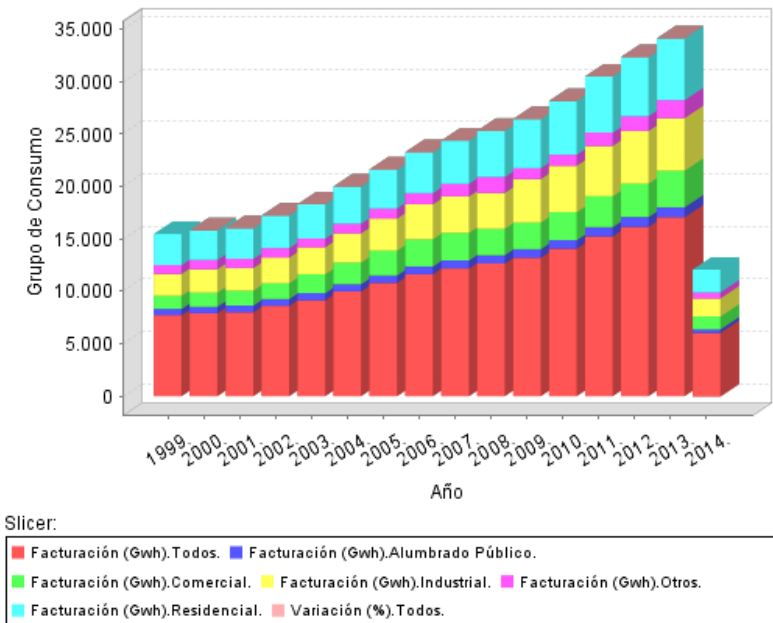


Ilustración 1. Demanda anual de energía eléctrica a nivel nacional por grupo de consumo.⁵

El incremento anual de la demanda energética es más rápido que el crecimiento poblacional debido a modificaciones en el estilo de vida, penetración de nuevas tecnologías y comodidades. De mantenerse este crecimiento y sin modificar las redes de distribución, se incrementarán las pérdidas por efectos de conducción, debido a la distancia entre los centros de generación y los centros de carga. En la tabla y figura 2 se muestran las pérdidas anuales de energía en los sistemas de distribución del Ecuador.

Tabla 2. Pérdidas anuales de energía en los sistemas de distribución.⁶

Año	Medidas			
	Pérdidas Técnicas	Pérdidas No Técnicas	Pérdidas Sistema (%)	Variación (%)
Todos	20.118,954	20.532,401	1869,98%	
1999	894	1.137,703	2083,46%	
2000	931	1.276,38	2188,80%	505,57%
2001	1.092,772	1.241,318	2230,78%	191,81%
2002	1.042,697	1.410,919	2251,21%	91,59%

⁵ http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4227

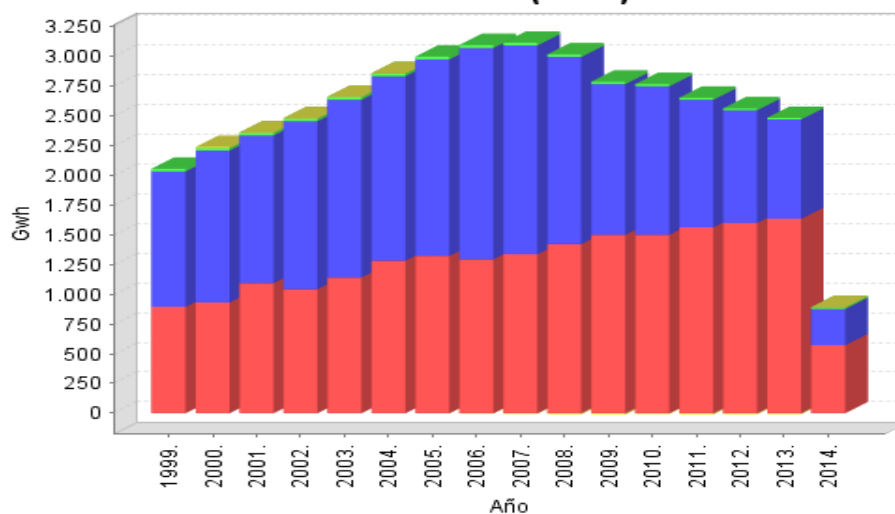
⁶ http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4248



UNIVERSIDAD DE CUENCA

2003	1.140,912	1.492,497	2288,77%	166,84%
2004	1.282,432	1.548,88	2300,84%	52,72%
2005	1.321,501	1.650,217	2275,95%	-108,15%
2006	1.292,723	1.776,185	2225,22%	-222,91%
2007	1.335,653	1.754,179	2141,59%	-375,82%
2008	1.421,206	1.571,87	1961,44%	-841,21%
2009	1.499,097	1.266,168	1730,59%	-1176,92%
2010	1.499,787	1.247,639	1633,04%	-563,73%
2011	1.560,947	1.073,133	1472,96%	-980,23%
2012	1.599,119	947	1360,00%	-766,87%
2013	1.633,584	834	1263,34%	-710,78%
2014	572	304	1268,86%	43,74%

Pérdidas anuales de energía eléctrica en los sistemas de distribución (GWh)



Slicer:

Pérdidas Técnicas.
 Pérdidas No Técnicas.
 Pérdidas Sistema (%).
 Variación (%).

Ilustración 2. Pérdidas anuales de energía eléctrica.⁷

Es por ello, que las micro-redes alimentadas con fuentes renovables, presentan una solución a la problemática del incremento de la demanda así como la reducción en las pérdidas por transporte de energía. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías en nuestro medio es una tarea a largo plazo, por lo que se propone

⁷ http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4248



iniciar, realizando la modelación dinámica de la oferta y demanda de una micro-red, sirviendo como base para en un futuro cercano desarrollar técnicas de control y optimización de la demanda y generación de una micro-red eléctrica, debido a todos los beneficios que nos ofrece en los ámbitos técnico, económico y socio-ambiental.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Proponer un modelo dinámico de simulación, con el fin de pronosticar la oferta y demanda de energía que tendría una micro-red eléctrica, compuesta por una vivienda con generación propia a través de paneles fotovoltaicos y un micro aerogenerador, teniendo como carga la demandada por la vivienda a lo largo del día.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Establecer una base teórica que permita iniciar un proyecto semilla de investigación para el desarrollo de redes inteligentes en el Ecuador.
2. Analizar los tipos de energías renovables que pueden ser implementadas en una micro-red, considerando restricciones físicas, climáticas y de potencia.
3. Modelar el consumo de energía eléctrica de una micro-red (vivienda), considerando el comportamiento de los habitantes y factores climáticos que inciden en el funcionamiento de los equipos de la vivienda.
4. Modelar la oferta de una micro-red, considerando los factores físicos y climáticos que inciden en su funcionamiento.

1.5 ALCANCE

En primer lugar se realiza una recopilación de información que permita conocer y entender el comportamiento de las micro-redes eléctricas, las distintas tecnologías utilizadas, su forma de integración hacia redes eléctricas, sus ventajas y su visión hacia el futuro.

El presente trabajo pretende ser el inicio de la constitución de técnicas de desarrollo y control de redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) en el Ecuador.



Se plantearán modelos matemáticos que puedan incorporarse en la implementación del control activo de una micro-red eléctrica. Se propone modelar el consumo dinámico de energía eléctrica en una micro-red (vivienda) y su generación.

1.6 ASPECTOS GENERALES DE UNA RED INTELIGENTE.

En el sistema de distribución de energía eléctrica actual, los consumidores son atendidos por una red principal de electricidad que proporciona la energía a través de las líneas de transmisión a una subestación que, a su vez, proporciona la energía por medio de la red de distribución de baja tensión. Con la presencia de micro-redes, éstas darán el servicio a pequeñas áreas geográficas o grupos de consumidores, así aliviarán la demanda de la red principal.

En las redes eléctricas inteligentes futuras está previsto que habrá un gran número de micro-redes eléctricas. Por lo tanto, cada vez que algunas micro-redes tengan un exceso de energía, mientras que otras tengan una necesidad de energía, las micro-redes podrán intercambiar la energía entre sí en lugar de solicitarla a la red principal. Sin embargo, la generación intermitente de ciertas micro-redes, junto con la naturaleza impredecible de la demanda de los consumidores, implica que en ciertos momentos las micro-redes tendrán la necesidad de energía adicional de otras fuentes. Típicamente, ésta necesidad de energía adicional puede ser proporcionada por la red eléctrica principal.

Las redes inteligentes se introdujeron con el fin de superar las debilidades de las redes eléctricas tradicionales mediante métodos inteligentes de operación y control. Este sistema permite monitorizar, analizar, controlar y comunicar los elementos involucrados en el sistema de distribución para mejorar la eficiencia del servicio, reducir el consumo y costo, maximizar la transparencia y confiabilidad del sistema de distribución.

Los equipos de las redes inteligentes transmiten información de una manera tal que permite a los usuarios ordinarios, operadores, dispositivos automatizados y agentes distribuidores, responder rápidamente a los cambios en los sistemas bajo cualquier condición en el que se encuentra la red inteligente.

Esta red es igualmente ventajosa para personas ordinarias, empresas, comercios, hospitales, universidades, corporaciones multinacionales, etc. Pues se pretende que



UNIVERSIDAD DE CUENCA

todo el sistema de distribución se encuentre automatizado para dar seguimiento al consumo de energía en todos los lugares. También debe combinarse con el software de gestión de la energía para la estimación del consumo de energía y su costo asociado para un consumidor específico.

Por lo general, los precios de la electricidad aumentan cuando aumenta la demanda. Si se proporciona al consumidor la información sobre el consumo actual y los precios de la energía, los servicios de gestión de redes inteligentes de energía ayudan a reducir al mínimo el consumo en horas de alta demanda si se tiene una política de incrementar los precios en las horas pico.

Una red inteligente moderna debe tener las siguientes capacidades:

- Se puede reparar a sí misma.
- Incentiva la participación de los consumidores en las operaciones de la red.
- Asegura suministro de energía de calidad, continuo y minimiza las pérdidas.
- Permite a los mercados de electricidad realizar transacciones de compra venta mejor y así crecer.
- Se puede operar de manera más eficiente.

Las características principales de una red inteligente son:

- **Control de carga:** La carga de la red eléctrica no es fija, varía con el tiempo. Bajo escenarios de demanda elevada, un sistema de distribución inteligente puede aconsejar a los consumidores reducir al mínimo el consumo de energía temporalmente hasta que pase la hora pico.
- **Apoyo para el control del consumo:** Proporciona a los usuarios una forma automatizada para reducir sus facturas de electricidad, guiándolos para que utilicen dispositivos eléctricos de baja prioridad cuando la demanda es menor.
- **Descentralización de la generación de energía:** Un sistema de red distribuida o descentralizada permite que el usuario individual pueda generar energía mediante el empleo de cualquier método apropiado a su criterio, el más común suele ser mediante paneles fotovoltaicos.

- **Contribuyen a proteger la sostenibilidad ambiental:** Las implantaciones de este tipo de redes en un sistema eléctrico común, conllevan la ventaja de que se integra fuentes de energía renovable limpia; las cuales contribuyen a la disminución de la contaminación ambiental por emisión de gases dañinos.

1.7 ACTUALIDAD DEL SISTEMA ELÉCTRICO ECUATORIANO

1.7.1 Característica de la demanda eléctrica en el Ecuador.

El sector energético constituye un pilar fundamental dentro de la estructura económica de una nación o país, el Ecuador (o cualquier otro país), no sólo por su importancia para mejorar la calidad de vida sino también por ser un elemento indispensable en cualquier proceso de industrialización y desarrollo económico y tecnológico; por lo cual el Gobierno Nacional está obligado a realizar constantes esfuerzos económicos de inversiones directas en las áreas de generación, transmisión y distribución, con el único objetivo de que la demanda por parte de los consumidores sea completamente satisfecha.

“La demanda de energía y potencia del sistema eléctrico ecuatoriano ha mantenido un crecimiento sostenido durante la última década, registrándose una tasa media de crecimiento anual de energía en el período 2001 - 2010 de 6,3%; la mayor tasa de crecimiento fue de 8,1% en el año 2006 y la menor fue de 3,7% en el año 2001. En el 2010, el consumo de energía del país creció 835 GWh respecto al 2009, convirtiéndose en el mayor incremento de la última década”.⁸

En las siguientes dos ilustraciones se observan la evolución del consumo de energía eléctrica en el Ecuador y las tasas de crecimiento anual respectivamente:

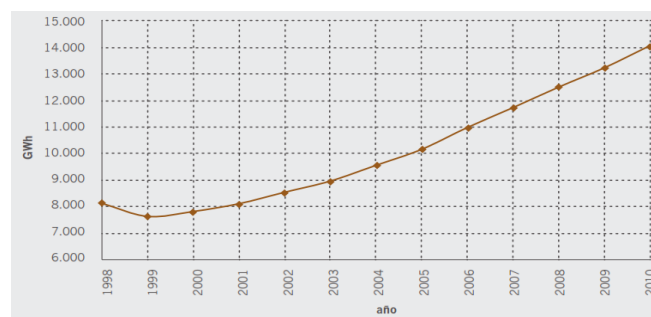


Ilustración 3. Evolución del consumo de energía eléctrica del sistema nacional interconectado (SNI).⁹

⁸ Extracto tomado del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 98.

⁹ Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 98.

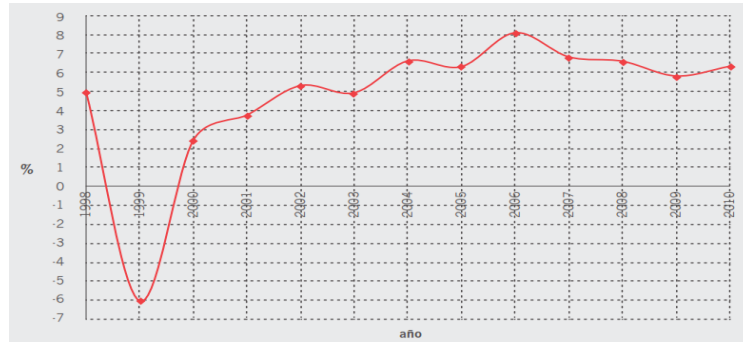


Ilustración 4. Tasa de crecimiento anual del consumo de energía eléctrica (Consumo total del SNI).

FUENTE: Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 99.

Se observa en las dos ilustraciones anteriores que ha existido un crecimiento constante del consumo de energía eléctrica, exceptuando los años 1999 y 2000 en los cuales el país sufrió graves dificultades de carácter financiero y económico, y que claramente su incidencia se encuentra reflejada en las curvas de los históricos anteriores.

Los sectores consumidores de electricidad en el país se clasifican de la siguiente manera:

- Sector Residencial.
- Sector Comercial.
- Sector Industrial.
- Alumbrado Público.
- Otros.

La participación de los sectores de consumo se puede observar en la siguiente figura:

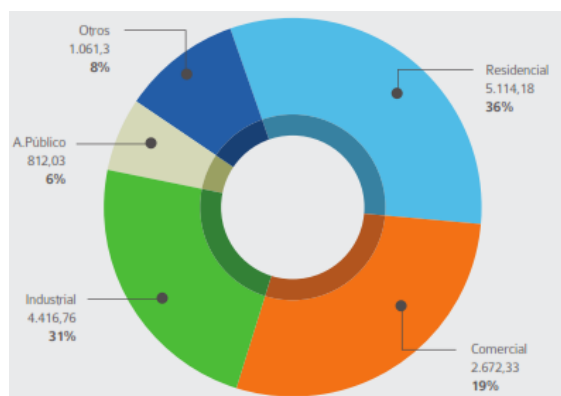


Ilustración 5. Consumo Nacional por sectores GWh (2010).

FUENTE: Figura tomada de las Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano Año 2012. CONELEC. Página 7.

En la *Ilustración 5* se observa que el sector residencial constituye la mayor fuente de consumo de energía eléctrica del país, seguido de cerca por el sector industrial y del sector comercial.

“En noviembre de 2010, según el censo de población y vivienda, existían 3.748.919 viviendas habitadas con personas presentes, registrando 15'012.228 habitantes, y un promedio de ocupación de 4 habitantes por vivienda, de las cuales 3'553.002 viviendas contaban con servicio eléctrico, proporcionado por la distribuidora de electricidad, según declararon el día del censo, esto es el 94,77%”¹⁰.

A continuación se pueden observar ilustraciones del consumo eléctrico de estos tres sectores.

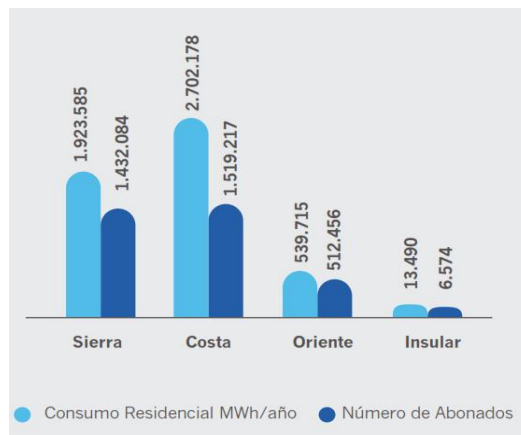


Ilustración 6. Consumo Eléctrico y Número de Abonados Sector Residencial.

FUENTE: Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 69.

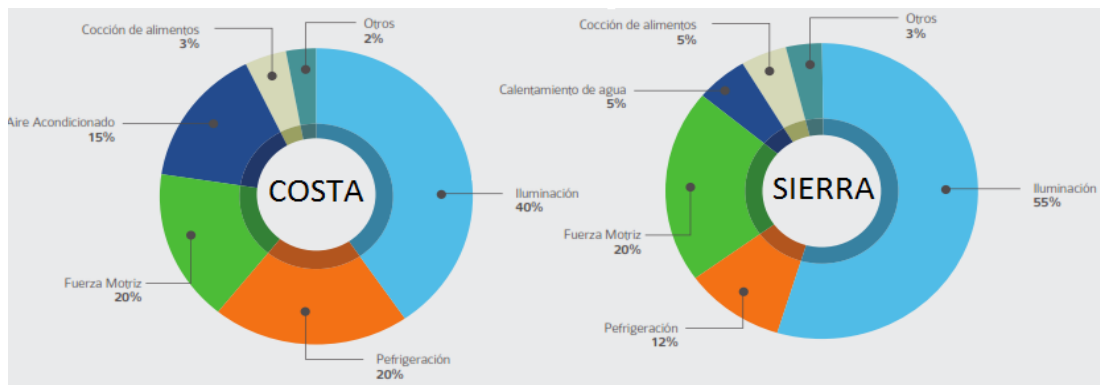


Ilustración 7. Usos finales de la energía Eléctrica (Región Costa y Sierra).¹¹

¹⁰ Extracto tomado del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 98.

¹¹ Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 76.

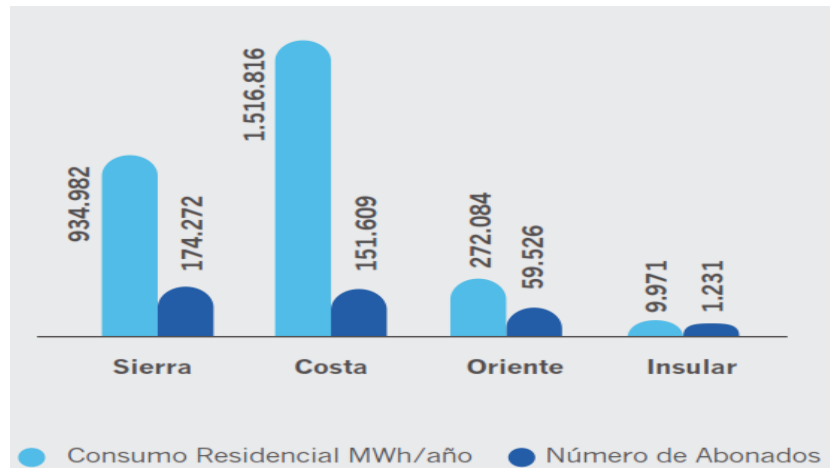


Ilustración 8. Consumo Eléctrico y Número de Abonados Sector Comercial.¹²

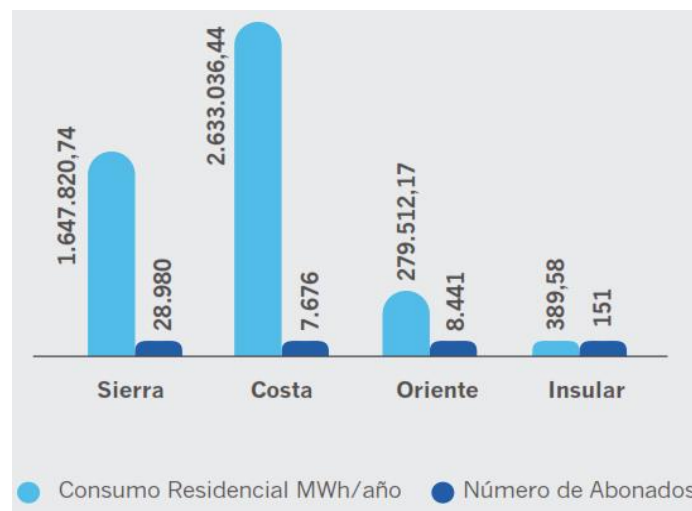


Ilustración 9. Consumo Eléctrico y Número de Abonados Sector Industrial.¹³

1.7.2 Proyectos de eficiencia energética en el Ecuador.

Debido al incremento constante de la demanda eléctrica en el país y al alto costo invertido para suplir tal demanda (fuentes de generación, transmisión y distribución); tomando como base los inicios del año 2008 el Gobierno Nacional en conjunto con el MEER¹⁴ y demás Instituciones Públicas directamente involucradas en el aspecto energético, plantearon iniciar proyectos a gran escala involucrados con el concepto de eficiencia energética que permitan el control del crecimiento de la demanda por parte de los consumidores y su directa influencia hacia una conciencia ambiental sobre el buen uso de la energía.

¹² Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 70.

¹³ Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 70.

¹⁴ Ministerio de Electricidad y Energía Renovable del Ecuador por sus siglas conocido como MEER.



Los proyectos energéticos de eficiencia energética divididos por sectores se pueden clasificar en:

Sector Residencial:

- Sustitución de cocinas de GLP por cocinas eléctricas.
- Sustitución de refrigeradoras ineficientes.
- Introducción de focos ahorradores.
- Señal tarifaria.

Sector Industrial:

- Tarifa diferenciada horaria.
- Eficiencia energética para la industria.

Alumbrado Público:

- Sustitución de lámparas.
- Alumbrado público eficiente.

Transporte:

- Introducción de vehículos eléctricos.
- Transporte masivo: Metro de Quito, Tranvía de Cuenca.

Las características de los principales proyectos se detallan a continuación¹⁵:

Alumbrado público eficiente: Tiene como objetivo general el de disminuir el consumo de energía eléctrica en el alumbrado público mediante la sustitución de 65.905 luminarias de vapor de mercurio de 175 W de potencia por luminarias más eficientes en el uso de la energía eléctrica. El monto del proyecto es de USD 10'454.841,00. Con la implementación de este proyecto se espera alcanzar un ahorro de energía de 24.800 MWh y una disminución en la potencia de 5,7 MW.

Proyecto piloto de cocinas de inducción: El objetivo del proyecto piloto es determinar el impacto social, técnico y económico de la sustitución parcial de GLP¹⁶

¹⁵ Extracto de la Tesis de Grado "Análisis de la evolución de la demanda eléctrica en el Ecuador considerando el ingreso de proyectos de eficiencia energética". Escuela Politécnica Nacional. Panchi Guamangallo, Byron Paúl. 2013.

¹⁶ Gas Licuado de Petróleo por sus siglas conocido como GLP.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

por electricidad para la cocción de alimentos, a través de la entrega sin costo de un sistema de cocción por inducción a familias que lo acepten voluntariamente.

Proyecto dotación de 10.905 sistemas de energía solar térmica para agua caliente sanitaria: Como una forma de fomento al uso de la energía solar térmica para el calentamiento del agua, se propone la ejecución de proyectos con la intervención directa del Estado, para lo cual el MEER suscribió un acuerdo con el MIDUVI, el mismo que permitirá seleccionar a las 10.905 familias en diferentes comunidades de las provincias de Azuay, Bolívar, Cañar, Carchi, Chimborazo, Cotopaxi, Imbabura, Pichincha, Santo Domingo y Loja, que se beneficiaran de este primer proyecto de dotación de sistemas solares térmicos para agua caliente sanitaria.

Proyecto “Eficiencia Energética en la Industria”: El proyecto demanda una inversión total de 4’750.000 USD. Los resultados a mayo de 2013, según el portal web del MEER son: 22 empresas implementando Sistemas de Gestión de Energía, 14 industrias verificadas con implementación > 70%, 4 industrias auditadas con ahorros de hasta 25% consumo, 20 profesionales formados como asesores para implementar Sistemas de Gestión de energía, 220 profesionales de las Industrias formados en conceptos básicos de la norma ISO 50001 y 120 gerentes y directores industriales sensibilizados sobre la importancia de la Eficiencia Energética.

Programa para la renovación de equipos de consumo energético ineficiente. “Sustitución de Refrigeradoras Ineficientes”: El Programa prevé sustituir a nivel nacional 330.000 refrigeradoras de consumo ineficiente (mayor de 10 años de uso) por otras de alta eficiencia de un volumen de enfriamiento entre 280 y 340 litros (10 a 12 pies cúbicos), para lo cual se está entregando un estímulo a los clientes del sector residencial que consuman hasta 200 kWh por mes, el estímulo será complementado con un crédito directo otorgado por el Banco Nacional de Fomento para financiar la refrigeradora nueva. El proyecto igualmente contempla un proceso de disposición final de las refrigeradoras obsoletas que será supervisado por el MIPRO y el MAE. Los clientes interesados deben acceder al proyecto a través de la página web de la empresa eléctrica que les brinda el servicio.

Proyecto de “Sustitución de Focos Ahorradores por Incandescentes”: La sustitución de focos ahorradores por incandescentes es la iniciativa pionera de eficiencia energética ejecutados por el Gobierno Nacional en los hogares ecuatorianos, con el fin disminuir la demanda de potencia y energía del Sistema



Eléctrico Nacional en horas pico a través de la sustitución masiva de Lámparas Fluorescentes Compactas (LFCs) en clientes residenciales con consumos hasta 200 kWh/mes. El proyecto inició en el 2008 con la sustitución de 6 millones de focos ahorradores (Primera Fase), destinada al sector residencial de los estratos bajos, en el 2010 se continuó con la sustitución de 10 millones de focos ahorradores (Segunda Fase) destinada a otros sectores como salud, educación y servicio social.

Proyecto tarifas eléctricas con señales de eficiencia energética: Sustentado en el principio de eficiencia energética preceptuado por la Constitución de la República del Ecuador en su capítulo V: “Sectores estratégicos, servicios y empresas públicas”, el CONELEC desarrolló un estudio sobre “Tarifas con señales de eficiencia aplicables para el sector residencial en época de estiaje”, como un mecanismo para incentivar la reducción del consumo en los clientes residenciales, sobre todo en aquellos con mayor demanda, a través de la estructura tarifaria.

Campaña masiva de comunicación para incentivar el ahorro de la energía: Mediante este programa que debe constituir una acción permanente, se busca diseñar y ejecutar Campañas de Comunicación para incentivar y promover el buen uso del recurso energético en la ciudadanía, especialmente durante los meses de septiembre, octubre, noviembre y diciembre, en los que los factores climáticos no contribuyen a la generación de energía, dada la dependencia del sistema de generación hidroeléctrico del régimen de lluvias de las cuencas orientales, como es el caso del complejo hidroeléctrico Paute.

Así también se proyecta el uso de nuevas tecnologías para el transporte urbano. El proyecto consiste en desarrollar un prototipo de bus híbrido que permita utilizar la energía eléctrica, proveniente de fuentes renovables como es el caso de la hidroelectricidad, en el sector transporte del Ecuador y de esta manera disminuir el consumo de combustibles fósiles.

1.7.3 Proyección de la demanda en el Ecuador.

“El desarrollo del sector eléctrico es fundamental para el normal desenvolvimiento de las crecientes actividades productivas del Ecuador. En efecto, en los próximos años se ha previsto el abastecimiento eficiente de la futura demanda de energía eléctrica, a través de una importante participación de generación hidroeléctrica, resaltando que varios proyectos denominados emblemáticos se encuentran en plena ejecución; además, se ejecutará el reforzamiento de las redes de transmisión



y subtransmisión, así como el cambio de paradigma hacia un adecuado y moderno servicio de distribución y comercialización...”¹⁷

El comportamiento evolutivo de la demanda depende principalmente del crecimiento macroeconómico del país (PIB) relacionado con su crecimiento poblacional. Una proyección de la futura demanda es una herramienta valiosa de toma de decisiones para la planificación de la expansión de los sistemas eléctricos, pues basándose en ella se establecen los parámetros y las prioridades para realizar inversiones que permitan asegurar la oferta de la electricidad en condiciones de seguridad, confiabilidad y economía.

La evolución de la demanda de energía y potencia eléctrica a nivel de país ha mantenido un escenario característico de crecimiento sostenido durante los últimos años. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que en el corto plazo este crecimiento sostenido de la demanda a nivel del país se verá afectado debido al ingreso de cargas considerables como la Refinería del Pacífico, el metro de Quito, el tranvía de Cuenca, grandes proyectos de minería, introducción de cocinas de inducción, calefones y autos eléctricos, entre otros.

Contrariamente, un análisis que constituye también una parte esencial a considerar es la reducción y control de las pérdidas en los sistemas de distribución.

*“La situación macro-económica estable que ha tenido el país en los últimos años, ha permitido dar un mejor tratamiento metodológico a las proyecciones de la demanda eléctrica. En este contexto, la participación activa de las empresas distribuidoras de servicio eléctrico es relevante, debido a que, por su cercanía y conocimiento del mercado en su área de concesión, están o deberían estar mejor preparadas para determinar con mayor certidumbre la previsión total de sus necesidades de energía y potencia eléctrica a futuro, considerando su distribución espacial y geográfica”.*¹⁸

En la siguiente figura puede observarse una proyección estimada de la demanda y generación de potencia eléctrica hasta el año 2021 para el Ecuador.

¹⁷ Palabras de Introducción Dr. Esteban Albornoz Vintimilla. Plan Maestro de Electrificación 2012-2021.

¹⁸ Extracto tomado del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 99.

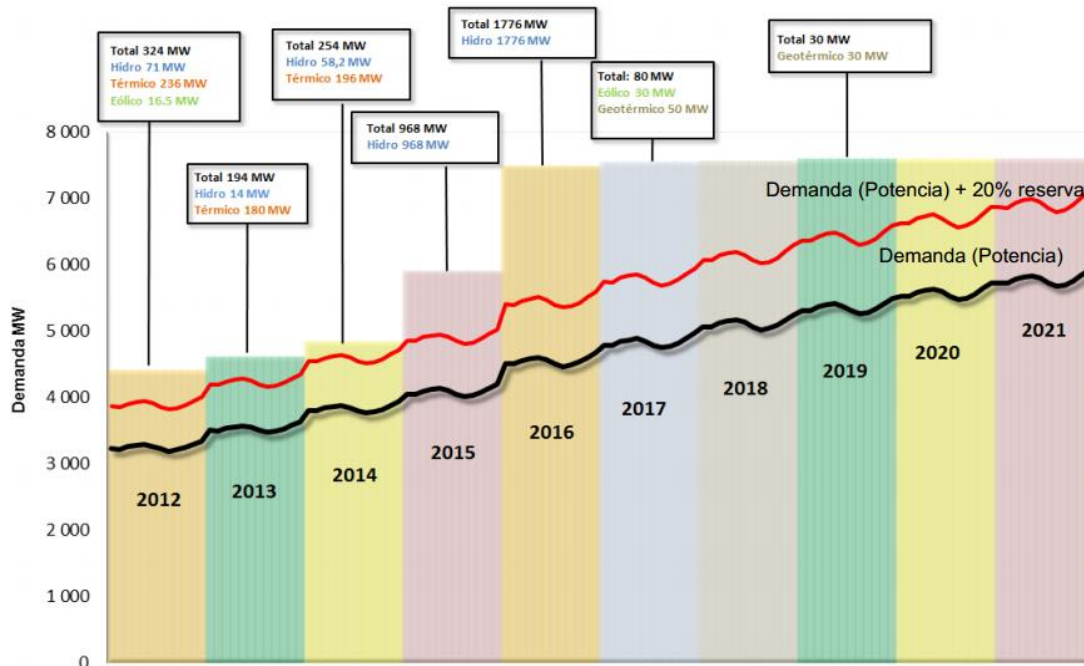


Ilustración 10. Proyección de la generación y demanda eléctrica en el Ecuador.¹⁹

En la siguiente figura se puede observar la proyección del consumo de energía establecida por sectores de consumo.

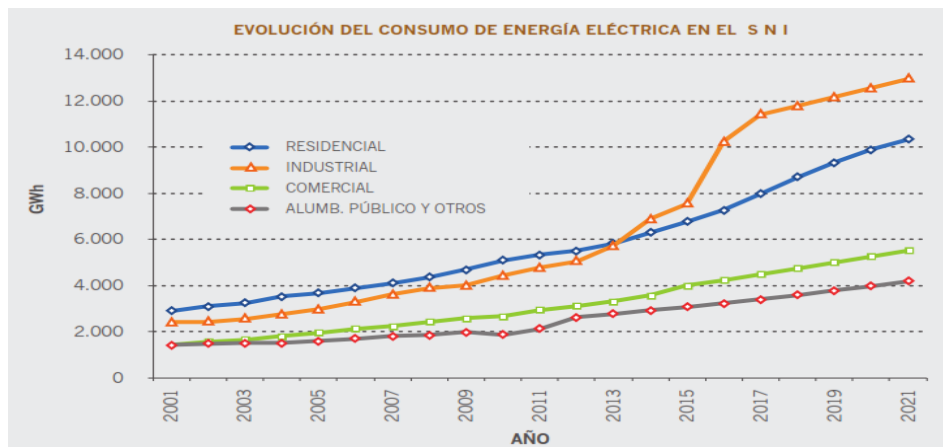


Ilustración 11. Evolución del consumo de energía en el SNI.²⁰

Para establecer el número de clientes del servicio de electricidad se ha tomado en cuenta su futuro consumo medio unitario anual de los principales sectores de consumo. Según esta proyección en el consumo del servicio eléctrico, se ha establecido hasta el año 2021 un crecimiento medio del consumo unitario en el orden de 3,8 % anual para el sector residencial; 2,6 % para el comercial y 6,9% para el industrial. En la siguiente tabla puede observarse tal proyección.

¹⁹ Figura tomada de la presentación VISION SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO BENEFICIOS PROYECTO MAZAR. PhD. Esteban Albornoz Vintimilla. 2009.

²⁰ Figura tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 121.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Tabla 3. Proyección del consumo unitario anual del servicio eléctrico. (Escenario de crecimiento medio).²¹

CONSUMO UNITARIO ANUAL (kWh)					
AÑO	Residencial (kWh)	Comercial (kWh)	Industrial (kWh)	Alumb. Público y Otros (kWh)	Total (kWh)
2011	1.444	6.878	96.608	16.608	298
2012	1.429	6.837	97.609	19.272	357
2013	1.454	6.883	105.838	19.677	362
2014	1.517	7.064	122.774	20.194	369
2015	1.580	7.657	130.019	20.727	378
2016	1.651	7.823	170.637	21.235	387
2017	1.769	8.018	184.475	22.040	397
2018	1.884	8.224	184.919	22.863	408
2019	1.977	8.431	185.866	23.765	420
2020	2.056	8.630	186.727	24.631	432
2021	2.106	8.887	188.824	25.445	445
Crecimiento anual promedio 2011-2021	3,8%	2,6%	6,9%	4,4%	4,1%

²¹ Tabla tomada del Plan Maestro de Electrificación 2012-2021. CONELEC. Página 112.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO II

CONCEPTOS GENERALES



2 CONCEPTOS GENERALES

A continuación se expondrán conceptos generales tales como, Smart Grids (SG) y sus componentes, micro-red, generación distribuida (GD) y las energías renovables no convencionales, como solar fotovoltaico y eólico.

2.1 SMART GRIDS

En la actualidad, se están dando grandes cambios debido al desarrollo de la tecnología que se emplea para la producción de energía eléctrica, para lograr mejorar la eficiencia de un SEP se han estudiado varias técnicas con el propósito de obtener un mayor grado de confiabilidad del sistema, de todo esto se deriva lo que es una red-inteligente (SG), ésta ha tenido una gran aplicación en los países desarrollados. Debido a que varios autores de libros tienen diferentes puntos de vista, se hace difícil establecer una definición única, es por ello que a continuación vamos a mencionar los conceptos de los institutos reconocidos a nivel mundial y que de alguna manera han sido aceptados.

En referencia a la Plataforma Tecnológica Smart Grids (SG) de EU, el concepto de SG se define como una *"red de electricidad, que integra de forma inteligente las acciones de los productores y los consumidores conectados a él con el fin de entregar eficientemente el suministro de electricidad sostenible, económico y seguro"*.²²

El Departamento de Energía de los EE.UU da una definición más detallada de las Redes Eléctricas Inteligentes. Afirma que *"una red inteligente es la auto-sanación, permite la participación activa de los consumidores, opera elásticamente contra el ataque y los desastres naturales, tiene capacidad para todas las opciones de generación y almacenamiento, permite la introducción de nuevos productos, servicios y mercados, optimiza la utilización de activos y opera de manera eficiente, proporciona calidad de la energía para la economía digital"*.²³

²² Nouredine Hadjaid, J. C. (2012). *SmartGrids*. Pag 17. London, Great Britain: Wiley.

²³ FUENTE: EE.UU. DoE

De las enunciaciones previas podemos establecer una definición sobre Smart Grids la cual es: Las SG se interpretan como una manera de gestión eficiente de electricidad que emplea la tecnología de las comunicaciones (*Ilustración 12*) para optimizar la producción y distribución de electricidad con el fin de equilibrar mejor la oferta y la demanda entre productores y consumidores.



Ilustración 12. Diagrama de Smart Grids.

FUENTE: http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_EU/SmartGrid/EU-Smart-Grid/

2.2 MICRO-REDES (Microgrids)

Las micro-redes son versiones modernas a pequeña escala del sistema eléctrico de potencia. Estas logran objetivos locales específicos, tales como la confiabilidad, reducción de emisiones de carbono, la diversificación de las fuentes de energía (solar, eólica) y la reducción de costos. Al igual que un SEP, las micro-redes inteligentes logran generar, distribuir y regular el flujo de electricidad a los consumidores (viviendas²⁴), pero lo hacen localmente con lo cual se logra tener menos pérdidas y obtener una mayor confiabilidad del sistema.

Las micro-redes inteligentes se conectan con la red de distribución y proporcionan valiosos servicios que se benefician tanto los servicios públicos como sus clientes. *“Operan en coordinación con la utilidad para mejorar el servicio al cliente, pero la infraestructura se controla ya sea en parte (como con una comunidad) o totalmente (como con una universidad) por la entidad local. Universidades tales como Princeton y Harvard poseen y operan sus propias micro-redes, al igual que comunidades*

²⁴ Se considera a la vivienda como la unidad de análisis básica para el estudio de una microrred

como Naperville, Illinois, y bases militares como Fort Bragg, Carolina del Norte”.²⁵

El control de la infraestructura a nivel local permite la inversión privada en el sistema y cuando se combina con su tamaño relativamente pequeño, hace que las micro-redes sirvan como iniciativa de innovación empresarial.

La arquitectura básica que tiene una micro-red se muestra en la *Ilustración 13* establecida en [1], “Esta consiste en un grupo de líneas radiales, que podría ser parte de un sistema de distribución o sistema eléctrico de un edificio. Hay un único punto de conexión a red principal llamada punto de acoplamiento común (Lasseter 2002b). Algunos alimentadores, (alimentadores AC) tienen cargas sensibles, que requieren de la generación local. Los alimentadores de carga no críticos no tienen ninguna generación local. Los alimentadores AC pueden aislarse de la red con el interruptor estático que se puede separar en menos de un ciclo (Zang 2003). En este ejemplo hay cuatro micro-fuentes en los nodos 8, 11, 16 y 22, que controlan la operación utilizando sólo tensiones locales y las corrientes medidas”.

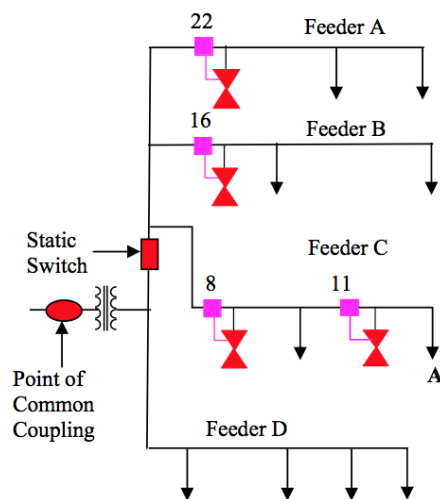


Ilustración 13. Diagrama de la arquitectura de una micro-red.

FUENTE: [1]

Cuando hay un problema con la red principal el conmutador estático se abrirá, aislando las cargas sensibles de la red eléctrica. En [1] plantean que “Las cargas no sensibles (alimentador D) queda aislada ya que los alimentadores A, B y C satisfacen su propia carga. Cuando la micro-red está conectada a la red principal la potencia de la generación local se puede dirigir a las cargas no sensibles”.

²⁵ Electricity, G. (20 de Mayo de 2012). Microgrids. *Galvin Electricity Initiative* , 6

Para ello se promueve en [2] el control autónomo “peer-to-peer” y el modelo “plug-and-play” para cada componente de la micro-red. En [3] plantean que el concepto peer-to-peer asegura que no hay componentes tales como un controlador maestro o unidad de almacenamiento central, que es crítica para el funcionamiento de la micro-red. Esto implica que la micro-red puede seguir operando con la pérdida de cualquier componente o generador. Con una fuente adicional (N+1) podemos asegurar la funcionalidad completa con la pérdida de cualquier fuente. Plug-and-Play implica que una unidad se puede colocar en cualquier punto en el sistema eléctrico sin necesidad de modificar los controles.



Ilustración 14. Esquema de una Micro-red.

FUENTE: <http://powergen-renewable-energy.com/customers/commercial/>

2.3 GENERACION DISTRIBUIDA

La GD en inglés conocida como Distributed Generation, se refiere a una generación emergente de los sistemas de generación eléctrica, es llamado emergente porque éste ayuda al Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), ya que las pérdidas que se presentan en un SEP por transmitir la energía a grandes distancias, es relativamente mayor a la generación distribuida que se encuentra cerca de los consumidores, ya que en la GD ésta integrado el sistema de suministro de energía de acuerdo a la disponibilidad de sus recursos. Estos recursos se conocen como Recursos Energéticos Distribuidos (DER). No existe un consenso sobre las definiciones precisas de GD debido a que el concepto abarca muchas tecnologías y aplicaciones.²⁶

²⁶ Segundo seminario internacional Smart Grids. Ing Estrella E. Parra



La aplicación de la generación distribuida representa un cambio en el paradigma de la producción eléctrica centralizada, cabe resaltar que, los inicios de la generación de electricidad se tuvo en los años 1882 y fue principalmente para iluminación, se tenía generación a pequeña escala y cerca de la carga (consumidores), es por ello que el concepto de generación distribuida no es un concepto nuevo, ya que de alguna manera es “volver” a los inicios de la generación de electricidad; debido a que los sistemas de generación de potencia o de almacenamiento, están situados cerca de centros de carga o directamente conectado al sistema de distribución.

Los principales aspectos que ocasionan diferencias en la definición de las GD depende de: la potencia, la tecnología, el nivel de tensión de interconexión. Con todos estos pequeños antecedentes se define a la generación distribuida como: Generación de energía eléctrica en pequeña escala de la carga haciendo uso de tecnologías eficientes.

Cuando se refiere a la generación de electricidad a micro y pequeña escala, los rangos de generación son de 1 W a 5 kW y 5 kW – 5 MW²⁷ respectivamente.

2.4 ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES (ERNC)

La definición más clara que se tiene de Energías Renovables No Convencionales (ERNC) es: *“que a todas aquellas fuentes de generación energética en las cuales no se incurre en el consumo gasto o agotamiento de su fuente generadora”*.²⁸

Entre estas fuentes de energías podemos mencionar a la energía hidráulica proveniente de la fuerza motriz del agua. La energía solar, capturada mediante la radiación solar. La energía eólica, nutrida por la fuerza mecánica del viento, y la fuente mareomotriz, que se alimenta de la fuerza generadora del oleaje de los océanos. También es posible hacer mención de otras energías, categorizadas por su forma de explotación, como es el caso la energía proveniente de los desechos industriales denominada biomasa, y la energía geotérmica que aprovecha el calor interno de la tierra; a continuación se presentan una ilustración de las ERNC.

²⁷ P. Dunsky, Cogeneration and On-Side Power Production. COSPP, (2000).

²⁸ <http://www.revistaenergia.cl/index.php/reportajes/9-articulos/reportajes/60-ernc>

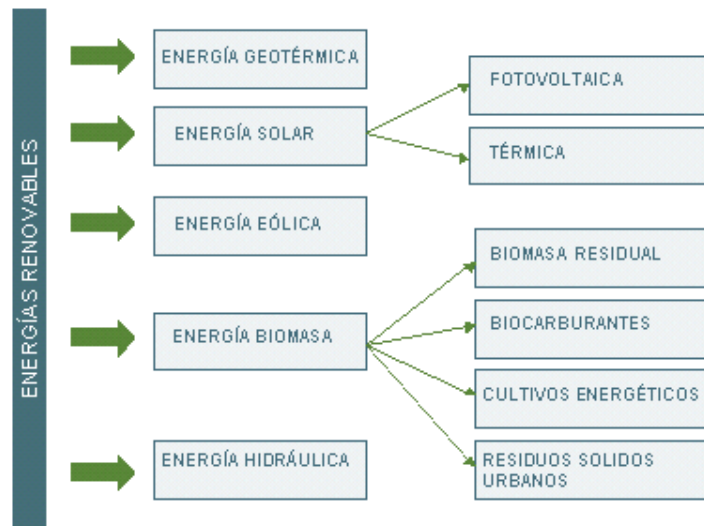


Ilustración 15. Energías Renovables.
REALIZADO: Autores

Un aspecto importante a considerar, es lo que sucede con la energía hidráulica, dado que ella se nutre de la fuerza mecánica del agua, o sea, una fuente que cae claramente en la denominación de energía renovable, pero no coincide en la categoría de fuentes no convencionales, por tratarse de un proceso de generación de tipo convencional.

Una de las causas primordiales de la masificación de las ERNC dentro del escenario mundial, ha sido gracias a grupos medio ambientalistas y asociaciones comunitarias aledañas a los centros energéticos, quienes han dado la voz de alerta por las altas emisiones de partículas contaminantes que expelen los procesos generadores, siendo estos ligados directamente al cambio climático planetario de las últimas décadas. La creciente demanda energética ha obligado, tanto a gobiernos como a empresas privadas, a estar en una constante e incesante búsqueda por nuevos centros de generación, todo ello aparejado de continuas o reiteradas alzas en los precios de combustibles fósiles, es aquí donde las ERNC empiezan a verse como un gran potencial para la generación de energía eléctrica, con lo cual se obtiene energía de una manera más pura sin lograr un gran impacto en nuestro medioambiente.

El Ecuador actualmente se encuentra viviendo grandes cambios dentro del sistema energético, ya que ha empezado a migrar al uso de nuevas tecnologías para la generación de energía eléctrica, tal es así que ya cuenta con un parque eólico “Villonaco” *Ilustración 16* ubicado en la ciudad de Loja, con esto el Ecuador empieza a incursionar en el uso de las energías renovables haciendo uso de las tecnologías maduras que cuentan los países desarrollados.



Ilustración 16. Parque Eólico Villonaco ubicado en Loja-Ecuador.

FUENTE: <http://www.nuevamineria.com/revista/ecuador-ahorra-132-millones-de-dolares-con-parque-eolico-con-aerogeneradores-goldwind/>

Como se mencionó anteriormente las ENRC son varias, para el desarrollo del presente trabajo se considera en la oferta: la generación eólica y fotovoltaica, se optó por este tipo de fuentes de energía debido a la ubicación geográfica del Ecuador, donde se tiene un gran potencial de energía proveniente del Sol para lograr generar energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos, esto se puede constatar en el atlas solar del Ecuador *Ilustración 17*.

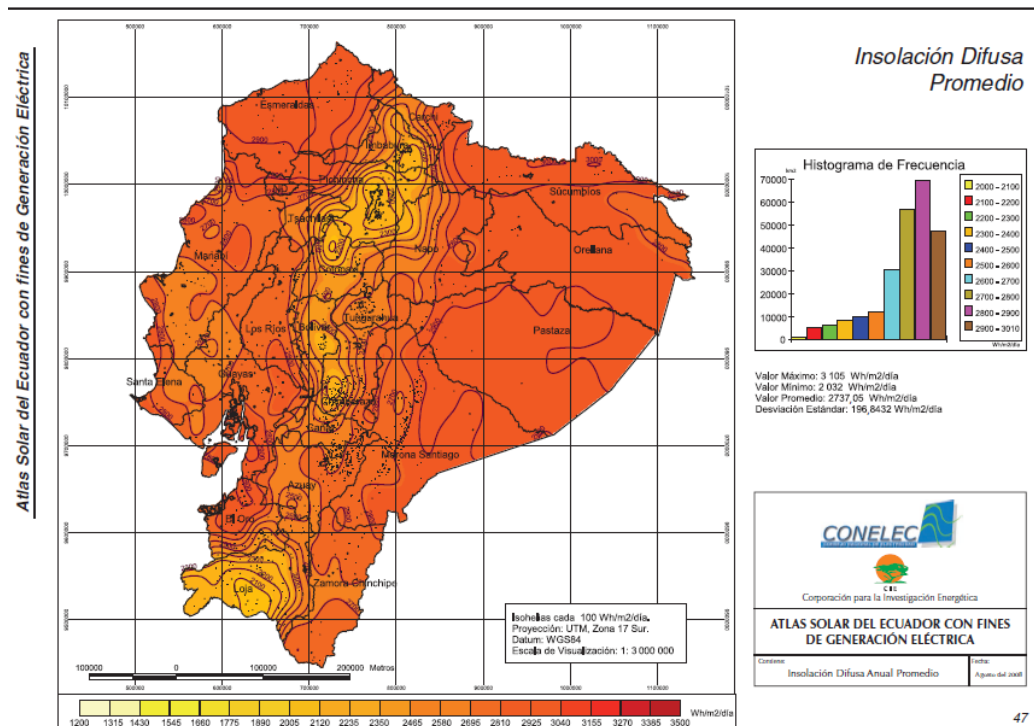


Ilustración 17. Atlas Solar de Ecuador.²⁹

²⁹ FUENTE: CONELEC, Atlas solar del Ecuador, pag. 47

2.4.1 Energía eólica

La energía que se obtiene a través de la conversión de la energía cinética que tiene la masa de aire hacia energía mecánica y luego a energía eléctrica se conoce como energía eólica, en nuestro planeta este tipo de energía es abundante. Para lograr la conversión de esta energía se emplean máquinas denominadas aerogeneradores, estas máquinas, a través de una superficie aerodinámica expuesta al viento, producen trabajo mecánico en un eje.

La energía eólica es una de las más limpias lo cual es muy importante, debido a que no produce un daño en el medioambiente.

Un aerogenerador está conformado, básicamente, por dos elementos principales: el primero un rotor compuesto por un eje y la o las palas que es accionado por el viento, el segundo un generador que se mueve por arrastre del rotor.

La energía eólica es aprovechada básicamente por un sistema de un rotor *Ilustración 18* que gira a medida que pasa viento por este.

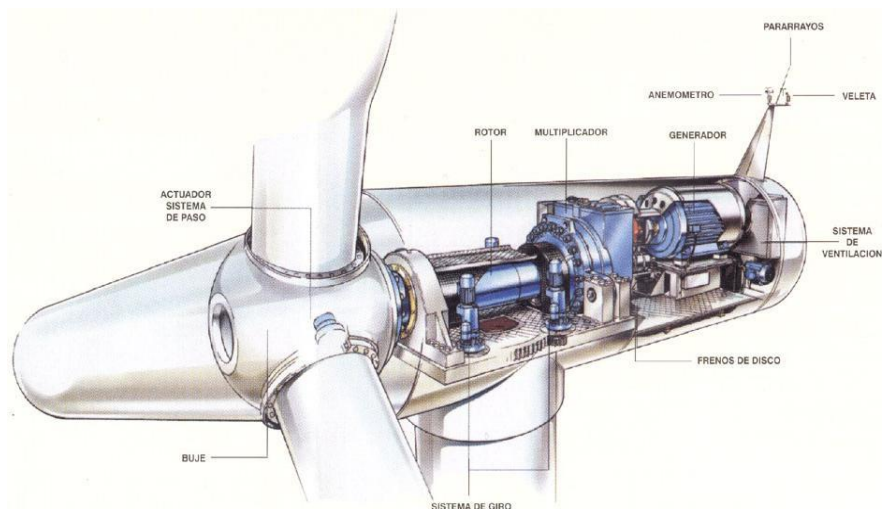


Ilustración 18. Partes de un Aerogenerador.

FUENTE: <http://www.energias.bienescomunes.org>

2.5 SISTEMAS HIBRIDOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Existen sistemas en los cuales se tiene generación a través de paneles fotovoltaicos que pueden a su vez estar conectado a la red o aislados de la red, a éste sistema se los denomina sistemas autónomos, el mismo caso se tiene para la generación

eólica; además de estos existe un sistema denominado híbrido en el cual se tiene generación eólica y generación fotovoltaica, integrados por módulos fotovoltaicos y aerogeneradores, a su vez estos pueden estar conectados a la red con el fin de cuando se tenga un defecto de generación propia se pueda alimentar desde la red, esto disminuye el costo del sistema, mientras que en un sistema completamente autónomo los costos se incrementan debido al dimensionamiento que se debe tener para el almacenamiento de energía.

Un sistema híbrido autónomo presenta una gran ventaja para la implantación en lugares donde no se tiene el servicio eléctrico de una empresa distribuidora de energía eléctrica o en áreas aisladas. En la actualidad se utilizaban generadores diésel para satisfacer la demanda pero estos presentan una baja eficiencia del funcionamiento y además presentan costos elevados por mantenimiento. Los sistemas híbridos nos permiten solucionar todos esos problemas y algo importante es que estos utilizan los recursos renovables.

A continuación se presenta en la Ilustración 19 un sistema híbrido autónomo y en la

Ilustración 20 un sistema híbrido conectado a la red.

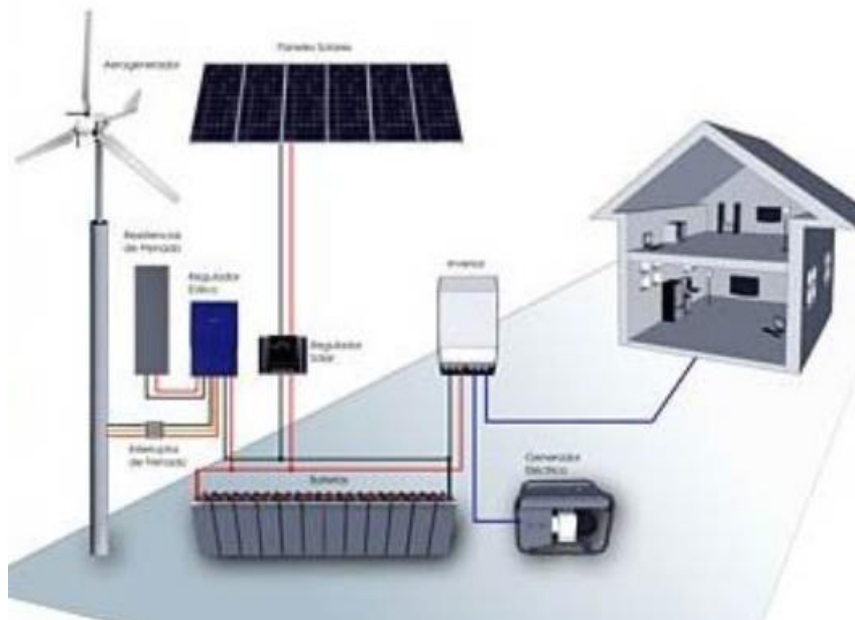


Ilustración 19. Sistema híbrido autónomo.

FUENTE: <http://www.energias.bienescomunes.org/2012/10/17/que-es-la-microgeneracion-de-energias-renovables/>

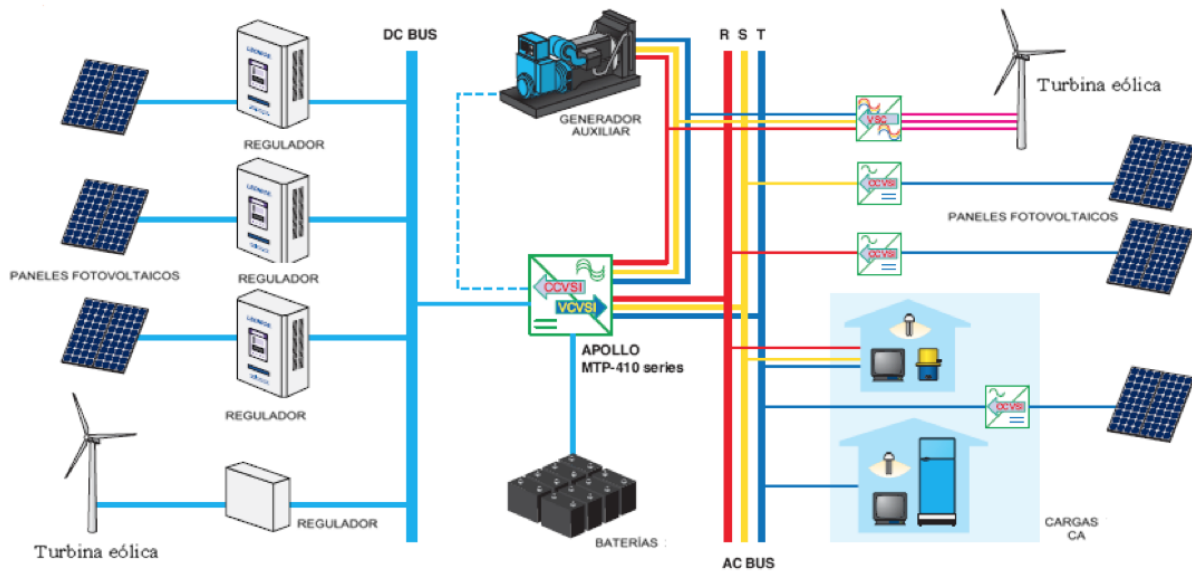


Ilustración 20. Sistema híbrido conectado a la red.³⁰

2.6 PROGRAMACIÓN DINÁMICA

La programación dinámica es una técnica matemática útil para la toma de decisiones secuenciales interrelacionadas. Proporciona un procedimiento sistemático para determinar la combinación óptima de decisiones.

En contraste con la programación lineal, no cuenta con una formulación matemática estándar del problema de programación dinámica, sino que se trata de un enfoque de tipo general para solucionar problemas; además, las ecuaciones específicas que se usan deben ajustarse a la situación particular. Por tanto, es necesario cierto grado de creatividad y un buen conocimiento de la estructura general de los problemas de programación dinámica para reconocer cuándo y cómo un problema puede ser resuelto por medio de estos procedimientos.

³⁰ www.leonics.com



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO III

MICRO-RED: DEMANDA Y OFERTA



3 MICRO-RED: DEMANDA Y OFERTA

El presente trabajo pretende contribuir al entendimiento y futura implementación de las denominadas redes eléctricas inteligentes (“Smart Grids”) en el Ecuador. Para esto, como paso inicial es fundamental tener una herramienta que nos permita pronosticar la oferta y demanda que tiene una vivienda, para cuantificar los posibles impactos y beneficios que tendría la integración de generación eléctrica doméstica y el consumo de los electrodomésticos existentes en el hogar. Se empieza considerando ciertos aspectos en la demanda y oferta, los mismos que se explican a continuación:

3.1 CONSIDERACIONES EN LA DEMANDA

En una red de distribución eléctrica, la determinación de la demanda es fundamental para asegurar el suministro de energía, así como para tener una buena aproximación de cuando se da el pico de demanda. Además, permite tener un mejor control de la red, por lo que es primordial contar con un modelo que ayude a caracterizar la demanda de energía según los parámetros más apropiados, para poder simular un consumo real de electricidad en una vivienda.

La modelación de la demanda de energía eléctrica de una vivienda no es una investigación reciente, según [4] la determinación de la demanda en una residencia puede ser muy extendida según los parámetros que se quiera considerar; es por eso que se ha tomado la solución más apropiada para determinar el método que permita obtener la curva de demanda diaria según nuestro entorno.

Los métodos de determinación de la curva de demanda están divididos en dos categorías descritas por [5]: bottom-up y top-down, cada una tiene su rango de aplicación determinado por los parámetros de entrada (Ver *Ilustración 21*). Sin embargo, además de estos dos métodos se han venido desarrollando modelos que pueden ser descritos como una mezcla de ambos.

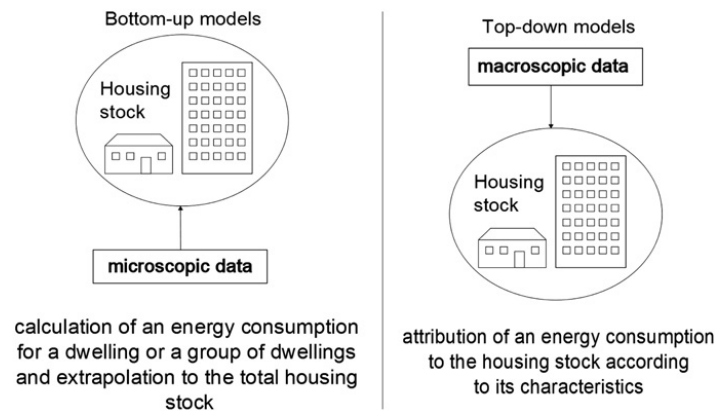


Ilustración 21: Modelo Bottom-up y Top-down

FUENTE: Renewable and Sustainable Energy Reviews [4]

Desde el punto de vista de [4], la potencia demandada es mucho más complicada de predecir que la energía demandada, esto es debido a la naturaleza aleatoria de las cargas así como las fluctuaciones que cada una de ellas tiene debido a la actividad de los ocupantes. Este aspecto es muy importante ya que dos viviendas con las mismas características pueden tener el mismo consumo de energía, sin embargo las curvas de carga diaria para cada una pueden ser muy diferentes.

3.1.1 Electrodomésticos

El modelo que presenta [6], utiliza el aparato como el componente básico, donde "aparato" se refiere a cualquier carga de electricidad doméstica individual. La característica importante del modelo está en su enfoque que representa el uso del aparato correlacionado con el tiempo.

Los aparatos del modelo se configuran mediante estadísticas que describen su demanda media anual de energía y las características de uso de energía asociados, basándose en datos descritos en [7], incluyendo el consumo de estado estacionario "stand by" o ciclos normales de utilización, según sea el caso. Además se considera cuando los aparatos específicos son susceptibles de ser utilizados dependiendo del número de habitantes en el hogar.

El consumo promedio anual es el consumo promedio que tiene una vivienda en un año. En la ciudad de Cuenca, el consumo promedio anual de una vivienda con tarifa residencial se obtuvo a partir de la

Tabla 4 contrastados con los resultados que se obtuvieron de [7].



Tabla 4. Clientes por estrato del Cantón Cuenca.³¹

ESTRATOS		CONSUMO kWh/mes	NÚMERO DE CLIENTES	CONSUMO PROMEDIO kWh/mes/Cliente
Estrato 0	0	0	15682	-
Estrato 1	1-20	105555	13599	7,761967792
Estrato 2	21-50	459306	13340	34,43073463
Estrato 3	51-80	1023226	15690	65,2151689
Estrato 4	81-100	1103642	12335	89,47239562
Estrato 5	101-120	1312372	12004	109,3278907
Estrato 6	121-150	1993111	14873	134,0086734
Estrato 7	151-200	3030806	17580	172,4007964
Estrato 8	201-300	3757315	15661	239,9153949
Estrato 9	301-500	2414572	6583	366,789002
Estrato 10	501-1000	901511	1407	640,7327647
Estrato 11	>1000	778259	203	3833,788177
CANTÓN CUENCA		16879675	138957	121,4740891

3.1.2 Ocupantes de la vivienda

El uso de los electrodomésticos (a excepción de las refrigeradoras) dentro de una vivienda está directamente relacionado con el número de personas que están en casa y despiertos. En el modelo de Richardson et al. [6] define como "ocupación activa" y se representa para cada vivienda dentro del modelo, como un entero que varía a lo largo del día de una manera pseudo-aleatoria, lo que refleja el comportamiento natural de las personas en sus vidas diarias. Sin embargo para la aplicación de este modelo en el presente trabajo, es considerado como un valor constante el número de personas dentro de la vivienda a lo largo del día, para lo cual se ha considerado el promedio de personas por hogar, en el cantón Cuenca según el Censo de Población y Vivienda (CPV) en el año 2010 es de 4 sin embargo es importante tener en cuenta que existe muchos hogares con 5 ocupantes, es por ello que para el presente modelo consideramos la posibilidad de tener de uno a cinco ocupantes en la vivienda. Además de esto como limitación se considera la hora que inician y terminan sus actividades los ocupantes dentro de la vivienda.

³¹ FUENTE: Empresa Eléctrica Centro Sur E.E.R.C.S C.A



3.1.3 Actividad de los ocupantes y el uso de los electrodomésticos

Con el fin de perfeccionar la modelación de la demanda eléctrica, se utiliza un segundo mecanismo, basado en las actividades de los ocupantes. Para este caso se usa los datos de origen [7] para crear "perfiles de actividad", que muestran, que las personas tienden a hacer determinadas actividades en determinada hora del día, por ejemplo cocina en torno a los tiempos de comida, del mismo modo, son más propensos a ducharse en las horas de la mañana y ver TV en las horas de la noche. Otras actividades tienen cada uno sus propios perfiles diarios.

El siguiente paso es vincular estas actividades a los aparatos. Por ejemplo, ver la televisión, obviamente, requiere una televisión para estar en uso; cocción puede implicar el uso de un microondas y una actividad de lavado puede conducir a un uso de una lavadora. Mediante la asignación de un perfil de actividad en cada aparato en el modelo, la probabilidad de uso del aparato a lo largo del día se puede tomar en cuenta en una simulación estocástica, que es un elemento clave del modelo en estudio.

Los pasos anteriores garantizan que los aparatos en el modelo se activan en el momento adecuado del día. Por otra parte, la creación de una relación entre el uso de energía y la actividad de los ocupantes es particularmente importante en el estudio de la gestión de la demanda, incluyendo la demanda flexible.

Esta metodología es aplicada por modelos similares que describe [8]. Por otra parte el enfoque que se adopta, usa los perfiles de actividad estocástica teniendo como variable el número de ocupantes de la vivienda; esto da la posibilidad de representar la probabilidad de que más de un aparato sea utilizado al mismo tiempo.

3.1.4 Uso simultaneo de electrodomésticos

El uso simultáneo de electrodomésticos sería probable, por ejemplo de la iluminación y la TV, dentro de una vivienda que tiene ocupantes en una noche. Una vez más, el uso de ocupación activa dentro del modelo proporciona una base para la determinación del uso de electrodomésticos simultáneos.



3.1.5 Consumo de reactivos

Basar el modelo en la estimación de aparatos individuales también proporciona un medio sencillo de representar el consumo de energía reactiva, que es importante, para los estudios de flujo de carga. El modelo representa las demandas de potencia reactiva de cada aparato a través de la asignación de un factor de potencia apropiado.

3.1.6 Características de consumo

Los aspectos que más influyen en el consumo de energía eléctrica de los electrodomésticos varían dependiendo de cuál sea el elemento considerado, en el caso del refrigerador debemos considerar aspectos ambientales los cuales afectan directamente al encendido y apago del compresor, ya que en esto está involucrado la temperatura interna y externa a la cual se encuentra el refrigerador, y dependiendo de las veces que se prenda y apaga el compresor a lo largo del día, obtendremos la curva de carga, la cual nos sirve de base para desarrollar el modelo del refrigerador. De la misma manera la lavadora tiene una demanda que es variable a lo largo del tiempo, ya que se ejecuta en varias etapas de llenado, lavado y centrifugado.

Ciertos elementos considerados en el modelo como es el TV, radio, microondas, ducha eléctrica, computador, etc. Su consumo de energía eléctrica depende básicamente del tiempo que permanezca encendido el elemento, ya que al momento de encenderlos estos presentan un consumo constante de energía por cada elemento.

3.1.7 Características de potencia

Cada dispositivo tiene dos estados: puede estar encendido o apagado. El estado de apagado incluye la potencia de "stand by", en el cual el aparato electrónico se encuentra conectado pero en reposo a la espera de recibir órdenes. Para muchos electrodomésticos, tales como un computador o un televisor, se supone una demanda de potencia constante cuando se encuentran en funcionamiento como se indica en la *Tabla 5*.



Tabla 5: Características de potencia³²

	POTENCIA MEDIA POR CICLO DE USO (W)	POTENCIA MEDIA STAND BY (W)	FACTOR DE POTENCIA
Refrigerador	312	0	0,8
Equipo de Sonido	70	3	0,9
Wi-Fi	9	9	0,8
Plancha	1200	0	1
Aspiradora	600	0	0,8
LAPTOP	75	9	0,9
Computadora	250	9	0,9
Impresora	200	4	0,9
TV 1	110	4	0,9
TV 2	100	3	0,9
TV 3	100	3	0,9
VCR / DVD	34	2	0,9
Decodificador	30	9	0,9
Microondas	1250	2	0,8
Licuadora	550	0	0,8
Arrocera	900	0	1
Lavaplatos	1131	0	0,8
Secadora	763	1	0,8
Lavadora	763	1	0,8
Cafetera	1200	0	1
Ducha Eléctrica	3000	0	1

Sin embargo, algunos aparatos están representados por las demandas variables en el tiempo. Por ejemplo, una refrigeradora que tiene una variación de consumo en relación a la temperatura ambiente, la lavadora de ropa que se ejecuta a través de varias etapas, de llenado, el lavado y centrifugado, varía significativamente su demanda a lo largo de un ciclo.

Para el caso de la Lavadora de ropa el perfil de la demanda se basa en el modelo [9], donde la carga varía como se indica en la *Ilustración 22*.

³² Fuente: [5]

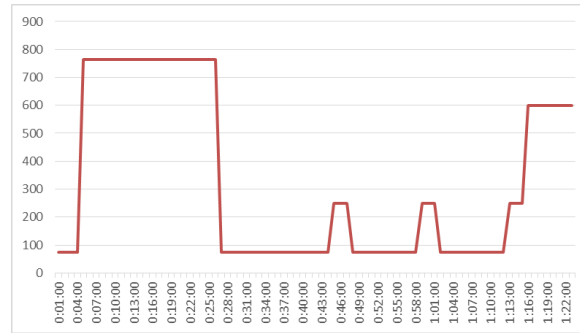


Ilustración 22: Ciclo de funcionamiento de la lavadora Fuente: [9]

El consumo de la refrigeración tiene un impacto mayor comparado al de los otros equipos, es por ello que para la consideración de la demanda de la refrigeradora se ha tomado en cuenta la temperatura de la habitación donde se coloca el refrigerador igual a la temperatura ambiente. Para este trabajo se supone que la temperatura ambiente será variable a lo largo del día y el efecto de la apertura de la puerta no se tiene en cuenta. La evolución de la temperatura relacionada con energía eléctrica necesaria se ha descrito en [10] y se caracteriza por la ecuación:

$$T(t + 1) = \varepsilon \cdot T(t) + (1 - \varepsilon)(T_{amb}(t) - \frac{\eta \cdot P(t)}{A})$$

Los parámetros que se asignan para la determinación de la demanda de la refrigeradora se describen en la *Tabla 6*, los cuales fueron escogidos con el objetivo de obtener la demanda promedio mensual descrita en [7]. La ecuación diferencial descrita anteriormente es usada por [11] con el fin de obtener la evolución de la temperatura para el calentamiento o enfriamiento.

La siguiente ecuación se usa para determinar cuando el compresor se enciende:

$$T_1(t) = \frac{T_1(t_1) - T_{on}(t_1)}{e^{-\frac{A}{m_c}t_1}} e^{-\frac{A}{m_c}t} + T_{on}(t)$$

Donde $T_{on}(t) = T_{amb}(t) - \frac{\eta \cdot P(t)}{A}$

Para el momento en que llegue a la temperatura deseada en el interior del refrigerador se usa la siguiente expresión para determinar el apagado del compresor.

$$T_2(t) = \frac{T_2(t_1) - T_{amb}(t_1)}{e^{-\frac{A}{m_c}t_1}} e^{-\frac{A}{m_c}t} + T_{amb}(t)$$

Tabla 6: Parámetros de la refrigeración [9]

ε	Factor de inercia	0
η	Coficiente de rendimiento	1.5
A	Aislamiento Térmico	$6 \text{ W}/^\circ\text{C}$
m_c	Masa Térmica	$800 \text{ J}/^\circ\text{C}$
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^\circ\text{C}$
$P(t)$	Potencia nominal	312 W

Tomando la temperatura ambiente de un día típico de la ciudad de Cuenca³³ y los parámetros descritos obtenemos el perfil de carga de la refrigeradora como se muestra a continuación.

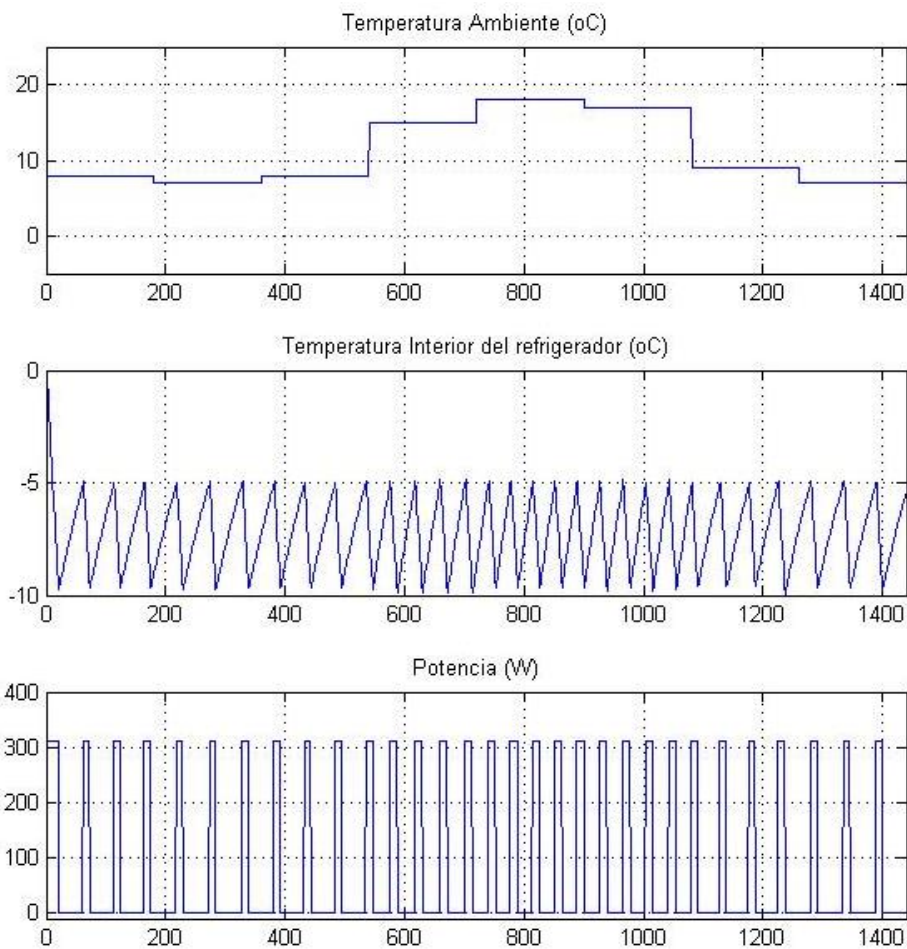


Ilustración 23: Perfil de carga de la refrigeradora.³⁴

³³ <http://es.windfinder.com/>

³⁴ REALIZADO: Autores



3.2 CONSIDERACIONES EN LA OFERTA

El uso de las energías renovables no convencionales hoy en día tiene una gran aplicación en nuestra sociedad. A continuación, se indican los parámetros que determinan el nivel de generación del panel solar fotovoltaico y el micro aerogenerador.

3.2.1 Energía solar

Puede convertirse en electricidad mediante paneles fotovoltaicos, el Sol constituye la mayor fuente de radiación electromagnética y representa el 98,6% de la masa del sistema solar.

El Sol emite continuamente radiación a todo el espacio. La Tierra intercepta aproximadamente $1,74 \times 10^{14} kW$, de tal manera que la Tierra es efectivamente un gran colector solar³⁵.

Para saber cuánto puede generar un módulo FV debemos analizar lo siguiente:

3.2.1.1 Movimiento solar

La Tierra gira alrededor del Sol en un período exacto de 365 días, 6 horas, 9 minutos y 8 segundos.

Para el estudio de la generación de una micro-red, se debe entender el comportamiento del Sol en el emplazamiento, ya que la radiación en nuestro planeta no es uniforme está depende de la latitud, longitud y también de la época del año así como de ciertos factores meteorológicos y atmosférico.

Toda superficie de la tierra no recibe la misma radiación, esto se debe a que la Tierra tiene un ángulo de inclinación aproximadamente de 23.25° con respecto al Sol (ver *Ilustración 24*), dicha inclinación se conoce como declinación solar.

³⁵ OLADE, Organización Latinoamericana de Energia, 1995

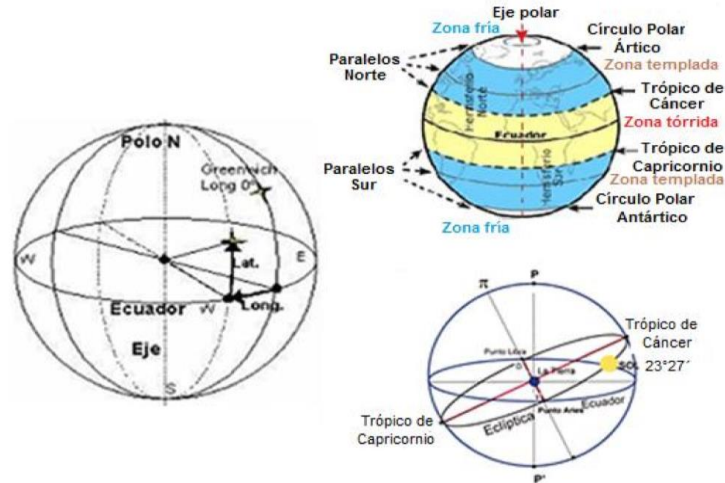


Ilustración 24. Zonas y movimiento planetario.³⁶

3.2.1.2 Posición del sol

La posición que tiene el movimiento de la Tierra a lo largo de un año respecto al Sol varía, existen distintos puntos que es importante conocer, los cuales se muestran en Ilustración 25.

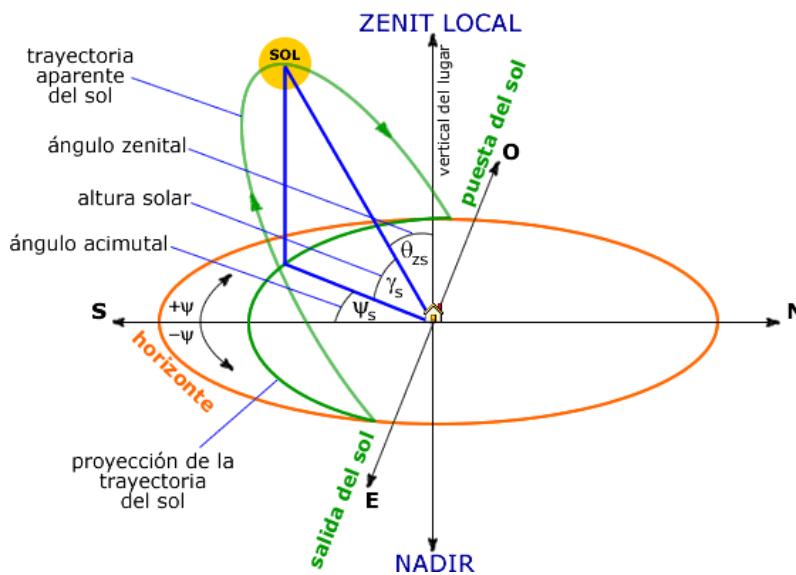


Ilustración 25. Posición del Sol.

FUENTE: http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/images/posi_sol.gif

- **Azimet solar (ψ):** La azimet solar es el ángulo formado por los meridianos y el punto del observador, en otras palabras es el ángulo formado entre la proyección del Sol sobre el horizonte y el Sur.

³⁶ FUENTE: ALSTON <http://www.alstom.com/grid/smart-grid/>

- **Altura solar (γ_s):** A la altura solar se la define como el ángulo en un plano vertical entre los rayos del Sol y la proyección de los mismos en un plano horizontal.
- **Angulo zenital (θ_{zs}):** Este ángulo es el complementario de la altura solar. Es el ángulo formado entre los rayos del Sol y la normal al plano horizontal.

3.2.1.3 Ángulo de incidencia de la radiación solar

Es el ángulo comprendido por la línea que se forma entre la radiación directa del sol sobre la superficie captadora y la perpendicular al captador, esto se logra observar en la *Ilustración 26*.

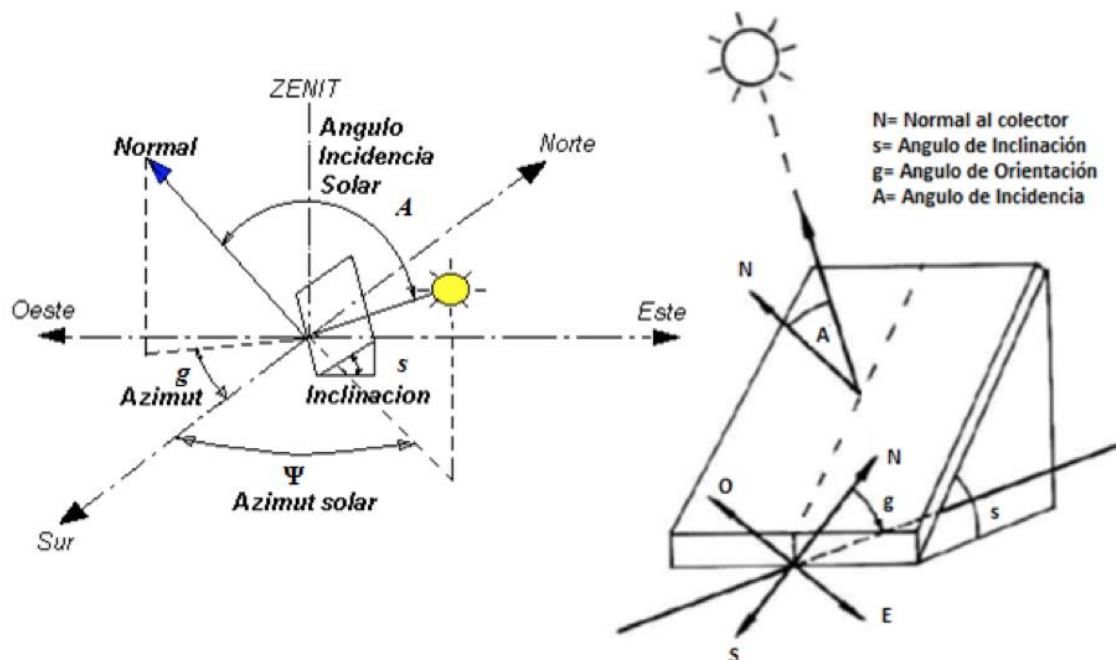


Ilustración 26. Ángulo de incidencia.³⁷

Un captador de energía solar puede ocupar cualquier posición sobre la superficie terrestre, por lo que el ángulo de incidencia puede variar notablemente. Los parámetros de los cuales depende este ángulo de incidencia son:

- **Latitud geográfica (L):** Si la Tierra es cortada por la línea ecuatorial, se consigue la división de dos hemisferios, uno, el Hemisferio Norte, positivo; el otro, el Hemisferio Sur, negativo. Al situar un punto en el planeta, y al referirla con el centro de la línea ecuatorial, se obtiene un ángulo, el cual es la

³⁷ FUENTE: ALSTON <http://www.alstom.com/grid/smart-grid/>



denominada Latitud, generalmente en los planos se la representa con las líneas horizontales paralelas.

- **Declinación geográfica (δ):** La declinación se la define como el ángulo formado entre el rayo solar y el plano en cada época del año. Entonces tenemos en los Solsticios de $\pm 23.45^\circ$ y se anula en los Equinoccios. La declinación solar puede calcularse con la fórmula de Cooper:

$$\delta = 23.45 \sin \left(\frac{(284+n)}{365.25} * 360 \right) \quad (3.1)$$

- **Inclinación (s):** Es el ángulo formado por el colector y la horizontal del terreno, de manera que el ángulo que se forma está entre 0° a 90° .
- **Orientación (g):** Este ángulo es el formado por el plano perpendicular al colector con la dirección de la meridiana del lugar. Su valor es constante. Para hallar su origen se considera lo siguiente:

- Si se encuentra en el Hemisferio Norte, lo toma hacia el Sur.
- La orientación puede tener cualquier valor (Norte, Sur, Este, Oeste, o valores intermedios).
- Si utilizamos una brújula, debemos considerar la declinación magnética, el cual es el ángulo formado por el norte verdadero y el norte magnético.
- Al este se toman grados negativos.

- **Angulo horario (ω):** Este ángulo es respecto al mediodía solar, es la relación que existe entre los 360° sexagesimales para las 24 horas del día, dando 15° , su unidad son las horas solares (ω).

Considerando los parámetros presentados se obtiene la siguiente ecuación:

$$A = \cos^{-1}[\sin \delta * \sin L * \cos s - \sin \delta * \cos L * \sin s * \cos g + \cos \delta * \cos L * \cos s * \cos w + \cos \delta * \sin L * \sin s * \cos w * \cos g + \cos \delta * \sin s * \sin g * \sin w] \quad (3.2)$$

Al considerar que tenemos la orientación hacia el sur, es decir, $g=0$, el ángulo de incidencia nos queda:

$$A = \cos^{-1}[\cos(L - s) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(L - s) * \sin(\delta)] \quad (3.3)$$

3.2.1.4 Radiación solar

Es la energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (ultravioleta, rayos X, luz visible, infrarroja, microondas y ondas de radio), en la *Ilustración 27* se puede observar el espectro luminoso.



Ilustración 27. Espectro luminoso.³⁸

Sabemos que el Sol radia en todas direcciones y parte de este flujo llega a la Tierra a través del espacio. Esta energía se emite en dos formas: radiación electromagnética y viento solar.

Radiación solar es el conjunto de radiaciones electromagnéticas que emite el Sol. El Sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 6000 °K, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar.

El Sol se comporta prácticamente como un cuerpo negro, el cual emite energía siguiendo la ley de Planck a la temperatura ya citada. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque las ondas ultravioletas más cortas son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia. Esta mide la energía que por

³⁸ <http://www.educ.ar/sitios/educar/recursos/ver?id=70828>



unidad de tiempo y área alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado)³⁹.

Existen diferentes tipos de radiación:

- **Radiación directa:** es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección.
- **Radiación difusa:** es parte de la radiación que atraviesa la atmósfera que es reflejada por las nubes o que puede ser absorbida por estas.

3.2.1.5 Radiación en las diferentes partes del mundo

Un aspecto importante dentro de la energía solar es observar la radiación en las diferentes partes que tenemos en nuestro planeta, los cuales varían por la geografía del lugar y las diferentes épocas que se tiene a lo largo de un año.

En el año tenemos 4 días que son especiales los cuales tienen un significado particular, estos son:

- **Equinoccio:** Aproximadamente se da el 21 de Marzo y el 21 de Septiembre, aquí el sol se encuentra directamente sobre la línea ecuatorial al medio día.
- **Solsticio:** es aproximadamente el 21 de Junio y 21 de Diciembre, en esta época el sol está directamente sobre el trópico de cáncer ($23.5^{\circ}N$) al medio día del 21 de Junio y directamente sobre el trópico de Capricornio ($23.5^{\circ}S$) el 21 de Diciembre.

3.2.2 Energía solar fotovoltaica

Para lograr tener este tipo de energía se emplea el principio del efecto fotoeléctrico, es decir, convierte la energía lumínica proveniente del Sol en energía eléctrica. Para lograr dicha conversión se emplean paneles solares o colectores solares, los cuales están conformados por pequeñas células que producen electricidad a partir de la luz que llega a incidir sobre ellas, es decir, de los fotones provenientes de la luz del Sol. Las células se pueden conectar en serie o paralelo dependiendo de la corriente o tensión que tienen que entregar para satisfacer la demanda.

³⁹ http://es.wikipedia.org/wiki/Radiación_solar

3.2.2.1 Parámetros fundamentales de la célula solar

- **Corriente de iluminación:** Es la corriente generada cuando incide la radiación solar sobre la célula.
- **Corriente de oscuridad:** Es debida a la recombinación de los pares electrón-hueco que se produce en el interior del semiconductor.
- **Tensión de circuito abierto:** Es la máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar, se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula.
- **Corriente de cortocircuito:** Máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados.

Cuando una célula solar está conectada a una carga, los valores de intensidad y tensión varían, por lo que la potencia máxima P_m entregada por la célula a la carga está en función de la tensión máxima V_m y de intensidad máxima I_m :

$$P_m = I_m V_m \quad (3.4)$$

3.2.2.2 Panel solar

El panel solar conocido también como módulo fotovoltaico se encuentra conformado por un conjunto de células como se observa en la *Ilustración 28*, las cuales están conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas en una estructura de soporte. En la salida de su conexión nos brinda una tensión continua, los valores típicos que entrega son 6V, 12V y 24V.

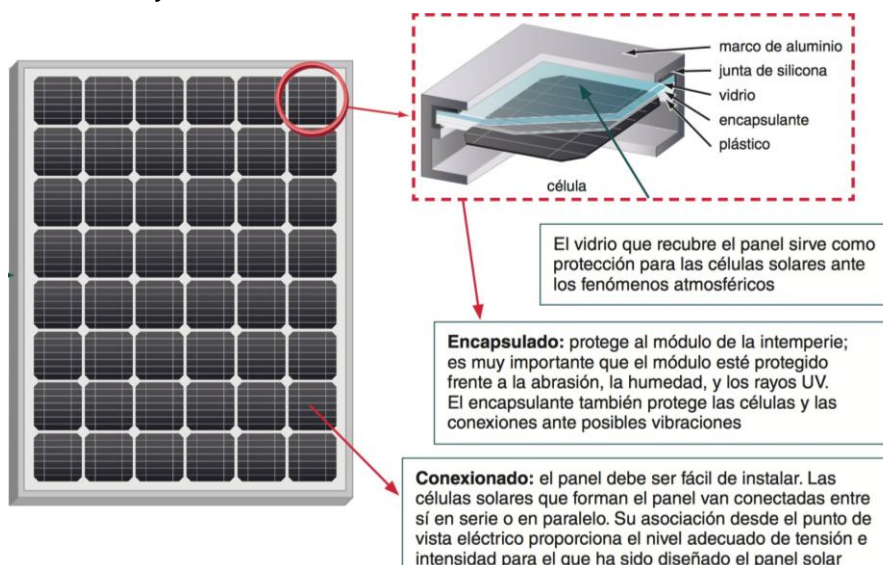


Ilustración 28. Panel Solar.⁴⁰

⁴⁰ <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

Existen diferentes tipos de paneles fotovoltaicos debido al material y tecnología que están construidas las células.

3.2.2.3 Rendimiento del panel

El funcionamiento de un panel solar depende directamente de los siguientes factores:

- Intensidad de la radiación luminosa
- Temperatura de las células solares

La corriente que puede generar un panel aumenta conforme se incremente la irradiación, y el voltaje tiende a permanecer constante como se puede observar en la *Ilustración 29*.

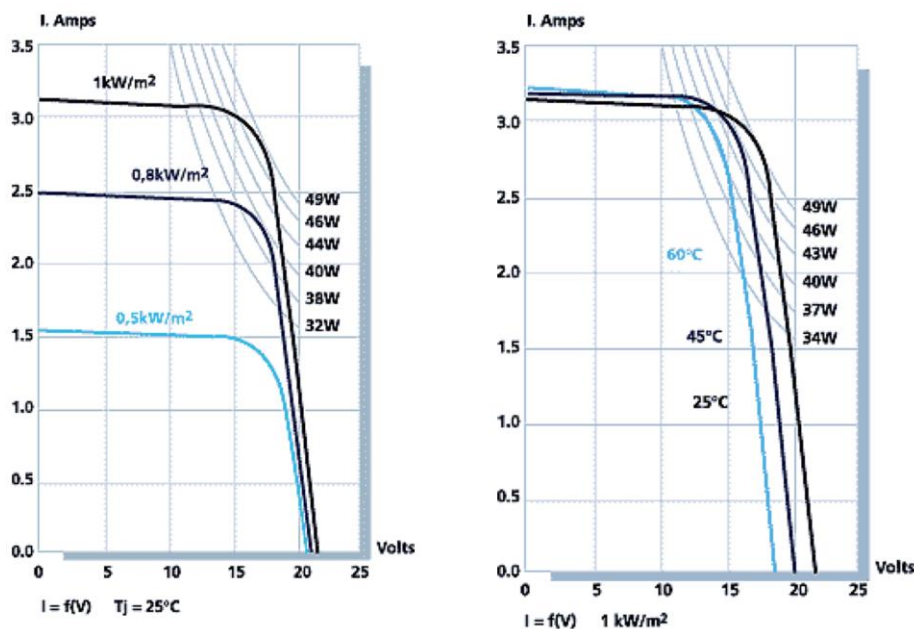


Ilustración 29. Variación de la corriente y tensión con la irradiación y la temperatura según la potencia nominal.⁴¹

Si se da un incremento de temperatura en las células solares se supone que tenemos un incremento en la corriente, pero hay que considerar que al mismo tiempo se va a tener una disminución mucho mayor en proporción de la tensión.

Los paneles fotovoltaicos logran generar electricidad aun en días nublados pero su rendimiento disminuye. Los paneles en el mercado actualmente llegan a tener una eficiencia alrededor del 10 al 20%.

⁴¹http://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/123456789/1383/IME_076.pdf?sequence=1

La curva característica que nos proporciona el fabricante de un módulo fotovoltaico es similar a la que se indica a continuación:

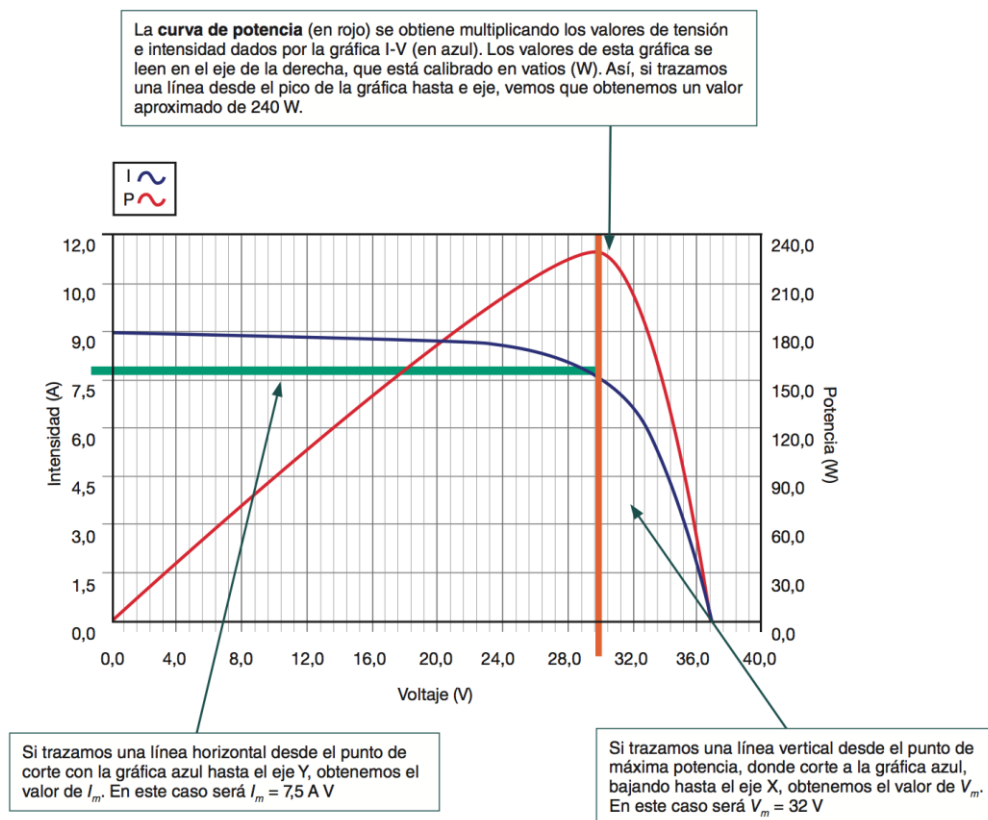


Ilustración 30. Curva característica de un panel fotovoltaico.⁴²

3.2.2.4 Almacenamiento (batería)

El efecto que tiene la variabilidad de la producción de electricidad por medio de un panel fotovoltaico, hace que se necesite un sistema de almacenamiento, a través de baterías que emplean la conversión de energía química en eléctrica para cubrir parte de la demanda cuando el panel no logre abastecer. La batería se recarga por medio de un regulador de carga que toma la energía del módulo FV y la entrega a la instalación. En una instalación fotovoltaica las baterías tienen como objetivo:

- Almacenar energía durante un determinado periodo de tiempo.
- Proporcionar una potencia instantánea elevada.
- Fijar la tensión a la cual trabaja la instalación.

Al comprar una batería se debe tener en cuenta la capacidad que esta tiene en amperios hora (Ah); ésta se calcula como el producto de la intensidad de descarga de la batería durante el tiempo en el cual está actuando, es decir $C = t \times I$. Otro de

⁴² <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>



los parámetros a considerar en la batería es la eficiencia de carga la cual se calcula en base a la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía que realmente esta almacenada, lo ideal es que este parámetro sea lo más cercano al 100%.

3.2.2.4.1 Tipos de baterías

Las baterías se clasifican principalmente en base al tipo de tecnología empleada y a los electrolitos. A continuación se muestra en la Tabla 7 los diferentes tipos de baterías que existen en la actualidad.

Tabla 7. Características de los principales tipos de baterías.⁴³

Tipo de batería	Tensión por vaso (V)	Tiempo de recarga	Autodescarga por mes	N.º de ciclos	Capacidad (por tamaño)	Precio
Plomo-ácido	2	8-16 horas	< 5 %	Medio	30-50 Wh/kg	Bajo
Ni-Cd (níquel-cadmio)	1,2	1 hora	20 %	Elevado	50-80 Wh/kg	Medio
Ni-Mh (níquel-metal hydride)	1,2	2-4 horas	20 %	Medio	60-120 Wh/kg	Medio
Li ion (ión litio)	3,6	2-4 horas	6 %	Medio - bajo	110-160 Wh/kg	Alto

En una instalación las baterías que mayor aplicación tiene son las de ácido-plomo por las características que presentan.

3.2.2.5 Regulación de carga

Para tener un funcionamiento adecuado de la micro-red, es necesario instalar un sistema de regulación de carga, el mismo que se encuentra ubicado entre la conexión de los paneles y la batería como se observa en la *Ilustración 31*, esto es con el fin evitar situaciones de sobre carga y sobre descarga de la batería.

El regulador se constituye en un elemento fundamental de un sistema autónomo ya que permite el tránsito de la corriente del panel hacia la batería y de la batería hacia la carga.

⁴³ <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

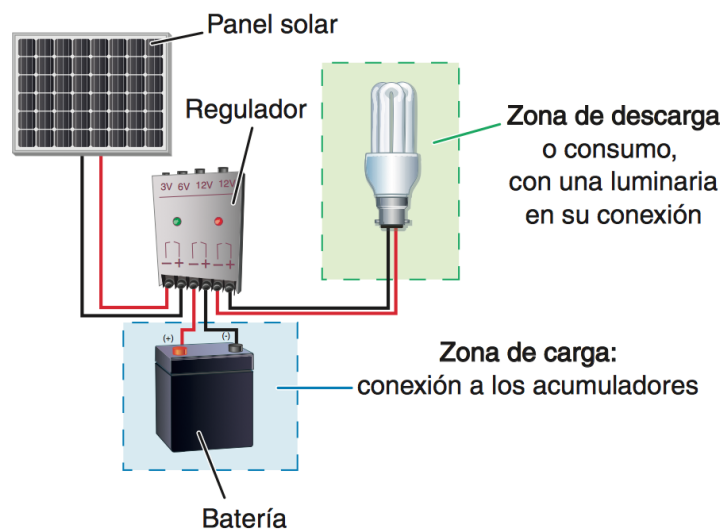


Ilustración 31. Conexión del regulador.

FUENTE: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

3.2.2.6 Inversor

Otro elemento importa es el inversor, este es encargado de convertir la forma de onda de tensión y corriente de CC a CA. Las características a considerar en un buen inversor son:

- Alta eficiencia
- Bajo consumo en vacío
- Alta fiabilidad
- Protección contra cortocircuitos
- Seguridad
- Buena regulación de la tensión y frecuencia de salida

También existen algunos inversores que funcionan como reguladores de carga para las baterías, en este caso ya no se incluye el regulador en la instalación.

3.2.2.7 Seguidores solares

En las secciones previas se menciona la posición y movimiento de la Tierra respecto del Sol, esto afecta a la superficie captadora ya que a lo largo del día los rayos del Sol no caen perpendicularmente a ella debido al movimiento de la Tierra, para tener



UNIVERSIDAD DE CUENCA

una eficiencia alta de los módulos FV se emplean seguidores solares, los cuales tiene como objetivo que los rayos del Sol incidan perpendicularmente a la superficie captadora.

Existen diferentes tipos de seguidores solares, estos son:

- **En dos ejes:** estos logran mantener siempre a la superficie captadora perpendicular al Sol y por ende incrementan la eficiencia del panel fotovoltaico, existen de dos tipos :
 - Monoposte: estos tienen un solo apoyo central.
 - Carrusel: estos cuentan con varios apoyos que se distribuyen a lo largo de una superficie circular.
- **Un eje polar:** la superficie captadora gira sobre un eje que se encuentra orientado hacia el sur y que está inclinado con un ángulo igual a la latitud del lugar. El giro que tiene la superficie se ajusta de tal manera que la normal a la superficie captadora coincida en todo instante con el meridiano terrestre que tiene el Sol. Estos tienen una velocidad de giro de 15° por cada hora, idéntica a la del reloj.
- **Un eje azimutal:** en este caso la superficie captadora va a girar sobre un eje vertical donde el ángulo de la superficie es constante con un valor igual a la latitud del lugar. La velocidad de giro es variable a lo largo del día. El giro que tiene la superficie captadora se ajusta de tal manera que la normal a dicha superficie coincida en todo instante con el meridiano local que contiene el Sol.
- **Un eje horizontal:** la superficie captadora de este seguidor solar gira sobre un eje horizontal con dirección norte-sur. El giro que tiene la superficie captadora se ajusta de tal manera que la normal a dicha superficie coincida en todo instante con el meridiano local que contiene el Sol.

Todos los elementos mencionados: panel, regulador, inversor, baterías; en conjunto forman una micro-red para generar energía eléctrica, el esquema general de una instalación autónoma se observa en la *Ilustración 32*.

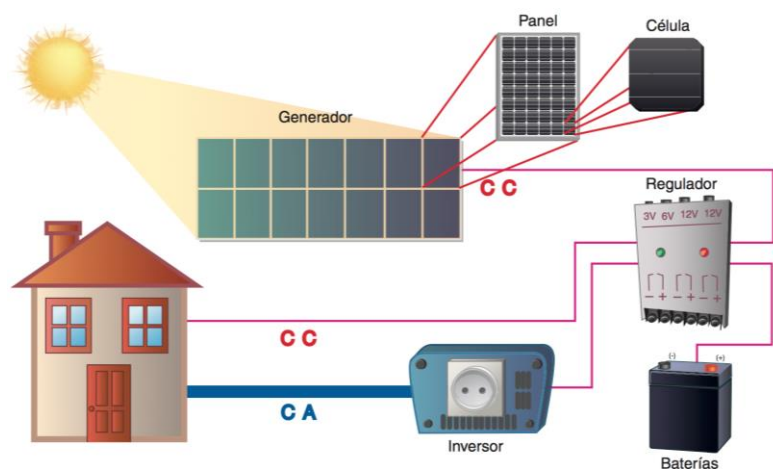


Ilustración 32. Micro-red autónoma con generación fotovoltaica.

FUENTE: <http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf>

3.2.3 Aspectos para la generación eólica

En la última década, el uso de la energía proveniente del viento ha tenido un rápido crecimiento entre las fuente de energía renovables no convencionales. A continuación se detallan los aspectos a considerar para generar energía eléctrica a través del viento.

3.2.3.1 Clasificación de los aerogeneradores

Los aerogeneradores se clasifican en base a distintos aspectos como: eje de giro, tamaño, aplicación y turbinas eólicas donde se considera el eje de giro del rotor. Las turbinas eólicas se clasifican en dos: de eje vertical y de eje horizontal.

3.2.3.2 Componentes del aerogenerador de pequeña potencia

A continuación se presenta los componentes de los actuales diseños de aerogeneradores a pequeña potencia que se encuentran en el mercado y que están siendo usados a nivel mundial. Los elementos son [1]:

- Rotor
- Sistema de regulación de potencia
- Sistema de frenado

- Sistema de orientación
- Generador eléctrico
- Control electrónico
- Torre soporte

Los elementos mencionados se exponen en la *Ilustración 33*.

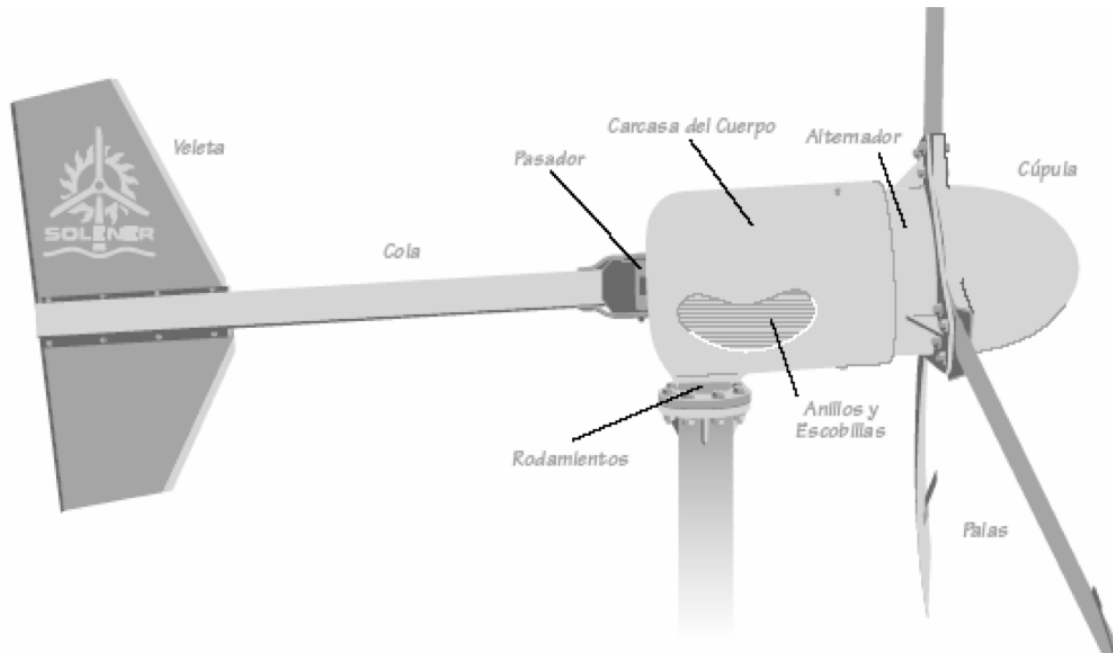


Ilustración 33. Elementos de un aerogenerador de pequeña potencia (micro aerogenerador).⁴⁴

3.2.3.3 Densidad del viento

Uno de los parámetros que afecta directamente a la producción de energía eléctrica a través de un micro aerogenerador, es la densidad del aire ρ , la cual depende directamente del emplazamiento de la máquina. Ésta varía dependiendo de la altura sobre el nivel del mar.

Es importante considerar la densidad del aire, debido que a mayor altura la densidad del aire disminuye, mientras que a menor altura mayor es la densidad del aire.

A continuación se muestra la *Tabla 8* de la densidad del aire en función de la altura.

⁴⁴ FUENTE: ONUDI

Tabla 8. Densidad del aire.

Altitud (m)	Temperatura (°C)	Presión (hPa)	Densidad (kg/m ³)
0	15.0	1013.2	1.225
100	14.3	1001.3	1.213
200	13.7	989.5	1.202
300	13.0	977.73	1.190
400	12.4	966.11	1.179
500	11.7	954.6	1.167
1000	8.5	898.7	1.112
2000	2.0	794.9	1.007
3000	-4.5	701.1	0.909
4000	-11.0	616.4	0.819
5000	-17.5	540.2	0.736

FUENTE: Atlas Eólico Ecuador MEER 2013, tomado de la página 8

3.2.3.4 Curva de potencia del aerogenerador

Un aerogenerador tiene diferentes características y una de las más importante con respecto a su caracterización energética, es la denominada curva de potencia, la cual es la relación que existe entre la potencia eléctrica suministrada en función de la velocidad de viento incidente. En base a esta curva podemos calcular la energía que logra suministrar el aerogenerador en el emplazamiento.

A continuación se muestra una curva típica de potencia que el fabricante nos entrega cuando se adquiere un aerogenerador.

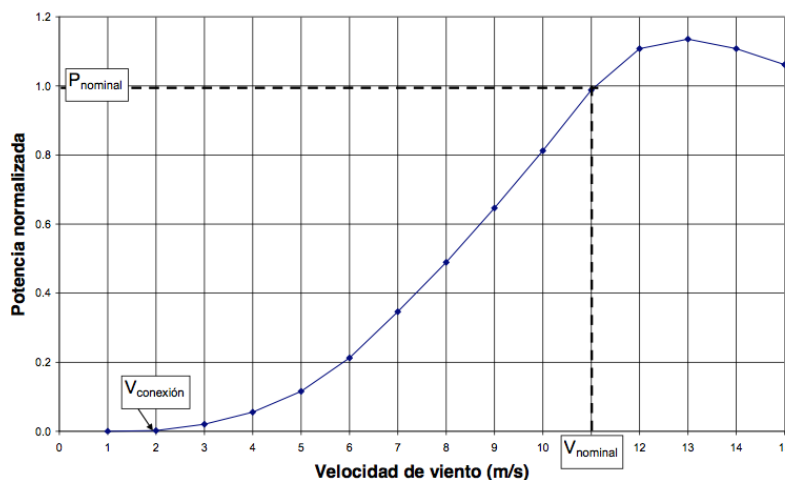


Ilustración 34. Curva de potencia de un aerogenerador.

FUENTE: ONUDI



Con respecto a la *Ilustración 34* podemos calcular algunos valores, tales como:

- **Velocidad de conexión o de arranque:** es el valor medio de la velocidad del viento, en función de esta velocidad el aerogenerador empieza a generar energía eléctrica.
- **Velocidad nominal:** se define como el valor medio de la velocidad del viento a la cual la turbina eólica llega a tener su potencia nominal. Cuando se tiene esta velocidad del viento los sistemas de control del aerogenerador van a tratar de mantener la potencia de salida de forma regulada.
- **Velocidad de corte o desconexión:** es el valor de la velocidad del viento a la cual el sistema de control que tiene la turbina realiza la desconexión ya que se tienen ráfagas de viento que superan la velocidad nominal a la cual funciona la turbina, a partir de la velocidad de corte el aerogenerador permanece parado y adopta una posición que lo protege de vientos fuertes que se logren producir.

3.2.3.5 Perfil vertical del viento

El perfil vertical del viento es la variación de la velocidad del viento horizontal con respecto a la altura sobre el suelo. Este es un parámetro a considerar dentro del recurso eólico, en los primeros metros de la atmósfera este depende de la estabilidad atmosférica, la rugosidad del terreno y la orografía.

Los terrenos que presentan orografía simple y en condiciones de estabilidad neutra, el perfil logarítmico proporciona una buena aproximación al perfil vertical, representado por la siguiente ecuación:

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (3.5)$$

Donde v_1 es la velocidad del viento a una altura h_1 , v_2 es la velocidad del viento con respecto a una altura h_2 y z_0 es la longitud de rugosidad. La rugosidad varía con el tipo de suelo que se tenga.

A continuación se presenta la *Tabla 9* donde se muestra una clasificación de clases de rugosidad orientativas:

Tabla 9. Clases y Longitudes de rugosidad.

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad z_0 (m)	Usos del suelo
0	0.0002	Superficie del agua en calma.
0.5	0.0024	Terreno abierto con superficie lisa: pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos.
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y cercados de hasta 8 m de altura separados por más de 1 km.
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y cercados de hasta 8 m de altura separados por aproximadamente 500 m.
2.5	0.2	Terreno agrícola con varios árboles, arbustos y plantas, o cercados de hasta 8 m de altura separados por aproximadamente 250 m.
3	0.4	Ciudades, villas, terreno agrícola con muchos cercados o muy altos, bosques.
3.5	0.6	Grandes ciudades con edificios altos
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

FUENTE: Atlas Eólico Ecuador MEER 2013, tomado de la página 8.

Se realiza la gráfica del perfil del viento, en la ecuación (3.5) se sustituye para diferentes clases de rugosidad, “suponiendo que a 10m la velocidad del viento es de 5.5 m/s, obtenemos diferentes perfiles verticales del viento, tal y como nos muestra la siguiente gráfica”⁴⁵.

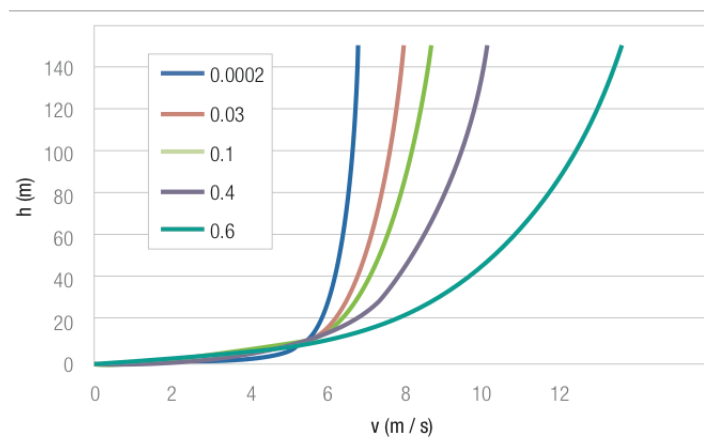


Ilustración 35. Perfil vertical del viento en función de la longitud de rugosidad. FUENTE: Atlas Eólico Ecuador 2013, tomado de la página 23.

La *Ilustración 36* nos muestra la rugosidad del terreno que tiene el Ecuador.

⁴⁵ Renovables, M. d. (2013). Atlas Eólico del Ecuador . 8.

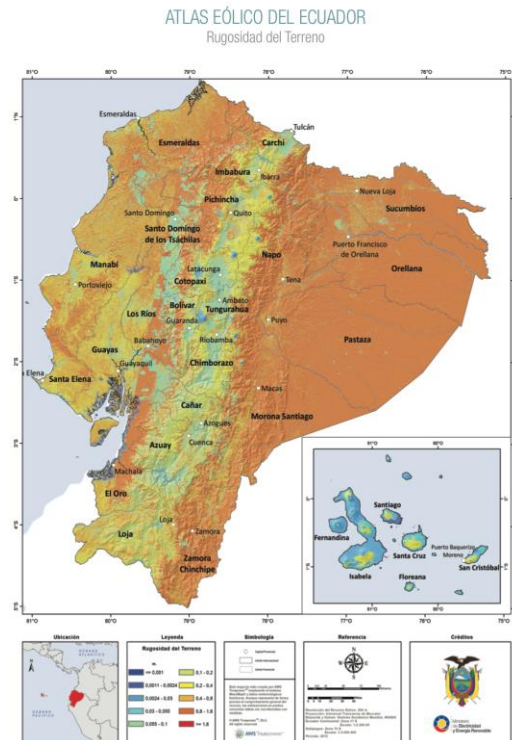


Ilustración 36. Rugosidad del Terreno del Ecuador.

FUENTE: Atlas Eólico Ecuador MEER 2013, tomado de la página 17.

3.2.4 Sistemas híbridos

3.2.4.1 Componentes de un sistema híbrido

Una configuración típica de un sistema híbrido se presenta en la siguiente ilustración.



Ilustración 37. Configuración típica de un sistema híbrido.⁴⁶

Los componentes que tiene un sistema híbrido son:

⁴⁶ www.industechrenovables.com



UNIVERSIDAD DE CUENCA

- Una o más unidades de generación de energías renovables: eólica, fotovoltaica.
- Sistema de almacenamiento, pueden ser: mecánico, hidráulico o electroquímico.
- Sistemas que permitan realizar el condicionamiento de la potencia, estos son: inversor, rectificadores y reguladores de carga.
- Sistema de regulación y de control.

3.2.4.2 Configuración de un sistema híbrido

Normalmente la capacidad instalada que se tiene de generación eólica o fotovoltaica por lo general no nos garantiza una cobertura total del consumo eléctrico que se tenga a lo largo de cierto periodo, esto es debido a razones económicas o puede ser por el hecho de que en el lugar del emplazamiento no se tiene las condiciones climáticas adecuadas.

Debemos tener claro que aun teniendo un buen dimensionamiento de las instalaciones, a lo largo del tiempo vamos a tener periodos donde el consumo va hacer mayor de lo habitual, esto es debido a que hay épocas en el año donde se tiene poca radiación o se va a tener velocidades del viento muy pequeñas, o se pueden presentar ocasiones donde se esté usando todas las cargas al mismo tiempo.

Un sistema híbrido se puede configurar de la siguiente manera [12]:

- Sistema fotovoltaico con grupos electrógenos
- Sistema fotovoltaico con sistemas eólicos
- Sistema fotovoltaico con sistemas eólicos y grupos electrógenos

3.2.4.2.1 Sistema fotovoltaico con grupos electrógenos

Este tipo de sistema no hace uso exclusivo de fuentes renovables si no que emplea un grupo generador, con esto podemos generar energía eléctrica en cualquier instante y lugar donde se requiera el servicio eléctrico.

Este sistema básicamente fue diseñado para que se utilice cuando se tenga déficit en una instalación diseñada con un sistema fotovoltaico.

Esta configuración se observa en la siguiente figura.

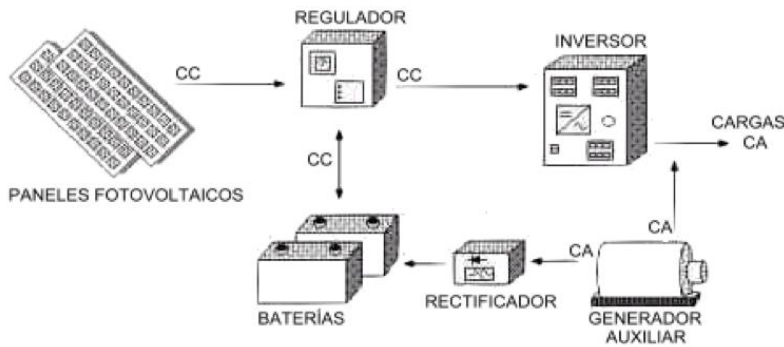


Ilustración 38. Configuración de un sistema fotovoltaico con grupo electrógeno.

FUENTE: www.saecsaenergiasolar.com

3.2.4.2.2 Sistema fotovoltaico con sistemas eólicos

Este tipo de instalación se tiene cuando hay presencia de viento y un buen nivel de radiación. No se pueden ubicar en cualquier lugar, previo a esto se debe tener un buen conocimiento sobre el potencial eólico y solar del emplazamiento.

Este sistema está conformado por un aerogenerador, el cual a través del regulador de carga inyecta la energía producida a las baterías. Se tiene en paralelo uno o varios paneles fotovoltaicos y por medio de su regulador de carga van conectados a las baterías. En este caso el regulador de carga va hacer especial ya que no se tiene un sistema puramente fotovoltaico o eólico, a continuación se presenta una ilustración en la cual se puede observar los componentes de esta configuración.

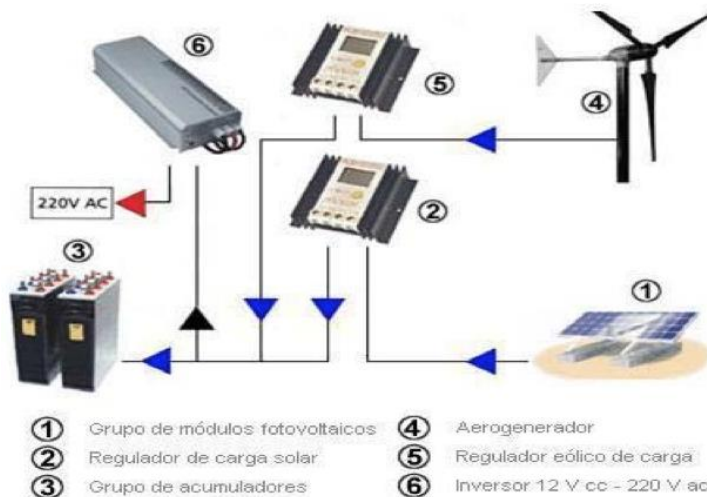


Ilustración 39. Configuración de un sistema fotovoltaico-eólico.

FUENTE: www.electricasas.com

3.2.4.2.3 Sistema fotovoltaico con sistemas eólicos y grupos electrógenos

Este tipo de configuración es básicamente la misma que la anterior con la diferencia que aquí se incrementa en paralelo un grupo de generación de emergencia electrógeno con un motor que puede ser a gasolina o diésel, estos por medio de un rectificador se conectan a las baterías con el fin de que se puedan cargar.

Aquí los dispositivos de generación son: el aerogenerador, los paneles fotovoltaicos y el grupo electrógeno, están conectados en paralelo al regulador de carga, el grupo electrógeno tiene la opción de poder ser conectado directamente a la carga, a continuación se muestra una ilustración donde se puede observar esta configuración.

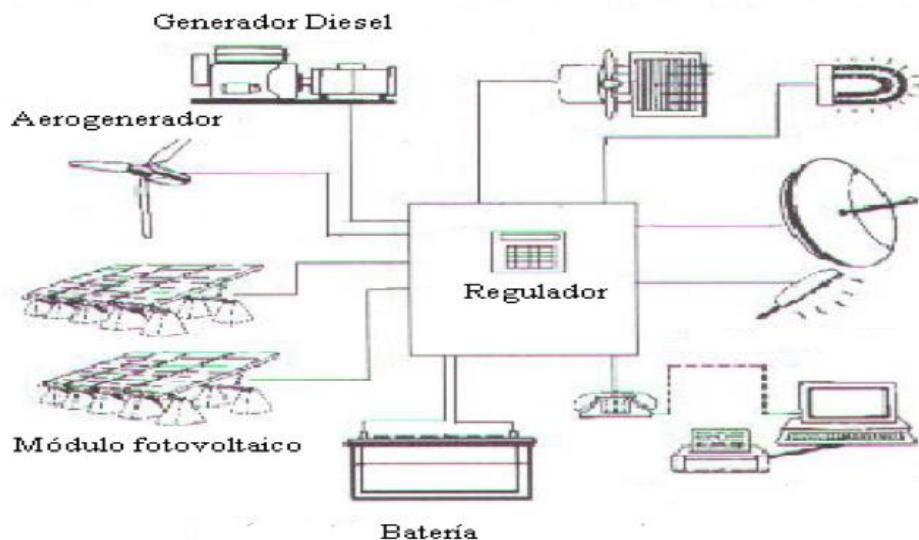


Ilustración 40. Configuración de un sistema fotovoltaico-eólico y grupo electrógeno.⁴⁷

3.2.4.3 Análisis de los factores que influyen en un sistema híbrido

Para tener una idea clara de los factores que afectan a un sistema híbrido de generación se presenta la siguiente figura.

⁴⁷ www.eurotecam.com

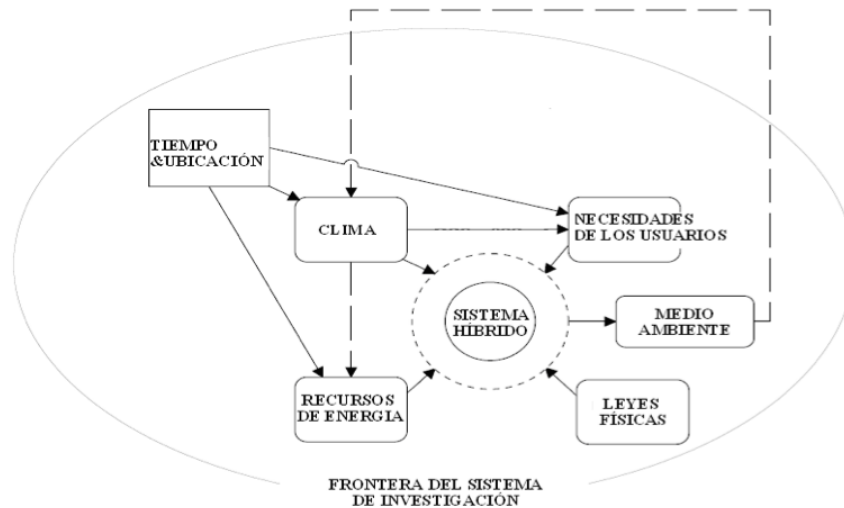


Ilustración 41. Factores que afectan a un sistema híbrido de generación.⁴⁸

Los aspectos importantes que se tienen son:

- Las necesidades y requerimientos que el usuario final requiera
- Condiciones atmosféricas
- Recursos energéticos
- Las leyes físicas que están presente en la naturaleza
- El medio ambiente

Todos los aspectos que se mencionó se los considera como procesos externos, en la figura anterior, estos están señalados por los cuadrados con las esquinas redondeadas.

Sin duda que el punto inicial para cualquier análisis sobre energías renovables, es tener información sobre la ubicación en términos de latitud, altitud y longitud de donde se instalara el sistema.

⁴⁸ Phd Ulleberg, Oystein (1998). Stan-alone Power Systems for the Future



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO IV

MODELOS MATEMÁTICOS



4. MODELOS MATEMÁTICOS

Debido al crecimiento de los usos finales de la electricidad, tener un adecuado manejo de la demanda y oferta de energía con respecto a las variaciones en el tiempo, se ha convertido en un aspecto importante presentando un mayor interés en el sector residencial. El poder anticipar el comportamiento de la demanda y oferta es de gran interés, aquello lo podemos lograr a través de modelos matemáticos.

El poder predecir el comportamiento de la demanda implica tener un mejor conocimiento sobre la curva de carga de la demanda de energía de los hogares.

El desarrollo de nuevas herramientas nos permite predecir el comportamiento de un sistema que se requiera analizar, aquello se obtiene a través de la construcción de un modelo matemático, en él cuál se realiza la simulación del sistema con el fin de entender y poder predecir el comportamiento de este en el tiempo.

Un modelo matemático nos permite obtener soluciones que pueden ser expresados en términos matemáticos, dichas soluciones dependerán de la metodología que se emplee, actualmente existen diferentes técnicas para lograr desarrollar un modelo matemático y dependiendo de esto se va a tener resultados con un mayor o menor grado de error, debido a que algunas metodologías emplean datos de entrada más detallados y realizan restricciones más finas, con lo cual el resultado que se obtiene va a presentar un menor grado de incertidumbre con respecto a otras metodologías que no plantean un análisis profundo en los datos de entrada.

En otros términos podemos decir que un modelo es la traducción de la realidad física de un sistema en términos matemáticos. Las expresiones matemáticas del modelo deben representar las relaciones que existen entre los diferentes objetos que intervienen. Así una vez que un problema sea planteado o traducido como un modelo matemático se puede aplicar el cálculo para deducir el comportamiento del sistema bajo estudio.

4.1 CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

Anteriormente se mencionó que existen diferentes métodos para establecer un modelo matemático, los cuales dependiendo de la información que se emplee como entrada para construir el modelo se clasifican en, modelos heurísticos y empíricos.



- **Modelos Heurísticos:** (del griego euriskein 'hallar, inventar'), son aquellos que explican las causas o mecanismos naturales que dan lugar al fenómeno que se está estudiando.
- **Modelos Empíricos:** (del griego empeirikos relativo a la 'experiencia'), son aquellos que emplean observaciones directas o se basan de los resultados de los experimentos del fenómeno estudiado.

Además de esta clasificación se tiene también una posible clasificación dependiendo si se desea hacer predicciones de tipo cualitativo o se pretende cuantificar ciertos aspectos de lo que se está modelando.

- **Modelos cualitativos:** estos pueden ser por medio de gráficos, figuras en general, que logren predecir si el sistema se comporta en un sentido u otro.
- **Modelos cuantitativos:** estos emplean números para representar aspectos del sistema modelado.

Una siguiente clasificación se realiza en base a que si una entrada del sistema puede tener una o varias salidas, se puede clasificar en:

- **Determinista:** se conoce la forma del resultado debido a que no se presenta incertidumbre. Los datos de entra son completamente conocidos.
- **Estocástico:** estos son probabilísticos, es decir no se conoce el resultado, por lo tanto existe incertidumbre.

4.2 MODELOS DE CURVAS DE CARGAS RESIDENCIALES

Para desarrollar modelos que nos permitan predecir el comportamiento de algún sistema que se desee estudiar, en nuestro caso una micro-red, necesitamos información como la curva de carga que presenta nuestra micro-red, es por ello que en la presente sección se estudian los modelos de curva desarrollados hasta la actualidad.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

El comportamiento de las personas tiene una gran influencia en la demanda de energía residencial esto fácilmente se puede explicar a través del siguiente ejemplo, dos hogares con igual consumo de energía diaria no van a tener la misma curva de carga debido a que los elementos que consumen energía no van a ser los mismos y no son encendidos en ambas viviendas al mismo tiempo.

Revisando la literatura encontramos que se han desarrollado varios modelos, un documento presentado por la revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews* en [4] nos presenta cinco tipos de modelos, los cuales se describen a continuación:

- **Modelo determinista desagregación estadística:** este enfoque consiste en desagregar los perfiles de carga medidos para identificar diversos aparatos. La diversidad no se modela en absoluto, ya que está integrado, de forma determinista, en los datos medidos.
- **Modelo aleatorio estadístico:** en este modelo, la reconstitución de la diversidad hace uso de los datos estadísticos.
- **Modelo empírico probabilístico:** concerniente a la información real recolectada, hábitos domésticos de las personas, procedimientos probabilísticos se definen y aplican para generar una diversidad de resultados.
- **Modelo basado en el tiempo de uso:** la diversidad se construye gracias a los datos provenientes de las encuestas de uso del tiempo (datos reales y precisos sobre el comportamiento de las personas).
- **Modelo de ingeniería estadística:** en este caso, la diversidad está integrada en parte en los datos de medición que sirven de entrada (características de la vivienda, datos meteorológicos, las tasas de penetración, etc.) Además de eso, la diversidad está incrustado en los coeficientes estadísticos que ajustan los resultados originales. Estos coeficientes se calculan con la ayuda de las curvas de carga medidas y datos socioeconómicos.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO V

MODELO DE LA OFERTA (GENERACIÓN)



5 MODELACIÓN DE LA OFERTA DE LA MICRO-RED

La micro-red en estudio es un sistema híbrido, conformado por generación solar (módulos FV) y eólica (un micro aerogenerador). El sistema estará conectado a la red de distribución para consumir energía de ahí cuando no se satisfaga la demanda. En la actualidad existe una variedad de métodos para el dimensionamiento de sistemas híbridos, en este trabajo se presenta una metodología sencilla que permita obtener buenos resultados.

Los pasos a seguir en el dimensionamiento del sistema de generación son:

- Estimación de radiación incidente.
- Dimensionamiento del subsistema generador: paneles fotovoltaicos.
- Dimensionamiento del sistema de acumulación.
- Dimensionamiento del regulador.
- Dimensionamiento del inversor.
- Dimensionamiento del micro-aerogenerador.

5.1 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

En el modelo de oferta con paneles fotovoltaicos se toma en consideración aspectos como: la radiación, la posición del Sol, la inclinación de la Tierra, inclinación de la superficie captadora, día del año, nubosidad, hora local, latitud, entre otros, los cuales se describieron en el capítulo 3

La generación de energía solar fotovoltaico está estrechamente relacionada con la cantidad de radiación solar que llega a un punto o zona (ciudad de Cuenca) en cualquier instante dado.

La generación a través de paneles fotovoltaicos depende de la posición del Sol como se indica en la siguiente ilustración.

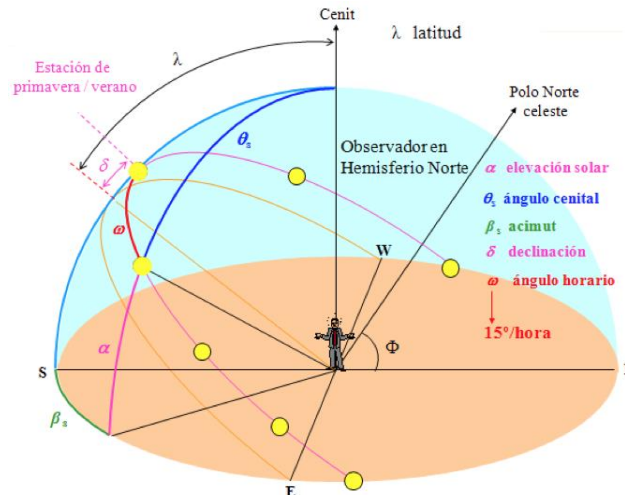


Ilustración 42. Gráfica de los ángulos que definen la posición del Sol.
FUENTE: Alfonso Calero Belmonte y Antonio J. Barbero

Donde:

- El ángulo horario (ω) es la distancia angular entre el meridiano del observador y el meridiano que contiene al Sol.
- Radiación directa $B_d(0)$
- Radiación difusa $D_d(0)$
- Radiación global $G_d(0)$

La metodología propuesta parte del modelo ya establecido de la radiación [13], se construye con los datos previamente obtenidos del modelo de radiación y datos de placa del módulo FV seleccionado, con estos datos se construye la curva de oferta que va a presentar el modelo de generación con módulos FV de la micro-red.

La literatura nos dice que la interacción entre el Sol y la Tierra es un proceso completamente determinista y que ha sido muy bien estudiado [13], es por ello que para el desarrollo del presente estudio se utiliza un modelo ya establecido en [13] y [14].

Con el fin de lograr captar la mayor energía proveniente del Sol en el sistema fotovoltaico, se plantean tres modelos para la estimación de radiación solar: radiación solar para una superficie fija, radiación solar para un seguidor con un eje, radiación solar para una superficie que es rastreada con dos ejes. Estos indican que cantidad de radiación se obtendrá en una superficie captadora, cada uno presenta diferentes eficiencias y cualquiera de los tres se puede aplicar en una micro-red. El uso de uno de los tres sistemas descritos dependerá de la capacidad económica que el usuario



disponga, ya que el uso de un sistema que tenga mayor eficiencia nos representa una mayor inversión, el desarrollo de los tres modelos se indica a continuación.

5.1.1 Radiación solar para una superficie fija

El modelo permite obtener el valor de la radiación solar a ser transformada en energía eléctrica. La formulación de este método parte de la radiación extraterrestre que se indica a continuación:

La energía que proviene del Sol antes de atravesar la superficie terrestre se denomina radiación extraterrestre diaria I_d^0 , la ecuación se muestra a continuación [13]:

$$I_d^0 = \frac{24}{\pi} I \varepsilon_0 (\cos \delta_d * \cos \phi * \sin \omega_s + \omega_s * \sin \delta_d * \sin \phi) \quad (5.1)$$

Donde:

$$I_d^0 = \text{Radiación extraterrestre diaria } \left[\frac{kWh}{m^2} \right]$$

ε_0 = Factor corrector

δ_d = Declinación [grados]

ϕ = Latitud [grados]

ω_s = Ángulo solar al amanecer [grados]

En la ecuación de la radiación extraterrestre diaria está involucrada la irradiancia que alcanza la tierra I .

La irradiancia I viene en (W/m^2), en un lugar específico se determina por:

$$I(\text{día, hora}) = I_{sc} \cdot Exc_d [\sin \delta_d \sin \phi + \cos \delta_d \cos \phi \cos \alpha_h] \quad (5.2)$$

Donde:

$$I_{sc} = \text{es la constante solar } 1367 \text{ W/m}^2$$

Demostración de la constante solar:

- La irradiación se ve influenciada directamente por la ley de Stefan-Boltzman, la cual relaciona la irradiación emitida por un cuerpo en función de su temperatura.

$$M = \sigma T^4 \quad \text{Ecuación de Stefan-Boltzman} \quad (5.3)$$

Donde:

M = Densidad total de flujo radiante emitida por cuerpo en (W/m^2)

σ = Constante de Stefan-Boltzman $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$



T^4 = Temperatura del cuerpo en (k)

Con esta ley se puede calcular la irradiación solar que llega a la Tierra, considerando un área de 1 m².

Tenemos como datos:

Radio del Sol: $r_s = 695500Km$

Distancia Sol-Tierra: $d_{s-t} = 149597870Km$

Temperatura en la superficie del Sol: 5780 °K

Con esto tenemos:

$$M_{sol} = 5,76 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 k^4} \right] * 5780^4 k^4 \quad (5.4)$$

$$M_{sol} = 63,28 \frac{MW}{m^2}$$

En base a la ley de la conservación de la energía se tiene que, la irradiación en la superficie del Sol es igual a la irradiación de la órbita de la Tierra, por lo tanto:

$$M_{sol} * A_{sol} = M_{tierra} * A_{Sol-Tierra} \quad (5.5)$$

Despejamos M_{sol} de la ecuación (5.4) y tenemos:

$$M_{Tierra} = \frac{M_{Sol} * \pi * r_s^2}{\pi * d_{s-t}^2} \quad (5.6)$$

Remplazando los valores se obtiene:

$$M_{Tierra} = \frac{63,28 \left[\frac{W}{m^2} \right] * (695,5 \times 10^6 [m])^2}{(149,6 \times 10^9 [m])^2}$$

$$M_{Tierra} = I_{sc} = 1367 W/m^2$$

La constante solar I_{sc} representa la cantidad de energía proveniente del Sol que llega por unidad de tiempo y de superficie a un área perpendicular a los rayos del Sol para la distancia media del Sol a la Tierra.

$$Exc_d = 1 + 0.033 \left(\frac{2\pi d}{365} \right) \quad (5.7)$$

En la ecuación (5.2) “ Exc_d ” representa la excentricidad de la órbita terrestre y “ d ” es el número del día perteneciente al año que se esté considerando.

$$\delta_d = 23.24 \left(\frac{\pi}{180} \right) \sin \left(\frac{2\pi(d+284)}{365.25} \right) \quad (5.8)$$

δ_d es conocido como la declinación, la cual es el ángulo que forma la línea que une los centros de la Tierra y el Sol con el plano ecuatorial [14].

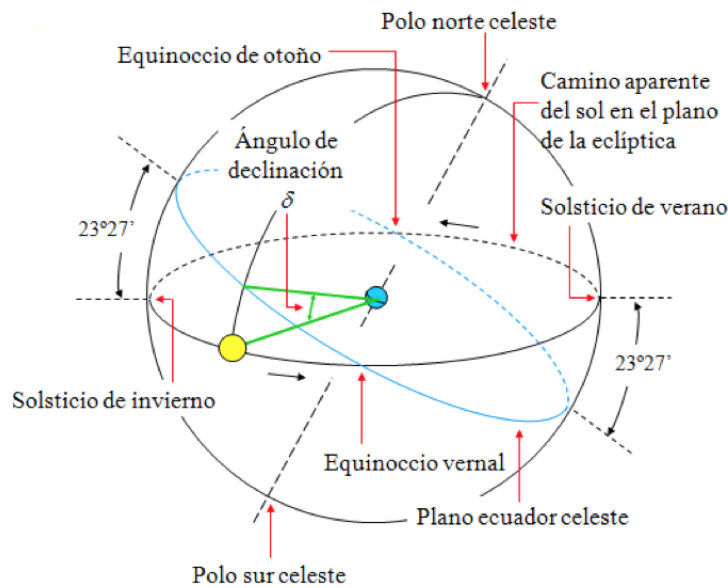


Ilustración 43. Representación de la declinación.
FUENTE: Alfonso Calero Belmonte y Antonio J. Barbero.

En la ecuación (5.2) ϕ representa la latitud geográfica donde esta ubicada la instalación, este es un dato de entrada del modelo.

$$\alpha_h = \frac{15\pi}{180} (H_{solar} - 12) \quad (5.9)$$

α_h es el ángulo horario del lugar considerado, donde la hora solar (H_{solar}) exacta de un lugar es función de la hora local y de la corrección solar.

$$H_{solar} = H_{local} + \frac{1}{60} E_t \quad (5.10)$$



E_t es conocida como la ecuación del tiempo, representa por:

$$E_t = 229.18[0.000075 + 0.0187 \cos(\alpha_d) - 0.032 \sin(\alpha_d) - 0.015 \cos(2\alpha_d) - 0.041 \sin(2\alpha_d)] \quad (5.11)$$

De la ecuación (5.11) tenemos que α_d es igual a:

$$\alpha_d = 2\pi \left(\frac{d-1}{365} \right) \quad (5.12)$$

La irradiancia diaria se tiene dependiendo de la hora y la inclinación del panel. Tiene un valor constante de 1353.05 W/m² si se aplica para periodos mensuales, mientras que si se estudia para las diferentes horas de radiación que se tiene en un día esta variará.

El factor corrector ε_0 de la ecuación (5.1) viene asociado a la geometría elíptica que tiene la Tierra, este valor afecta para evaluaciones diarias pero si se va a realizar estimaciones mensuales se considera igual a 1.

La lucidez que tiene la atmósfera es empleado en nuestro estudio, se conoce como el índice de claridad o nubosidad k_t :

$$k_t = \frac{G_0(0)}{I_d^0} \quad (5.13)$$

Donde:

k_t = Índice de claridad

I_d^0 = Radiación Extraterrestre $\left[\frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$

$G_0(0)$ = Radiación global $\left[\frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$

Luego de calcular el índice de nubosidad o claridad k_t y haciendo uso de las correlaciones de Lui-Jordan, podemos calcular el valor que tiene el índice de claridad difuso k_d [14].

$$k_d = 1,139 - 4,07 * k_t + 5,531 * k_t^2 - 3,108 * k_t^3 \quad (5.14)$$

Existen diferentes tipos de radiación a considerar para el dimensionamiento de los paneles fotovoltaicos, estas son radiación directa (Bd), difusa (Dd) y la global (Gd) que es la suma de la directa y difusa.



Para calcular la radiación difusa, se tiene [13].

$$D_d(0) = k_d * G_d(0) \quad (5.15)$$

Donde:

$$D_d(0) = \text{Radiación difusa} \left[\frac{kWh}{m^2_día} \right]$$

$$k_d = \text{Índice de claridad difuso}$$

$$G_d(0) = \text{Radiación global} \left[\frac{kWh}{m^2_día} \right]$$

La radiación global incidente sobre una superficie horizontal viene dada por la suma de la componente directa $B_d(0)$ y difusa $D_d(0)$, con esto se calcula la componente directa [14].

$$B_d(0) = G_d(0) - D_d(0) \quad (5.16)$$

El siguiente paso es calcular la radiación incidente para las distintas inclinaciones, esto es con el objetivo de hallar la óptima del presente estudio.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \delta_d * \tan(\varnothing + \varphi)) \quad (5.17)$$

Donde:

$$\omega_s = \text{Ángulo solar [grados]}$$

$$\varphi = \text{Inclinación de la superficie [grados]}$$

Se calcula el factor R_b que es igual a la relación entre la componente directa de la radiación solar sobre una superficie inclinada y la radiación directa sobre una superficie horizontal.

$$R_b = \frac{\omega_{SS} * \sin \delta_d * \sin(\varnothing + \varphi) + \cos \delta_d * \cos(\varnothing + \varphi) * \sin \omega_{SS}}{\omega_S * \sin \delta_d * \sin \varnothing + \cos \delta_d * \cos \varnothing * \sin \omega_S} \quad (5.18)$$

Donde:

$$\omega_{SS} = \text{Ángulo solar}, \omega_{SS} = \text{MIN} [\omega_S; \omega_{SS}]$$

El módulo FV aprovecha toda la radiación que llegue a él y una de ellas es la que se logra reflejar a través de alguna superficie hacia el modulo.

La irradiancia de albedo o reflejada es la cantidad de radiación que se refleja en el suelo y por ende esta depende de la irradiancia horizontal y de un coeficiente de reflectividad $\rho = 0.5$.



La ecuación que da el valor de la radiación sobre una superficie inclinada es [14]:

$$G(\varphi) = B_d(0) * R_b + D_d(0) * \left(\frac{1+\cos\varphi}{2}\right) + \rho * G_d(0) * \left(\frac{1-\cos\varphi}{2}\right) \quad (5.19)$$

Donde:

$G(\varphi)$ =Radiación sobre una superficie inclinada $\left[\frac{kWh}{m^2_día}\right]$

$B_d(0)$ = Radiación directa $\left[\frac{kWh}{m^2_día}\right]$

$D_d(0)$ = Radiación difusa $\left[\frac{kWh}{m^2_día}\right]$

$G_d(0)$ = Radiación global $\left[\frac{kWh}{m^2_día}\right]$

φ = Inclinación de la superficie [grados]

A continuación se calcula la radiación aplicando el método de radiación solar para una superficie fija, el análisis se lleva a cabo para un periodo de un año.

Para cada día del año se tendrá valores diferentes de radiación, sin embargo no es necesario efectuar los cálculos para todos los días ya que para cada mes existe un día característico que se toma como referencia para los cálculos, estos días se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 10. Días característicos de año [13].⁴⁹

MES	DÍA DEL AÑO 2014	FECHA DEL AÑO
Enero	15	Enero 15
Febrero	48	Febrero 17
Marzo	79	Marzo 20
Abril	105	Abril 15
Mayo	135	Mayo 15
Junio	166	Junio 15
Julio	196	Julio 15
Agosto	227	Agosto 15
Septiembre	258	Septiembre 15
Octubre	288	Octubre 15
Noviembre	319	Noviembre 15
Diciembre	346	Diciembre 12

⁴⁹ REALIZADO: Autores



En función de la *Tabla 10* tenemos el valor d para cada mes, con esto se calcula la radiación directa y difusa para una superficie horizontal, los resultados de cada parámetro se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 11. Radiación directa y difusa para una superficie horizontal.⁵⁰

RADIACIÓN DIRECTA Y DIFUSA PARA UNA SUPERFICIE HORIZONTAL [kWh/m ² _día]									
	$G_n(\theta)$	d	δ_d	ω	Bo	kt	kd	$D_d(0)$	$B_d(0)$
Enero	4.58	15	-21.1133	89.0185	9.3753	0.48851	0.3593	1.6458	2.9341
Febrero	4.58	48	-12.5797	89.4328	9.9222	0.46158	0.3841	1.7592	2.8207
Marzo	4.56	79	-0.8992	89.9601	10.3138	0.44212	0.4031	1.8382	2.7217
Abril	4.28	105	9.2329	90.4131	10.3083	0.41519	0.4311	1.8454	2.4345
Mayo	4.25	135	18.5547	90.8531	10.0196	0.42416	0.4215	1.7917	2.4582
Junio	3.92	166	23.0920	91.0837	9.7829	0.40069	0.4472	1.7532	2.1667
Julio	4.22	196	21.3765	90.9949	9.8797	0.42713	0.4184	1.7658	2.4541
Agosto	4.39	227	13.7730	90.6230	10.2013	0.43033	0.4151	1.8224	2.5675
Septiembr	4.39	258	2.34473	90.1040	10.3471	0.42426	0.4214	1.8502	2.5397
Octubre	4.78	288	-9.37031	89.5805	10.0717	0.47459	0.3719	1.7779	3.0020
Noviembr	5.06	319	-18.8805	89.1307	9.53905	0.53045	0.3234	1.6367	3.4232
Diciembre	4.97	346	-22.9503	88.9236	9.23007	0.53845	0.3169	1.5749	3.3950

Se calcula la radiación sobre una superficie para diferentes ángulos de inclinación aplicando la ecuación (5.19) en función de la *Tabla 11*, esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 12. Radiación sobre una superficie para diferentes ángulos de inclinación.

RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE INCLINACIÓN												
	Rb	$G(\varphi) = 0$	$G(\varphi) = 5$	$G(\varphi) = 10$	$G(\varphi) = 15$	$G(\varphi) = 20$	$G(\varphi) = 25$	$G(\varphi) = 30$	$G(\varphi) = 35$	$G(\varphi) = 40$	$G(\varphi) = 45$	$G(\varphi) = 50$
Ener	0.93	4.39	4.302	4.149	4.160	4.319	4.398	4.284	4.140	4.172	4.335	4.394
Feb	0.96	4.47	4.333	4.116	4.132	4.357	4.469	4.308	4.104	4.150	4.379	4.464
Marz	0.99	4.53	4.364	4.100	4.119	4.394	4.531	4.334	4.085	4.141	4.421	4.525

⁵⁰ REALIZADO: Autores



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Abril	1.01	4.31	4.114	3.799	3.821	4.149	4.312	4.077	3.780	3.847	4.182	4.305
May	1.03	4.34	4.157	3.867	3.888	4.189	4.340	4.124	3.850	3.912	4.220	4.333
Junio	1.04	4.02	3.821	3.497	3.520	3.857	4.025	3.783	3.478	3.546	3.890	4.017
Julio	1.04	4.33	4.151	3.871	3.891	4.182	4.328	4.119	3.855	3.914	4.212	4.322
Ago	1.02	4.45	4.274	3.991	4.011	4.306	4.453	4.242	3.974	4.034	4.335	4.446
Sept	0.99	4.38	4.193	3.894	3.915	4.226	4.382	4.159	3.877	3.940	4.258	4.375
Oct	0.96	4.68	4.565	4.372	4.385	4.586	4.687	4.543	4.361	4.401	4.606	4.825
Nov	0.94	4.87	4.828	4.761	4.766	4.835	4.870	4.820	4.757	4.771	4.842	4.868
Dic	0.93	4.74	4.713	4.665	4.669	4.718	4.742	4.707	4.663	4.673	4.723	4.741

En base a la *Tabla 12*, se calcula el total de radiación anual para inclinaciones de 5⁰ y 10⁰ ya que se obtiene un mayor número de radiación con estos ángulos.

Tabla 13. Radiación anual para inclinaciones de 5 y 10 grados.⁵¹

	$G(\varphi) = 5$	$G(\varphi) = 10$	Total por cada mes con $G(\varphi) = 5$	Total por cada mes con $G(\varphi) = 10$
Enero	4.302166137	4.149540054	137.6693164	128.6357417
Febrero	4.333207182	4.116912811	121.3298011	115.2735587
Marzo	4.364843632	4.100888124	135.3101526	127.1275318
Abril	4.114165473	3.799006034	123.4249642	113.970181
Mayo	4.157708924	3.867644698	128.8889767	119.8969856
Junio	3.821160589	3.497119095	114.6348177	104.9135729
Julio	4.151800126	3.871183148	128.7058039	120.0066776
Agosto	4.274748072	3.991028381	132.5171902	123.7218798
Septiembre	4.19376367	3.894415062	125.8129101	116.8324519
Octubre	4.565344406	4.372243998	141.5256766	135.5395639
Noviembre	4.828287419	4.761603935	144.8486226	142.848118
Diciembre	4.713137124	4.665983603	146.1072508	144.6454917
TOTAL ANNUAL [kWh/m ² _día]	1580.775483	1493.411755		

⁵¹ REALIZADO: Autores



Con un ángulo de 5° se obtiene una radiación anual de $1580.77 \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$ mientras que con una inclinación de 10° la radiación anual va hacer $1493.411 \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$, la diferencia que existe de radiación anual entre los ángulos es de $87.36 \left[\frac{kWh}{m^2 \cdot día} \right]$.

La inclinación que debemos escoger es de 5° , debido a que se obtiene mayor radiación, a continuación se presenta una ilustración de la radiación solar para una superficie inclinada con diferentes ángulos.

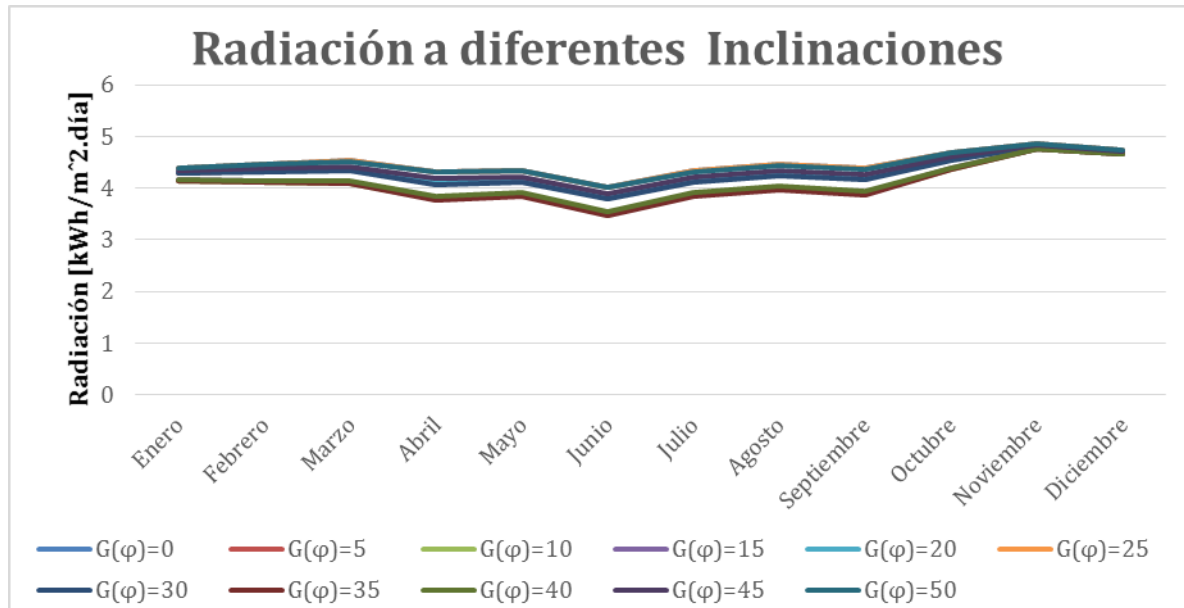


Ilustración 44. Radiación para una superficie inclinada a diferentes ángulos.⁵²

5.1.2 Radiación solar para un seguidor con un eje

El segundo método calcula la radiación solar que se obtiene cuando se sigue el movimiento del Sol en un día por medio de una superficie captadora. La superficie que se encarga de captar el Sol realizará un movimiento de este a oeste, es decir siguiendo el azimut. Aquello busca mantener la perpendicular entre la superficie captadora y la radiación solar incidente que se tiene en un día.

El procedimiento es idéntico al que se realizó en la sección anterior, la única diferencia que se considera en este caso, es que el valor de R_b viene dado por la siguiente ecuación [13]:

⁵² REALIZADO: Autores



$$R_b = \frac{\cos \delta_d}{\omega_s \sin \delta_d \sin \varnothing + \cos \delta_d \cos \varnothing \sin \omega_s} \quad (5.20)$$

Se sigue la metodología que se desarrolló en la sección previa para obtener la radiación global, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 14. Radiación sobre una superficie con seguidor a un eje.⁵³

RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE CON SEGUIDOR A UN EJE			
	Rb	$G(\varphi) = 5$	Total de cada mes del año $G(\varphi) = 5$
Enero	1.028505929	4.56625971	141.554051
Febrero	1.016743753	4.48922681	125.6983507
Marzo	1.002079248	4.397247755	136.3146804
Abril	0.989746854	4.053956656	121.6186997
Mayo	0.978000473	4.010849112	124.3363225
Junio	0.971933303	3.652437907	109.5731372
Julio	0.974263649	3.977797893	123.3117347
Agosto	0.984115932	4.168194526	129.2140303
Septiembre	0.998133935	4.194267263	125.8280179
Octubre	1.012599747	4.694620802	145.5332449
Noviembre	1.025299118	5.104058187	153.1217456
Diciembre	1.031229653	5.045939382	156.4241209
TOTAL ANNUAL [kWh/m ² _día]		1592.528136	

A continuación se grafican los datos de la *Tabla 14*, donde se muestra la radiación total anual que se capta en una superficie de 5° de inclinación que sigue el movimiento del Sol.

⁵³ REALIZADO: Autores



Ilustración 45. Valores de radiación para un seguidor a un eje.⁵⁴

5.1.3 Radiación solar para una superficie que es rastreada con dos ejes

El método de seguimiento con dos ejes obtiene el máximo de la radiación que esté disponible en un día, en este caso los colectores mantienen a los rayos del Sol perpendicular a la superficie del colector. Los elementos captadores deben ser capaces de realizar un movimiento combinado, esto consiste en un movimiento azimut y al mismo tiempo una inclinación variable según el mes del año en el cual se encuentre. El procedimiento que se desarrolla es idéntico al de la radiación solar para una superficie fija, la única diferencia que se considera, es que el valor de R_b viene dado por la siguiente ecuación [13]:

$$R_b = \frac{1}{\omega_s * \sin \delta_d * \sin \phi + \cos \delta_d * \cos \phi * \sin \omega_s} \quad (5.21)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos y la correspondiente gráfica.

Tabla 15. Radiación sobre una superficie con seguidor con dos ejes.⁵⁵

RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE CON SEGUIDOR CON DOS EJES			
	Rb	G(φ)=5	Total de cada mes con G(φ)=5
Enero	1.102518376	4.783420893	148.2860477
Febrero	1.041752373	4.559768636	127.6735218
Marzo	1.002202692	4.397583745	136.3250961
Abril	1.002738109	4.085584977	122.5675493

⁵⁴ REALIZADO: Autores

⁵⁵ REALIZADO: Autores

Mayo	1.031624432	4.142672321	128.422842
Junio	1.056591876	3.835873006	115.0761902
Julio	1.046239652	4.154435523	128.7875012
Agosto	1.013250704	4.243000711	131.5330221
Septiembre	0.998970318	4.196391465	125.891744
Octubre	1.026293945	4.735731025	146.8076618
Noviembre	1.083602014	5.303641375	159.1092413
Diciembre	1.119875517	5.346892296	165.7536612
TOTAL ANNUAL [kWh/m ² _día]			1636.234078



Ilustración 46. Valores de radiación para un seguidor con dos ejes.⁵⁶

5.1.4 Comparación de los resultados de los tres modelos

Se realiza una comparación entre los tres modelos de captación de radiación planteados, con esto se elige el que ofrezca una mayor captación de la radiación anual.

En la *Tabla 16* se presentan los datos con la correspondiente gráfica, donde se aprecia que se obtiene un mayor número de radiación con el método de radiación solar para una superficie que es rastreada por dos ejes.

⁵⁶ REALIZADO: Autores



Tabla 16. Comparación de resultados de los tres modelos.⁵⁷

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS TRES MODELOS			
	Fija a $G(\phi)=5$	Seguimiento a un eje con $G(\phi)=5$	Seguimiento a dos ejes con $G(\phi)=5$
Enero	4.302166137	4.56625971	4.783420893
Febrero	4.333207182	4.48922681	4.559768636
Marzo	4.364843632	4.397247755	4.397583745
Abril	4.114165473	4.053956656	4.085584977
Mayo	4.157708924	4.010849112	4.142672321
Junio	3.821160589	3.652437907	3.835873006
Julio	4.151800126	3.977797893	4.154435523
Agosto	4.274748072	4.168194526	4.243000711
Septiembre	4.19376367	4.194267263	4.196391465
Octubre	4.565344406	4.694620802	4.735731025
Noviembre	4.828287419	5.104058187	5.303641375
Diciembre	4.713137124	5.045939382	5.346892296
TOTAL ANNUAL [kWh/m ² _día]	1580.775483	1592.528136	1636.234078

⁵⁷ REALIZADO: Autores

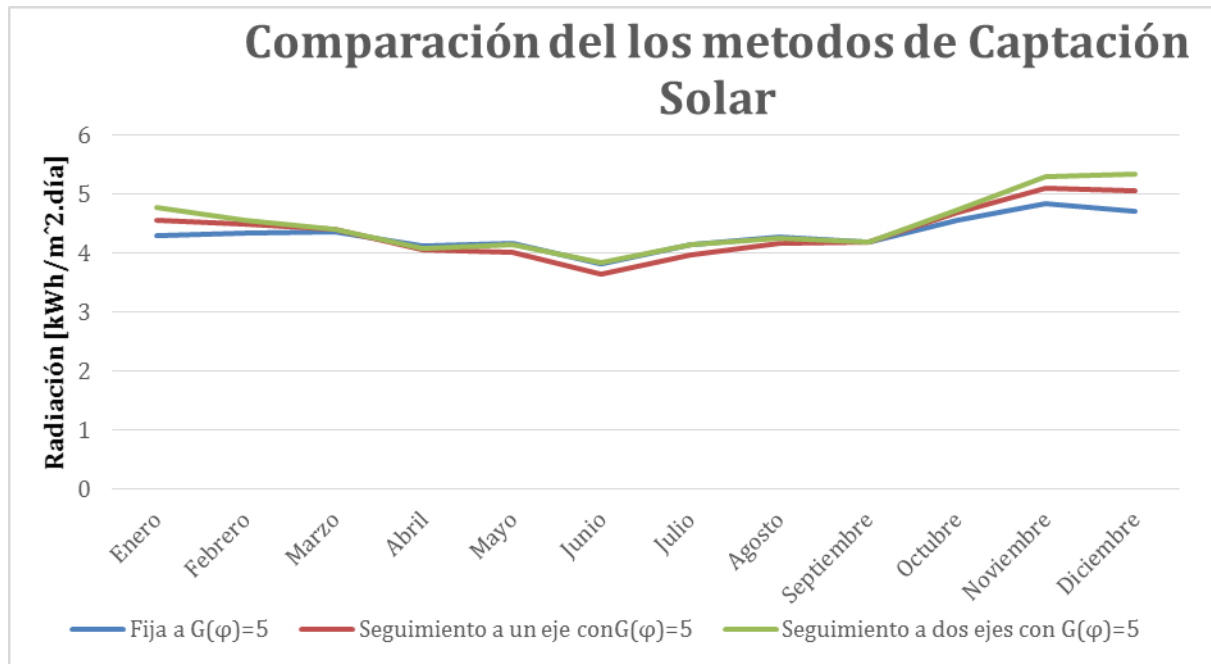


Ilustración 47. Comparación de los métodos de captación solar.⁵⁸

5.1.5 Cálculo de la energía generada por el panel

La irradiancia diaria viene dada en KW/m^2 y el cálculo de la generación fotovoltaica está en función de la potencia pico del panel ($P_{módulo}$) por las horas pico solar de irradiación que se tiene en ese instante t y por un factor de pérdidas por puntos calientes η , es decir:

$$E = P_{módulo} * t * \eta \quad (5.22)$$

Se denomina puntos calientes a las pérdidas consideradas cuando en una parte del panel se tiene sombra y por ende la celda no genera si no que se da el efecto contrario ya que tiende a emitir energía en forma de calor, también se considera las pérdidas por efecto Joule que se tiene en los conductores.

Se considera las horas solar pico igual a la irradiación, a continuación se demuestra esto.

5.1.6 Demostración de las horas pico solar igual a la irradiación

La irradiación solar sobre la superficie terrestre en un día cualquiera tiene un comportamiento semejante a la *Ilustración 48*.

⁵⁸ REALIZADO: Autores

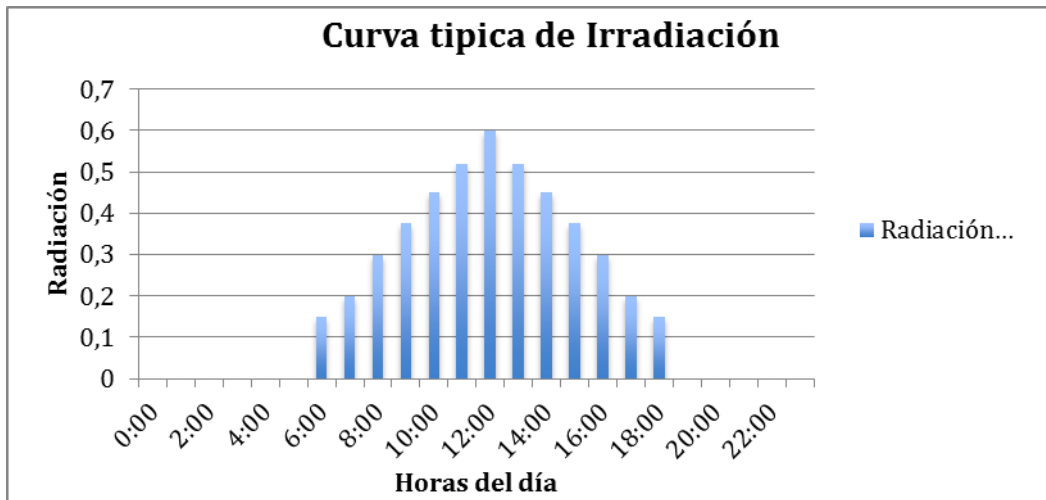


Ilustración 48. Curva de radiación diaria.⁵⁹

La potencia nominal de un panel se obtiene en función de recibir una irradiancia de 1000W/m^2 , sin embargo la irradiancia cambia a lo largo del día, es por ello que se analiza de la siguiente manera:

- En el día se tiene un corto tiempo con irradiancia de 1000W/m^2 , esto se representa como área 1 que está dentro del rectángulo naranja de la *Ilustración 49*.
- En el resto de horas del día se obtendrán diferentes niveles de irradiancia, se representa como área 2, que es el área bajo la curva de irradiancia diaria (parte rayada de café) como se muestra en la *Ilustración 49*.

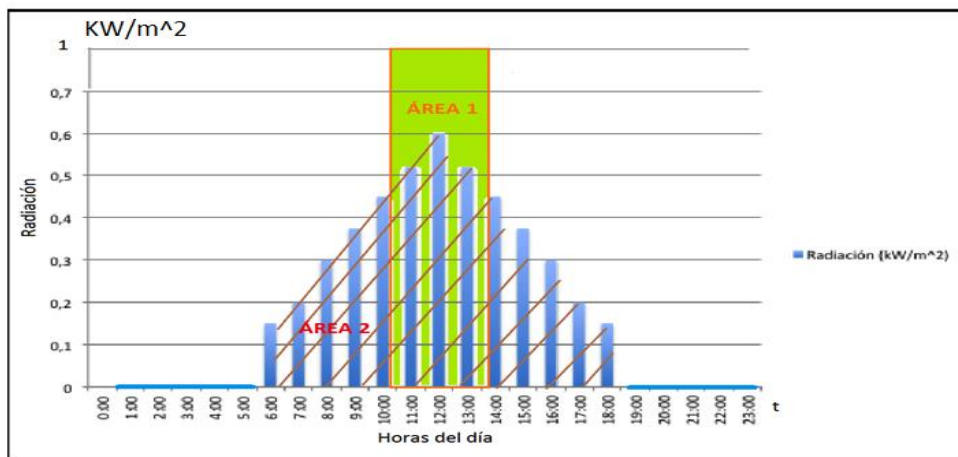


Ilustración 49. Horas pico de radiación.⁶⁰

Se tiene que: Área 1= A1; Área 2= A2

⁵⁹ REALIZADO: Autores

⁶⁰ REALIZADO: Autores

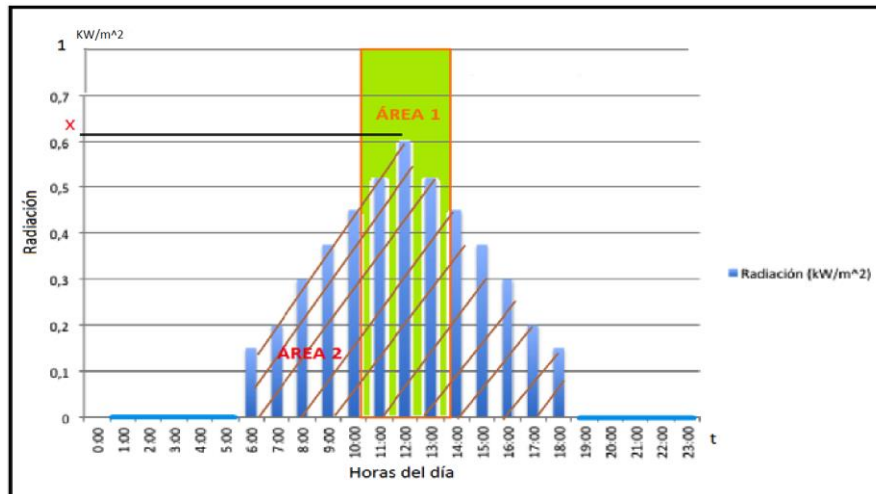


Ilustración 50. Demostración de las horas picos.

REALIZADO: Autores

Se asume que las áreas 1 y 2 son iguales, debido a que todo lo que el panel puede generar con la curva de irradiancia diaria A2 es igual a lo que se genera dentro de las horas pico solar que el panel estará recibiendo una irradiancia de 1000W/m² A1.

La energía de cada área es:

$$\text{Área 1} = t * 1 \left[\frac{KW}{m^2} \right] = t \left[\frac{KW}{m^2} \right] \quad (5.23)$$

$$\text{Área 2} = E = \int_6^{18} P * t d(t) \quad (5.24)$$

Se integra de 06:00h a 18:00h porque en estas horas es donde se tiene radiación.

$$\text{ÁREA 2} = X \left[\frac{KWh}{m^2} \right]$$

Donde: X= la radiación promedio que se tiene en el día, puede ser $X > 1$ Ó $X < 1$
Igualando las áreas se tiene:

$$A1 = A2 \quad (5.25)$$

Reemplazando los valores se tiene:

$$t \left[\frac{KW}{m^2} \right] = X \left[\frac{KWh}{m^2} \right]$$

$$t = X[h] = \text{irradianción en el día.}$$

Con esto se demuestra que el dato que se tiene como irradianción diaria es igual a las horas pico solar.

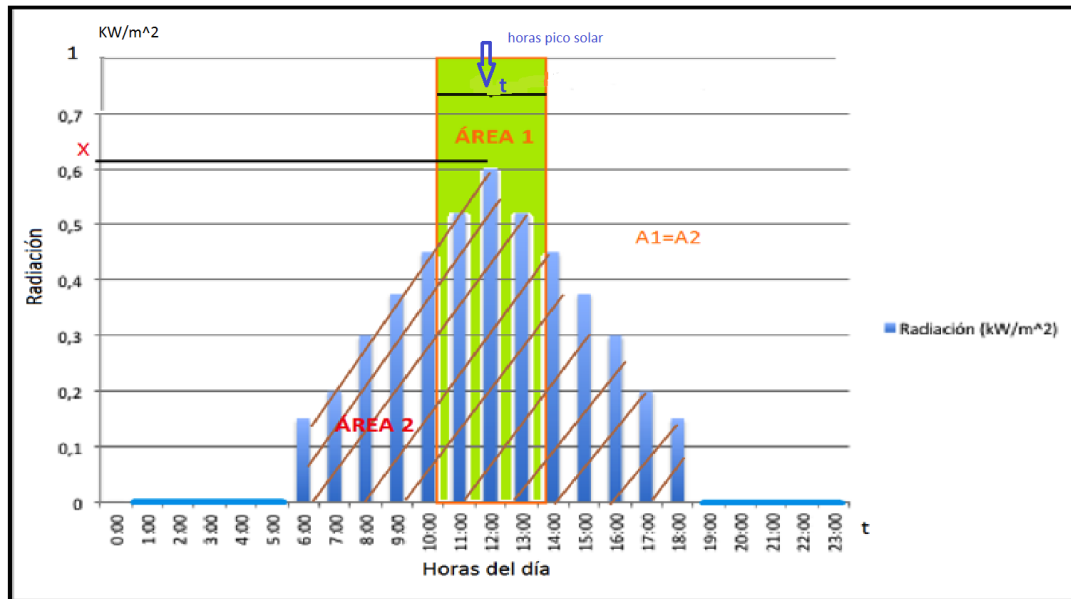


Ilustración 51. Demostración de radiación diaria promedio, igual a las horas picos.⁶¹

5.2 DIMENSIONAMIENTO DEL BLOQUE GENERADOR

5.2.1 Determinación del mes más desfavorable

El sistema de generación de energía eléctrica se dimensiona en función del peor mes de radiación, por ende Junio será nuestro peor escenario, esto se observa en la *Ilustración 47*.

5.2.2 Elección del tipo y número de módulos fotovoltaicos.

Este proceso emprende con la selección del módulo FV de 150Wp.

Posterior a la elección del módulo FV, se estimara la energía generada por dicho módulo durante un día cualquiera perteneciente al peor mes de radiación.

La energía producida por un módulo de potencia pico, bajo condiciones estándar, durante una hora, es igual a $P_{módulo}$. Si en lugar de una hora, la radiación solar de $1000W/m^2$ incide sobre el módulo t horas, la energía producida por el mismo durante un día es [15]:

$$E_{panel} = P_{módulo} * t \quad (5.26)$$

⁶¹ REALIZADO: Autores



El número de módulos $N_{módulos}$ necesarios para cubrir las necesidades diarias de la carga (en función del peor escenario: Junio) viene dado por:

$$N_{módulos} = 1,1 \left[\frac{E_{carga}}{E_{panel}} \right] \quad (5.27)$$

Donde: $N_{módulos}$: Número de módulos
 E_{carga} : Energía eléctrica de la carga [kWh/día]
 E_{panel} : Energía diaria producida por un módulo [kWh/día]

El coeficiente 1,1 es un factor de seguridad para hacer frente a imprevistos y a la depreciación de prestaciones de los diferentes componentes.

5.2.3 Estimación de la conexión

Se calcula el número de módulos que estarán conectados en paralelo y serie.

Para calcular el número de módulos conectados en serie, se debe determinar la tensión de trabajo del sistema de acumulación (V_{acu}), normalmente suele ser 12Voltios. Dicha tensión tiene que ser igual a la tensión de salida del campo fotovoltaico para que se cumpla [15]:

$$N_{S,módulo} = \frac{V_{acu}}{V_{módulo}} \quad (5.28)$$

Donde: $N_{S,modulo}$: Número de módulos conectados en serie
 V_{acu} : Voltaje nominal del sistema de acumulación [V]
 $V_{módulo}$: Voltaje nominal de salida del módulo fotovoltaico [V]

Una vez calculo el número de módulos conectados en serie se calcula el número de módulos conectados en paralelo [15]:

$$N_{P,modulo} = \frac{N_{módulos}}{N_{S,mod}} \quad (5.29)$$

Donde: $N_{P,modulo}$: Número de módulos conectados en paralelo
 $N_{módulos}$: Número de módulos totales
 $N_{S,modulo}$: Número de módulos conectados en serie

La potencia máxima total generada por el sistema de captación de energía $P_{P,gen}$ [15]:

$$P_{P,gen} = N_{módulos} * P_{módulo} \quad (5.30)$$



Donde: $P_{P,gen}$: Potencia máxima generada [W]
 $N_{módulos}$: Número de módulos totales
 $P_{módulo}$: Potencia nominal del módulo [W]

La corriente máxima total que se genera por el sistema de captación de energía es:

$$I_{gen} = N_{P,modulo} * I_{módulo} \quad (5,31)$$

Donde: I_{gen} : Intensidad máxima generada [A]
 $N_{P,modulo}$: Número de módulos conectados en paralelo
 $I_{módulo}$: Intensidad máxima del módulo [A]

5.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.

Lo que almacena una batería viene dado por el producto de la tensión nominal de la batería y su capacidad [15]:

$$E_{bateria} = C * V_{bateria} \quad (5.32)$$

Donde: $E_{bateria}$: Energía de la batería [Wh]
 C : Capacidad nominal de la batería [Ah]
 $V_{bateria}$: Voltaje nominal de la batería [V]

La capacidad del sistema de acumulación, que admite un 100% de descarga profunda, es la cantidad de energía que debe ser capaz de almacenar, para asegurar los días de autonomía y se determina por [15]:

$$E_{acumulada} = N_D * E_{carga,max} \quad (5.33)$$

Donde: $E_{acumulada}$: Energía almacenada por las baterías [Wh]
 N_D : Número de días de autonomía
 $E_{carga,max}$: Energía eléctrica máxima requerida por la carga [Wh/día]

$E_{carga,max}$ es el promedio diario de la energía eléctrica requerida por la carga para el mes en que el consumo de la carga es máximo.



De acuerdo a la ecuación (5.33) se puede establecer que, toda la energía almacenada en el sistema de acumulación es aprovechada por la carga para cubrir su demanda, esto es posible debido a que el sistema de acumulación permite una descarga del 100%. Sin embargo en la realidad esto no es así ya que los sistemas de acumulación permiten solamente descargas menores al 100%. Debido a esto la energía almacenada por el sistema de acumulación tiene que ser mayor a la requerida por la carga. Este requerimiento extra de energía debe ser tomado en cuenta por la ecuación (5.33), para lo cual se incorpora la profundidad de descarga como divisor. Adicionalmente se incluye un factor de seguridad de 1,1, con esto se determina la energía que se almacena el sistema de acumulación.

$$E_{acumulada} = 1,1 \left[\frac{N_D * E_{elec,max}}{P_{D,max}} \right] \quad (5.34)$$

Donde: $E_{acumulada}$: Energía almacenada por las baterías [Wh]
 N_D : Número de días de autonomía
 $E_{elec,max}$: Energía eléctrica máxima requerida [Wh/día]
 $P_{D,max}$: Máxima profundidad de descarga

Luego del cálculo de la energía almacenada por las baterías, se calcula la capacidad necesaria del sistema de acumulación [15]:

$$C_T = \frac{E_{acumulada}}{V_{acu}} \quad (5.35)$$

Donde: C_T : Capacidad del sistema de acumulación [Ah]
 $E_{acumulada}$: Energía almacenada por las baterías [Wh]
 V_{acu} : Voltaje nominal del sistema de acumulación [V]

5.4 RESTRICCIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL NÚMERO DE PANELES Y DEL SISTEMA DE ACUMULACIÓN.

Las restricciones se realizan en función de la diferencia que va a existir entre la energía de la carga en un instante dado y la energía que el micro aerogenerador produce en dicho instante, es decir:

$$E_{restricción}(t_i) = \sum_{i=0}^{t=24horas} (E_{carga}(t_i) - E_{eléctrica,aero}(t_i)) \quad (5.36)$$

En función de la ecuación (5.36) se plantean 3 restricciones las cuales son:



✚ **PRIMERA RESTRICCIÓN:** la energía de la carga es mayor que la energía producida por el micro aerogenerador.

$$E_{carga}(t_i) > E_{el\acute{e}ctrica,aero}(t_i) \quad (5.37)$$

El número de módulos es:

$$N_{m\acute{o}dulos} = 1,1 \left[\frac{E_{restricci\acute{o}n,max}(t_i)}{E_{panel}} \right] \quad (5.38)$$

Donde: $N_{m\acute{o}dulos}$: Número de módulos
 $E_{restricci\acute{o}n,max}$: Energía eléctrica de la ecuación (5.37) [kWh/día]
 E_{panel} : Energía diaria producida por un módulo [kWh/día]

La ecuación (5.38) se cumple siempre y cuando $A_{Nmodulos} \leq A_{\acute{u}til}$ donde:

$$A_{\acute{u}til} = 6m^2 = \text{área útil de la casa para instalar los paneles}$$

$$A_{Nmodulos} = \text{área total de todos los paneles fotovoltaicos}$$

Ahora si $A_{Nmodulos} > A_{\acute{u}til}$ el número de paneles solares es:

$$N_{m\acute{o}dulos} = \frac{A_{\acute{u}til}}{A_{panel}} \quad (5.39)$$

La capacidad del sistema de acumulación es:

$$E_{acumulada,restriccion\ 1} = 1,1 \left[\frac{N_D * E_{restricci\acute{o}n,max}(t_i)}{P_{D,max}} \right] \quad (5.40)$$

$$C_{sistema} = \frac{E_{acumulada,restriccion\ 1}}{V_{acu}} \quad (5.41)$$

✚ **SEGUNDA RESTRICCIÓN:** la energía de la carga es menor o igual a la energía producida por el micro aerogenerador, el exceso de la energía se envía al sistema de acumulación.

$$E_{carga}(t_i) \leq E_{el\acute{e}ctrica,aero}(t_i) \quad (5.42)$$



El número de módulos es:

$$N_{\text{módulos}} = 1,1 \left[\frac{E_{\text{carga,min}}(t_i)}{E_{\text{panel}}} \right] \quad (5.43)$$

Donde: $N_{\text{módulos}}$: Número de módulos
 $E_{\text{carga,min}}(t_i)$: Energía eléctrica mínima de la carga [kWh/día]
 E_{panel} : Energía diaria producida por un módulo [kWh/día]

La ecuación (5.43) se cumple siempre y cuando $A_{N_{\text{módulos}}} \leq A_{\text{útil}}$ donde:

$A_{\text{útil}} = 6m^2 = \text{área útil de la casa para instalar los paneles}$

$A_{N_{\text{módulos}}} = \text{área total de todos los paneles fotovoltaicos}$

Ahora si $A_{N_{\text{módulos}}} > A_{\text{útil}}$ el número de paneles solares es:

$$N_{\text{módulos}} = \frac{A_{\text{útil}}}{A_{\text{panel}}} \quad (5.44)$$

La capacidad del sistema de acumulación es:

$$E_{\text{acumulada, restricción 2}} = 1,1 \left[\frac{N_D * E_{\text{carga,min}}(t_i)}{P_{D,max}} \right] \quad (5.45)$$

$$C_{\text{sistema}} = \frac{E_{\text{acumulada, restricción 2}}}{V_{\text{acu}}} \quad (5.46)$$

✚ **TERCERA RESTRICCIÓN:** Si el micro aerogenerador no generará debido a baja velocidades del viento o por problemas de la máquina.

$$E_{\text{restricción}}(t_i) = E_{\text{carga,max}}(t_i) \quad (5.47)$$

El número de módulos es:

$$N_{\text{módulos}} = 1,1 \left[\frac{E_{\text{carga,max}}(t_i)}{E_{\text{panel}}} \right] \quad (5.48)$$

Donde: $N_{\text{módulos}}$: Número de módulos
 $E_{\text{carga,max}}(t_i)$: Energía eléctrica máxima de la carga [kWh/día]
 E_{panel} : Energía diaria producida por un módulo [kWh/día]

La ecuación (5.48) se cumple siempre y cuando $A_{N_{\text{módulos}}} \leq A_{\text{útil}}$ donde:



$A_{\text{útil}} = 6m^2 = \text{área útil de la casa para instalar los paneles}$

$A_{N_{\text{modulos}}} = \text{área total de todos los paneles fotovoltaicos}$

Ahora si $A_{N_{\text{modulos}}} > A_{\text{útil}}$ el número de paneles solares será:

$$N_{\text{módulos}} = \frac{A_{\text{útil}}}{A_{\text{panel}}} \quad (5.49)$$

La capacidad del sistema de acumulación es:

$$E_{\text{acumulada, restricción 3}} = 1,1 \left[\frac{N_D * E_{\text{carga, max}(t_i)}}{P_{D, \text{max}}} \right] \quad (5.50)$$

$$C_{\text{sistema}} = \frac{E_{\text{acumulada, restricción 3}}}{V_{\text{acu}}} \quad (5.51)$$

5.5 DIMENSIONAMIENTO DEL REGULADOR

En el dimensionamiento del regulador se deben especificar tres parámetros eléctricos:

- ✚ Tensión nominal de trabajo del regulador ($V_{\text{regulador}}$), debe ser igual a la tensión nominal de los sistemas de captación de energía y de acumulación.

$$V_{\text{regulador}} = V_{\text{gen}} = V_{\text{acu}} \quad (5.52)$$

- ✚ La intensidad nominal del interruptor de conexión y desconexión de la corriente eléctrica desde el generador fotovoltaico hacia el sistema de acumulación ($I_{\text{regulador}}$), debe ser igual a la máxima intensidad de corriente que es capaz de suministrar el campo fotovoltaico, es decir:

$$I_{\text{regulador}} = I_{\text{gen}} \quad (5.53)$$

- ✚ Por último se deberá tener en cuenta el aumento de la tensión que se genera por el arreglo fotovoltaico en condiciones medioambientales específicas. Debido a esto el regulador de carga debe estar diseñado para soportar los siguientes valores de tensión:

$$V_{\text{regulador, max}} = 1,25 * V_{\text{gen}} \quad (5.54)$$



5.6 DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR

El inversor depende de la máxima potencia simultánea estimada a lo largo de un día y del voltaje de entrada.

El número de inversores necesarios para una instalación es en función de la máxima carga demandada, y se estima con:

$$N_{inversor} = \frac{1,25 * P_{max}}{P_{inversor}} \quad (5.55)$$

Donde: P_{max} : Potencia máxima demandada [kW]
 $P_{inversor}$: Potencia nominal del inversor [W]

5.7 CURVA DE LA ENERGÍA QUE GENERA EI PANEL EN FUNCIÓN DEL MODELO ESTABLECIDO PARA LA GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

La curva que se indica a continuación es el resultado de lo que genera un panel FV de 150Wp con el modelo de la estimación de radiación solar para una superficie fija, los pasos de cómo se obtuvo la curva, cálculos del dimensionamiento del sistema fotovoltaico, se explica en la parte A del anexo 1.

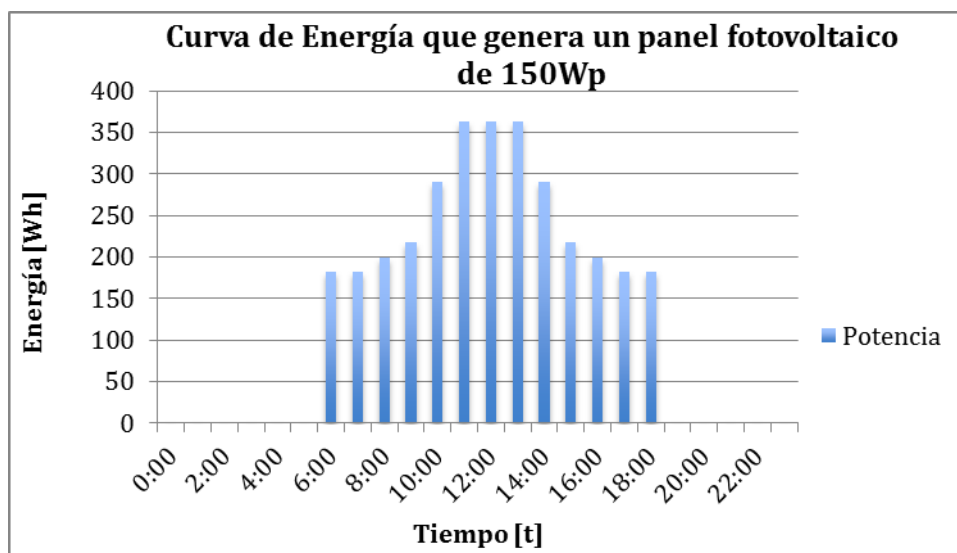


Ilustración 52. Curva de generación del panel.

REALIZADO: Autores



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Si analizamos la curva de radiación anual que obtiene el modelo de radiación solar para una superficie fija y la curva de la radiación solar anual del Ecuador que publico la Universidad de Massachusetts, se aprecia que es idéntica con lo cual se valida el modelo establecido para determinar la estimación de radiación.

A continuación, se muestra la curva de irradiación mensual que se tiene en Cuenca, los datos fueron presentados por la Universidad de Massachusetts.

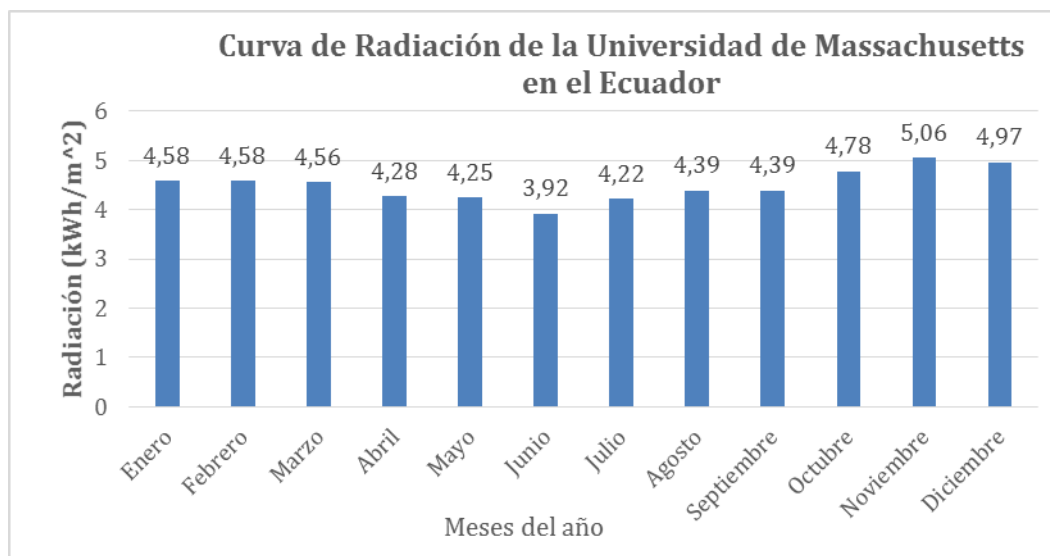


Ilustración 53. Curva de radiación mensual de Cuenca en el 2013.⁶²

FUENTE: Universidad de Massachusetts

⁶² REALIZADO: Autores

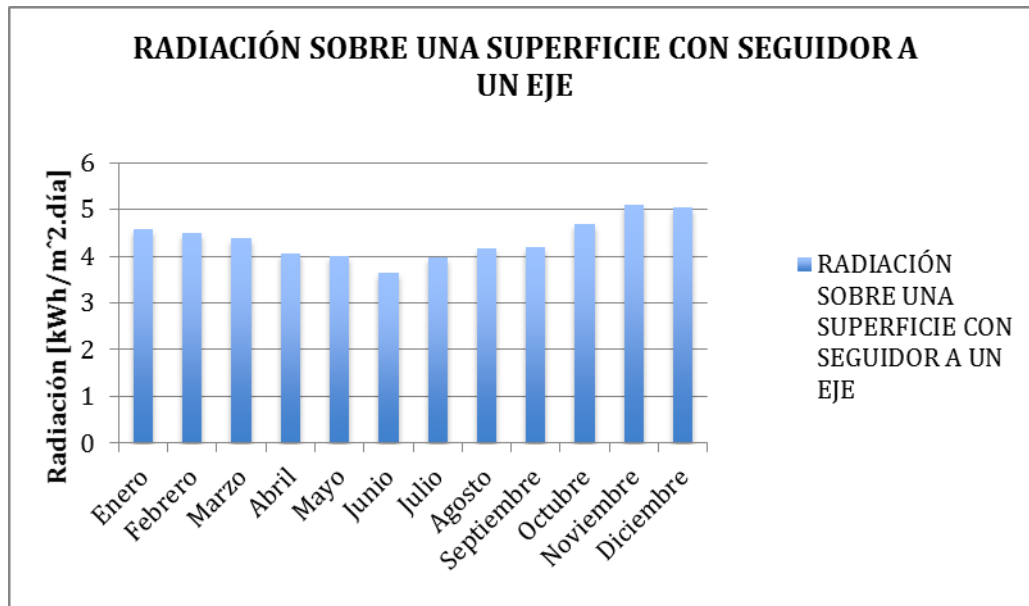


Ilustración 54. Curva de radiación sobre una superficie con seguidor a un eje.⁶³

En la Ilustración 55 se muestra un ejemplo de cómo sería la radiación sobre una superficie horizontal en la ciudad de Cuenca con el cielo despejado así como la radiación sobre un panel solar (superficie inclinada); sin embargo, dado que esta situación climática no es muy común, a esta curva se le ha aplicado una variación que simula el efecto de nubosidad pudiendo tener como mínimo valor el 20% de la radiación máxima. La grafica se obtuvo del simulador del modelo final de la micro-red.

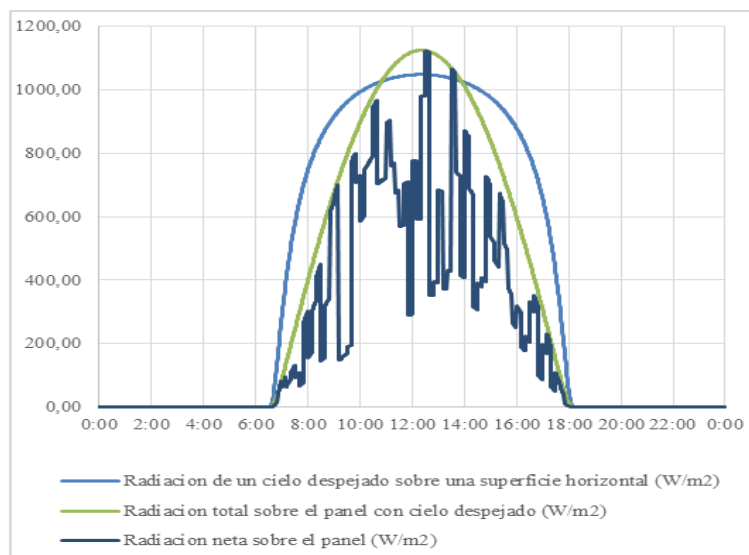


Ilustración 55. Curva diaria de radiación final del simulador.⁶⁴

⁶³ REALIZADO: Autores

⁶⁴ REALIZADO: Autores

5.8 MODELO DE GENERACIÓN EÓLICO

El comportamiento del viento es estocástico, es decir, no siempre se mantiene constante en dirección y en magnitud, si no que este cambia de forma aleatoria a lo largo del tiempo.

El modelo de la generación eólica se establece primero modelando al viento con la distribución de Weibull que es probabilística, dicha distribución nos permite obtener las probabilidades de cuando el viento va a estar a la velocidad que se desea calcular y a su vez nos admite calcular la potencia que se va a generar con dicha velocidad.

Luego se calcula la ecuación de la potencia eólica media que logra aprovechar el rotor de la máquina, además se analiza algunos parámetros que son importantes a la hora de obtener la ecuación de la potencia total que genera un micro-aerogenerador, como es la densidad del aire y la densidad de potencia.

5.8.1 Modelo del viento

Revisando la literatura tenemos que en algunos modelos el viento es considerado como una variable aleatoria con distribución de Weibull, la ilustración de esta distribución se indica a continuación.

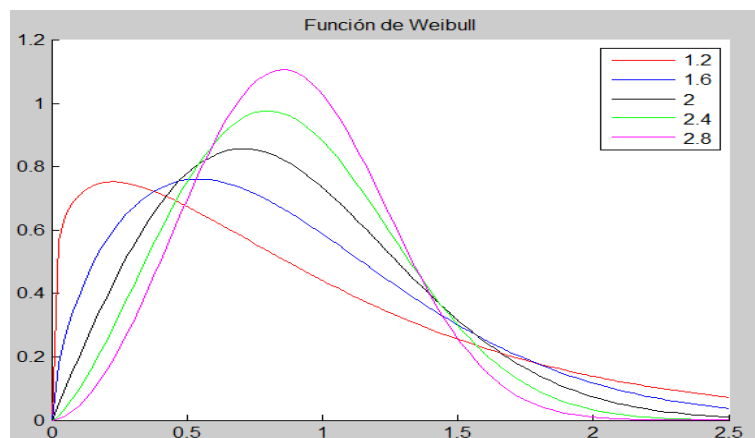


Ilustración 56. Curva de la función de probabilidad de Weibull, con $c=1$ y variando k para distintos valores.

REALIZADO: Autores

La *Ilustración 56* se obtiene de la función de densidad de una variable aleatoria que tiene distribución Weibull, la cual es:



$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (5.56)$$

Donde $k > 0$ es el parámetro de forma, es decir si la curva es más ancha o más delgada y $c > 0$ es el parámetro de escala de la distribución, es decir si la curva es más alta o no, estos parámetros se los puede observar en la *Ilustración 56*.

Los parámetros tanto k como c , están en función de la desviación estándar y de la media aritmética.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1,086} \quad (5.57)$$

$$c = \frac{v}{\Gamma\left[1+\frac{1}{k}\right]} \quad (5.58)$$

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (5.59)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{u})^2 \quad (5.60)$$

Donde n es el tamaño de la muestra o el número de valores medidos y \bar{u} es la media aritmética, las v_i representan las velocidades del viento y σ es la desviación estándar.

La ecuación (5.56) nos permite determinar la probabilidad de que la velocidad este en el intervalo de análisis $v_a \leq v \leq v_b$, el resultado de dicha ecuación al multiplicar por el 100% significara que la velocidad del viento estará en el intervalo estudiado un tanto por ciento % del tiempo y si a este porcentaje lo multiplicamos por 8760horas que tiene un año, se obtiene las horas/año que va a estar funcionando el micro aerogenerador con dicha velocidad.

La función de distribución acumulativa está dada por:

$$F(v) = \int_0^v f(x)dx \quad (5.61)$$

En la ecuación (5.62), $f(v)$ es la distribución de Weibull, esta ecuación se entiende como la probabilidad que la velocidad del viento v sea mayor o igual que v_a .



$$P(v \geq v_a) = \int_{v_a}^{\infty} f(v)dv = \exp\left[-\left(\frac{v_a}{c}\right)^k\right] \quad (5.62)$$

Con la ecuación (5.62) se calcula la probabilidad de que la velocidad del viento sea mayor o igual a una que sea de interés estudiar $v \geq v_a$, en nuestro caso v_a será un número mayor a la velocidad nominal del micro aerogenerador, ya que si se tiene una velocidad mayor a la nominal la máquina se frenera con el fin de evitar daños, el valor que se obtiene en de la ecuación (5.62) al multiplicar por el número de horas que tiene el año 8760horas se obtiene el tiempo que la máquina perderá en generar.

5.8.2 Potencia promedio aprovechada por el rotor de la máquina (potencia eólica)

La cantidad de energía eléctrica que genera un aerogenerador depende de la energía del viento y está a sus vez de la velocidad del viento, es necesario calcular la potencia promedio que será aprovechada por el rotor, para ello se aplica la ley de Betz.

La potencia que lleva el viento antes de ingresar al rotor viene dado por la siguiente ecuación:

$$P_0 = \left(\frac{1}{2}\right) \rho V_1^3 A \quad (5.63)$$

Donde:

$A = \text{Área por donde pasa el viento(circulo)} = \pi * r^2$

$V_1 = \text{Velocidad que ingresa el viento viento}$

$\rho = \text{densidad del viento}$

Por lo tanto la potencia del viento debido a la energía cinética, es decir la potencia eólica es:

$$P_0 = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \pi r^2 V_1^3 \quad (5.64)$$

En el modelo del micro-aerogenerador se tiene como datos de entrada la velocidad del viento, el radio del círculo que forman las aspas del generador y la densidad del viento.



Es importante recalcar que la ecuación (5.63) no nos da la potencia que logra generar el micro aerogenerador, está simplemente es la potencia del viento, la misma que no se puede extraer 100% debido a pérdidas.

Al comparar la potencia de la ecuación (5.63) para la de la ecuación (5.64) se obtiene la siguiente ilustración.

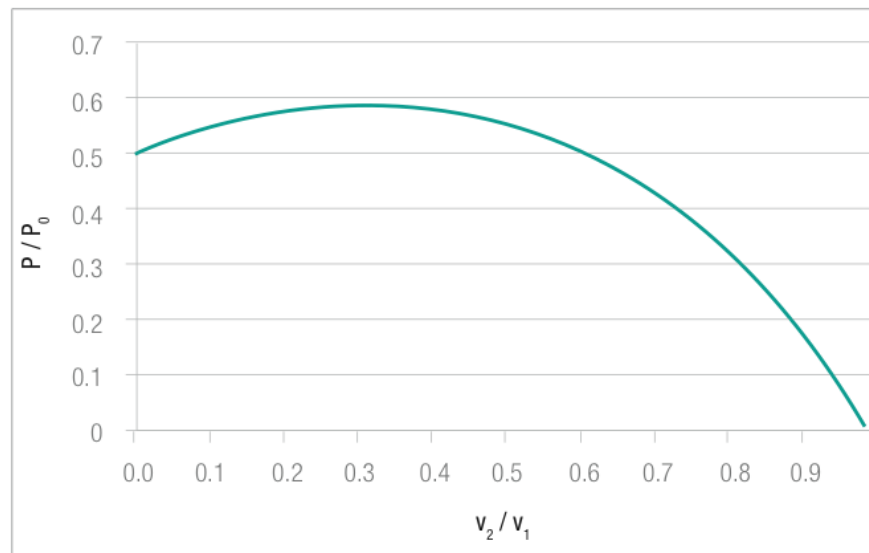


Ilustración 57. Gráfica de comparación de potencias.

REALIZADO: Autores

Analizando la *Ilustración 57* se puede observar que el valor máximo es aproximadamente 0.59, es decir la potencia máxima que se puede extraer del viento es $C_p = 0.59$ de la potencia.

5.8.3 Densidad de potencia

Uno de los parámetros importantes dentro de la generación de electricidad a través de un micro aerogenerador es la curva de densidad de potencia, ya que en base a esta curva se puede tener una estimación de cuanto se generara en función de la velocidad del viento que se tenga y de la ubicación donde se va a instalar la máquina.

La densidad de potencia se la define como la potencia por unidad de área, se muestra en la siguiente ecuación.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (5.65)$$

En base a la ecuación (5.65) se establece lo siguiente:

- La densidad de potencia es proporcional a la densidad del aire, esto quiere decir que a mayor altitud, menor la energía disponible a igual velocidad del viento.
- La densidad de potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento.
- Las unidades de la densidad de potencia son de potencia por unidad de superficie. En el Sistema Internacional, estas unidades son W/m^2

La siguiente figura muestra como es la gráfica de la densidad de potencia.

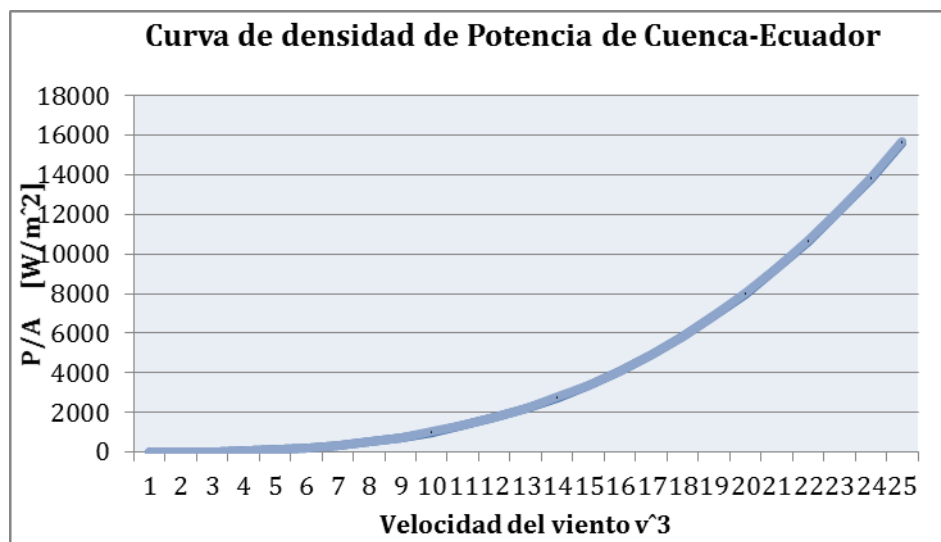


Ilustración 58. Curva de densidad de Potencia.

Realizado: Autores

5.8.4 Potencia eléctrica generada por el micro aerogenerador

La potencia eléctrica que genera el micro aerogenerador depende de los factores ya analizados como es la distribución de Weibull que tiene el viento, la potencia eólica la cual se analizó aplicando la ley de Betz y solo se puede aprovechar el $C_p=0.59$ de la potencia eólica, velocidad del viento, características del micro aerogenerador y del factor de rendimiento que tenga el sistema es decir la máquina; con todo esto la ecuación final es:

$$P_{eléctrica,aero} = \eta_{sistema} * P_0 * C_p \quad (5.66)$$



A continuación se indica la gráfica de energía que logra generar un micro aerogenerador de 1500W, la curva se obtuvo del simulador de la micro-red, donde la curva roja nos representa la potencia promedio que produce el micro aerogenerador mientras que la curva azul es la potencia instantánea que se obtiene a cada minuto, los cálculos de dicha curva se indica en la parte B del anexo 1.

Curva de la producción de Energía Eléctrica del Aerogenerador

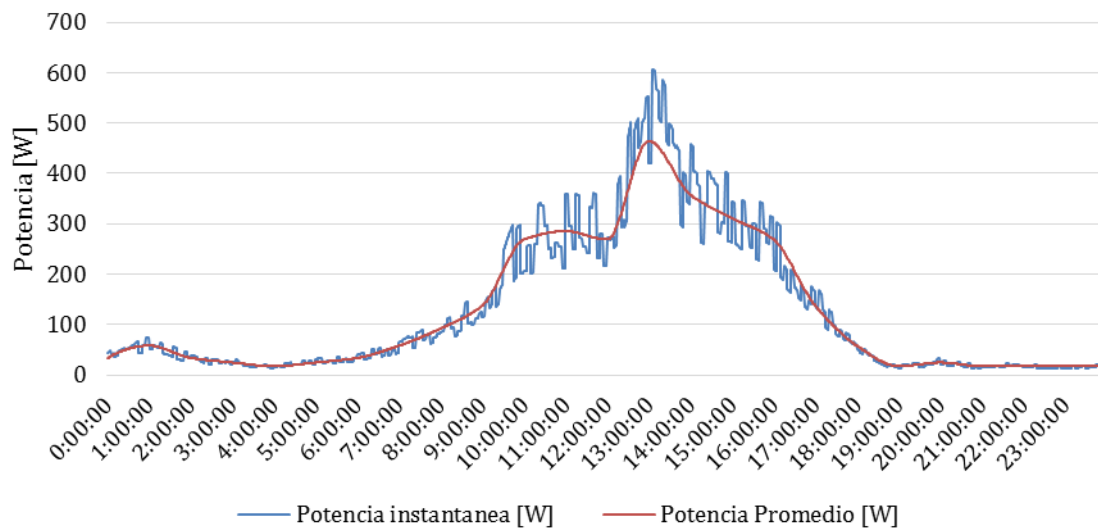


Ilustración 59. Curva de Generación del micro aerogenerador.⁶⁵

⁶⁵ Realizado: Autores



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO VI

MODELO DE LA DEMANDA (CARGA)



6 MODELACIÓN DE LA DEMANDA (CARGA)

En una red de distribución eléctrica, la determinación de la demanda es fundamental para asegurar el suministro de energía, así como para tener una buena aproximación de cuando se da el pico de demanda. Además, permite tener un mejor control de la red, por lo que es primordial contar con un modelo que ayude a caracterizar la demanda de energía según los parámetros más apropiados, para poder simular un consumo real de electricidad en una vivienda.

Para obtener una mejor visión de la interacción de las energías renovables y la demanda de la micro-red, se considera importante que para el presente estudio se apliquen métodos que se encuentran en la categoría de Bottom-up (de abajo hacia arriba), es decir buscando la mayor precisión posible.

Luego de analizar los principales modelos que se mencionan en [4] se destacan los aspectos más importantes que se deben considerar en el presente estudio. Es así que para la modelación de la demanda de los aparatos que tienen interacción directa con el usuario (p.ej. TV, laptop, licuadora, microondas, etc.), el modelo propuesto por Ian Richardson, Murray Thomson y David Infield como se presenta en [6] brinda un enfoque apropiado pues se basa en la combinación de patrones de actividad de las personas que se encuentran en casa y los perfiles de actividad diaria que muestran la forma como la gente gasta su tiempo en realizar ciertas actividades. Para obtener la resolución de un minuto, los datos se crean a través de la simulación del uso del aparato, para ello se utilizan los equipos que se encuentran comúnmente en nuestras viviendas, tomando como base datos estadísticos del INEC [16]. Al modelo de Richardson et al. se incorpora el uso de aparatos que no tienen relación con la actividad de los residentes (refrigerador) así como el modelo descrito por [9] para la lavadora de ropa, todo esto es incorporado en un solo modelo para el estudio de las micro-redes en la ciudad de Cuenca.

6.1 ESTRUCTURA DEL MODELO

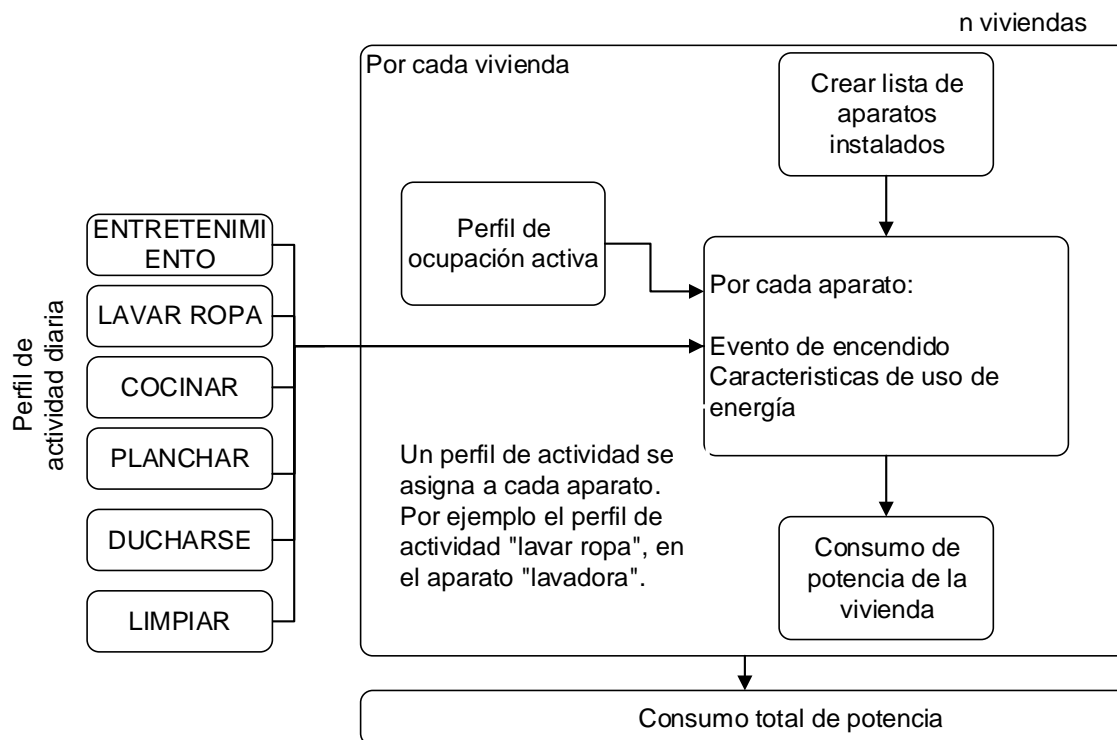


Ilustración 60. Estructura del Modelo de la Demanda.⁶⁶

La estructura del modelo se presenta en la Ilustración 60, donde se muestra, a la izquierda, un conjunto de perfiles de actividad diaria, que representan la probabilidad de que las personas realicen las diferentes actividades en diferentes momentos del día. Estos perfiles son los mismos para todas las viviendas. A la derecha del diagrama, las viviendas están representados por un solo bloque. Cada vivienda se le asigna un perfil de ocupación activa (en función del número de habitantes y horas de actividad en el hogar a lo largo del día) y una serie de aparatos instalados. Cada dispositivo se asigna a uno de los perfiles de actividad diaria. Cuando se produce un evento de encendido, las características de uso de energía del aparato se utilizan para determinar su demanda de electricidad. Adicionando la demanda de energía de todos los aparatos dentro de una vivienda, da como resultado la demanda total de la misma.

⁶⁶Elaboración: Los Autores. Fuente: Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model [6]



6.2 PERFILES DE ACTIVIDAD DIARIA

Cada perfil de actividad diaria, Ilustración 60, cuantifica la probabilidad de que la actividad especificada se está llevando a cabo, en función del tiempo. El conjunto de perfiles incluye variantes para tener en cuenta: el número actual de ocupantes activos (de uno a cinco⁶⁷) y si se trata de un día de semana o un día de fin de semana.

Los perfiles de actividad diaria se construyen a partir de datos de las encuestas levantadas en [7] (subdivididos en grupos de lunes a viernes y fin de semana) Los datos corresponden a 423 viviendas en Quito y Cuenca. Con esta información, el presente trabajo incorpora interpolaciones de Hermite para obtener datos cada 10 minutos, esto permite obtener el perfil de 6 actividades (entretenimiento, lavar ropa, cocinar, ducharse, limpieza y planchar).

Dos ejemplos de perfiles se muestran en la Ilustración 61. Ambos son perfiles de la actividad “cocinar” para un día de semana. Las dos curvas representan probabilidades de actividad para diferentes números de ocupantes activos, en este caso, dos o cuatro. Por ejemplo, si una vivienda tiene dos ocupantes activos a las 12:00, entonces la probabilidad de que los ocupantes realicen una actividad relacionada con “cocinar” es de 0,63. Sin embargo, si hay cuatro ocupantes activos, la probabilidad de que al menos uno de los ocupantes realice una actividad relacionado con “cocinar” se eleva a 0,94. Esto se obtiene usando la información de (6): del total de 423 viviendas, el número que tienen dos ocupantes activos a las 12:00 es 11. De ese grupo, el número de viviendas donde al menos un ocupante está realizando una actividad relacionada con cocinar es de 7. La proporción es $7/11 = 0,63$. Igualmente se procede para viviendas con 4 ocupantes donde, a las 12h00, el número total con esa tasa de ocupación es 17 viviendas y en 16 hay al menos alguien activo en la cocina, dando una probabilidad de 0,94 (Ver Ilustración 62).

⁶⁷ Promedio de Personas por Hogar, Cantón Cuenca. Fuente: Censo de Población y Vivienda (CPV) 2010

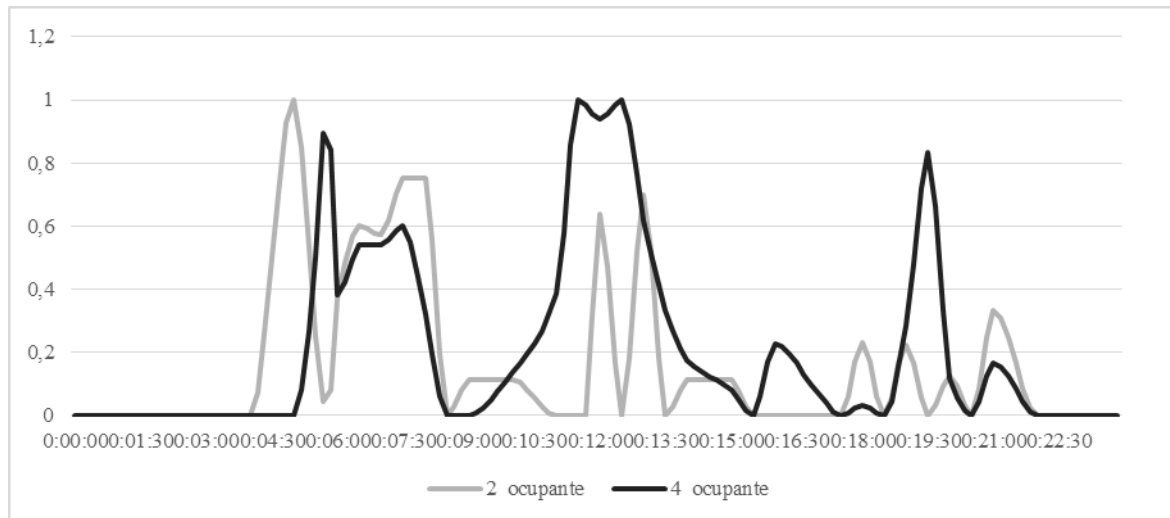


Ilustración 61: Perfil de la actividad “cocinar” para 2 y 4 ocupantes en un día de laborable.⁶⁸

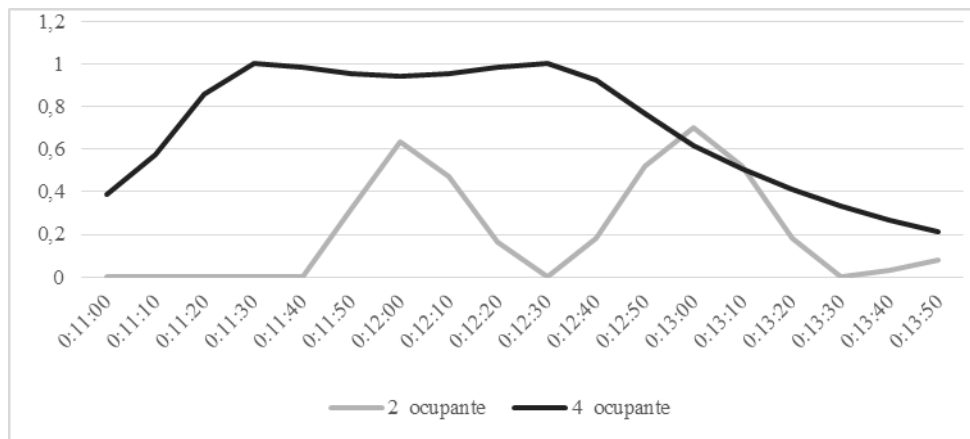


Ilustración 62: Perfil ampliado de la actividad “cocinar” para 2 y 4 ocupantes en un día laborable, de 11:00 a 14:00.⁶⁹

Los picos esperados se producen alrededor de los horarios de comida, pero la cocción puede ocurrir en cualquier momento del día como indica la Ilustración 61.

Se debe de tener en cuenta que los valores que representan dos ocupantes activos se convierten, en ciertas horas, muy volátiles. Este es el resultado de la pequeña cantidad de muestras aplicables y el tiempo entre la toma de muestras (30 minutos) en el conjunto de datos de origen [7] reflejando el hecho de que hubo relativamente pocos casos con dos ocupantes activos en las primeras horas de la mañana.

⁶⁸ REALIZADO: Autores

⁶⁹ REALIZADO: Autores



6.3 APARATOS INSTALADOS

Para la asignación de los aparatos a utilizar, al inicio, el modelo “puebla” cada vivienda con electrodomésticos. Esto se hace de forma aleatoria a partir de datos estadísticos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) [16].

Sobre esta base, el modelo está configurado para incluir hasta 22 aparatos dentro de cada vivienda. Para tener en cuenta la propiedad múltiple, aparatos están listados explícitamente: por ejemplo, tres de los 22 aparatos son televisores. En el modelo, una sola vivienda puede tener de cero a tres televisores.

Cada dispositivo se le asigna una demanda anual en kWh / año. Estos datos están basados en los datos de [7], junto con otros datos obtenidos de la distribuidora que da servicio a Cuenca, la Empresa Eléctrica Regional Centrosur S.A., y se ajusta para representar a las viviendas de la ciudad, que tienen un consumo promedio de 1588 kWh / año para abonados con tarifa residencial.

6.4 ASIGNACIÓN DE ACTIVIDAD A CADA EQUIPO

Los electrodomésticos cuyo uso depende de una actividad en particular son asignados a su perfil correspondiente. Puede haber varios dispositivos asignados a una sola actividad. Por ejemplo, microondas, licuadora y ollas arroceras están asignados a la actividad de cocinar. Esto no implica que todos estos aparatos se utilicen necesariamente cada vez que la cocción se lleva a cabo; simplemente se considera en el modelo la posibilidad de que se utilicen, incluso de forma simultánea.

Los electrodomésticos que no están asociados con ninguna actividad en particular se asignan al "otro" perfil de actividad, que abarca dos casos específicos:

- Para algunos tipos de aparatos, no hay perfil de actividad que describen cuando es probable que se los utilice. Un Wi-Fi es un ejemplo. En este caso, se toma el uso del aparato que sólo depende de la ocupación activa dentro de una vivienda.
- Los aparatos eléctricos de refrigeración y calefacción de espacios no encajan en el modelo de perfil de actividad ya que su uso varía con relación a las condiciones climáticas, construcción del equipo y características de llenado y vaciado. En este modelo, se ha considerado que el ciclo de los aparatos de refrigeración, no depende de la gente que es activa dentro de una vivienda. Para ello se ha usado el modelo

descrito en [9], cuyos factores son ajustados con el fin de obtener un perfil de uso con relación a las condiciones climáticas y de consumo de la ciudad de Cuenca.

6.5 ENCENDIDO DE CADA APARATO

El procedimiento para determinar si se produce el encendido de un aparato en cada lapso de tiempo de una simulación se presenta en la Ilustración 63 en el cual se dan los siguientes pasos:

El perfil de actividad se selecciona de acuerdo con la actividad del dispositivo, el número de ocupantes activos y si se trata de un fin de semana o no.

La probabilidad de que alguno de los ocupantes activos se dedica a la actividad en este momento se lee en el perfil de actividad.

La actividad de probabilidad se multiplica por el valor escalar de calibración.

El resultado de la etapa anterior se compara con un número aleatorio entre cero y uno. Si la probabilidad es más que el número aleatorio, a continuación, el encendido se produce.

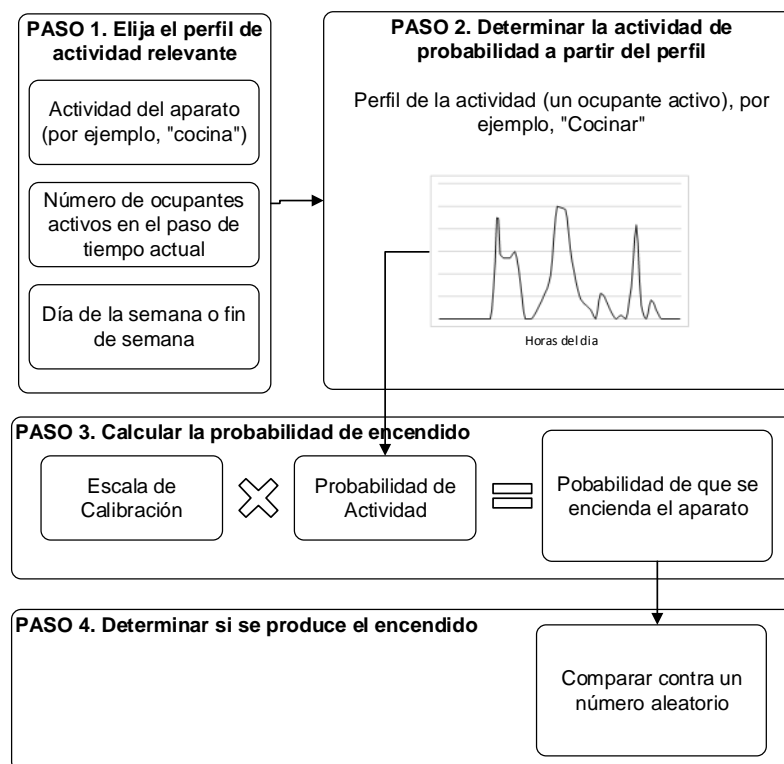


Ilustración 63: Estructura del Modelo de la Encendido de cada aparato Elaboración: Los Autores. Fuente: Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model [6]



6.6 ESCALA DE CALIBRACIÓN

Cada aparato tiene una "escala de calibración" [6], que es un factor en la probabilidad de encendido como se muestra en la Ilustración 63, y por lo tanto determina el número promedio de veces que el aparato se utiliza en un año. La escala de calibración se ajusta de modo que, en un número muy grande de iteraciones, el consumo promedio de un equipo que simule el modelo será similar al consumo medio anual del aparato según se obtuvo en [7]. Es decir que va a coincidir con los datos de entrada de energía anual consumida por cada aparato.

Por ejemplo, el microondas en el modelo usa 11,73 kWh / año. En cada encendida se asigna 1250 W durante 5 minutos en cada ciclo de funcionamiento y 2 W en modo de espera. Por lo tanto, debe apagar y prender aproximadamente 111 veces por año. Esto deja aproximadamente 240503 minutos del año en que se puede producir un evento de encendido. Así, el tiempo medio entre eventos de inicio, con exclusión del tiempo cuando el aparato está en un ciclo, es $240503/111 = 2166$ minutos. Dado que el aparato depende de la ocupación activa, la probabilidad de actividad del microondas es 0,243 debido a que de las 423 muestras solo 103 viviendas registraron una actividad de este equipo, y por lo tanto, en referencia a Ilustración 63, el escalar de calibración es $1/(2166 \times 0,243)=0,0019 \text{ min}^{-1}$.

Todos los valores se determinan por el mismo método que se ha descrito anteriormente, de tal manera que el número requerido de ciclos por año ocurren según se requiera para dar el correcto uso de energía global. Por supuesto, los aparatos que dependen de los perfiles de actividad diaria solo pueden comenzar si hay ocupación activa dentro de la vivienda.

6.7 SIMULACIÓN DEL MODELO

Como resultado del análisis descrito anteriormente, una simulación para la determinación de la demanda de una vivienda a lo largo de un día se muestra a continuación, separada por actividades y con los respectivos equipos (Ilustración 64, 65 y 66):



COCINA

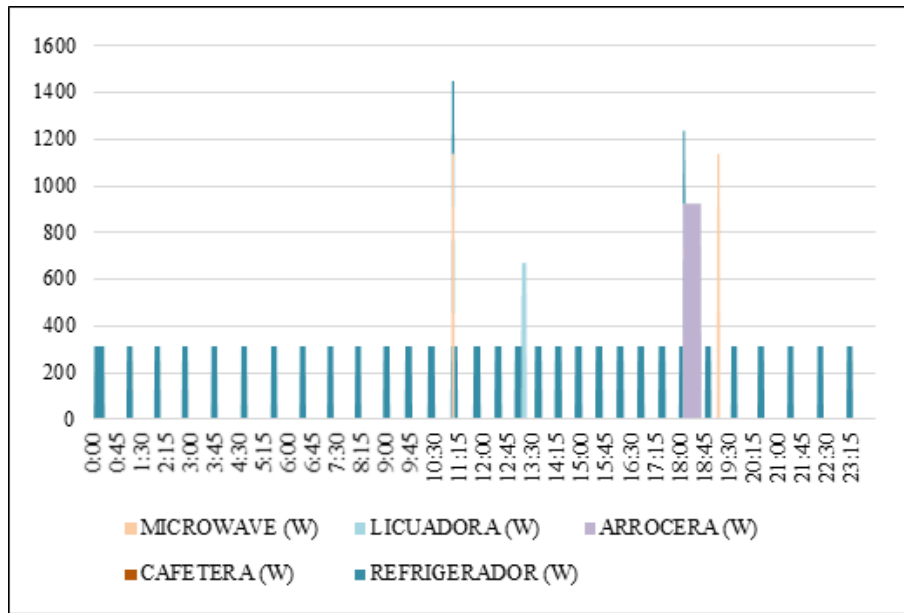


Ilustración 64: Demanda diaria para Cocción de alimentos.⁷⁰

ENTRETENIMIENTO

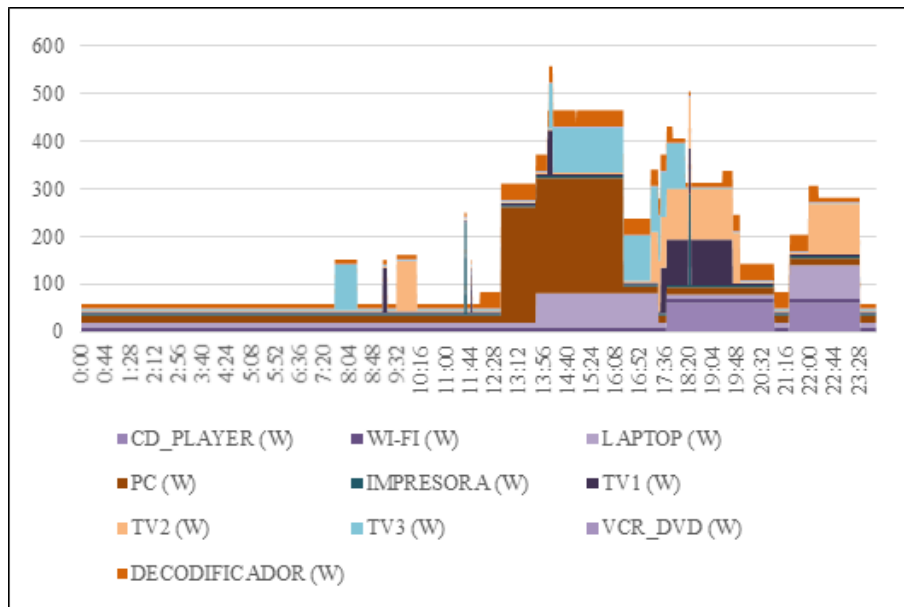


Ilustración 65: Demanda diaria para Entretenimiento.⁷¹

⁷⁰ REALIZADO: Autores

⁷¹ REALIZADO: Autores



ILUMINACIÓN

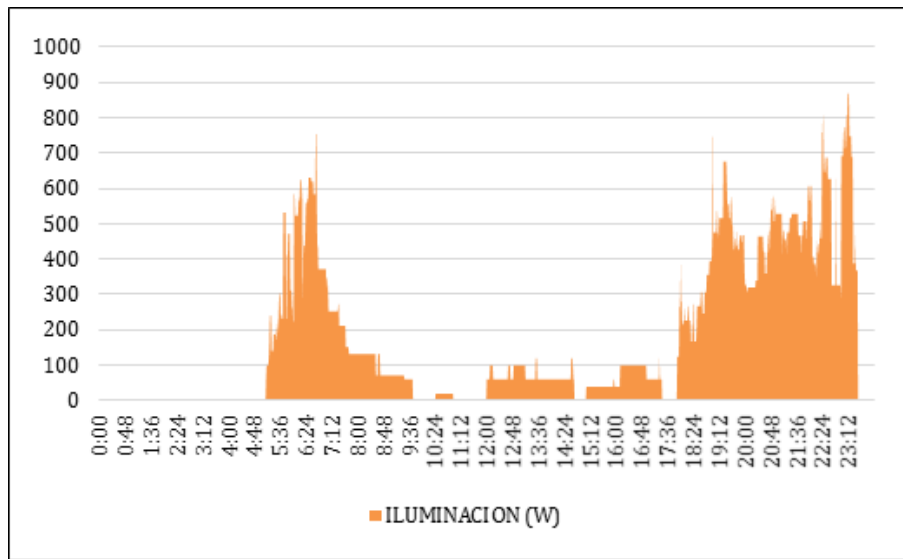


Ilustración 66: Demanda diaria para Iluminación.⁷²

⁷² REALIZADO: Autores



UNIVERSIDAD DE CUENCA

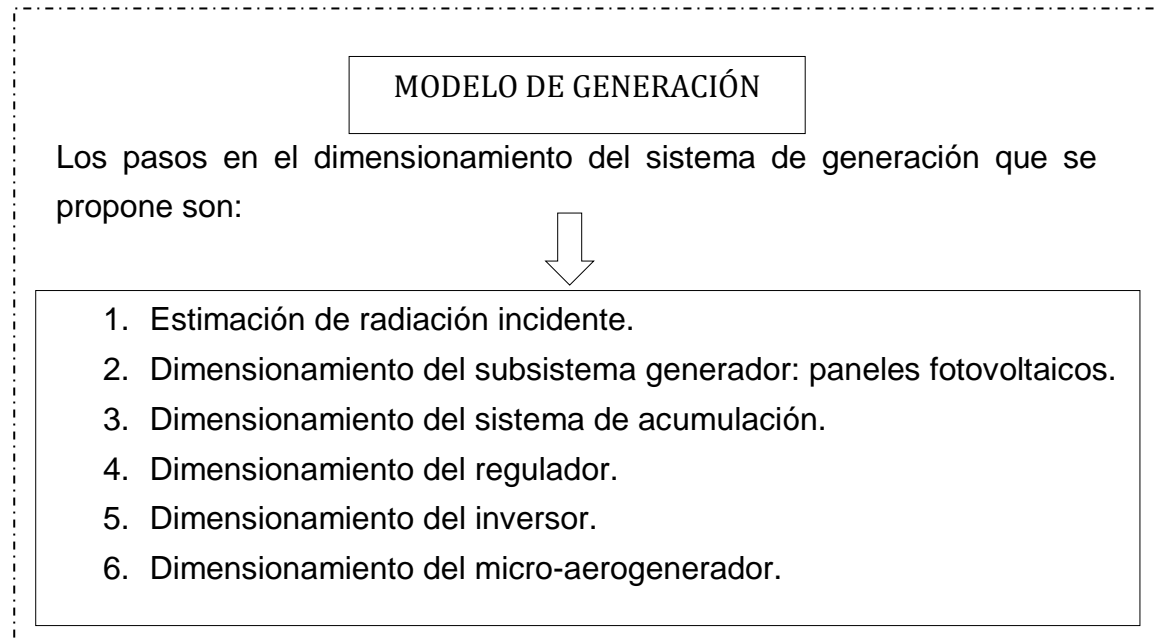
CAPÍTULO VII

ESTRUCTURA DEL MODELO DINÁMICO DE LA MICRO-RED

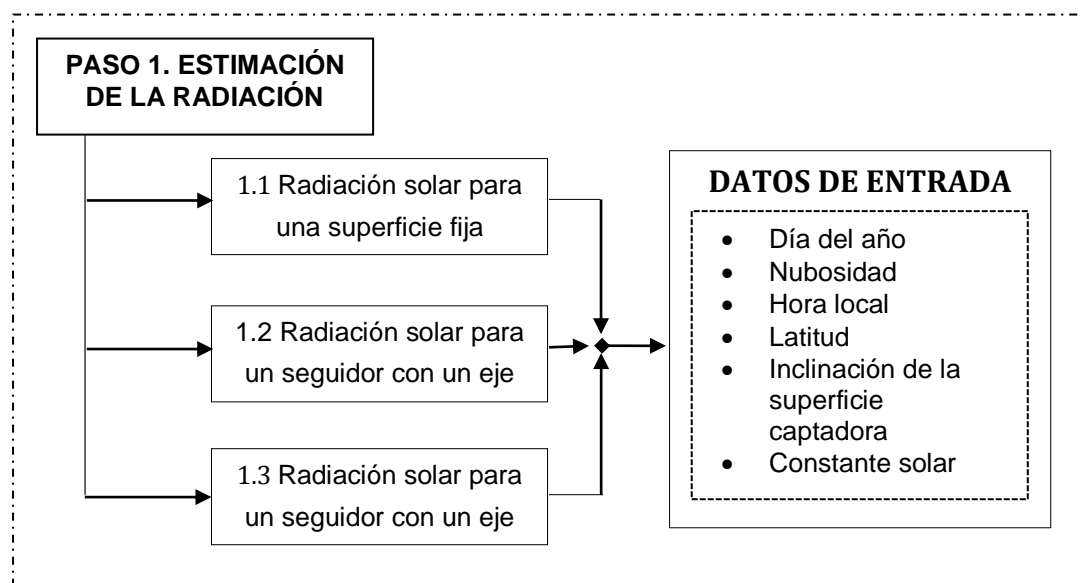


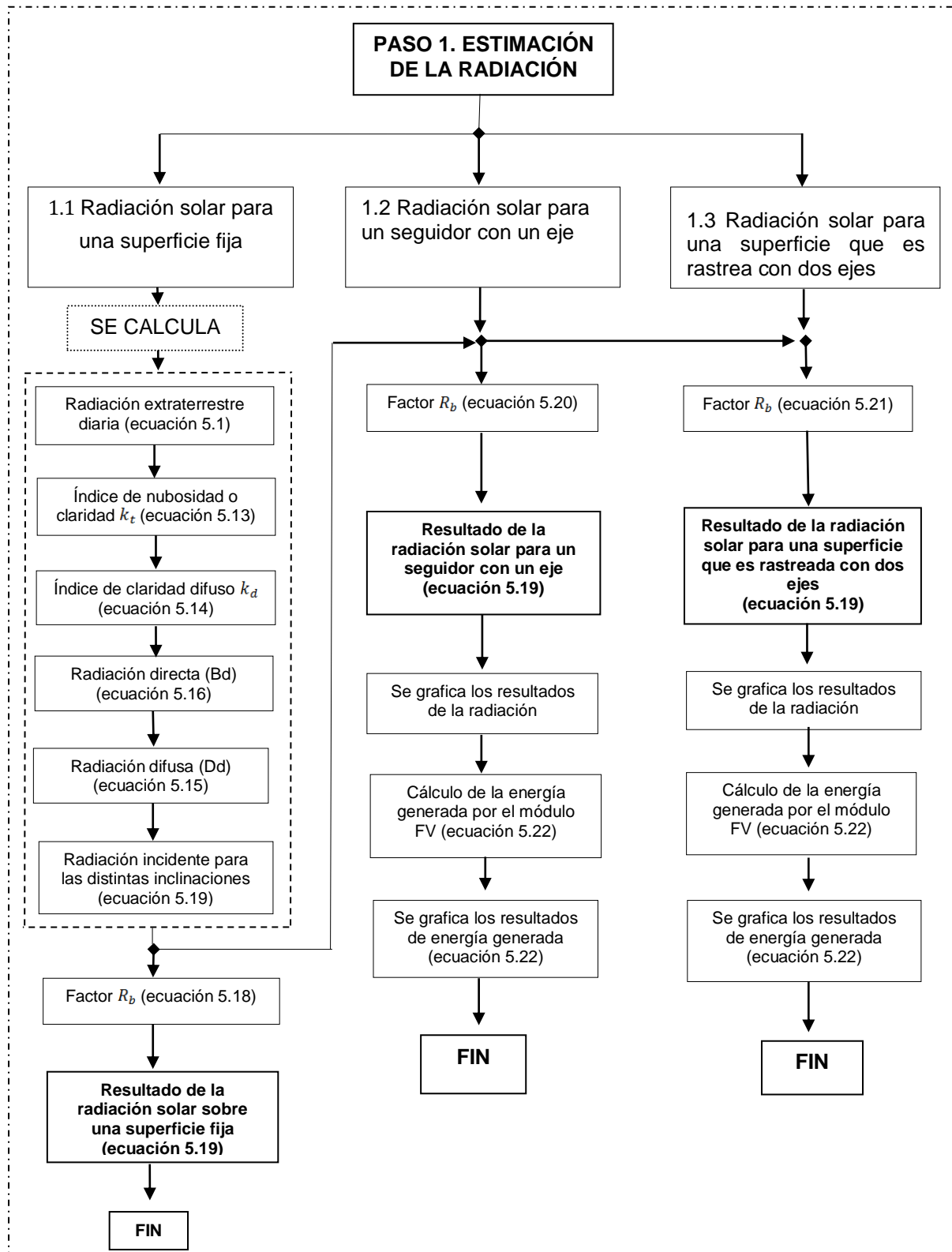
7 ESTRUCTURA DEL MODELO DINÁMICO DE LA MICRO-RED

7.1 ESTRUCTURA DEL MODELO DE GENERACIÓN



Con el fin de lograr captar la mayor energía proveniente del Sol en el sistema de generación fotovoltaica, se presentan tres métodos para la estimación de radiación solar que están presentes en el paso 1, dichos métodos presentan los mismos datos de entrada.



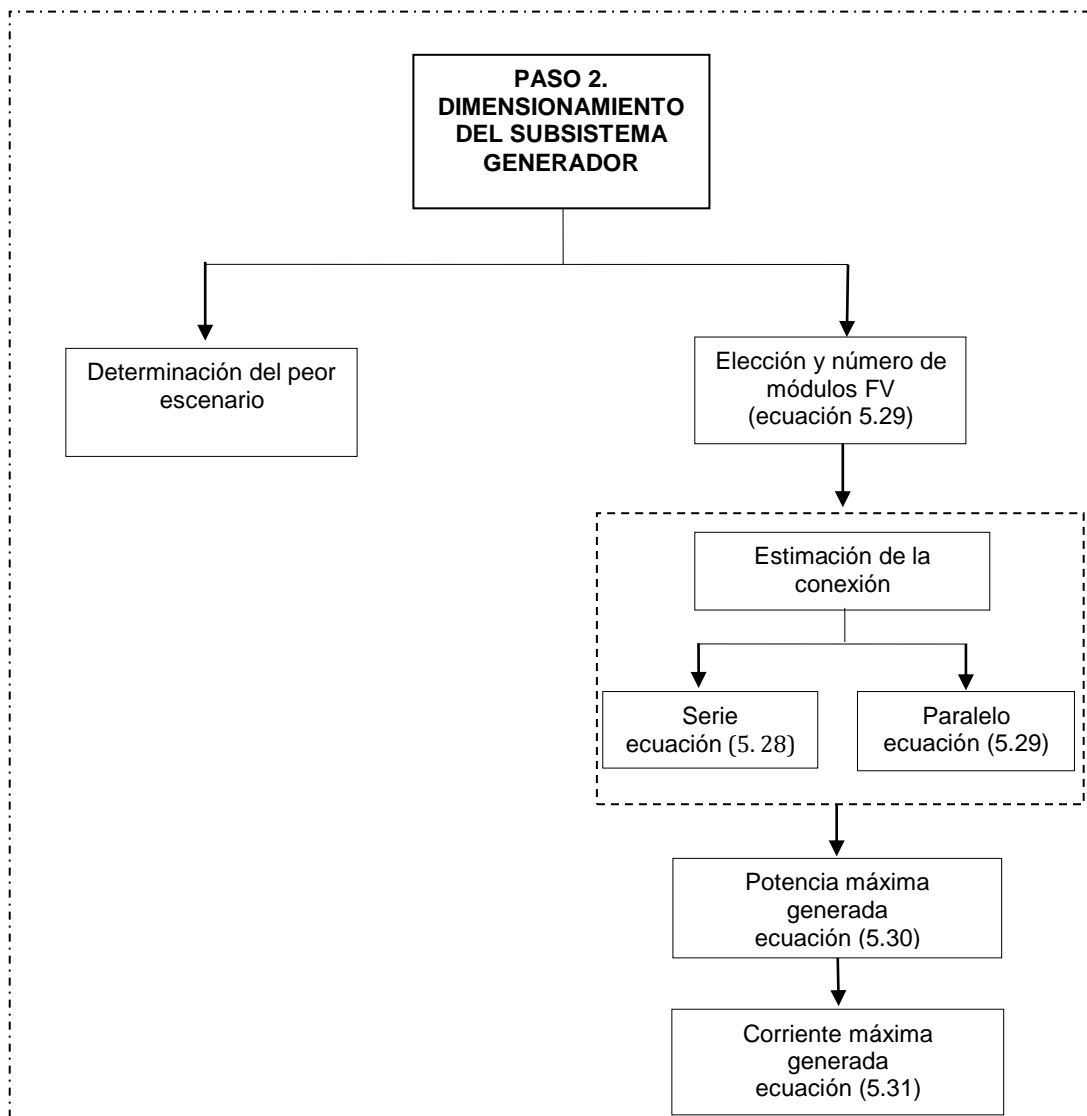


En el segundo paso realiza el dimensionamiento del subsistema generador: paneles fotovoltaicos; parte estableciendo nuestro peor escenario en función del mes en el que se tiene el mínimo de radiación solar.



Luego se lleva a cabo la elección del panel FV, en este caso se elige un panel de 150Wp, y posterior a esto se realiza el cálculo del número de paneles FV con la ecuación (5.27).

Luego de haber determinado el número de módulos FV, se realiza la estimación de la conexión, es decir, el número de módulos FV que se conectaran en serie y en paralelo, esto se lo calcula con las ecuaciones (5.28) y (5.29) respectivamente. Además se calcula la potencia y corriente máxima genera por el sistema de captación, por medio de las ecuaciones (5.30) y (5.31) respectivamente.

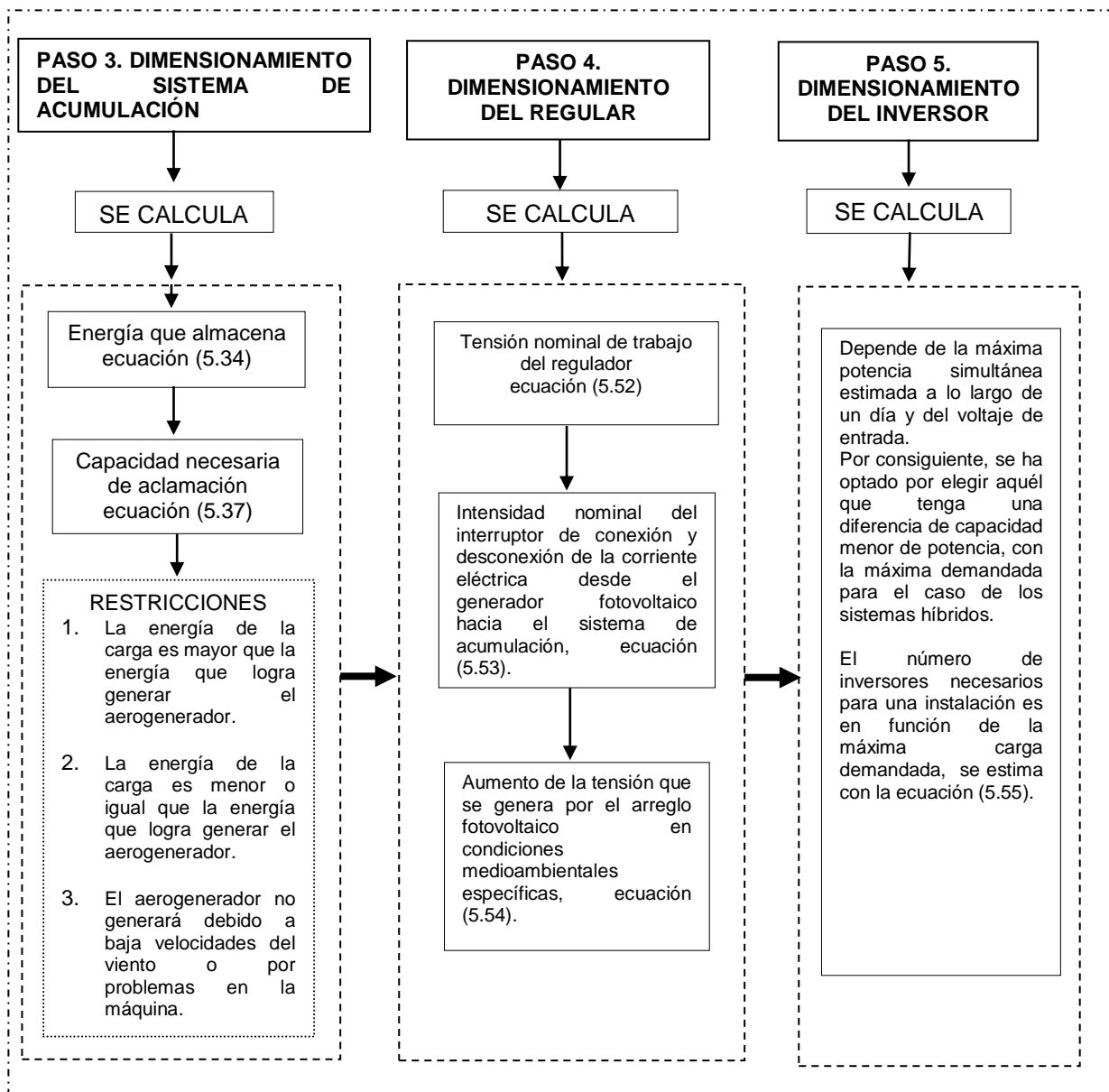


El tercer paso es realizar el dimensionamiento del Sistema de acumulación (baterías). La energía que puede almacenar el sistema de acumulación se la determina por la ecuación (5.34), esta incluye un factor de seguridad de 1,1.



En el cuarto paso se deben especificar: tensión nominal de trabajo del regulador, la intensidad nominal del interruptor de conexión y desconexión de la corriente eléctrica desde el generador fotovoltaico hacia el sistema de acumulación, por último se deberá tener en cuenta el aumento de la tensión que se genera por el arreglo fotovoltaico en condiciones medioambientales específicas.

En el quinto paso se realiza el dimensionamiento del inversor, donde el número de inversores se calcula con la ecuación (5.55)





UNIVERSIDAD DE CUENCA

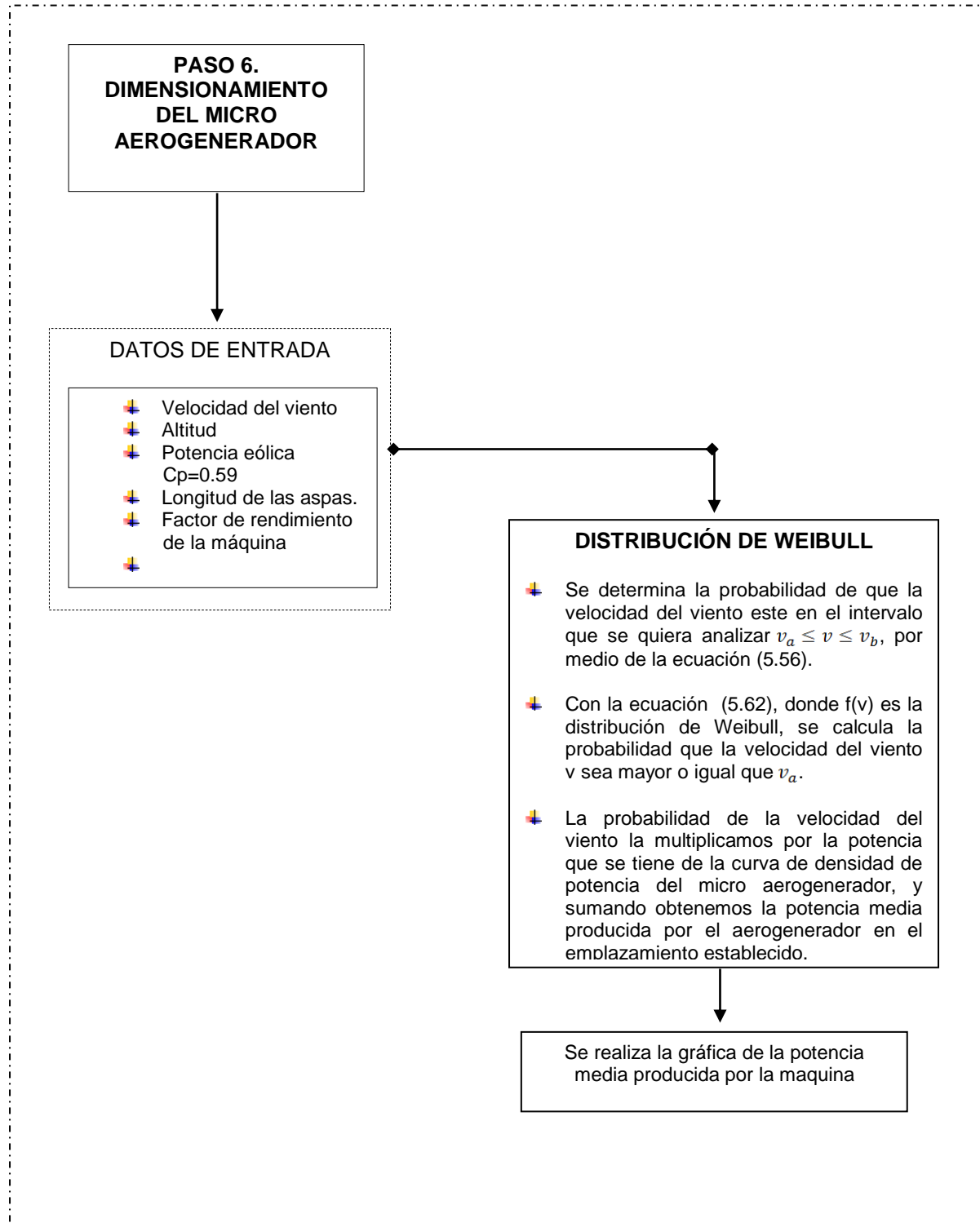
El último paso en el modelo de la oferta, es el dimensionamiento del micro aerogenerador, se empieza considerando al viento como una variable aleatoria con distribución de Weibull. La función de densidad de una variable aleatoria que tiene distribución Weibull es representada por la ecuación (5.56).

La ecuación (5.56) nos permite determinar la probabilidad de que la velocidad este en el intervalo de análisis $v_a \leq v \leq v_b$, el resultado de dicha ecuación al multiplicar por el 100% significara que la velocidad del viento estará en el intervalo estudiado un tanto por ciento % del tiempo y si a este porcentaje lo multiplicamos por 8760 horas que tiene un año, se obtiene las horas/año que va a estar funcionando el micro aerogenerador con dicha velocidad.

En la ecuación (5.62), $f(v)$ es la distribución de Weibull, esta ecuación se entiende como la probabilidad que la velocidad del viento v sea mayor o igual que v_a .

Con la ecuación (5.62) se calcula la probabilidad de que la velocidad del viento sea mayor o igual a una que sea de interés estudiar $v \geq v_a$, en nuestro caso v_a será un número mayor a la velocidad nominal del micro aerogenerador, ya que si se tiene una velocidad mayor a la nominal la máquina se frenera con el fin de evitar daños, el valor que se obtiene en de la ecuación (5.62) al multiplicar por el número de horas que tiene el año 8760 horas se obtiene el tiempo que la máquina perderá en generar.

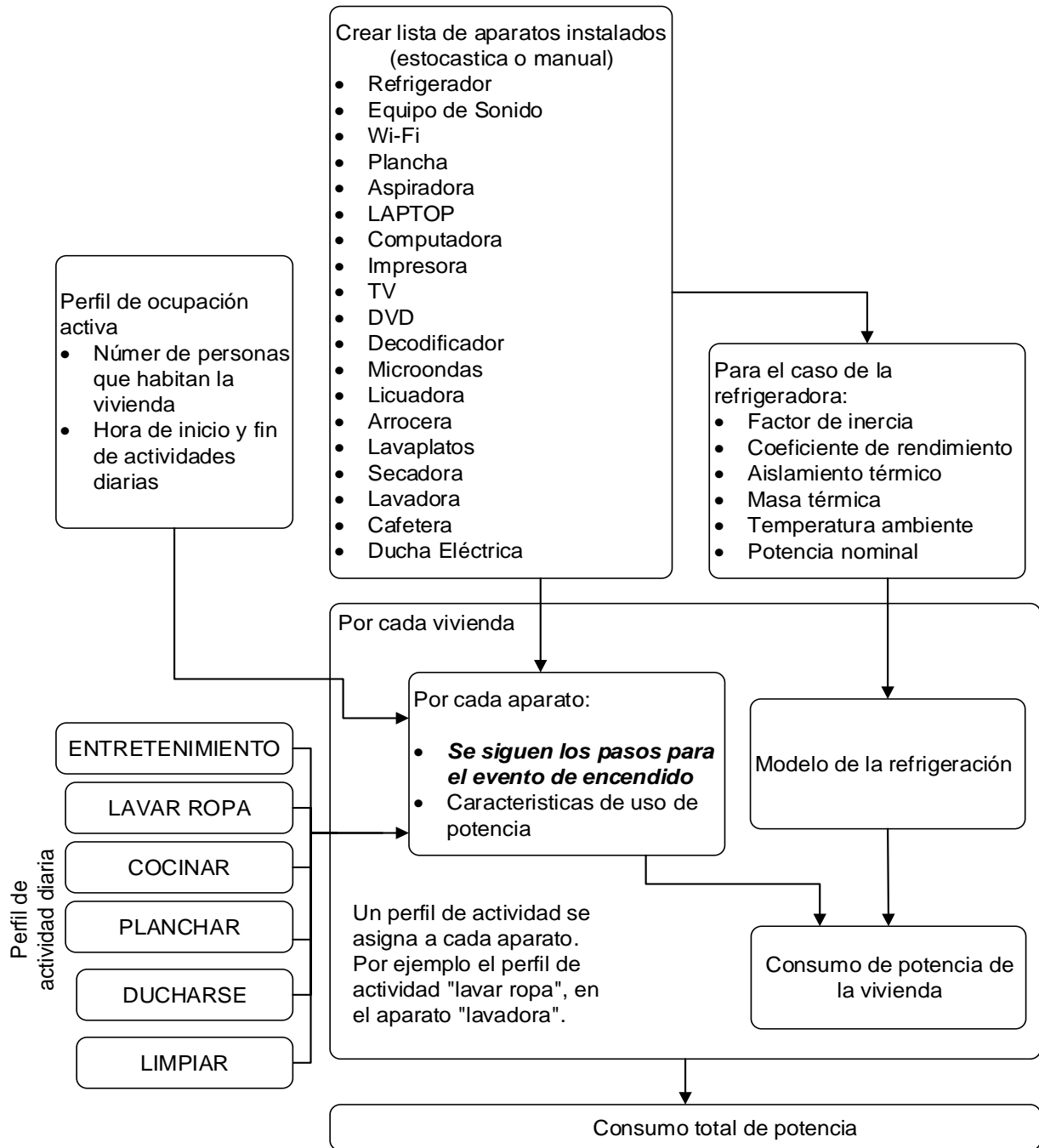
La potencia eléctrica que genera el micro aerogenerador depende de los factores ya analizados como es la distribución de Weibull que tiene el viento, la potencia eólica la cual se analizó aplicando la ley de Betz y solo se puede aprovechar el $C_p=0.59$ de la potencia eólica, velocidad del viento, características del micro aerogenerador y del factor de rendimiento que tenga el sistema es decir la máquina. Lo que genera el micro aerogenerador se calcula con la ecuación (5.66).



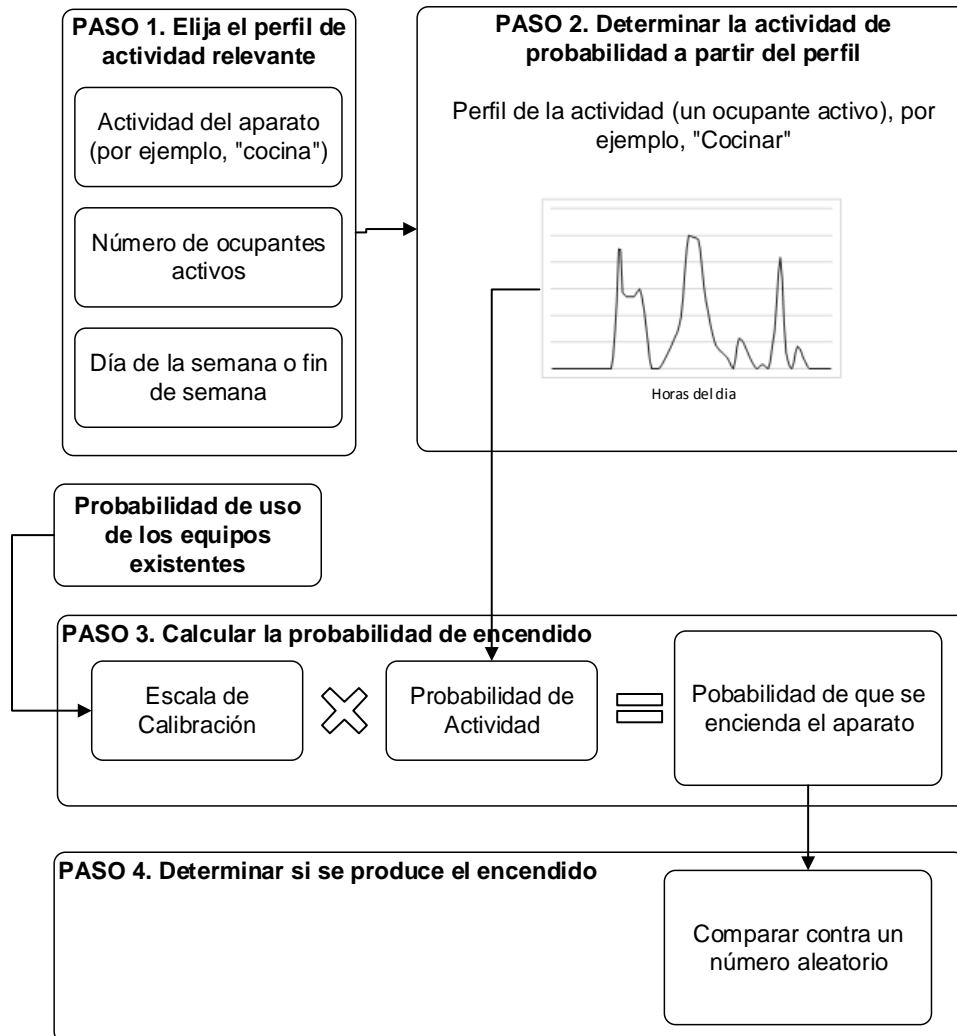


7.2 ESTRUCTURA DEL MODELO DE LA DEMANDA

Para la determinación de la demanda de una vivienda se usa el modelo que se plante a continuación donde se tiene como datos de entrada los que se encuentran en la parte exterior del cuadro principal.



Para la predicción del evento de encendido de un aparato se siguen los siguientes pasos:



7.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE LA OFERTA Y DEMANDA

7.3.1 Resultados de la oferta

Los resultados de las gráficas finales de la generación se obtienen del simulador planteado para la modelación dinámica de la micro-red, primero se obtiene la curva de generación cuando se tienen 6 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, esta curva se observa en la *Ilustración 67*, esta condición representa el peor escenario para el modelo de la oferta ya que se tiene el máximo consumo por la carga.

En el peor escenario de la generación el simulador nos arroja los siguientes datos:

Total generado por día solar:	4,43	kWh
Total generado por día eólico:	3,07	kWh

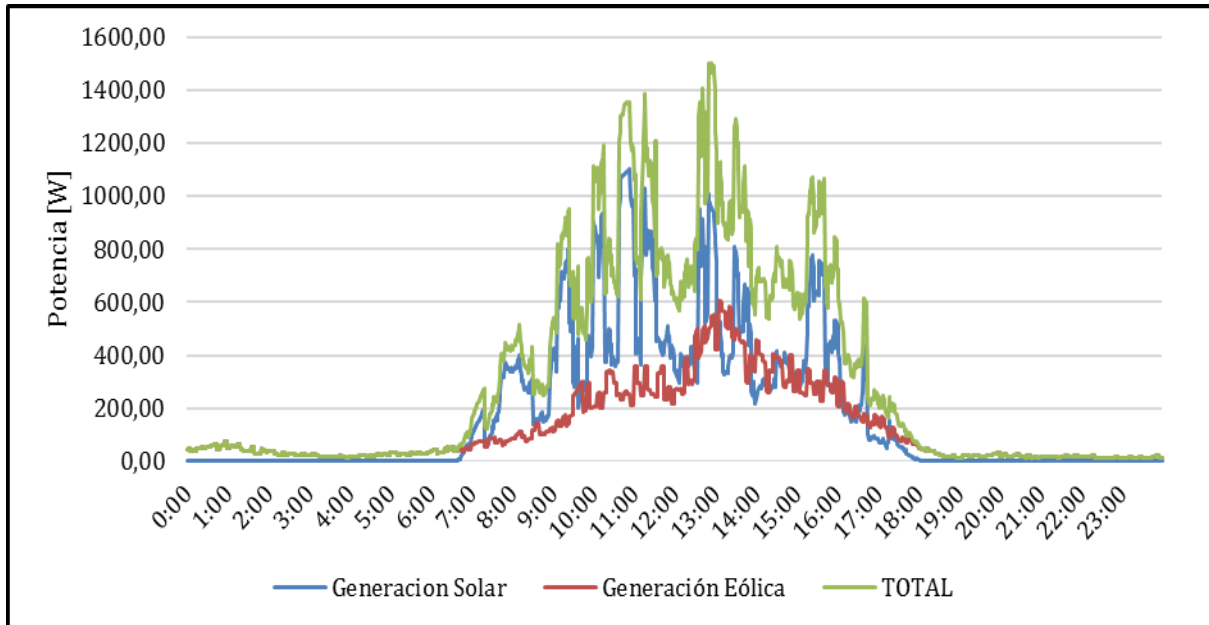


Ilustración 67. Curva de generación con 6 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W.⁷³

La siguiente gráfica se obtiene con un módulo FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, esto representa el mejor escenario para la generación ya que el consumo de la carga es mínima, esto se aprecia en la *Ilustración 68*.

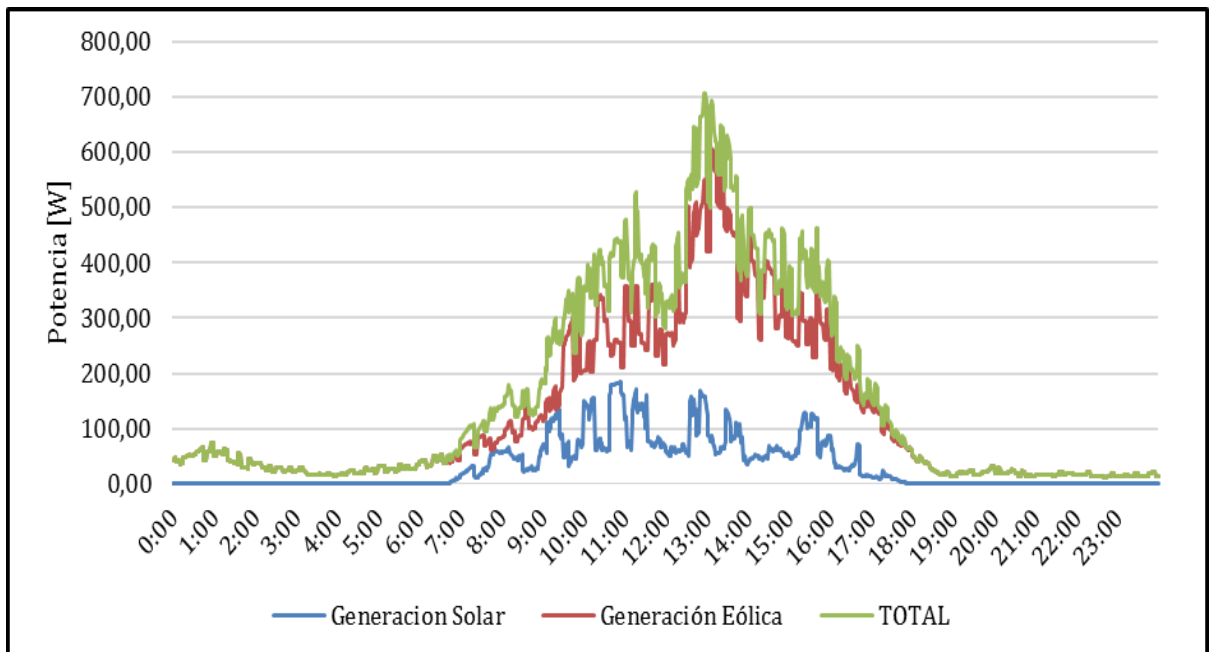


Ilustración 68. Curva de generación con 1 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W.⁷⁴

⁷³ REALIZADO: Autores

⁷⁴ REALIZADO: Autores



En el mejor escenario de la generación el simular nos arroja los siguientes datos:

Total generado por día solar:	0,74	kWh
Total generado por día eólico:	3,07	kWh

7.3.2 Resultados de la demanda

7.3.2.1 Curva de demanda diaria

Usando el modelo que se describió anteriormente de la demanda podemos obtener un perfil promedio de la demanda para la ciudad de Cuenca, este perfil es contrastado con el perfil de demanda de la EERCS S.A. y con los resultados que muestra [7].

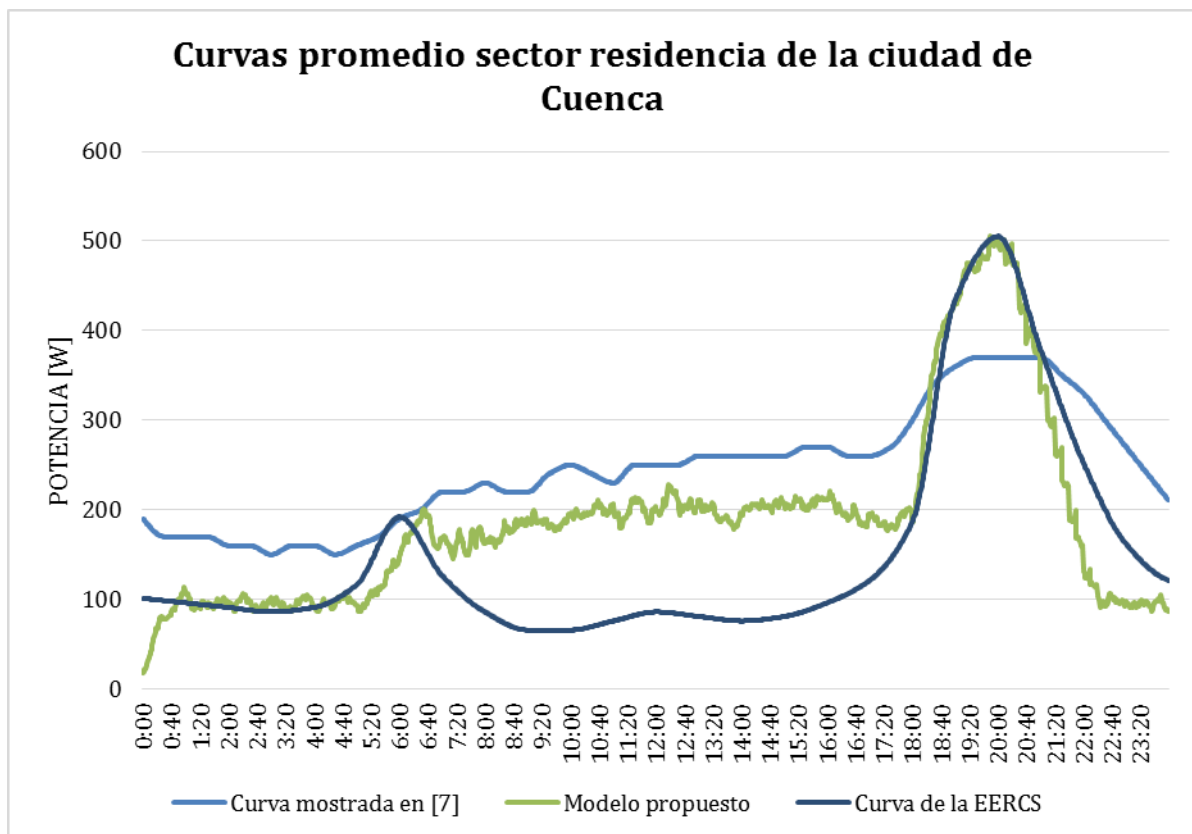


Ilustración 69: Curva promedio para el sector residencial de la ciudad de Cuenca.⁷⁵

⁷⁵ REALIZADO: Autores

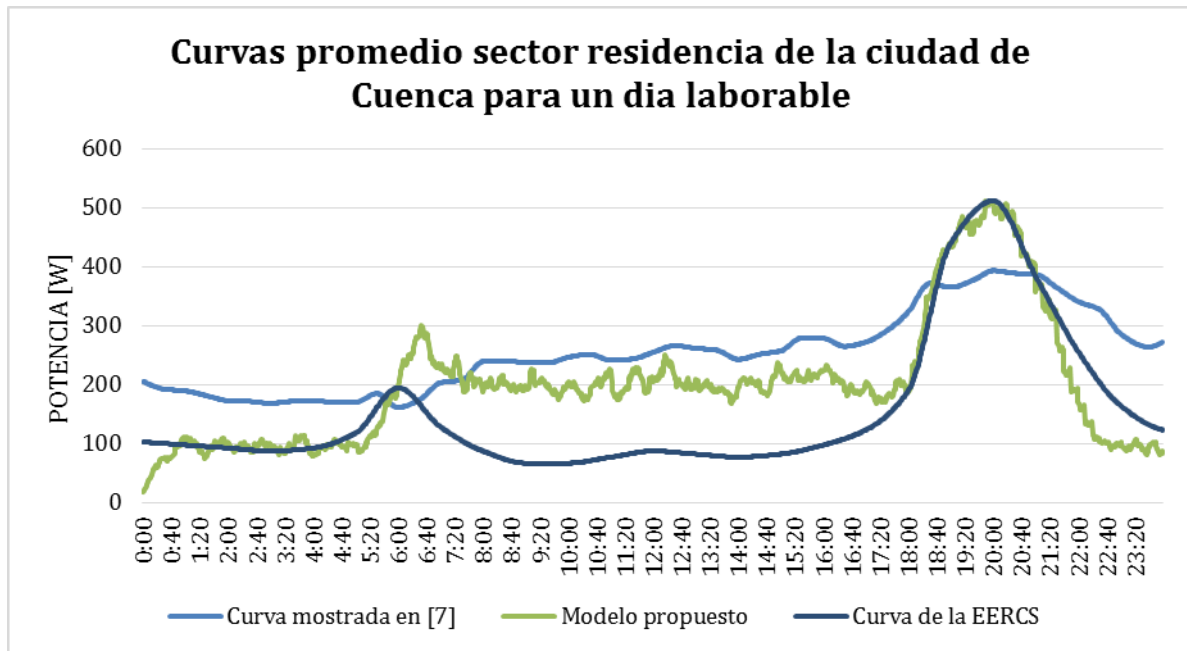


Ilustración 70: Curva promedio para el sector residencial de la ciudad de Cuenca para un día laborable.⁷⁶

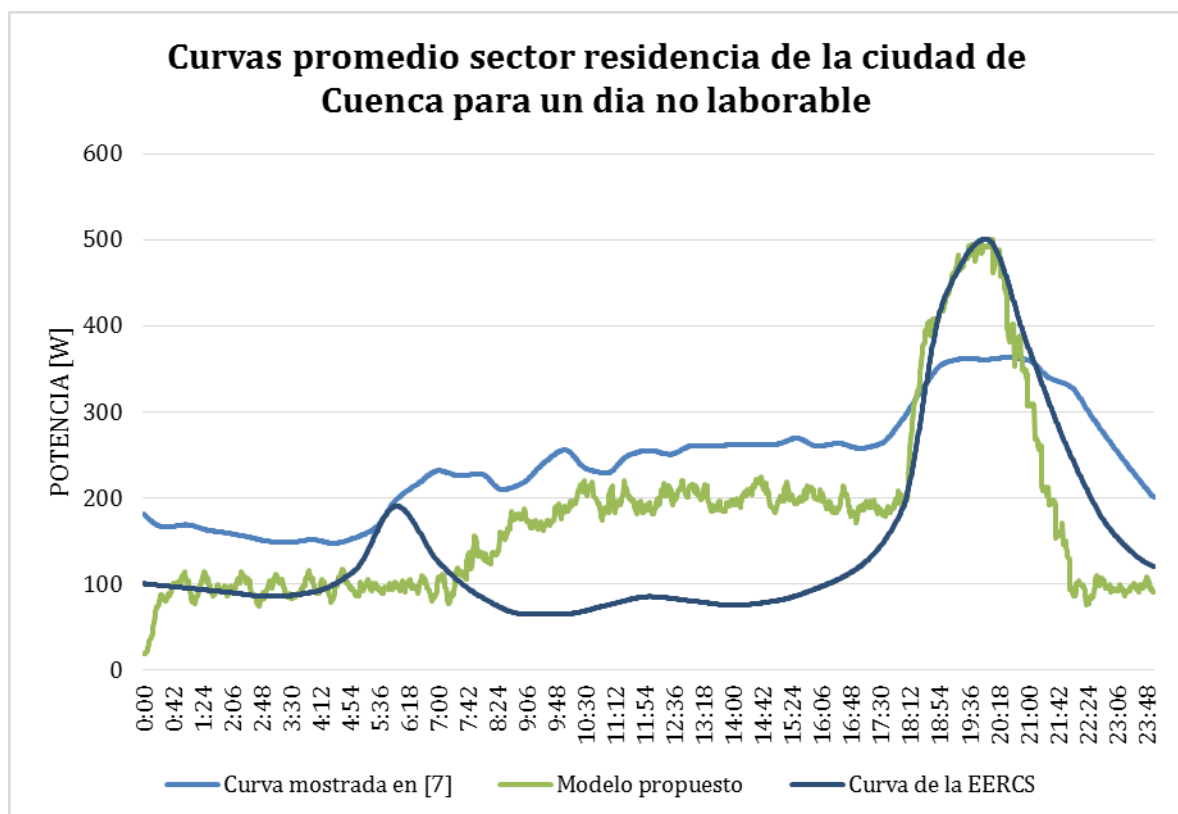


Ilustración 71: Curva promedio para el sector residencial de la ciudad de Cuenca para un día no laborable.⁷⁷

⁷⁶ REALIZADO: Autores

⁷⁷ REALIZADO: Autores

Además de las curvas que se muestran en las ilustraciones anteriores, es importante para el dimensionamiento de las micro-redes conocer cuáles son los valores de potencia máxima y mínima que se podría obtener.

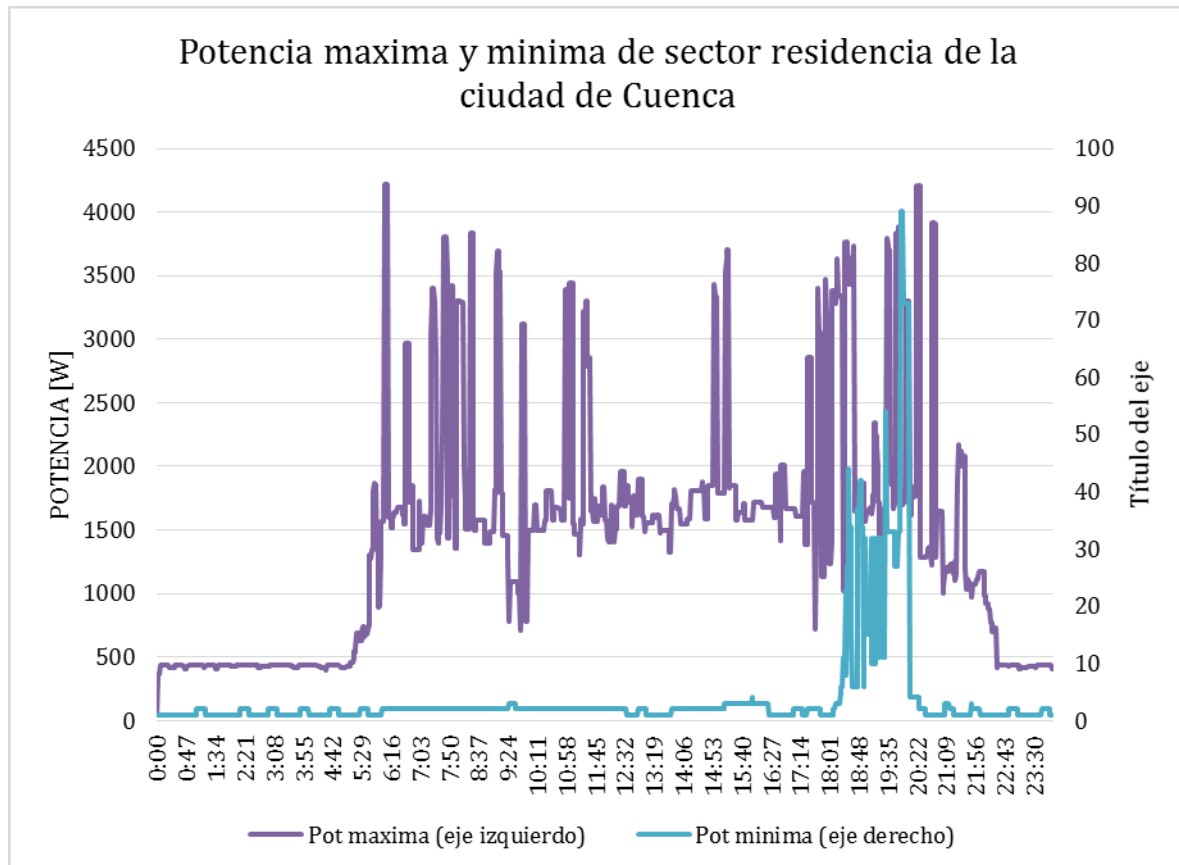


Ilustración 72: Potencia máxima y mínima que tiene una micro-red.⁷⁸

7.3.2.2 Factor de potencia

Uno de los factores importantes para el estudio de flujos de potencia es el Factor de Potencia. Los cuales se obtuvieron usando el modelo de demanda descrito anteriormente el cual dio como resultado:

⁷⁸ REALIZADO: Autores

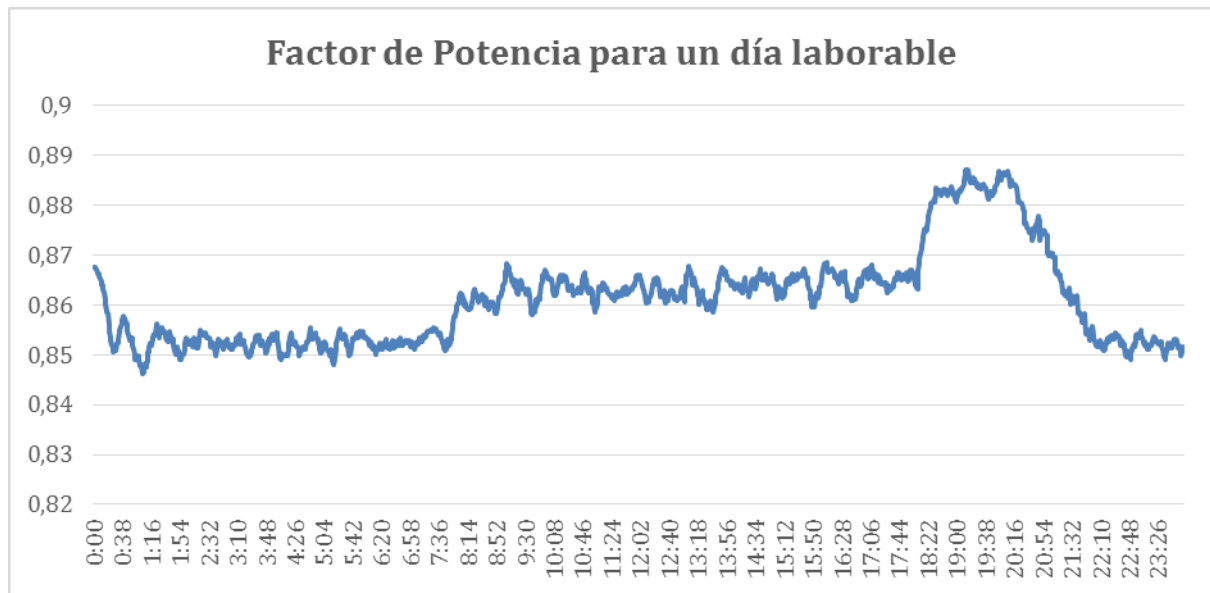


Ilustración 73: Factor de Potencia para un día laborable.⁷⁹

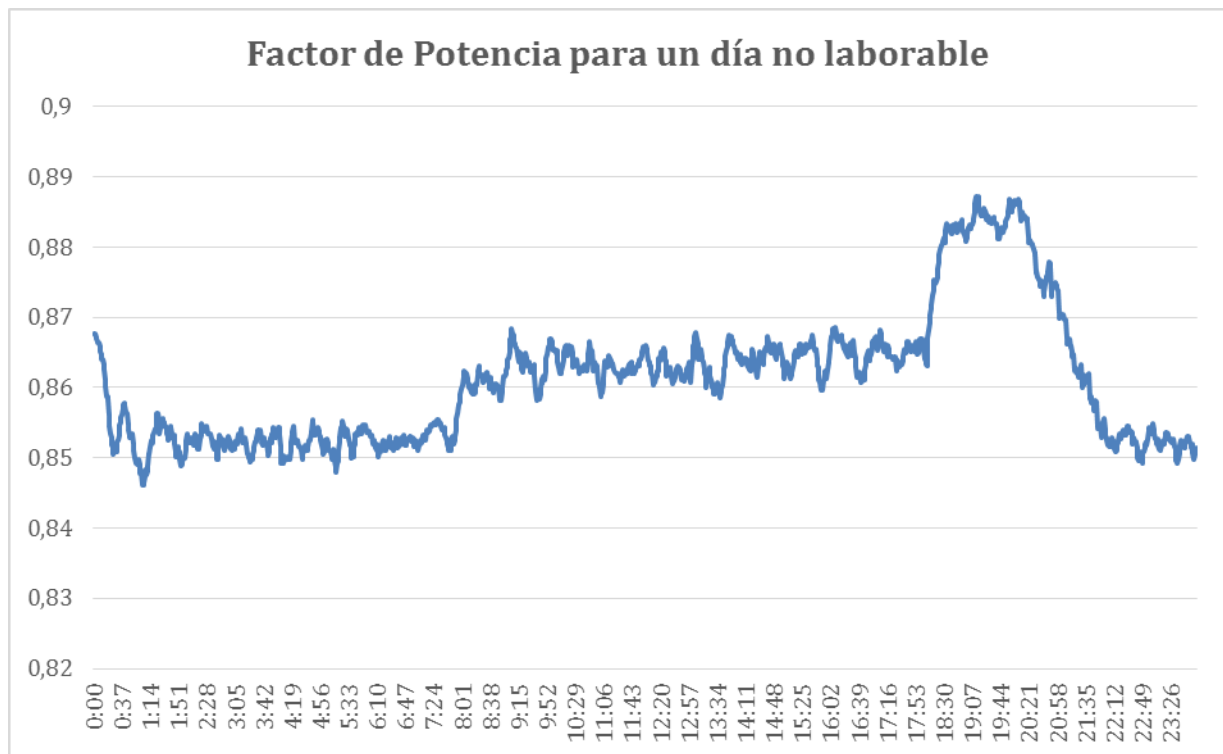


Ilustración 74: Factor de Potencia para un día no laborable.⁸⁰

Finalmente, como resultado de la modelación de la demanda se obtuvieron los usos finales de energía eléctrica promedio en la ciudad de Cuenca (

Ilustración 75) los cuales se comparan con los obtenidos en [7] (

⁷⁹ REALIZADO: Autores

⁸⁰ REALIZADO: Autores

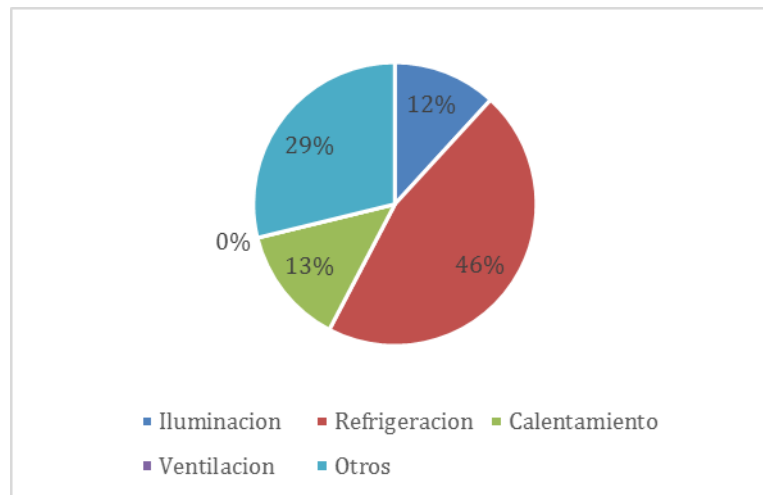


Ilustración 76: Usos finales de energía en la ciudad de Cuenca según [7]

7.4 INTEGRACIÓN DE LOS MODELOS

Una vez estudiada la oferta y la demanda, se muestra un ejemplo de la integración de estos dos modelos que serán aplicados para pronosticar la operación de una micro-red compuesta por un equipamiento asignado de forma manual, utilizando datos climáticos de la ciudad de Cuenca y mostrando el efecto de nubosidad mediante asignación aleatoria.

Para obtener las curvas con la generación incorporada, en las cuales para la demanda están activas las cargas de: refrigeradora, equipo de sonido, wi-fi, computadora, impresora, licuadora, arrocera, decodificador, DVD, iluminación y TV. Además se considera que en la micro-red están presentes 5 personas, las cuales tienen actividad desde las 05:00 hasta las 22:00 horas.

La

Ilustración 77 es la curva final de la oferta y demanda de la micro-red, que tiene como oferta un módulo FV de 150Wp con un micro aerogenerador de 1500W y la demanda la carga que se mencionó anteriormente. En la curva se observa que la cantidad de energía que se puede enviar en estas condiciones al sistema de almacenamiento es baja, los datos que se obtienen del simulador son:

Total generado por día solar:	0,74	kWh
Total generado por día eólico:	3,07	kWh
Total demandado por día:	6,98	kWh
Total exportado	1,22	kWh

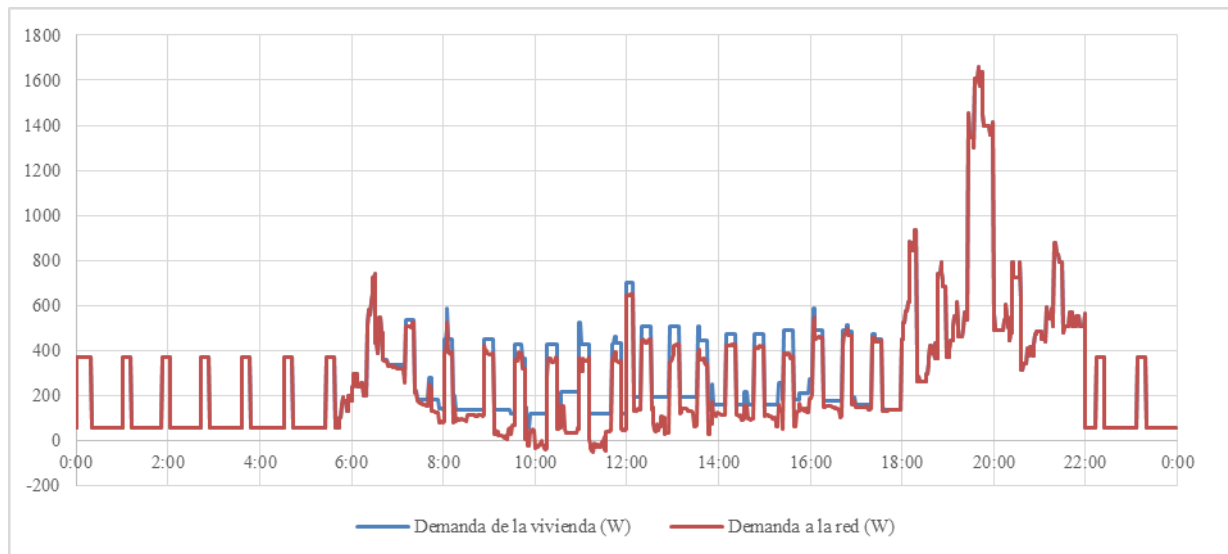


Ilustración 77. Curva de la oferta con 1 módulo FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, la demanda especificada.⁸¹

La siguiente ilustración es la curva de la oferta y demanda final de la micro-red, que tiene como oferta 6 módulos FV de 150Wp con un micro aerogenerador de 1500W y la demanda la carga que se mencionó. En la curva se observa que la cantidad de energía que se puede enviar en estas condiciones al sistema de almacenamiento es considerable y por ende se aprecia las ventajas que presenta una micro-red con generación propia, ya que se puede almacenar energía para satisfacer parte de la demanda que se tenga en cierto instante, los datos que se obtienen del simulador son:

Total generado por día solar:	4,43	kWh
Total generado por día eólico:	3,07	kWh
Total demandado por día:	6,98	kWh
Total exportado	4,44	kWh

⁸¹ REALIZADO: Autores

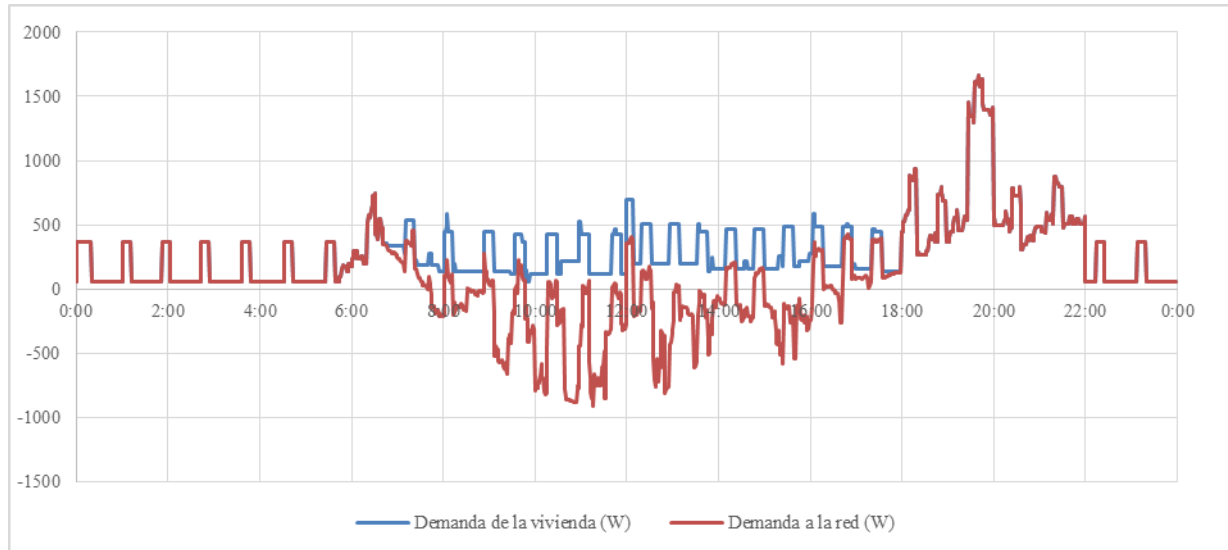


Ilustración 78. Curva de la oferta con 6 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, la demanda especificada.⁸²

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los resultados que arroja el simulador en función de las curvas finales de la oferta y demanda de la micro-red, donde se observa el comportamiento dinámico de la micro-red. En la tabla se puede apreciar el efecto que tiene la generación propia en la micro-red, cuando se tiene el dimensionamiento planteado de 6 módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W.

Tabla 17. Modelo dinámico de la micro-red.

MODELO DINÁMICO DE LA MICRO-RED				
	MODELO DE LA OFERTA		MODELO DE LA OFERTA Y DEMANDA	
	6 módulos FV y un micro aerogenerador	1 módulo FV y un micro aerogenerador	1 módulo FV, un micro aerogenerador y demanda	6 módulos FV, un micro aerogenerador y demanda
Módulo FV= 150Wp Micro aerogenerador =1500W				
Total generado por día con módulo FV [kWh]	4,43	0,74	0,74	4,43
Total generado por día con el micro aerogenerador [kWh]	3,07	3,07	3,07	3,07
TOTAL DE ENERGÍA DEMANDADA POR DIA [kWh]			6,98	6,98
TOTAL DE ENERGÍA A EXPORTAR [kWh]			1,22	4,44

⁸² REALIZADO: Autores



UNIVERSIDAD DE CUENCA

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a los problemas que se crean al utilizar combustibles fósiles para la generación de la energía eléctrica, en el mundo se vienen desarrollando otras fuentes alternativas, las cuales acarrearán sus propios problemas técnicos durante su aplicación.

La creciente demanda de energía limpia en nuestro planeta hace que se recurra más a las energías renovables no convencionales, esto significa un reto en los análisis de confiabilidad del suministro, para lo cual se crean nuevos métodos y herramientas que faciliten el estudio de estas fuentes y su aplicación a los sistemas de potencia que los requieran. Este es el caso de los sistemas solares fotovoltaicos aplicados a nivel residencial.

Como se puede observar en los ejemplos mencionados, a medida que se incrementa el número de paneles solares se incrementa la cantidad de energía que puede ser exportada a la red ya que el consumo de energía no es el más alto a la hora de mayor radiación. Dado que el mayor consumo de energía se da en las horas que no existe energía solar es importante la incorporación de unidades de almacenamiento (baterías) acorde a las necesidades para de esta manera optimizar el sistema autónomo y depender menos de la red pública.

Mediante la simulación planteada para de la oferta y demanda de la micro-red, se obtiene el comportamiento dinámico que esta va tener a la largo de un día, analizando los resultados de las curvas finales se concluye que es conveniente tener un sistema de almacenamiento en el sistema híbrido, cuando se tiene generación a través de seis módulos FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W, ya que aquí se logra obtener excedente de energía generada desde las 08:00 hasta las 16:00. Con el dimensionamiento del sistema de generación expuesto prácticamente se tiene que la energía que se enviara a las baterías es de 4,44KWh/día. Mientras que si se dimensiona la generación con un módulo FV de 150Wp y un micro aerogenerador de 1500W se exportara 1,22 KWh/día, es decir se obtiene un excedente de energía que es mínimo pero que representa ganancia en la micro-red.



Para el dimensionamiento de la generación se recomienda tener información previa del emplazamiento, donde se detalle el potencial eólico y solar que se pueda aprovechar en el emplazamiento de la micro-red, que está conformada por un sistema híbrido.

Para el modelo de generación eólica se debe tener un registro de las velocidades del viento, con el fin de calcular las probabilidades exactas de las velocidades del viento en un instante dado, por medio de la distribución de Weibull y así minimizar el grado de incertidumbre en el dimensionamiento de este sistema.

Complementariamente, la incorporación de medidas “demand side management (DSM)” [17] puede tener un gran impacto en el aprovechamiento del sistema fotovoltaico, esto incluye el desplazamiento de carga de las horas pico a las horas de menor demanda y mayor oferta. Esto se puede lograr incorporando a las viviendas sistemas de control automatizado o simplemente cambiando el hábito de la personas al utilizar ciertos equipos.

En el lado de la demanda, se tienen modelos avanzados para determinar la misma con precisión. Uno de estos modelos ha sido desarrollado en el presente trabajo, dando resultados que se asemejan a los obtenidos en estudios previos.

8.1 TRABAJOS FUTUROS

El presente trabajo es parte de un proyecto de investigación que cubre otros aspectos importantes relacionados a micro-redes. Por ejemplo, al modelo estudiado se pretende incorporar, en el lado de la auto-generación, un generador eólico, almacenamiento de energía y mecanismos de control inteligente. En resumen, se plantea a partir de este modelo desarrollar algoritmos para el control de redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) en el Ecuador.

Un análisis más profundo de este tipo de redes va a permitir el dimensionamiento de sistemas híbridos para hogares y aportar al análisis del denominado nuevo paradigma energético, donde las energías renovables a pequeña escala y las tecnologías de la información juegan un papel preponderante.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Por otro lado, usando este modelo se puede determinar con exactitud las variables que tienen relación con la demanda residencial (incluido el consume de equipos en “stand by” cuyo valor puede ser significativo), datos que son de mucha importancia para la planificación en las empresas distribuidoras. Este es un aspecto clave para el Ecuador pues a partir de este análisis se puede estudiar también el impacto de incorporar nuevas cargas residenciales como las cocinas de inducción y duchas eléctricas.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Robert H. Lasseter, «Microgrids and Distributed Generation,» *IEEE*, p. 7, Septiembre 2007.
- [2] J. C. S. Nouredine Hadjaid, *SmartGrids*, London: Wiley, 2012, pp. 6-8.
- [3] G. Electricity, «Microgrids,» *Galvin Electricity Initiative*, p. 6, 20 Mayo 2012.
- [4] J. A. G. B. A. Grandjean, «A review and an analysis of the residential electric load curve models,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n^o 16, pp. 6539-6565, 2012.
- [5] V. I. U. Lukas G. Swan, «Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n^o 13, pp. 1819-1835, 2009.
- [6] I. Richardson, M. Thomson y D. Infield, «Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model,» *Energy and Building*, vol. 10, n^o 42, pp. 1878-87, 2010.
- [7] P. E. Martínez Mosquera, *USOS FINALES DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y GLP EN EL CANTÓN CUENCA. ESCENARIOS AL AÑO 2015.*, Cuenca, 2010.
- [8] U. V. Swan LG, «Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: a review of modeling techniques,» *Renowable and Sustainable Energy Review*, vol. 13, pp. 1819-1835, 2009.
- [9] E. Rodríguez, «Flexible load management in Smart-grids,» 2013.
- [10] F. S. R. L. P. Constantopoulos, « A real time consumer control scheme for space conditioning usage under spot electricity pricing,» *ESTIA*, 1991.
- [11] I. L. B. A.-B. W. L. K. P. F. R. N. Baghina, «Predictive Control of a Domestic Freezer for Real-Time Demand Response Applications,» 2012.
- [12] E. Lazo, «DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE POTENCIA,» Piura, 2010.
- [13] J. A. D. a. W. A. Bechman, *SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESS*, vol. 1, Wiley, 2013, pp. 44-113.
- [14] P. Fernández Díez, *Energía Solas*, vol. I, 1993, p. 55~148.
- [15] M. R. P. J. R. U. Ibáñez plana, *Tecnología Solar*, 1ra edición ed., Madrid: Mundi-Prensa, 2004.
- [16] INEC, «HOGARES SEGÚN NIVEL SOCIOECONOMICO POR EQUIPAMIENTO EN CUENCA (010150),» Cuenca.
- [17] J. A. G. B. A. Grandjean, «A review and an analysis of the residential electric load curve models,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n^o 16, pp. 6539-6565, 2012.
- [18] G. J. L. Frederick S. Hillier, *INTRODUCCIÓN A LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES*, D.F: Mc Graw Hill, 2010, pp. 392-418.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

ANEXOS



ANEXO 1

PARTE A

1A.1 MÉTODO SIMPLIFICADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

La producción de un panel fotovoltaico está íntimamente relacionado con la temperatura ambiente y la célula solar, esto se refleja en la siguiente ecuación.

$$P_m = P_{módulo} \frac{(G)}{G^*} [1 - \zeta(T_C - T_C^*)] \quad (A.1)$$

Donde:

- P_m : Potencia en el punto de máxima potencia del FV [W]
- $P_{módulo}$: Potencia nominal en condiciones estándar [W]
- G^* : Irradiancia en condiciones de referencia [W/m²]
- G : Irradiancia global incidente en la superficie del módulo fotovoltaico [W/m²]
- ζ : Coeficiente de variación con la temperatura de la potencia. El valor típico para el Silicio es $4.41 \cdot 10^{-3}$
- T_C : Temperatura de célula [°C]
- T_C^* : Temperatura ambiente en condiciones de referencia, 25 °C

$$T_C = T_a + \frac{TONC - 20}{800} G \quad (A.2)$$

Donde:

- T_a : Temperatura ambiente [°C]
- $TONC$: Temperatura nominal de operación [°C]

1A.2 CÁLCULO DE LA ENERGIA QUE GENERA UN PANEL FOTOVOLTAICO

Con el modelo planteado en el capítulo 5 se obtiene la curva que el panel generara ya sea diaria, semanal o mensual, con el modelo obtenemos una curva diaria; esta es adquirida para un día cualquiera del mes de Junio que representa nuestro peor escenario.

Empezamos seleccionando el panel que se va a instalar, se muestra en el siguiente catálogo, el panel tiene una potencia de 150Wp.

Catálogo de productos

Paneles Solares













Fabricante: EXMORK 艾美克新能源							
Tipo	5Wp 12V	15Wp 12V	25Wp 12V	50Wp 12V	80Wp 12V	100Wp 12V	150Wp 24V
Material	Si-Poli- cristalino	Si-Poli- cristalino	Si- Mono- cristalino	Si-Poli- cristalino	Si-Mono- cristalino	Si-Poli- cristalino	Si-Poli- cristalino
Modelo	5P	15P	25C	50P	80C	100P	150P
Medidas (mm)	290x200x28	420x360x28	550x400x28	670x620x35	1200x550x3 5	1130x670x3 5	1190x992x3 5
Voltage Max. Voc*	22 V +/-0.5V	22 V +/-0.5V	22 V +/-0.5V	22 V +/-0.5V	21.97 V +/-0.5V	22 V +/-0.5V	44 V +/-0.5V
Voltage MPP. Vmpp*	17.5 V +/-0.5V	17.4 V +/-0.5V	17.5 V +/-0.5V	17.5 V +/-0.5V	17.39 V +/-0.5V	17.5 V +/-0.5V	35.5 V +/-0.5V
Corriente Max. Isc*	0.32 A +/-0.1A	0.92 A +/-0.1A	1.54 A +/-0.1A	3.07 A +/-0.1A	4.98 A +/-0.1A	6.14 A +/-0.1A	4.61 A +/-0.1A
Corriente MPP Impp*	0.29 A +/-0.1A	0.86 A +/-0.1A	1.43 A +/-0.1A	2.86 A +/-0.1A	4.61 A +/-0.1A	5.71 A +/-0.1A	4.23 A +/-0.1A
Variación potencia	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Diodos 'Bypass'	-	-	-	2	2	2	3
Voltage en Serie maxima	600V	600V	600V	600V	1000V	600V	1000v
Caja de conexion							
Precios sin IVA	30,-USD	75,-USD	100,-USD	200,-USD	320,-USD	400,-USD	600,-USD

Figura 1. Catálogo de Paneles fotovoltaicos.
FUENTE: Proviento S.A.

Se calcula la irradiancia que se tiene a lo largo del día, esto se realiza con el modelo establecido con la siguiente ecuación:

$$I(\text{día, hora}) = I_{sc} \cdot Exc_d [\sin \delta_d \sin(\phi - \beta) + \cos \delta_d \cos(\phi - \beta) \cos \alpha_h]$$

Se calculara la irradiancia para el día 190 que pertenece al mes de Junio el cual representa el mes en el que menos nivel de radiación se tiene.

$$I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$$

$$\alpha_d = 2\pi \left(\frac{d-1}{365} \right) = 2\pi \left(\frac{190-1}{365} \right) = 3.25348$$

$$E_t = 229.18 [0.000075 + 0.0187 \cos(\alpha_d) - 0.032 \sin(\alpha_d) - 0.015 \cos(2\alpha_d) - 0.041 \sin(2\alpha_d)]$$



$$E_t = 229.18 [0.000075 + 0.0187 \cos(3.25348) - 0.032 \sin(3.25348) - 0.015 \cos(2 * 3.25348) - 0.041 \sin(2 * 3.25348)] = -0.59$$

$$\delta_d = 23.24 \left(\frac{\pi}{180}\right) \sin\left(\frac{2\pi(d + 284)}{365.25}\right) = 23.24 \left(\frac{\pi}{180}\right) \sin\left(\frac{2\pi(190 + 284)}{365.25}\right) = 0.057$$

$$Exc_d = 1 + 0.033 \left(\frac{2\pi d}{365}\right) = 1 + 0.033 \left(\frac{2\pi 190}{365}\right) = 1.1079$$

TABLA A.1⁸³.

P	150
η	0.8
φ	2.5356
pi	3.141592654
Dia	190
αd	3.253484995
Et	-0.59
Exd	1.1079
δd	0.057

Se calcula la irradiancia que se tiene para el día establecido entre un rango de las 06:00h hasta las 18:00h ya que en este rango está el sol presente en nuestra región, para el cálculo de la irradiancia necesitamos calcular la corrección de la hora solar para cada hora, a continuación se hace el cálculo para una hora el resto de horas sigue el mismo procedimiento, los datos se muestran la tabla posterior al cálculo, además en la tabla se indica la potencia que logra generar el panel con la formula $E = P * t * \eta$.

$$H_{solar} = H_{local} + \frac{1}{60} E_t = 12 + \frac{1}{60} (-0.59) = 11.990166$$

$$\alpha_h = \frac{15\pi}{180} (H_{solar} - 12) = \frac{15\pi}{180} (11.9901667 - 12) = -0.0025744$$

TABLA A.2⁸⁴.

⁸³ FUENTE: Autores



H local	H Solar	ah	I(dia,hora)	Tiempo (t)	Potencia
0:00	-0,009833333	-3,144167014	0	0	0
1:00	0,990166667	-2,882367626	0	0	0
2:00	1,990166667	-2,620568239	0	0	0
3:00	2,990166667	-2,358768851	0	0	0
4:00	3,990166667	-2,096969463	0	0	0
5:00	4,990166667	-1,835170075	0	0	0
6:00	5,990166667	-1,573370687	1512,5	1,5125	181,5
7:00	6,990166667	-1,3115713	1512,7	1,5127	181,524
8:00	7,990166667	-1,049771912	1512,8	1,5128	199,6896
9:00	8,990166667	-0,787972524	1512,9	1,5129	217,8576
10:00	9,990166667	-0,526173136	1513	1,513	290,496
11:00	10,99016667	-0,264373748	1513,1	1,5131	363,144
12:00	11,99016667	-0,002574361	1513,1	1,5131	363,144
13:00	12,99016667	0,259225027	1513,1	1,5131	363,144
14:00	13,99016667	0,521024415	1513	1,513	290,496
15:00	14,99016667	0,782823803	1512,9	1,5129	217,8576
16:00	15,99016667	1,044623191	1512,8	1,5128	199,6896
17:00	16,99016667	1,306422578	1512,7	1,5127	181,524
18:00	18,99016667	1,830021354	1512,1	1,5121	181,452
19:00	18,99016667	1,830021354	0	0	0
20:00	19,99016667	2,091820742	0	0	0
21:00	20,99016667	2,35362013	0	0	0
22:00	21,99016667	2,615419517	0	0	0
23:00	22,99016667	2,877218905	0	0	0

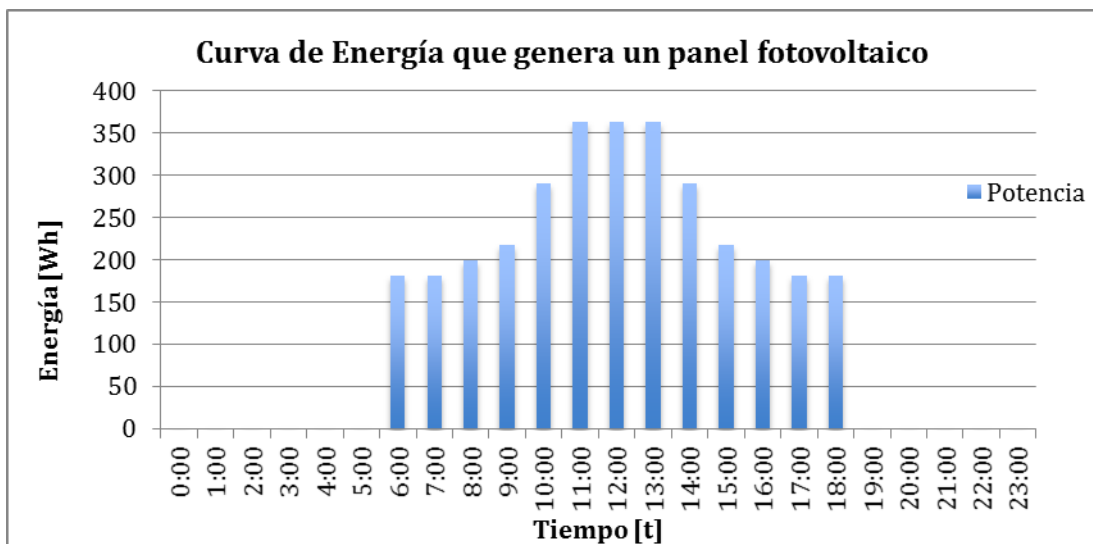


Figura 2. Curva de generación del panel.
FUENTE: Autores



1A.3 CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Se establece cual va hacer el consumo de energía de nuestra micro-red, esta es 200kWh/mes.

El dimensionamiento se hace en función del peor escenario, que es el mes de Junio ya que aquí se tiene baja radiación, esto se puede ver en la siguiente tabla que se obtuvo del modelo de radiación para una superficie fija.

	Fija a $G(\phi)=5$
Enero	4,302166137
Febrero	4,333207182
Marzo	4,364843632
Abril	4,114165473
Mayo	4,157708924
Junio	3,821160589
Julio	4,151800126
Agosto	4,274748072
Septiembre	4,19376367
Octubre	4,565344406
Noviembre	4,828287419
Diciembre	4,713137124

Se calcula la energía del panel con la ecuación (5.26) y luego el número de módulos fotovoltaicos como la ecuación (5.27), el procedimiento se indica a continuación:

$$E_{panel} = P_{módulo} * t$$

Se multiplica la potencia pico del panel por el tiempo que vendría hacer la radiación de cada mes, esto se realiza para todos los meses.

$$E_{panel} = \frac{150}{1000} * 4,302166137 = 0,645324921kWh$$

En base a la energía del panel se calcula el número de módulos fotovoltaicos:

$$N_{módulos} = 1,1 \left[\frac{E_{carga}}{E_{panel}} \right]$$

$$N_{módulos} = 1,1 \left[\frac{\frac{200kWh/mes}{30 \text{ días}} * mes}{0,645324921kWh} \right] = 11,36378$$



$$N_{módulos} = 12$$

En la siguiente tabla se puede observar los valores tanto de la energía del panel y el número de módulos para cada mes.

	Fija a $G(\phi)=5$			
		Y	E panel [kWh]	N módulos
Enero	4,302166137	1,549606978	0,645324921	11,36378451
Febrero	4,333207182	1,538506327	0,645324921	11,36378451
Marzo	4,364843632	1,527355211	0,645324921	11,36378451
Abril	4,114165473	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Mayo	4,157708924	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Junio	3,821160589	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Julio	4,151800126	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Agosto	4,274748072	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Septiembre	4,19376367	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Octubre	4,565344406	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Noviembre	4,828287419	46,48820934	0,645324921	11,36378451
Diciembre	4,713137124	46,48820934	0,645324921	11,36378451

1A.3.1 Restricciones para la elección del número de módulos fotovoltaicos, dimensionamiento del banco de baterías y regulador de carga

Lo que mayor relevancia presenta para la micro-red en estudio es la del área útil que cuente la vivienda para instalar los paneles fotovoltaicos, se estableció una área útil de $6m^2$ para la instalación de los paneles.

Para dimensionar el sistema lo hacemos en función de nuestro peor escenario, para ello consideramos que siempre la carga va hacer mayor que la oferta que entregue el aerogenerador, es decir, aplicamos la primera restricción de la sección 5.4.

$$E_{restricción}(t_i) = \sum_{i=0}^{t=24horas} (E_{carga}(t_i) - E_{eléctrica,aero}(t_i))$$

$$E_{carga}(t_i) > E_{eléctrica,aero}(t_i)$$

La ecuación anterior se cumple siempre y cuando $A_{Nmodulos} \leq A_{útil}$ donde

$$A_{útil} = 6m^2 = \text{área útil de la casa para instalar los paneles}$$

$$A_{Nmodulos} = \text{área total de todos los paneles fotovoltaicos}$$



UNIVERSIDAD DE CUENCA

$$A_{Nmodulos} = 12 * 1,18048 = 14,2m^2$$

Como $A_{Nmodulos} > A_{\text{útil}}$ el número de paneles solares será:

$$N_{\text{módulos}} = \frac{A_{\text{útil}}}{A_{\text{panel}}}$$
$$N_{\text{módulos}} = \frac{6}{1,18048} = 5,0826 \cong 6$$

En función de esto calculamos la capacidad del sistema de acumulación:

$$E_{\text{acumulada, restricción 1}} = 1,1 \left[\frac{N_D * E_{\text{restricción, max}(t_i)}}{P_{D, \text{max}}} \right]$$

La profundidad de descarga de la batería es del 80% y el día de autonomías que se requiere es de un día.

$$E_{\text{acumulada, restricción 1}} = 1,1 * \left[\frac{1 * \frac{200 \frac{kWh}{mes} * mes}{30}}{0,8} \right] = 9,16666667 kWh$$
$$C_{\text{sistema}} = \frac{E_{\text{acumulada, restricción 1}}}{V_{acu}}$$

$$C_{\text{sistema}} = \frac{9,16666667}{40} = 230Ah$$

Ahora para el dimensionamiento del regulador del sistema fotovoltaico y eólico tenemos que:

$$V_{\text{regulador}} = V_{\text{gen}} = V_{\text{acu}} = 12V$$

$$I_{\text{regulador}} = I_{\text{gen}} = 10A$$

$$V_{\text{regulador, max}} = 1,25 * V_{\text{gen}} = 1,25 * 12 = 15V$$

PARTE B**1B.1 OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO DEL MICRO AEROGENERADOR**

La potencialidad del viento está en función de la velocidad del viento, para poder evaluar la potencialidad que se tiene en cierta área el parámetro que se emplea es la densidad de potencia. Debido a las grandes variaciones temporales del viento, una forma de evaluar la potencialidad del viento es mediante la potencia media que dispone o contiene el viento por unidad de área expuesta al viento, o la densidad de potencia media en watt por metro cuadrado de área, lo que también se conoce como potencia media específica.

Los datos de entrada que necesitamos saber es, la densidad del viento y la velocidad del viento que se tiene en el lugar donde se va a instalar el micro aerogenerador, en el presente trabajo la velocidad del viento se la obtiene a través de un software desarrollado por el CONELEC que funciona con el Google Earth, este software nos muestra tanto la velocidad del viento promedio anual como la densidad de potencia en función del Atlas Eólico 2013 publicado por el MEER.

El software muestra todo el Ecuador donde uno selecciona el lugar y por medio de colores nos muestra la densidad de potencia y la velocidad del viento que se tiene en el área de análisis, en nuestro caso seleccionamos la ciudad de Cuenca.

A continuación se muestra la imagen del software donde nos muestra el Ecuador.

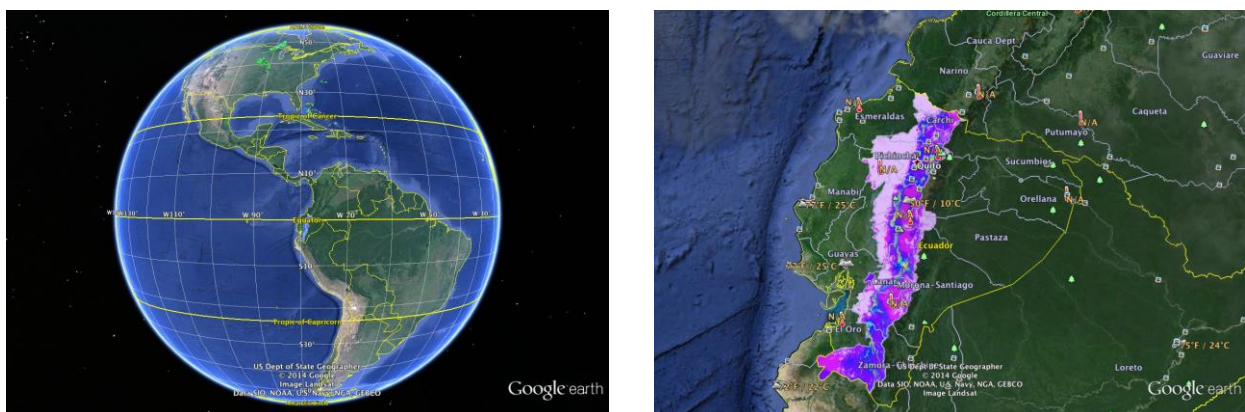


Figura 3. Ecuador.

FUENTE: SOFTWARE DEL CONELEC EN EL GOOGLE EARTH

En la siguiente imagen se ve los rangos de la velocidad del viento que se tiene en el Ecuador, tomamos el dato de la ciudad de Cuenca.

Viento medio anual

















	km/h	m/s
	< 10.8	< 3.0
	10.8 - 12.6	3.0 - 3.5
	12.6 - 14.4	3.5 - 4.0
	14.4 - 16.2	4.0 - 4.5
	16.2 - 18.0	4.5 - 5.0
	18.0 - 19.8	5.0 - 5.5
	19.8 - 21.6	5.5 - 6.0
	21.6 - 23.4	6.0 - 6.5
	23.4 - 25.2	6.5 - 7.0
	25.2 - 27.0	7.0 - 7.5
	27.0 - 28.8	7.5 - 8.0
	28.8 - 30.6	8.0 - 8.5
	30.6 - 32.4	8.5 - 9.0
	32.4 - 34.2	9.0 - 9.5
	34.2 - 36.0	9.5 - 10.0
	> 36.0	> 10.0

Figura 4. Rango de la velocidad del viento.
FUENTE: SOFTWARE DEL CONELEC EN EL GOOGLE EARTH

Ahora se muestra en el software la ciudad de Cuenca en la cual dependiendo del color que tenga esa área nos muestra la velocidad de viento.

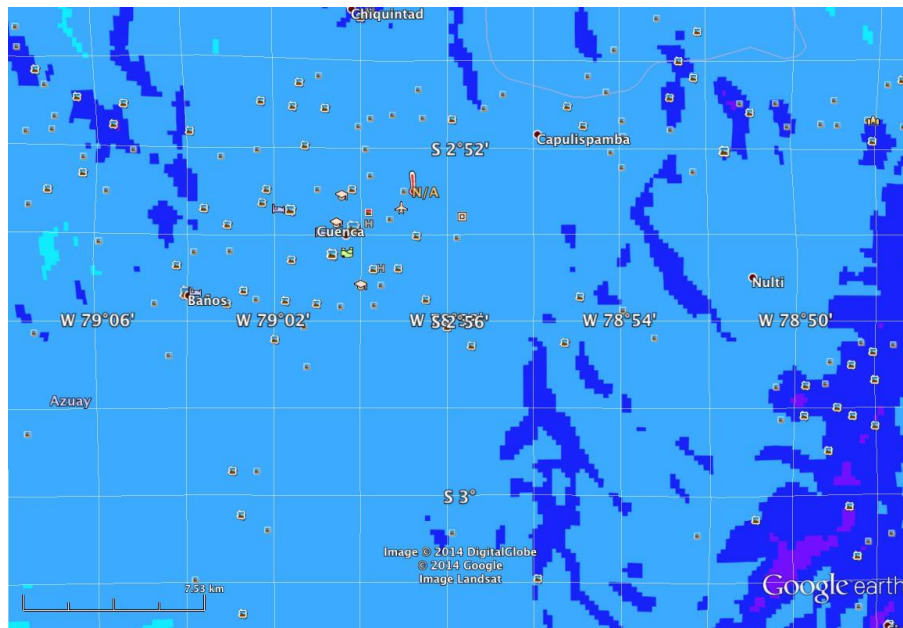


Figura 5. Velocidad del viento en Cuenca.
FUENTE: SOFTWARE DEL CONELEC EN EL GOOGLE EARTH

Con respecto al color que muestra el software vemos que en todo Cuenca se tiene una velocidad de 4,5 a 5,5 m/s el cual es equivalente de 16,2 a 18Km/h.

En la siguiente imagen se muestra los rangos de la densidad de potencia que corresponden a cada color.



Figura 6. Rango de la densidad de potencia
FUENTE: SOFTWARE DEL CONELEC EN EL GOOGLE EARTH

Ahora se muestra la imagen de la ciudad de Cuenca donde el software nos da la densidad de potencia que se tiene en esta ciudad.

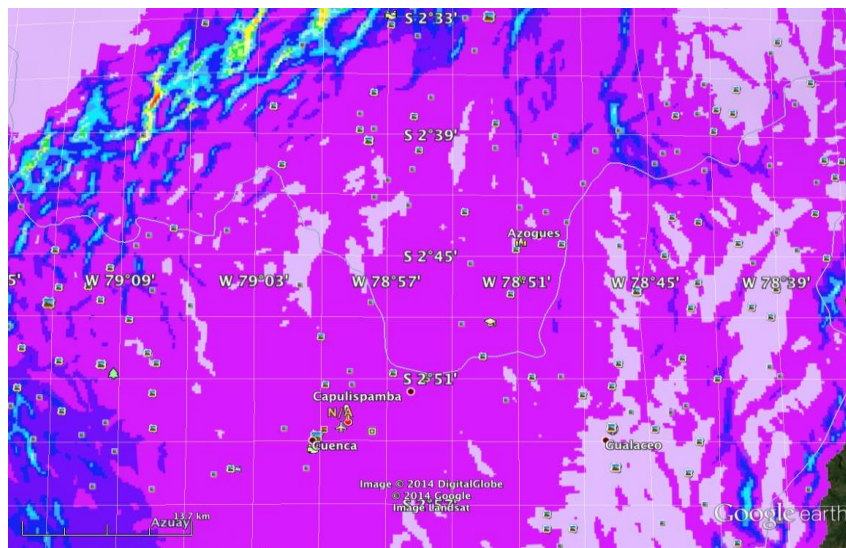


Figura 7. Densidad de potencia en Cuenca.
FUENTE: SOFTWARE DEL CONELEC EN EL GOOGLE EARTH

En función de lo que nos muestra el software vemos que Cuenca tiene una densidad de potencia de 70 a 100 W/m², debemos considerar que la densidad de potencia cambia con respecto a la altura.

A continuación se muestra la velocidad media anual del Azuay publicado por el MEER.

ATLAS EÓLICO DEL ECUADOR
Zona 6 - Cañar, Azuay, Morona Santiago.
 Velocidad Media Anual del Viento a 80 m de Altura sobre el Suelo.

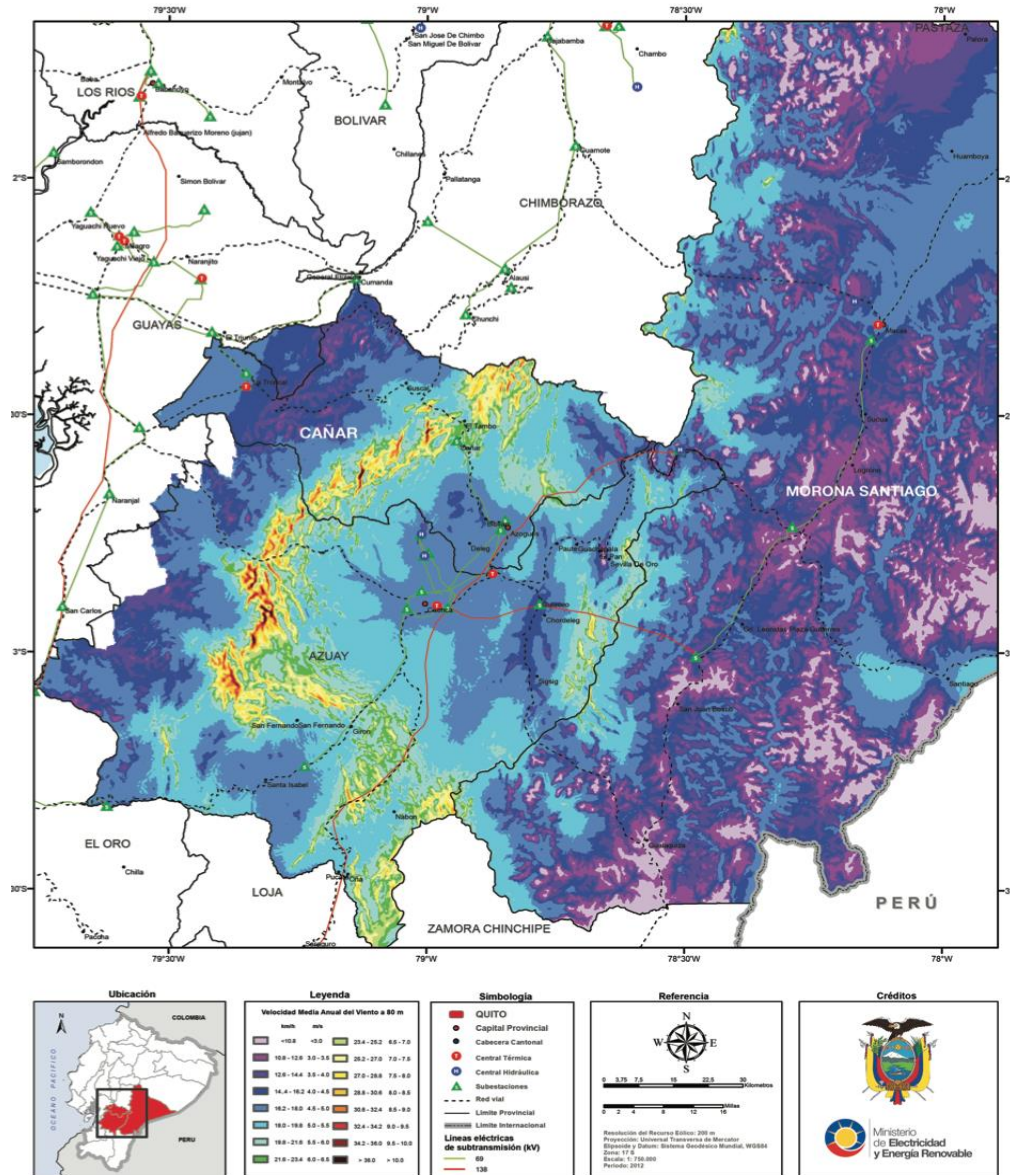


Figura 8. Atlas eólico del Azuay.
 FUENTE: Atlas eólico 2013 del Ecuador

1B.2 CÁLCULO DE LA POTENCIA QUE GENERA UN MICRO AEROGENERADOR EN FUNCIÓN DEL MODELO DE GENERACIÓN EÓLICO

Partimos definiendo un micro aerogenerador de 1500W que se utilizará, este se puede adquirir en el mercado ecuatoriano las características se obtuvieron del catálogo que se indica a continuación:

Catálogo de productos



Fabricante EXMORK 艾莫克斯能源				
Potencia Nominal	500W	1500W	2000W	3000W
Diámetro del Hélice	2,5m	3,2m	3,6m	4m
Velocidad de arranque	4,0m/s	3,0m/s	4,0m/s	4,0m/s
Velocidad potencia nominal	9m/s	9m/s	10m/s	12m/s
Rotación @potencia nom.	450 rpm	380 rpm	400 rpm	350 rpm
Controlador	Controlador electrónico externo con tecnología PWM (Pulse Wide Modulation) que mejora la eficiencia de la recarga, con disipación de energía aparte. 			
Voltaje de salida	12V	24V	48V	48V
Tipo de recarga	PWM Banco de Baterías Mínimo 200Ah	PWM Banco de Baterías Mínimo 800Ah	PWM Banco de Baterías Mínimo 1600Ah	PWM Banco de Baterías Mínimo 2400Ah
Protección sobre velocidad	Electrónica	Electrónica/side furling	Electrónica/side furling	Electrónica/side furling
Curva de potencia				
Material	Aspas: Fibra de vidrio Veleta: Acero Inoxidable Cuerpo: Aluminio 	Aspas: Fibra de vidrio Cuerpo: Aluminio Imanes cromatizados de alta eficiencia(NdFeB) y reemplazables 	Aspas: Fibra de vidrio Cuerpo: Aluminio Imanes cromatizados de alta eficiencia(NdFeB) y reemplazables 	Aspas: Fibra de vidrio Cuerpo: Aluminio Imanes cromatizados de alta eficiencia(NdFeB) y reemplazables 
Peso	46Kg	56Kg	68Kg	85Kg
Precio	890 USD	1690 USD	1990 USD	3200 USD

Figura 9. Catálogo de micro aerogeneradores
FUENTE: info@proviento.com

Una vez definido el micro aerogenerador se calcula la producción esperada de un micro aerogenerador que se instalará en Cuenca. La curva que se obtiene de la



distribución de Weibull es muy importante ya que con ella podemos realizar varios cálculos para analizar cómo va hacer el funcionamiento como el rendimiento del micro aerogenerador.

Se calcula los parámetros de la función de Weibull para poder construir la curva, los datos de entrada que en este caso seria las velocidades del viento las obtenemos del software del Conelec y del Atlas Eólico Ecuador 2013, los cálculos se realizaran en un hoja electrónica de Excel aplicando las formulas presentadas.

Los datos de entrada van hacer las velocidades del viento como se muestra en la siguiente tabla.

TABLA A.3⁸⁵.

DATOS DE VELOCIDADES	
Velocidades v_i	(m/s)
v1	4.5
v2	5
v3	5.5
v4	6
v5	6.5
v6	7
v7	7.5
v8	8

TABLA A.4⁸⁶.

CÁLCULO DE LOS PARAMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL	
Media Aritmética	6.4444444444
Varianza	1.6527777778
Desviación Estándar (σ)	1.285604052
K	5.870946802
c(m/s)	6.745089575

Con los datos de la tabla A.3 se calcula tanto la media aritmética, la desviación estándar y los parámetros de la distribución de Weibull k y c, aplicando las formulas correspondientes, los resultados se muestran en la tabla A.4

Con los datos obtenidos en la tabla A.4 se calcula las probabilidades que la velocidades estén entre $v_a \leq v \leq v_b$ ó que $v \geq v_a$.

⁸⁵ FUENTE: Autores

⁸⁶ FUENTE: Autores



TABLA A.5⁸⁷.

Cálculo de la probabilidad que la velocidad este comprendida entre $v_a < v < v_b$			
Cálculo de la probabilidad que la $v \geq v_a$		Probabilidad $v_a < v < v_b$	
Velocidad (m/s)	Probabilidad	Velocidades (m/s)	Probabilidad $v_a < v < v_b$
1	0.999986415		0.000133256
1.5	0.999853159		
2	0.999205277	Velocidad entre $1.5 < v < 2.5$	0.00214768
2.5	0.997057597	Velocidad entre $2 < v < 3$	0.007762755
3	0.991442522	Velocidad entre $2.5 < v < 3.5$	0.005615076
3.5	0.978979325	Velocidad entre $3 < v < 4$	0.036905198
4	0.954537323	Velocidad entre $3.5 < v < 4.5$	0.024442001
4.5	0.911281234	Velocidad entre $4 < v < 5$	0.112940198
5	0.841597126	Velocidad entre $4.5 < v < 5.5$	0.069684108
5.5	0.739502434	Velocidad entre $5 < v < 6$	0.102094692
6	0.604732146	Velocidad entre $5.5 < v < 6.5$	0.134770288
6.5	0.447226831	Velocidad entre $6 < v < 7$	0.316307011
7	0.288425135	Velocidad entre $6.5 < v < 7.5$	0.158801696
7.5	0.155018307	Velocidad entre $7 < v < 8$	0.222748869
8	0.065676266	Velocidad entre $7.5 < v < 8.5$	0.089342041

Luego de obtener las probabilidades de la tabla A.5, se calcula la probabilidad de las velocidades con la ecuación de la distribución de Weibull.

En base a la distribución de Weibull se obtiene las probabilidades de las velocidades como se muestra en la tabla A.6, en función de estos datos se construye la curva de la distribución de Weibull.

⁸⁷ FUENTE: Autores

TABLA A.6⁸⁸.

f(u)	Velocidad
0.00001	1
0.00025	1.5
0.00263	2
0.01544	2.5
0.02709	3
0.13124	3.5
0.22622	4
0.30076	4.5
0.32505	5
0.29762	5.5
0.23822	6
0.17042	6.5
0.11045	7
0.06519	7.5
0.03489	8
0.01667	8.5
0.0069	9
0.00233	9.5
0.00057	10
0.00008	10.5

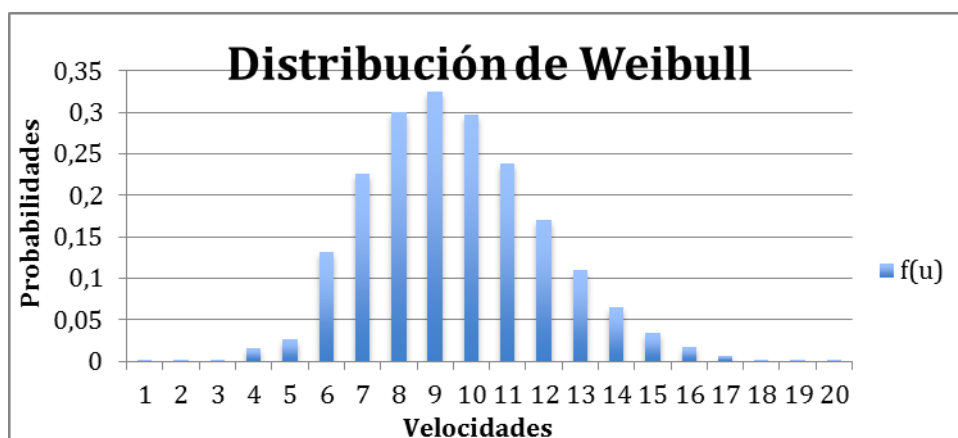


Figura 9. Curva de la distribución de Weibull para el modelo planteado.
FUENTE: Autores

⁸⁸ FUENTE: Autores



Ahora se calcula la potencia eólica en base a las características del micro aerogenerador seleccionado.

TABLA A.7⁸⁹.

Potencia Eólica	
A=	8.04226304
ρ =	1.007
P1(W)=	368.990589
P2(W)=	506.1599301
P3(W)=	673.6988669
P4(W)=	874.6443592
P5(W)=	1112.033366
P6(W)=	1388.902848
P7(W)=	1708.289764

Si se multiplica la potencia eólica por la probabilidad de Weibull que se obtuvo para cada velocidad se obtiene la potencia promedio generada por la máquina, a continuación se indica en la siguiente tabla.

TABLA A.7⁹⁰.

f(u)	Velocidad	Potencia Media Generada
0.00008	1	0
0.00057	1.5	0
0.00233	2	0
0.0069	2.5	0
0.01667	3	0
0.03489	3.5	0
0.06519	4	0
0.11045	4.5	40.75501056
0.17042	5	86.25977528
0.23822	5.5	160.4885441
0.29762	6	260.3116542

⁸⁹ FUENTE: Autores

⁹⁰ FUENTE: Autores



UNIVERSIDAD DE CUENCA

0.32505	6.5	361.4664457
0.30076	7	417.7264206
0.22622	7.5	386.4493104
0.13124	8	272.0908461
0.02709	8.5	0
0.01544	9	0
0.00263	9.5	0
0.00025	10	0
0.00001	10.5	0

La grafica de la potencia media producida por el aerogenerador se muestra a continuación:

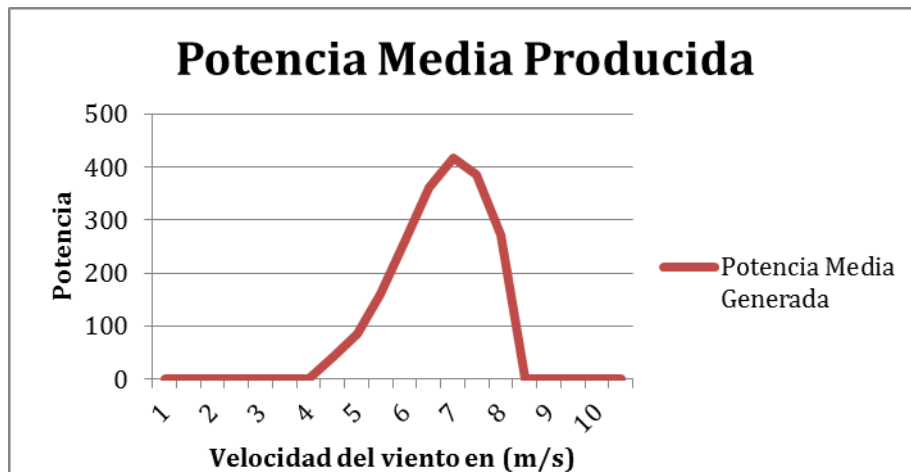


Figura 10. Curva de la Potencia Media Producida por el aerogenerador.

FUENTE: Autores

Un aspecto importante que podemos sacar de la gráfica 10 es que la potencia promedio producida esta en 450W/h que logra obtener cuando se tiene una velocidad de 5m/s a 6m/s que es la velocidad del viento promedio que tiene Cuenca; sin embargo el micro aerogenerador que fue seleccionado es de 1500W la razón por la cual no se logra generar toda su potencia nominal es debido a que esta se puede obtener con una velocidad de 9m/s, mientras que las velocidades más elevadas que tiene Cuenca son de 5.5m/s y está a su vez se logra en ciertas épocas al año.

En el modelo de generación nos interesa saber cómo va hacer el comportamiento diario de la producción del micro aerogenerador el mismo que para cada día va



UNIVERSIDAD DE CUENCA

hacer completamente diferente debido a que la velocidad del viento es muy variable, con el fin de obtener el comportamiento de la producción presentamos una curva diaria correspondiente al día 08/06/14, las velocidades del viento de este día se muestran en las siguiente gráficas.

Fecha local	domingo, jun 08								lunes, jun 09							
Hora local	01h	04h	07h	10h	13h	16h	19h	22h	01h	04h	07h	10h	13h	16h	19h	22h
Dirección del viento	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖
Velocidad del viento (m/s)	3	2	3	5	5	5	2	2	3	2	3	6	6	6	3	3
Ráfaga de viento (m/s)	4	3	4	7	7	6	4	4	4	4	5	9	9	8	6	7
Nubosidad	☀	☀	☁	☁	☁	☁	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀	☀
Precipitación (mm/3h)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Presión atmosférica (hPa)	779	779	779	781	780	779	779	780	780	779	779	781	780	779	780	781
Temperatura del aire (°C)	9	8	11	20	20	18	12	12	9	8	10	18	19	17	11	10

Figura 11. Velocidad del viento en Cuenca.

FUENTE: <http://es.windfinder.com>

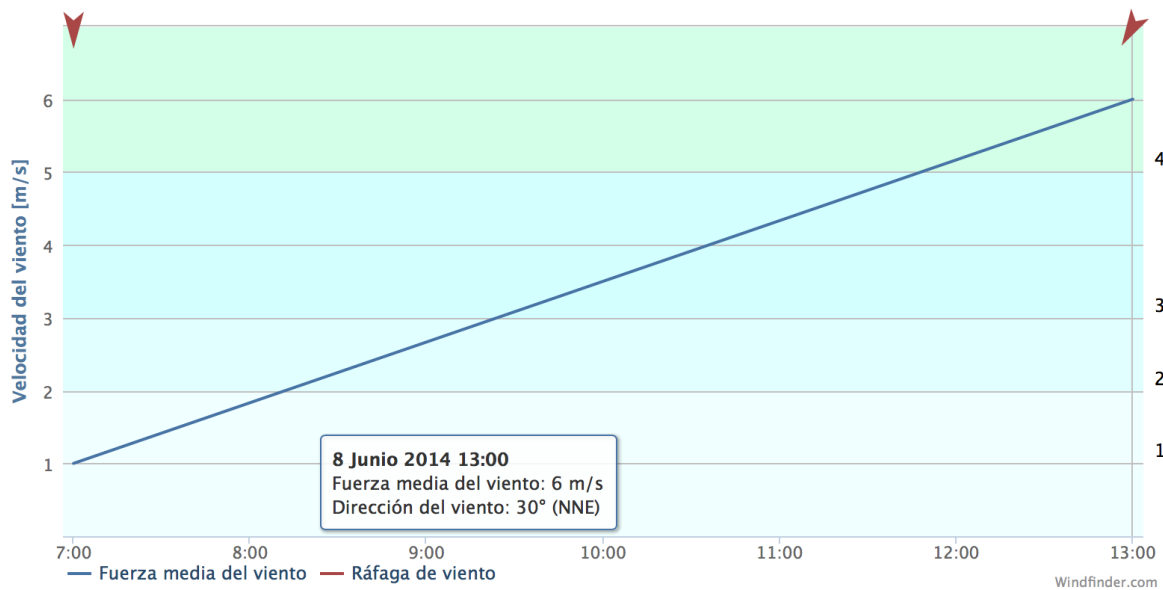


Figura 12. Velocidad del viento en Cuenca

FUENTE: <http://es.windfinder.com>

Los datos son tomados de la página <http://es.windfinder.com> ya que ellos llevan un registro sobre las velocidad de viento que tiene Cuenca, las velocidades se tomó del día 08/06/14 esto con el objetivo de ver cómo va hacer una curva diaria de la producción de un micro aerogenerador, la potencia eléctrica que se logra tener se calcula en función de la fórmula establecida la cual es:

$$P_{eléctrica} = \eta_{sistema} * P_0 * C_p$$



En base a dicha ecuación se calcula la potencia eléctrica que se muestra en la siguiente tabla.

TABLA A.8⁹¹.

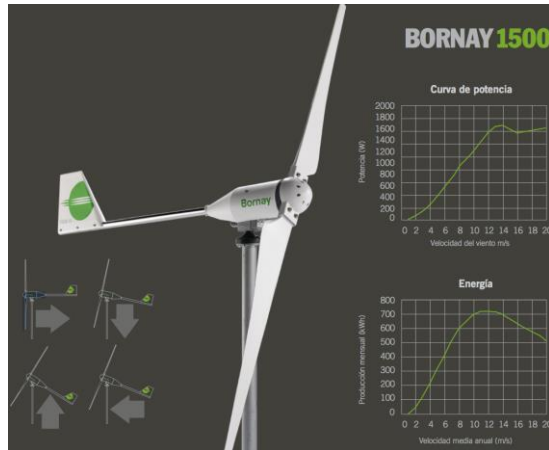
Tiempo	Potencia eléctrica	Potencia Eólica	Velocidad
0:00	58.05451934	109.3305449	3
1:00	58.05451934	109.3305449	3
2:00	33.59636536	63.26999126	2.5
3:00	24.49175035	46.12382363	2.25
4:00	17.20133906	32.39423553	2
5:00	24.49175035	46.12382363	2.25
6:00	33.59636536	63.26999126	2.5
7:00	58.05451934	109.3305449	3
8:00	92.18842655	173.612856	3.5
9:00	268.7709229	506.1599301	5
10:00	268.7709229	506.1599301	5
11:00	285.2218535	537.1409671	5.1
12:00	357.7340983	673.6988669	5.5
13:00	464.4361547	874.6443592	6
14:00	357.7340983	673.6988669	5.5
15:00	311.1359396	585.9433891	5.25
16:00	268.7709229	506.1599301	5
17:00	137.6107125	259.1538842	4
18:00	58.05451934	109.3305449	3
19:00	17.20133906	32.39423553	2
20:00	24.49175035	46.12382363	2.25
21:00	17.20133906	32.39423553	2
22:00	17.20133906	32.39423553	2
23:00	17.20133906	32.39423553	2

La gráfica correspondiente a la tabla A.8 se presenta en la *Ilustración 59*

⁹¹ FUENTE: Autores

1B.3 EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR

En siguiente ejemplo se lo hace en función de los datos que el fabricante nos entrega, en este caso la curva de potencia del micro aerogenerador el cual se indica a continuación:



Los datos de la máquina que el fabricante nos entrega se puede observar en la siguiente figura.

Características técnicas

Número de hélices	2
Diámetro	2,86 mts
Material	Fibra de vidrio/carbono
Dirección de rotación	En sentido contrario a las agujas del reloj
Sistema de control	1. Regulador electrónico 2. Pasivo por inclinación

Características eléctricas

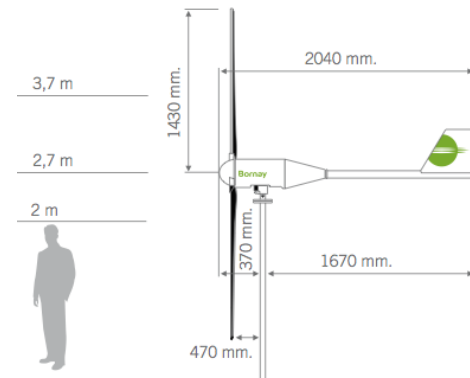
Alternador	Trifásico de imanes permanentes
Imanes	Neodimio
Potencia nominal	1500 w
Voltaje	24, 48, 120 v
RPM	@ 700
Regulador	24 v 80 Amp 48 v 40 Amp 120v. Conexión red

Velocidad del viento

Para arranque	3,5 m/s
Para potencia nominal	12 m/s
Para frenado automático	14 m/s
Máxima velocidad del viento	60 m/s

Características físicas

Peso aerogenerador	41 kg
Peso regulador	8 kg
Embalaje	50 x 77 x 57 cm - 57 kg
Dimensiones - peso	153 x 27 x 7 cm - 6,8 kg
Total	0,23 m ³ - 61,8 Kgr
Garantía	3 años





UNIVERSIDAD DE CUENCA

Para calcular la potencia que logra producir el micro-aerogenerador se calcula la media aritmética y la desviación estándar de las velocidades del viento que se tiene en la curva de potencia de la máquina.

Media	15,03448276
Varianza	73,53448276
Desv Estándar	8,575224939

Luego se calcula los parámetros de la distribución de Weibull:

k	1,83998
c	16,92310081

Para lograr tener el valor de potencia promedio que se logra producir, debemos calcular la probabilidad de que la velocidad del viento se encuentre en cada uno de los intervalos mostrados de la curva de potencia.

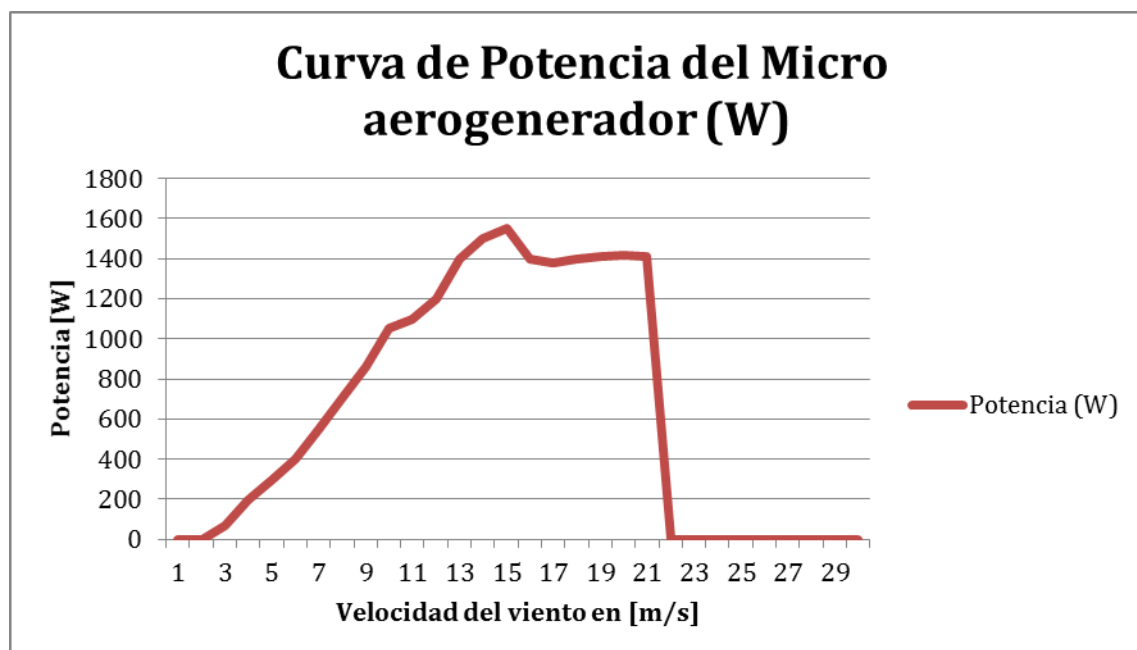


Figura 80. Curva de potencia del aerogenerador.

FUENTE: BORNAY.

Los intervalos de cálculo de probabilidad se tomarán en el punto intermedio entre los intervalos de la curva. Es decir para 5m/s, calculamos la probabilidad de que



UNIVERSIDAD DE CUENCA

la velocidad del viento esté comprendida entre 4.5 y 5.5m/s, mediante la ecuación de la probabilidad acumulada:

$$F(v \leq v_a) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v_a}{c} \right)^k \right]$$

Ahora sustituyendo los valores tenemos:

$$F(v \leq 4.5) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{4.5}{16.923} \right)^{1.83998} \right] = 0.083691$$

$$F(v \leq 5.5) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{5.5}{16.923} \right)^{1.83998} \right] = 0.11877$$

Lo que supone una probabilidad conjunta de:

$$p(4.5 < v \leq 5.5) = 0.039197$$

La metodología que sigue para el resto de cálculos de probabilidades de las velocidades es la misma a la del ejemplo que se realizó, se multiplica la probabilidad de cada velocidad por la potencia y sumando se obtiene la potencia promedio producido.

Además se calcula el factor de capacidad o planta, éste se define como el cociente entre la potencia media y la potencia máxima del micro aerogenerador, este se muestra en la tabla que se indica más adelante.

Una estimación de la producción bruta anual se obtendría multiplicando la potencia media en kW por las 8760 horas que tiene un año.

Todo lo mencionado anteriormente se muestra en la siguiente tabla.



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Velocidad (m/s)	Potencia (W)	Probabilidad	Potencia Prod (W)
1	0	0,009979	0
2	66,66666667	0,01769	0
3	195	0,024354	4,74903
4	300	0,030136	9,0408
5	400	0,035079	14,0316
6	550	0,039197	21,55835
7	700	0,042499	29,7493
8	860	0,045008	38,70688
9	1050	0,046753	49,09065
10	1100	0,047774	52,5514
11	1200	0,048125	57,75
12	1400	0,047864	67,0096
13	1500	0,047056	70,584
14	1550	0,045774	70,9497
15	1400	0,044091	61,7274
16	1380	0,042077	58,06626
17	1400	0,039808	55,7312
18	1410	0,037349	52,66209
19	1420	0,034765	49,3663
20	1410	0,032114	45,28074
21	0	0,029447	0
22	0		0
23	0		0
24	0		0
25	0		0
26	0		0
27	0		0
28	0		0
30	0		0
		SUMA	808,6053
		FC	53,90702
		KWh	7083,382428



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA