



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**METODOLOGÍA PARA EL ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO POR UN SISTEMA  
HÍBRIDO CONECTADO A LA RED, APLICADO A LA POSTA DE BOYERUCA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**CRISTIÁN JAVIER GUAQUÍN SOTO**

**PROFESOR GUÍA:  
ROBERTO ROMÁN LATORRE**

**MIEMBROS DE LA COMISION  
RODRIGO PALMA BEHNKE  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO  
POR: CRISTIÁN GUAQUÍN SOTO  
FECHA: 27/04/2011  
PROF. GUÍA: Sr. ROBERTO ROMÁN LATORRE

“METODOLOGÍA PARA EL ABASTECIMIENTO ELÉCTRICO POR UN SISTEMA HÍBRIDO CONECTADO  
A LA RED, APLICADO A LA POSTA DE BOYERUCA”

El terremoto ocurrido el 27 de Febrero del 2010 en la zona centro-sur de Chile, dejó en evidencia la escasa autonomía eléctrica local de los centros de consumo, vinculados a un frágil sistema de abastecimiento eléctrico. De ahí la necesidad de avanzar hacia una matriz energética diversificada, que impulse la independencia energética de las distintas localidades, e incremente la confiabilidad del suministro eléctrico. En este sentido, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) apuntan a jugar un rol protagónico en la solución, impulsadas por la tendencia al alza del precio de los combustibles fósiles, y la disminución en el costo de generación de la energía eléctrica proveniente de fuentes renovables. Es así como los sistemas híbridos de generación eléctrica conectados a la red ofrecen una solución directa a la problemática planteada, principalmente en localidades rurales expuestas a frecuentes y prolongados cortes de suministro eléctrico.

Como estrategia de trabajo, se desarrolla una metodología que permita el diseño de un sistema híbrido Fotovoltaico (PV) -Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red, que sea capaz de entregar autonomía energética frente a un prolongado corte en el suministro eléctrico proporcionado por la red, y que tenga la capacidad de inyectar a la red los excedentes energéticos que no se consumen. La metodología generada propone un desarrollo paso a paso, comenzando por la búsqueda de datos estadísticos de las fuentes energéticas primarias solar y eólica, hasta finalizar encontrando la configuración óptima del sistema híbrido bajo el criterio mono-objetivo económico, que cumple las condiciones técnicas especificadas. Como herramienta de resolución, se utiliza el programa de optimización para modelos de micro-energía HOMER, el cual selecciona los equipos y configura el sistema idóneo. La metodología se ejemplifica y valida, con la aplicación de la misma al caso de la Posta de la localidad rural de Boyeruca, estudiando los resultados técnicos y económicos en función de distintos períodos de corte de suministro eléctrico. También se evalúa la dependencia de las configuraciones óptimas en función de parámetros como: radiación solar, precio del diesel, contrato de venta de excedentes eléctricos y precio de los equipos.

Este trabajo permite aplicar la metodología de diseño desarrollada, a cualquier otra localidad en la que se desee resolver problemas de autonomía y confiabilidad mediante un sistema híbrido con almacenamiento conectado a la red, basado fundamentalmente en los recursos renovables solar y eólico. También invita a la incorporación futura de especificaciones en la metodología, que permitan obtener resultados más precisos o que incorporen otras fuentes energéticas.

# Agradecimientos:

Si bien esta memoria me implicó un trabajo extenuante, debo decir que la valoro más por la importancia simbólica que representa. No me produce excesiva fascinación la obra desarrollada en sus páginas, a pesar de que la considero de excelente calidad profesional y me gustan las ERNC. Lo que me asombra en realidad es ese proceso que me permitió realizar este documento, ese proceso que me entregó las herramientas para poder analizar un problema y ser capaz de entregar la mejor respuesta posible dentro de mis capacidades y conocimientos.

De ahí que en este momento en que escribo, se me vengan a la mente las imágenes de mi “Papi” y mi “Mami” y también de “Tano”, mi hermano mayor. Sin “Juaco” y la “Rosa” o la “Rosa” y “Juaco”, nada de esto existiría, no sólo por ser su resultado biológico, sino porque ellos fueron determinantes en mi forma de ver la vida. Cómo olvidar el esfuerzo y responsabilidad de la Rosa, las lavadas y planchadas de ropa de colegio, el plato de comida que nunca faltó, entre otras cosas, y lo más importante: el amor y cuidado que siempre abundó en esa mujer muy trabajadora. Para que hablar de Juaco, siempre recordaré sus levantadas temprano para irme a dejar al colegio, sus trabajadas en el taller hasta tarde, inclusive escarchando para que no nos faltara nunca nada, y por supuesto su repetida pero no menos importante frase “la mejor herencia que les puedo dejar es la educación”.

Como siempre he defendido la hipótesis de que somos seres sociales, y que estamos casi absolutamente determinados por nuestro entorno, no me queda nada más que decirles Muchas Gracias.

Gracias Tano por cooperar en cambiar mi paradigma de vida y por ayudarme con la revisión lingüística de la memoria. Gracias “Lelo” y “Tío Ñofe” por haber estado presente en mi tránsito histórico. Gracias “Tata Chica” y “Tata Grande”. Gracias “Tíos” y “Tías” (no colocaré nombres).

Gracias Piter, Alexis y Nacif por alegrarme la existencia en la U. Gracias tía Gema por su gran cariño.

Gracias Profesor Roberto Román por ser el guía en un tema tan atractivo como las Energías Renovables.

Finalmente, MUCHÍSIMAS GRACIAS al Estado de Chile y a la Universidad de Chile por permitirme estudiar Ingeniería Civil Mecánica de forma gratuita. Mis más sinceras gracias a todos aquellos seres humanos que han luchado a lo largo de la Historia, para que otros humanos con menores posibilidades puedan estudiar y no estén destinados desde el comienzo de su existencia a vivir sumidos en la ignorancia y ser sirvientes de otros más afortunados...

Papi: Esto no es más que la finalización de una etapa que fue truncada de golpe, pero que debería haberse concretado hace más de 35 años, porque la capacidad para el área del saber matemático y físico, la heredé de ti.

Cristián Guaquín Soto

# Índice general

<b>1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivación .....	1
1.2	Alcances .....	1
1.3	Objetivos .....	2
1.3.1	Objetivo general .....	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	2
1.4	Metodología desarrollada.....	3
1.5	Estructura de trabajo.....	4
<b>2</b>	<b>Antecedentes .....</b>	<b>6</b>
2.1	Caracterización de un sistema híbrido de generación eléctrica.....	6
2.2	Estado del Arte .....	7
2.3	Localidad donde se aplicará la metodología a desarrollar.....	8
2.3.1	Descripción de la localidad de Boyeruca .....	8
2.3.2	Elección de la Posta de Boyeruca.....	9
2.4	Herramienta computacional .....	9
<b>3</b>	<b>Metodología para la modelación de los recursos energéticos.....</b>	<b>11</b>
3.1	Recurso solar.....	11
3.1.1	Datos necesarios para la definición del recurso solar.....	11
3.1.2	Fuentes de datos respecto a insolación solar .....	18
3.1.3	Aplicación de metodología a la Posta de Boyeruca .....	19
3.2	Recurso eólico.....	22
3.2.1	Datos necesarios para la definición del recurso eólico.....	23
3.2.2	Fuentes de datos respecto a velocidad del viento.....	27
3.2.3	Aplicación de metodología a la Posta de Boyeruca .....	28
<b>4</b>	<b>Cálculo de la demanda de energía eléctrica.....</b>	<b>33</b>
4.1	Determinación de demanda eléctrica actual .....	33
4.1.1	Características del recinto y las cargas presentes .....	33
4.1.2	Medición de la demanda eléctrica actual .....	34
4.2	Demanda eléctrica actual modificada.....	37
4.3	Demanda eléctrica básica .....	40
4.4	Costos asociados a energía eléctrica .....	44

4.5	Medición Neta.....	44
<b>5</b>	<b>Modelación de los componentes del sistema híbrido.....</b>	<b>45</b>
5.1	Generador fotovoltaico.....	46
5.1.1	Descripción.....	46
5.1.2	Curvas características.....	47
5.1.3	Modelos presentes en el mercado.....	48
5.1.4	Aplicación a Boyeruca.....	51
5.2	Aerogenerador.....	51
5.2.1	Características fundamentales.....	51
5.2.2	Aerogeneradores presentes en el mercado.....	52
5.2.3	Aplicación a Boyeruca.....	54
5.3	Generador AC.....	54
5.3.1	Curvas características.....	55
5.3.2	Aplicación a Boyeruca.....	57
5.4	Batería electroquímica.....	57
5.4.1	Baterías presentes en el mercado.....	59
5.4.2	Aplicación a Boyeruca.....	60
5.5	Inversor.....	60
5.5.1	Inversores presentes en el mercado chileno.....	61
5.5.2	Aplicación a Boyeruca.....	62
5.6	Rectificador.....	62
5.7	Regulador de carga.....	62
<b>6</b>	<b>Restricciones, fases, estrategias de control y análisis de sensibilidad.....</b>	<b>64</b>
6.1	Restricciones técnicas y económicas.....	64
6.2	Fases de simulación.....	64
6.3	Estrategias de Control.....	65
6.4	Análisis de sensibilidad.....	66
<b>7</b>	<b>Resultados de la aplicación a la Posta de Boyeruca.....</b>	<b>67</b>
7.1	Sistemas de abastecimiento económicamente óptimos para distintos periodos de autonomía....	67
7.2	Configuración económicamente óptima de cada tecnología para un corte de suministro eléctrico de 2 meses.....	71
7.3	Sistema de abastecimiento más conveniente para un corte de suministro eléctrico de 2 meses.....	73

7.4	Sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red óptimo para un corte de suministro eléctrico de 2 meses .....	76
7.5	Análisis de sensibilidad .....	79
7.5.1	Variación del recurso solar .....	80
7.5.2	Variación del precio del diesel .....	81
7.5.3	Variación del precio de venta de los excedentes electricidad .....	82
7.5.4	Variación conjunta de precio del diesel y precio de venta de excedentes .....	83
7.5.5	Variación del precio de los equipos del mercado nacional al mercado internacional .....	84
<b>8</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>87</b>
8.1	Conclusiones respecto a la metodología desarrollada .....	87
8.2	Conclusiones respecto al caso de la Posta de Boyeruca .....	88
8.3	Conclusiones respecto a los análisis de sensibilidad .....	89
8.4	Conclusiones generales obtenidas respecto a la utilización de sistemas híbridos .....	90
<b>Anexos</b>	<b>.....</b>	<b>92</b>
	Anexos A: Guía para la aplicación de la metodología .....	92
	Anexos B: Codificación de equipos utilizados .....	100
<b>Bibliografía</b>	<b>.....</b>	<b>102</b>

# Índice de figuras

Figura 1.1: Resumen de Metodología desarrollada.....	3
Figura 2.1: Ubicación geográfica de Boyeruca.....	8
Figura 2.2: Posta de Boyeruca y vivienda del profesional de la salud.....	9
Figura 3.1: a) Ángulo cenital solar, inclinación, ángulo azimut solar para una superficie inclinada b) Plano mostrando ángulo azimut solar.....	14
Figura 3.2: Irradiancia incidente para un plano horizontal.....	15
Figura 3.3: Sección de la Tierra mostrando $\beta$ , $\theta$ , $\phi$ y $(\phi-\beta)$ para el hemisferio norte.....	16
Figura 3.4: Resumen de datos obtenidos respecto a insolación diaria media para Boyeruca.....	20
Figura 3.5: Comportamiento de Weibull en función de la variación del parámetro de forma.....	26
Figura 3.6: Mapa ejemplificador de patrones diurnos de intensidad.....	27
Figura 3.7: Velocidad del viento de Boyeruca y medición directa en Punta Carranza.....	29
Figura 3.8: Velocidad anual del viento para Boyeruca adaptada del registro de Faro Punta Carranza mediante escalamiento.....	31
Figura 3.9: Distribución obtenida para Boyeruca basada en mediciones de Faro Carranza y media anual NASA.....	31
Figura 3.10: Distribución media mensual de la velocidad del viento a lo largo del día.....	32
Figura 4.1: Demanda eléctrica característica de un lunes.....	35
Figura 4.2: Demanda eléctrica característica de un viernes.....	36
Figura 4.3: Demanda eléctrica característica del fin de semana.....	36
Figura 4.4: Demanda eléctrica modificada para un día medio hábil.....	39
Figura 4.5: Demanda eléctrica modificada para fin de semana.....	39
Figura 4.6: Demanda de energía básica para la Posta de Boyeruca, para los días de semana (lunes a viernes).....	41
Figura 4.7: Demanda energética básica para la Posta de Boyeruca el fin de semana.....	43
Figura 4.8: Relojes que representan de forma simplificada el sistema Net Metering.....	44
Figura 5.1: Esquema básico de sistema híbrido en estudio.....	45
Figura 5.2: Estructura básica de un módulo fotovoltaico.....	46
Figura 5.3: Componentes de la celda fotovoltaica.....	47
Figura 5.4: Curvas características de un generador fotovoltaico.....	48
Figura 5.5: Costo de adquisición de generadores fotovoltaicos con garantía de 25 años.....	49
Figura 5.6: Costo de adquisición de generadores fotovoltaicos con garantía de 10 años[23].....	50
Figura 5.7: Costos de adquisición y O&M asociados a generadores fotovoltaicos extraídos de publicación internacional.....	51
Figura 5.8: Curva de potencia característica de un aerogenerador de 1 [kW].....	52
Figura 5.9: Costos internacionales para aerogeneradores.....	53
Figura 5.10: Curva de potencia para equipo A400.....	54
Figura 5.11: Curva de potencia para equipo A1000.....	54
Figura 5.12: Curvas características de consumo por unidad de potencia nominal y eficiencia global para un generador diesel aplicando el modelo propuesto por Skarstein y Ullen.....	56

Figura 5.13: Modelo lineal de consumo adaptado a generadores de 1,5 [kW], con $A=0,41$ [l/h/kW].....	57
Figura 5.14: Curva característica de ciclos de vida en función de la profundidad de descarga .....	59
Figura 7.1: Soluciones económicamente óptimas para cada tecnología en función del intervalo de autonomía.....	68
Figura 7.2: Distribución energética de generación, consumo y pérdidas de almacenamiento y conversión	70
Figura 7.3: Detalle respecto a la distribución de costos asociada a la configuración más conveniente para cada tecnología.....	72
Figura 7.4: Emisiones de <b>CO2</b> (rojo) y fracción de producción renovable (azul) .....	72
Figura 7.5: Distribución energética de generación, consumo, pérdidas de almacenamiento y conversión, y venta .....	73
Figura 7.6: Generación eléctrica asociada a la solución óptima bajo criterio económico para 2 meses de autonomía para la Posta de Boyeruca .....	74
Figura 7.7: Producción energética asociada a cada fuente para solución óptima híbrida PV-Eólica-Diesel .....	76
Figura 7.8: Comparación del costo de la energía para cada tecnología incrementando la radiación solar en 21% .....	80
Figura 7.9: Comparación del costo de energía para sistema Híbrido PV-Eólico-Diesel con precios nacionales e internacionales .....	84
Figura 7.10: Comparación del costo de energía para sistema Híbrido PV-Eólico con precios nacionales e internacionales.....	85
Figura 7.11: Comparación del costo de energía para sistema PV para precios nacionales e internacionales .....	85
Figura 7.12: Comparación del costo de energía de sistema PV para diferentes periodos con precios nacionales e internacionales .....	86
Figura A.1: Selección de equipos, tipo de carga y almacenamiento que participa en el sistema de abastecimiento.....	92
Figura A.2: Interfaz de introducción de datos respecto a Recurso Solar .....	93
Figura A.3: Interfaz de introducción de datos respecto a Recurso Eólico .....	94
Figura A.4: Introducción de demanda eléctrica modificada y demanda eléctrica básica a HOMER .....	95
Figura A.5: Incorporación de tarifa diferenciada durante junio y julio para lograr autonomía.....	96
Figura A.6: Incorporación de datos asociados a los paneles fotovoltaicos .....	97
Figura A.7: Incorporación de parámetros económicos .....	98
Figura A.8: Incorporación de parámetros asociados a sistema de control y despacho energético.....	98
Figura A.9: Restricciones operacionales.....	99
Figura A.10: Resultados entregados por HOMER bajo criterio económico .....	99



# Índice de tablas

Tabla 3.1: Días representativos de los meses y declinación asociada .....	15
Tabla 3.2: Coeficiente de albedo o reflectividad.....	17
Tabla 3.3: Insolación media diaria obtenida para la localidad de Boyeruca .....	20
Tabla 3.4: Índices de claridad entregados por HOMER para Boyeruca .....	21
Tabla 3.5: Comparación fraccional entre la radiación directa obtenida para diversos ángulos y la radiación directa sobre un plano horizontal. ....	22
Tabla 3.6: Longitud de rugosidad para distintas superficies .....	24
Tabla 3. 7: Datos obtenidos respecto a recurso eólico en Boyeruca y zonas cercanas .....	28
Tabla 3. 8: Resumen de parámetros del recurso eólico para Faro Punta Carranza .....	30
Tabla 4.1: Demanda eléctrica unitaria y agregada medida en la Posta de Boyeruca .....	34
Tabla 4.2: Resumen de demanda eléctrica de Boyeruca, obtenido durante 21 días de medición mediante data logger.....	35
Tabla 4.3: Comparación de eficiencia energética entre productos presentes en el mercado chileno.....	37
Tabla 4.4: Demanda actual modificada con luminarias de ahorro energético.....	37
Tabla 4.5: Resumen demanda actual modificada.....	38
Tabla 4.6: Demanda básica para días hábiles.....	40
Tabla 4.7: Demanda básica de energía para fin de semana.....	42
Tabla 4.8: Resumen comparativo entre la demanda actual, la actual modificada y la básica para los días hábiles .....	43
Tabla 4.9: Resumen comparativo entre la demanda actual, la demanda actual modificada y la demanda básica para los días del fin de semana.....	43
Tabla 4.10: Costos asociados al suministro de red eléctrica .....	44
Tabla 5.1: Tabla de eficiencias características para distintas tecnologías de celdas fotovoltaicas.....	47
Tabla 5.2: Caracterización de paneles fotovoltaicos presentes en el mercado chileno con garantía de 25 años .....	49
Tabla 5.3: Caracterización de paneles fotovoltaicos presentes en el mercado chileno con garantía de 10 años .....	49
Tabla 5.4: Costos de adquisición y O&M asociados a generadores fotovoltaicos extraídos de publicación internacional.....	50
Tabla 5.5: Costos internacionales de adquisición y O & M para generadores eólicos.....	53
Tabla 5.6: Unidades eólicas presentes en el mercado con potencia adecuada para estudio realizado a la Posta de Boyeruca.....	53
Tabla 5.7: Costos de adquisición y operación para generadores diesel extraídos de publicación internacional.....	57
Tabla 5.8: Costos de adquisición y O&M para un banco de baterías de 48[VDC].....	59
Tabla 5.9: Características de baterías AGM presentes en el mercado chileno.....	60
Tabla 5.10: Características de baterías Gel presentes en el mercado chileno .....	60
Tabla 5.11: Inversores simples, sin posibilidad de conversión bidireccional ni sincronizarse con sistema externo.....	61

Tabla 5.12: Inversor-rectificador con posibilidad de sincronizarse a la red u otra fuente externa.....	62
Tabla 7.1: Resumen de cada solución económicamente óptima para cada periodo de autonomía (intervalo de corte de suministro eléctrico) .....	68
Tabla 7.2: Costos asociados a cada solución económicamente óptima para cada intervalo de autonomía..	70
Tabla 7.3: Detalle de la configuración económicamente óptima para cada tecnología para un periodo de autonomía de 2 meses, ordenadas por el costo total presente. ....	71
Tabla 7.4: Detalle técnico respecto a la operación del Generador AC que participa en la solución más conveniente para 2 meses de corte de suministro eléctrico para la Posta de Boyeruca .....	74
Tabla 7.5: Detalle técnico respecto a la operación del banco de baterías que participa en la solución más conveniente para 2 meses de corte de suministro eléctrico para la Posta de Boyeruca .....	74
Tabla 7.6: Detalle técnico respecto a la operación del Inversor-Rectificador que participa en la solución más conveniente para 2 meses de corte de suministro eléctrico para la Posta de Boyeruca .....	75
Tabla 7.7: Emisiones asociadas a la configuración óptima (generador diesel con almacenamiento) .....	75
Tabla 7.8: Detalle respecto a generación fotovoltaica del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca.....	77
Tabla 7.9: Detalle respecto a generación eólica del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca.....	77
Tabla 7.10: Detalle respecto a generación con diesel del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca.....	77
Tabla 7.11: Detalles operacionales del sistema de abastecimiento del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca.....	78
Tabla 7.12: Detalles operacionales para el inversor-rectificador del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca.....	78
Tabla 7.13: Costos asociados al sistema híbrido PV-Eólica-Diesel con almacenamiento conectado a la red más económico para 2 meses de autonomía.....	79
Tabla 7.14: Resumen de Medición Neta de la energía para sistema híbrido PV-Eólico-Diesel más conveniente .....	79
Tabla B.1: Códigos para paneles fotovoltaicos .....	100
Tabla B.2: Códigos para aerogeneradores.....	100
Tabla B.3: Códigos para baterías AGM .....	100
Tabla B.4: Códigos para baterías de Gel.....	100
Tabla B.5: Códigos para inversores simples .....	101
Tabla B.6: Códigos para inversor-rectificador con posibilidad de sincronizarse a red .....	101

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Motivación

La energía eléctrica desempeña un papel esencial en la sociedad moderna, favoreciendo a la calidad de vida de las personas, al permitir el desarrollo de las distintas áreas del quehacer del hombre, tales como medicina, educación, manufactura, conservación de alimentos, entre otras.

En lo que corresponde a suministro energético, Chile es un país altamente dependiente y frágil, debido a la dependencia en la importación de hidrocarburos y a la vulnerabilidad en el abastecimiento eléctrico dada la reticencia a invertir en la diversificación del sistema eléctrico.

En este marco, esta memoria apunta a aportar en el avance hacia la autonomía y confiabilidad del suministro eléctrico, promoviendo también el desarrollo sustentable local a través de las ERNC. En particular se realiza el desarrollo de una metodología para la elaboración de un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red.

En la actualidad en el área de optimización de modelos de micro-energía existen diversas herramientas computacionales, que permiten encontrar la configuración óptima de sistemas híbridos conectados a la red o aislados. Dadas tales herramientas, se utiliza el software de aplicación gratuita HOMER para favorecer la expansión de esta temática.

### 1.2 Alcances

El presente trabajo de título elabora una metodología para el desarrollo de un sistema híbrido con almacenamiento conectado a la red, que permita la autonomía energética, abasteciendo un consumo básico para una propiedad pequeña (casa, posta rural, escuela rural, entre otras) en caso de que la propiedad se encuentre bajo un corte de suministro eléctrico prolongado. El sistema híbrido debe tener también la capacidad de inyectar a la red los excedentes de energía.

Las tecnologías en estudio se remiten sólo a PV, Eólica y Diesel, y como dispositivos de almacenamiento se consideran sólo baterías electroquímicas dejando de lado componentes poco desarrollados y de gran costo como la celda de combustible. Se analizan sólo cargas eléctricas y no térmicas. Además se deja de lado la incorporación de costos asociados a mano de obra, por considerarse irrelevantes para la finalidad del trabajo, fluctuantes y dependientes de la ubicación.

La aplicación de la metodología desarrollada permite obtener una aproximación a la solución óptima bajo el criterio económico, cuya precisión depende en gran medida de la calidad de los datos respecto al potencial energético de las fuentes renovables y del criterio de selección de los mismos. Por lo cual el diseño óptimo obtenido de las simulaciones puede distanciarse del que sería el más conveniente en la realidad. Así el grado de exactitud está vinculado al nivel de experiencia y conocimiento del diseñador en la selección de datos.

Este trabajo, se centra en la optimización mediante el criterio mono-objetivo de índole económico. No se aplican otros criterios de optimización como por ejemplo minimización de emisiones contaminantes ( $CO_2$  y  $NO_x$ ).

Este trabajo se remite al desarrollo de la metodología de diseño, la cual se ejemplifica y valida a través de su aplicación a la Posta Rural de Boyeruca. No es parte del estudio la implementación de la configuración obtenida, es decir no se financian, ni adquieren los equipos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo general de este trabajo de título es desarrollar una metodología de diseño para un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Del objetivo general anteriormente definido, se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar y aplicar una metodología para estimar datos utilizables de radiación solar y energía eólica en un lugar específico, a través del análisis de información de localidades cercanas.
- Aplicar la herramienta computacional HOMER, para la optimización de un modelo de generación eléctrica híbrido conectado a la red.
- Ejemplificar y validar la metodología desarrollada para el diseño de un sistema híbrido conectado a la red, mediante su aplicación al caso puntual de la Posta de Boyeruca.
- Realizar variados análisis de sensibilidad sobre los resultados obtenidos que permitan analizar distintos escenarios: variando el periodo de corte del suministro eléctrico, precio del diesel y contrato de venta de excedentes eléctricos generados.
- Servir de guía para el desarrollo y ejecución de proyectos de abastecimiento energético mediante sistemas híbridos.

## 1.4 Metodología desarrollada

El presente trabajo ofrece como principal aporte, el desarrollo de una metodología de diseño para un sistema de abastecimiento eléctrico conectado a la red. El resumen de la metodología se expresa en la figura 1.1, la cual es desarrollada de forma extendida desde el Capítulo 3 en adelante.

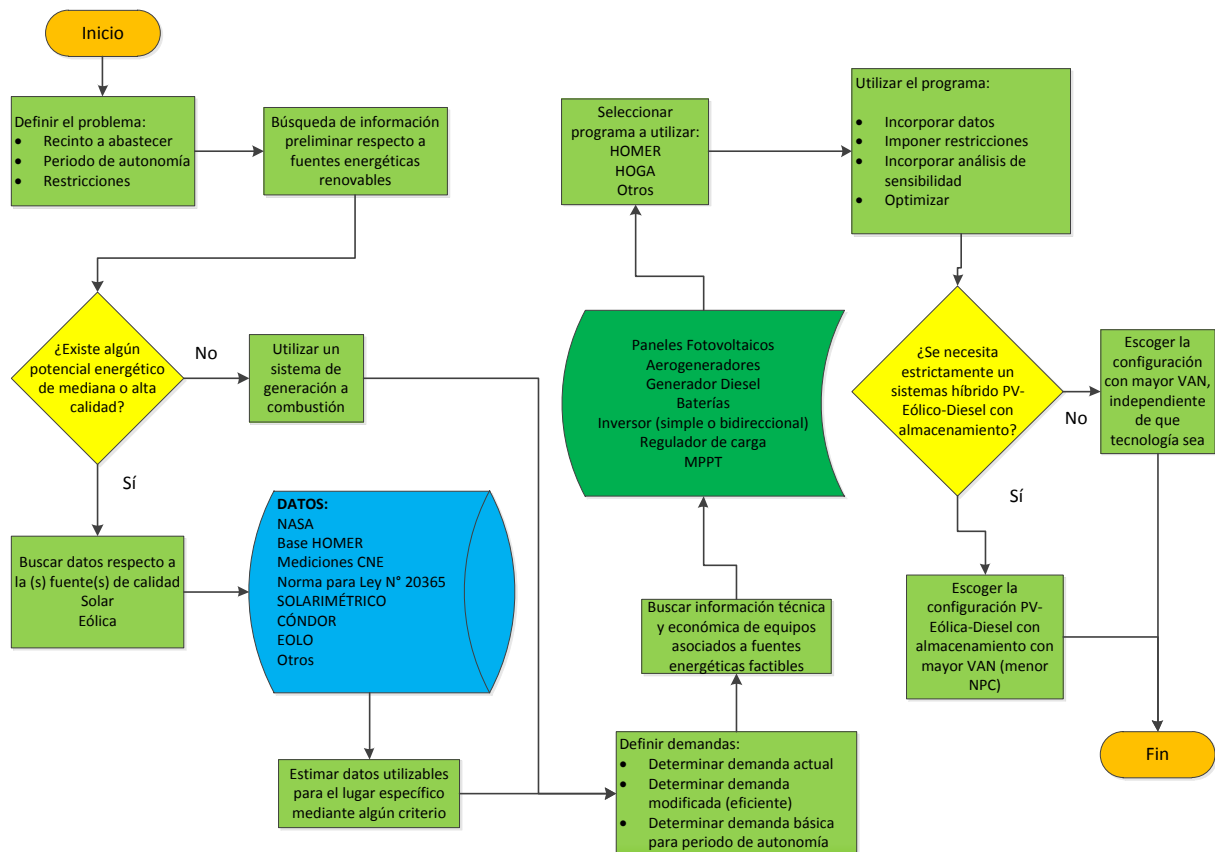


Figura 1.1: Resumen de Metodología desarrollada

La metodología expuesta se puede aplicar a cualquier recinto que se encuentre conectado a la red en que se desee lograr autonomía durante un periodo determinado. Es aplicable a localidades en las que exista recurso solar o/y eólico o/y hidráulico. De no encontrarse recursos renovables de calidad, se analiza directamente la opción de autonomía frente a cortes de suministro eléctrico mediante un generador a combustión interna. Los vacíos o problemáticas posibles, se relacionan principalmente con la inexistencia o imprecisión de datos respecto a las fuentes renovables.

Posterior a la búsqueda de datos, se debe realizar la medición de la demanda eléctrica propia del lugar. Con lo cual se determina una demanda más eficiente mediante el cambio de luminarias y otros equipos de ser necesario. También se determina la demanda básica, que restringe el consumo durante el periodo de autonomía.

Luego se recopila información técnica y económica respecto a los equipos que se desean introducir como posibles componentes participantes.

Se selecciona y utiliza el programa computacional incorporando la totalidad de los datos. Así se simula y realizan los distintos análisis de sensibilidad, con lo cual se posee mayor información para escoger la respuesta óptima bajo el criterio económico.

La metodología desarrollada posee validez general ya que en toda localidad seleccionada se pueden desarrollar las etapas destacadas en la figura 1.1, obteniendo así una solución de abastecimiento.

## 1.5 Estructura de trabajo

El presente trabajo se organiza de la siguiente forma:

En el Capítulo 2 se abordan los antecedentes generales: se caracterizan los sistemas híbridos, también se informa respecto a la situación en Chile y el mundo en la materia. Posteriormente se mencionan detalles respecto a la localidad y el recinto escogidos para ejemplificar la metodología a desarrollar. Para finalizar se describen aspectos fundamentales de la herramienta computacional a utilizar.

En el Capítulo 3 se describen las principales variables asociadas a las fuentes energéticas primarias solar y eólica, y se desarrolla una metodología para modelar los recursos renovables en alguna localidad en que se deseen evaluar los recursos energéticos solar y eólico. Se aplica cada etapa de la metodología desarrollada a la zona escogida (Posta de Boyeruca).

El Capítulo 4 se refiere a la obtención de las demandas eléctricas, desarrollando un procedimiento para la determinación del consumo eléctrico de un recinto en condiciones de utilización normales (cuando la propiedad no presenta corte de suministro eléctrico) y también un procedimiento para la obtención de una demanda básica (demanda restringida que debe abastecer el sistema híbrido frente al corte del suministro eléctrico). En esta sección se aborda el tema del mejoramiento de la eficiencia energética mediante cambio de luminarias. Todo lo expuesto se ejemplifica con el caso de la Posta de Boyeruca.

El Capítulo 5 se refiere a las componentes de un sistema híbrido, se caracteriza técnica y económicamente cada equipo (generador fotovoltaico, aerogenerador, batería electroquímica, inversor, rectificador, regulador de carga de las baterías y generador diesel AC). Se exponen los equipos presentes en el mercado de Chile que forman parte de las posibles alternativas para configurar el sistema (adaptado a la Posta de Boyeruca).

En el Capítulo 6 se muestran las distintas estrategias de control posible, se detallan también aspectos referentes a las restricciones y limitantes en la elaboración del sistema, y el algoritmo a seguir para obtener finalmente los resultados. Se detalla lo referente a lo económico y a las emisiones.

En el Capítulo 7 se realiza la optimización al caso de ejemplificación (Posta de Boyeruca). Se exponen los resultados técnicos y económicos. Primero se muestran las soluciones óptimas para cada tecnología en función del periodo de autonomía de diseño, haciendo hincapié en la solución óptima híbrida PV-Eólica-Diesel con almacenamiento bajo el criterio económico. Posteriormente se analizan

específicamente las soluciones, para un periodo de corte del suministro eléctrico de dos meses. Finalmente mediante un análisis de sensibilidad se estudia la evolución de las configuraciones más económicas en función de la radicación solar, precio del diesel, acuerdo de venta de los excedentes energéticos y costo de los equipos.

En el Capítulo 8 se exponen las conclusiones del trabajo desarrollado. Se concluye respecto a la metodología, al caso sobre el cual se aplica, y a los respectivos análisis de sensibilidad.

En Anexos principalmente se enuncian los pasos desarrollados, específicamente, se describe la utilización de HOMER hasta la obtención de los resultados. Se exponen la marca y modelos de los equipos utilizados para la evaluación.

# Capítulo 2

## Antecedentes

### 2.1 Caracterización de un sistema híbrido de generación eléctrica

Son llamados sistemas híbridos de generación de energía eléctrica, basados en fuentes renovables, aquellos sistemas que disponen de una o más fuentes renovables (solar fotovoltaica, eólica, minihidráulica, biomasa o biogás), y que a la vez pueden utilizar fuentes no renovables.

Los sistemas híbridos se pueden encontrar aislados o conectados a la red de electricidad, estos últimos pueden o no, tener la capacidad de inyectar energía a la red. Los sistemas híbridos usualmente desarrollados se componen de los siguientes equipos:

- Módulo fotovoltaico
- Aerogenerador eólico (de eje horizontal o vertical)
- Turbina hidráulica
- Generador AC
- Banco de baterías electroquímicas
- Inversor
- Rectificador
- Regulador de carga de baterías
- MPPT (Maximum Power Point Tracker)

En los últimos años se ha incorporado a los sistemas híbridos la tecnología vinculada a la celda de combustible de hidrógeno, la cual considera un electrolizador, un tanque de hidrógeno y una celda de combustible.

Existen diversos criterios de diseño para un sistema híbrido, criterios que dependen del objetivo para el que se desarrolla. Los que, primordialmente, corresponden al objetivo económico, medioambiental (reducción de emisiones contaminantes de  $CO_2$  y  $NO_x$ ) y de energía eléctrica no utilizada. Estos pueden ser mono-objetivo (búsqueda de solución bajo un único criterio) o multi-objetivo, es decir, una solución bajo la combinación de dos o más criterios.

Un sistema híbrido presenta la ventaja de la diversificación de las fuentes energéticas de suministro, lo que reduce la variabilidad en comparación con el suministro mediante la generación individual de alguna de sus fuentes. Su construcción puede ser modular, lo que permite la adición de nuevos componentes a la configuración, frente a un eventual incremento en la demanda eléctrica.



## 2.2 Estado del Arte

En la actualidad se encuentra en la literatura especializada, variados trabajos asociados a sistemas híbridos, el mayor porcentaje de tales estudios se enfoca en sistemas híbridos PV y/o Eólico y/o Diesel con almacenamiento de energía en baterías. De la totalidad de sistemas híbridos observados, una gran cantidad posee criterios de diseño de baja precisión debido a la utilización de técnicas rudimentarias para buscar la configuración de componentes adecuada, ya que el cálculo que permite encontrar la solución óptima resulta una tarea difícil, principalmente, a causa de la variabilidad de la disponibilidad de las fuentes energéticas primarias (viento y radiación solar), la variabilidad de la demanda y la no linealidad de las variables asociadas a los componentes que lo integran[1].

El criterio de diseño predominante en su desarrollo, ha sido el mono-objetivo económico, es decir la búsqueda del mayor VAN o menor NPC (Del inglés Net Present Cost). Bajo esta lógica, en algunos trabajos se ha mostrado la viabilidad económica de sistemas híbridos aislados que se encuentran en localidades alejadas de la red (elevado costo de transporte de energía) y donde se dan condiciones propicias, respecto a la disponibilidad de uno o más recursos energéticos renovables. Es por esta razón que la proliferación de sistemas híbridos aislados ha tenido tanto auge.

Las publicaciones desarrolladas internacionalmente han permitido avanzar en el Diseño, Simulación, Optimización y Estrategias de Control de sistemas híbridos, lo que ha permitido acercarse a resultados más exactos que favorecen a una reducción en los recursos destinados (predominantemente económico y temporal).

Los trabajos de memorias de pregrado y estudios de consultoras, se enfocan en mayor medida a la aplicación directa, como modelación y optimización de sistemas híbridos aislados o conectados a la red para lugares específicos. No registrándose en la bibliografía observada, una metodología detallada para elaborar un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red, que tenga la capacidad de entregar autonomía frente a un corte del suministro eléctrico, y que también ofrezca la posibilidad de inyectar excedentes de energía a la red eléctrica.

Chile en el tema de electrificación rural es el líder en Latinoamérica (cuenta con 85,71% de cobertura), principalmente porque el 95% de tal cobertura proviene de la red pública, mientras que el 4,3% de generadores propios o comunitarios y el 0,5% mediante placa solar[2]. Lo anteriormente citado resulta positivo en términos de conectividad, pero también da cuenta de lo dependiente de las zonas rurales a la interconexión central o en su defecto a los combustibles fósiles.

En los últimos años ha existido un incremento acelerado en la instalación de sistemas híbridos, principalmente PV-Eólico, en zonas aisladas, pero en la consulta a las principales empresas que desarrollan esta labor, se manifiesta la falta de conocimientos respecto a las herramientas presentes para entregar una solución óptima, ya que actualmente se realizan aproximaciones gruesas sin la presencia de una metodología pertinente.

Es en este sentido, que el sistema híbrido de mayor difusión y estudio realizado en Chile, corresponde al diseño e implementación de un sistema híbrido Eólico-Diesel en la Isla Tac (una de las Islas del

Archipiélago Chiloé), donde NREL (National Renewable Energy Laboratory ) a través de acuerdos de cooperación entre el gobierno de Chile y EE.UU., trabajó con un equipo de expertos. Se realizaron estudios de carga, recursos renovables y análisis económico, con la posterior optimización mediante la herramienta computacional HOMER. El sistema Diesel-Eólico con almacenamiento de baterías abastece a ochenta y dos familias, con dos aerogeneradores de 7,5 [kW]. Este proyecto también utilizó el software Vipor para distribución eléctrica en pequeñas redes, y el software Hybrid2 para finalizar el diseño del sistema de energía híbrido[3].

## 2.3 Localidad donde se aplicará la metodología a desarrollar

### 2.3.1 Descripción de la localidad de Boyeruca

La localidad de Boyeruca se ubica en el norte costero de la Región del Maule en la comuna de Vichuquén, específicamente en la latitud  $34^{\circ}4' S$  y longitud  $72^{\circ} O$ , limitando a escasos metros con la Región del Libertador Bernardo O' Higgins, como se puede observar en la Figura 2.1.

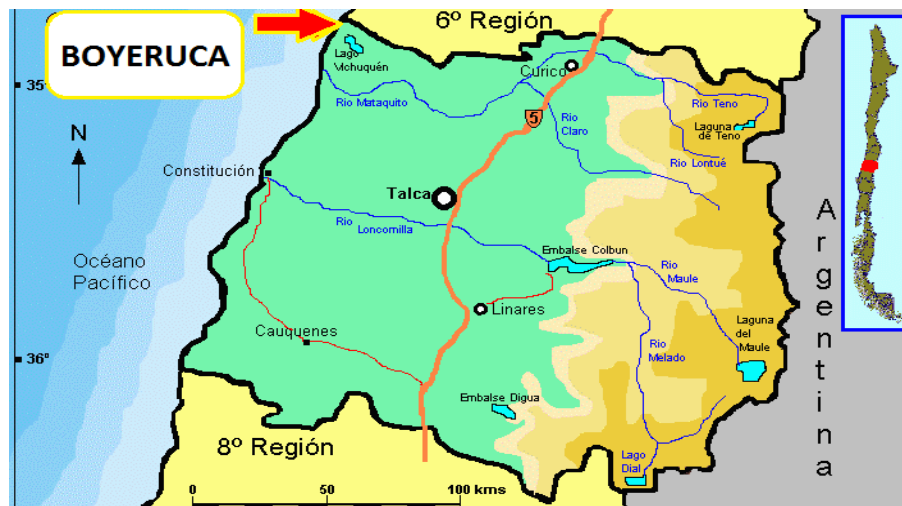


Figura 2.1: Ubicación geográfica de Boyeruca

Se estima que en la localidad de Boyeruca viven, permanentemente, 200 personas que componen 50 familias, las que se dedican, principalmente, a actividades relacionadas con la pesca artesanal, ya sea la recolección de algas y mariscos o a la pesca extractiva en bote. Un pequeño sector se dedica al turismo (época estival), a faenas forestales y a la construcción. Su atractivo principal es una laguna, que forma un humedal que durante algunos meses del año se conecta con el mar, permitiendo el desarrollo de la acuicultura con el cultivo de la Ostra del Pacífico. Además de permitir el avistamiento de aves. Otra de las actividades más importantes corresponde a la obtención de sal [4].

### 2.3.2 Elección de la Posta de Boyeruca

La localidad rural de Boyeruca se encuentra a dos horas en transporte terrestre del centro urbano más cercano (Santa Cruz). La energía eléctrica que consume la localidad proviene de la red eléctrica. Tal zona fue afectada, duramente, por el terremoto con posterior maremoto, el día 27 de Febrero de 2010, registrándose, posteriormente, un corte de suministro eléctrico que se prolongó durante dos meses. El historial de interrupciones eléctricas en esta localidad informa de una alta frecuencia en invierno (tres o cuatro interrupciones al mes), los cuales se prolongan por un periodo de uno o dos días, cuyas causas principales de falla son el viento, la lluvia o derrumbes [5].

La Posta de Boyeruca corresponde a un centro de salud a cargo de la Municipalidad de Vichuquén. Esta posta atiende en un horario determinado, y de producirse una urgencia también abre sus puertas de forma extraordinaria. En algunas ocasiones, se ha atendido a pacientes bajo la luz de velas debido a los continuos cortes de suministro eléctrico. Posterior al terremoto se obtuvo un generador a gasolina para suplir la demanda eléctrica durante el periodo en que la localidad se encontraba sin electricidad, el que le ha permitido enfrentar los reiterados cortes de suministro. En el recinto contiguo a la posta se encuentra una pequeña vivienda donde vive el profesional de la salud a cargo. El consumo eléctrico involucra a ambos recintos, ya que comparten la línea eléctrica. La demanda media diaria actual de energía medida corresponde a 7,45 [kWh/día], alcanzando un peak de 4,8 [kW]. En la figura 2.2 se aprecia la Posta de Boyeruca y la vivienda del trabajador.



Figura 2.2: Posta de Boyeruca y vivienda del profesional de la salud.

## 2.4 Herramienta computacional

Para el desarrollo de sistemas de micro-energía existe una variedad de programas, algunos comerciales y otros de libre distribución, que poseen mayor o menor exactitud en la simulación de sistemas de generación de energía eléctrica, en base, a fuentes renovables. Se pueden mencionar HYBRID2, HOGA, RAPSIM, SOLSIM, ARES, INSEL, TRNSYS, SOMES, CARE Y HOMER.

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) es un programa muy utilizado en la actualidad, siendo una aplicación que utiliza un criterio de optimización mono-objetivo económico para el diseño de sistemas híbridos basados en fuentes renovables y generadores a combustión interna. Este programa encuentra la combinación de componentes de menor costo que satisface las cargas eléctricas y térmicas.

El desarrollo de HOMER comienza en 1994 por el laboratorio norteamericano NREL. El programa permite simular sistemas híbridos compuestos por módulos fotovoltaicos, generadores eólicos, mini-turbinas hidráulicas, generador AC, baterías electroquímicas, celda de combustible, convertidor mono-direccional o bidireccional AC-DC. Las cargas pueden ser eléctricas (AC-DC), cargas de hidrógeno y cargas térmicas.

El programa simula la operación de un sistema por medio de cálculos de balance de energía para cada una de las 8760 horas de un año. Para cada hora, HOMER compara la carga eléctrica y térmica con la energía que el sistema puede entregar en una hora. La optimización utiliza el método enumerativo, es decir evalúa cada una de las configuraciones de componentes y estrategias posibles (pueden ser cientos de miles). Este programa permite evaluar sistemas híbridos aislados o conectados a una red eléctrica, por lo cual es propicio para el desarrollo de la metodología que se presenta en este trabajo.

Después de la simulación de todas las posibles configuraciones de sistemas, HOMER despliega una lista de sistemas factibles, ordenados por costo de ciclo de evaluación. HOMER también permite el desarrollo de análisis de sensibilidad, que permiten observar como varían los resultados con la modificación en los datos de entrada.

## Capítulo 3

# Metodología para la modelación de los recursos energéticos

La modelación de los recursos energéticos requiere de la búsqueda de datos cronológicos respecto a las variables asociadas a cada fuente energética. Es por esto que el paso temporal entre los valores encontrados es fundamental para la precisión del modelo, de ahí que una mayor cantidad de muestras para un mismo tiempo de captura de datos, convenga en aspectos de exactitud, pero se debe ser cuidadoso ya que esto trae consigo un mayor coste temporal para la realización de la simulación computacional.

Usualmente la información disponible respecto a las principales variables asociadas a los recursos energéticos renovables para la modelación de un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel (radiación y viento) corresponde a medias mensuales, por lo que se debe tener cautela, y adquirir información extra que coopere en determinar la distribución dentro del periodo a que pertenecen tales magnitudes (principalmente para la energía eólica), ya que existe una gran pérdida de información debido a la reducción informativa que involucra una media aritmética mensual.

### 3.1 Recurso solar

El sol es una fuente de energía, que la genera en forma de radiación a una tasa de  $3,8 \times 10^{22}$  [kW], y una pequeña fracción es interceptada por la tierra, la cual corresponde a  $1,8 \times 10^{14}$  [kW] siendo el 60% el que logra llegar a la superficie terrestre[6]. Para realizar una comparación de magnitudes, la potencia instalada en Chile, considerando los dos grandes mercados o sistemas eléctricos interconectados (SIC y SING), corresponde a cerca de  $1,3 \times 10^7$  [kWh][7], lo cual deja en evidencia el gigantesco potencial energético de esta fuente energética.

Es importante definir la terminología asociada a las magnitudes solares. Se conoce como irradiancia a la potencia incidente por unidad de superficie (usualmente en  $[W/m^2]$ ), mientras que insolación o irradiación corresponde a la energía incidente por unidad de superficie en un tiempo determinado (usualmente en  $[Wh/m^2/día]$ ).

#### 3.1.1 Datos necesarios para la definición del recurso solar

Para la definición del recurso solar y su incorporación a HOMER, es necesario conocer al menos la insolación global media diaria representativa de cada mes para un plano horizontal, así como el índice de claridad medio asociado a cada mes, índice que facilita HOMER al introducir las coordenadas y la zona

horaria de la localidad a analizar. También es posible importar un registro anual de irradiancia, que tenga algún intervalo especificado por el usuario (por ej. 15 minutos).

Para comprender el comportamiento y las características de fuente solar, es necesario conocer los aspectos astronómicos que se exponen a continuación.

### 3.1.1.1 Relación sol-tierra

La radiación solar extraterrestre varía durante el año, para lo cual existe un factor corrector de la excentricidad de la eclíptica ( $\varepsilon_0$ ), que puede ser descrita mediante la ecuación 3.1:

$$\varepsilon_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 d_n}{365}\right) \quad (3.1)$$

Con  $r_0$  la distancia media Tierra-Sol y  $r$  la distancia en el momento en que se desea calcular, y  $d_n$  el número de orden del día a evaluar (por ej. 1 de enero corresponde a 1, y 31 de diciembre a 365), la ecuación 3.1 asume una velocidad angular constante.

El plano del ecuador no es paralelo al plano de la trayectoria terrestre alrededor del sol (eclíptica). El plano del ecuador mantiene la misma dirección durante el año, con una inclinación de  $23,45^\circ$  sobre el plano de la eclíptica. Lo anteriormente citado da lugar a un ángulo que varía desde  $23,45^\circ$  hasta  $-23,45^\circ$  llamado declinación ( $\delta$ ) y que corresponde al ángulo entre la recta sol-tierra y el plano del ecuador. A los  $23,45^\circ$  ocurre el solsticio de verano, y a los  $-23,45^\circ$  el solsticio de invierno. La declinación ( $\delta$ ) puede estimarse mediante la ecuación 3.2.

$$\delta = 23,45^\circ \operatorname{sen}\left(360 \frac{284 + d_n}{365}\right) \quad (3.2)$$

Las relaciones geométricas entre un plano de alguna orientación asociada a un lugar de la tierra en algún momento y la relación solar entrante, suelen describirse mediante la posición del sol relativa a ese plano a través de variados ángulos[8]. Se pueden mencionar:

- Latitud ( $\varnothing$ ): el ángulo respecto a la ubicación, al norte o sur del Ecuador ( $-90^\circ \leq \varnothing \leq 90^\circ$ ), donde el norte corresponde a  $90^\circ$ .
- Inclinación ( $\beta$ ): el ángulo entre el plano de la superficie en análisis y la horizontal ( $0 \leq \beta \leq 180^\circ$ ), si  $\beta > 90^\circ$  significa que la superficie tiene una componente que enfrenta hacia abajo.
- Ángulo azimut ( $\gamma$ ): es el ángulo formado entre la dirección sur y la proyección del punto sobre el horizonte, ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ ), siendo positivo hacia el oeste. Se le llama horizonte al círculo formado por el lugar geométrico de los puntos con elevación  $0^\circ$ .

- Ángulo horario ( $\omega$ ): Corresponde al desplazamiento angular del sol, en este u oeste debido a la rotación de la tierra sobre su eje en  $15^\circ$  por hora,  $\omega=0$  al mediodía, en la mañana negativo y en la tarde positivo.
- Ángulo de incidencia ( $\theta$ ): el ángulo entre la recta que une la superficie con el sol y la normal a la superficie.

Se definen también ángulos que describen la posición del sol en el cielo:

- Ángulo cenital solar ( $\theta_z$ ): el ángulo entre la vertical y la línea al sol, es decir el ángulo de incidencia del rayo de luz sobre una superficie horizontal
- Altitud ( $\alpha_s$ ): el ángulo entre la horizontal y la línea al sol, es decir el complemento del cenital.
- Ángulo azimut solar ( $\gamma_s$ ): es el desplazamiento angular entre la proyección del rayo de luz sobre el plano horizontal y el vector que apunta al sur (Figura 3.1 b). Los desplazamiento hacia el este son negativos y hacia el oeste positivos.

Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital solar  $\theta_z$ . Su valor se encuentra entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  cuando el sol está sobre el horizonte, así para  $\beta=0$  se tiene la ecuación 3.3. Mientras que para el cálculo del azimut solar ( $\gamma_s$ ) se tiene la ecuación 3.4.

$$\delta \cos(\theta_z) = \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) = \sin(\alpha_s) \quad (3.3)$$

$$\cos(\gamma_s) = \frac{(\sin(\alpha_s) \sin(\phi) - \sin(\delta))}{\cos(\alpha_s) \cos(\phi)} \quad (3.4)$$

Se puede calcular el ángulo de salida  $\omega_s$  a través de la ecuación 3.5:

$$\omega_s = -\arcsin(-\tan(\delta) \tan(\phi)) \quad (3.5)$$

En la figura 3.1 se definen los ángulos que permiten describir el movimiento del sol con respecto a una ubicación.

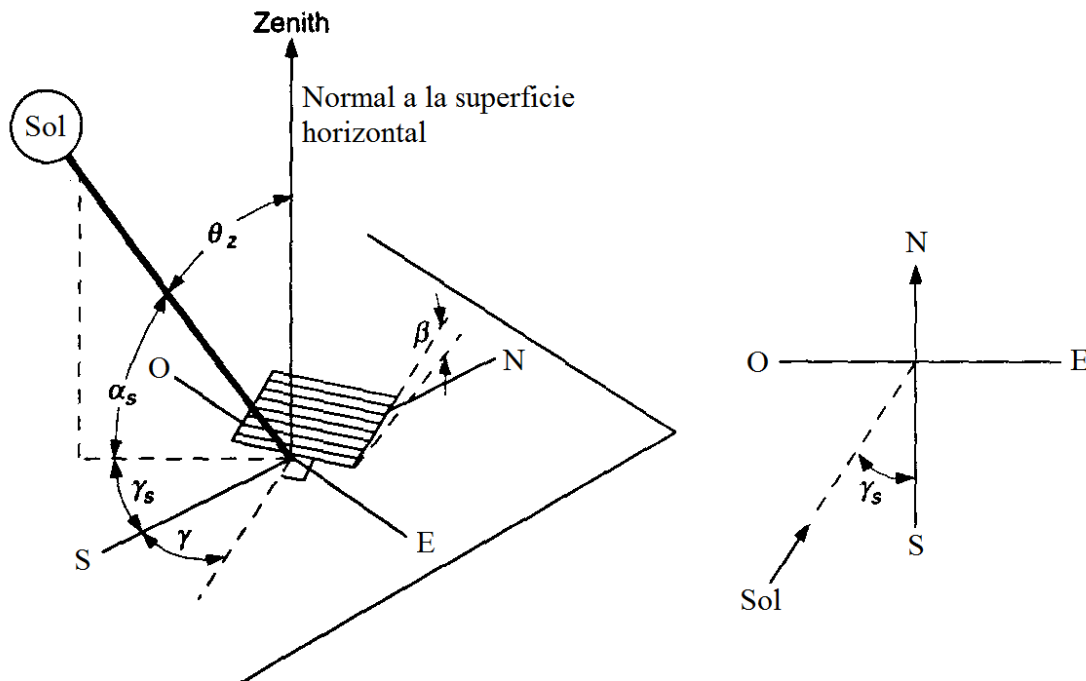


Figura 3.1: a) Ángulo cenital solar, inclinación, ángulo azimut solar para una superficie inclinada b) Plano mostrando ángulo azimut solar

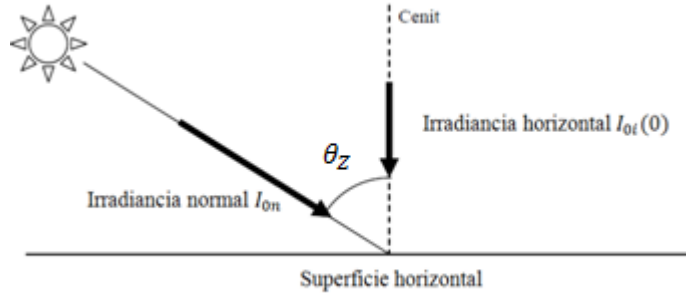
### 3.1.1.2 Radiación solar sobre una superficie horizontal

La radiación solar extraterrestre pasa a través de la atmósfera, una parte de esta es absorbida y la otra reflejada por el aire y el vapor de agua. Otra parte sufre dispersión debido a las moléculas de aire, vapor de agua, aerosoles y material particulado. La parte de radiación solar que alcanza la superficie de la Tierra esencialmente sin cambios en la dirección es llamada radiación directa. La radiación dispersada que alcanza la superficie es llamada radiación difusa. A la radiación procedente del suelo que corresponde a la reflexión de la radiación incidente se le llama radiación de albedo. Entonces se tiene que la radiación resultante total (directa + difusa + albedo) es denominada radiación global.

La irradiancia solar que cae sobre una superficie normal a los rayos solares fuera de la atmósfera de la Tierra (irradiancia extraterrestre) a una distancia media entre Tierra y Sol ( $r_0$ ) es llamada constante solar ( $I_0$ ). Mediciones de la NASA indican que el valor de la constante solar es de  $1353 \text{ [W/m}^2\text{]} (\pm 1,6\%)$ . Este valor fue revisado y el valor aceptado en la actualidad es de  $1377 \text{ [W/m}^2\text{]} \text{ [8]}$ . La variación en la radiación estacional en la superficie de la Tierra puede ser entendida de la geometría del movimiento relativo de la Tierra alrededor del sol, por lo cual  $r$  (distancia entre Tierra y sol en un determinado momento) estará relacionada con la irradiancia extraterrestre incidente para el día  $d_n$  ( $I_{0n}$ ). En base a esto se presenta la ecuación 3.6.



$$I_{0n} = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 I_0 = \varepsilon_0 I_0 \quad (3.6)$$



**Figura 3.2: Irradiancia incidente para un plano horizontal**

La figura 3.2 representa la geometría que permite obtener la irradiación sobre una superficie horizontal  $I_{0i}$  para un determinado ángulo  $\theta_z$ , la cual se expresa mediante la ecuación 3.7.

$$I_{0i}(0) = I_0 \varepsilon_0 \cos(\theta_z) \quad (3.7)$$

Como una simplificación de cálculos, se utiliza el concepto de día representativo del mes, que corresponde al día en que la declinación corresponde a la declinación media del mes. A través de esta simplificación, sólo se necesita calcular la insolación para ese día, en vez de calcularlos para todos los días del mes. En la tabla 3.1 se informa respecto a los días representativos para cada mes y la declinación asociada.[9]

**Tabla 3.1: Días representativos de los meses y declinación asociada.**

Mes	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día representativo	17	15	16	15	15	11	17	17	16	16	15	11
$d_n$	17	46	75	105	135	162	198	228	259	289	319	345
Declinación ( $\delta^\circ$ )	-20,92	-13,29	-2,42	9,41	18,79	23,09	21,18	13,45	1,81	-9,97	-19,15	-23,12

### 3.1.1.3 Radiación solar sobre una superficie inclinada

- **Radiación directa**

Para una superficie en alguna orientación inclinada como la mostrada en la figura 3.3 (en el hemisferio norte), el ángulo de incidencia  $\theta$ , se puede deducir del hecho que la superficie con inclinación  $\beta$  hacia el norte o sur tiene la misma relación angular con el rayo de radiación, que una superficie horizontal con una latitud artificial  $(\phi - \beta)$ . Así se tiene la ecuación 3.8 asociada al hemisferio sur (elección por la localidad en que se evaluará). Para el hemisferio norte se puede reemplazar  $(\phi + \beta)$  por  $(\phi - \beta)$ , siendo consistente con la convención de signos de  $\phi$  y  $\delta$ .

$$\cos(\theta) = \cos(\phi + \beta) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi + \beta) \sin(\delta) \quad (3.8)$$

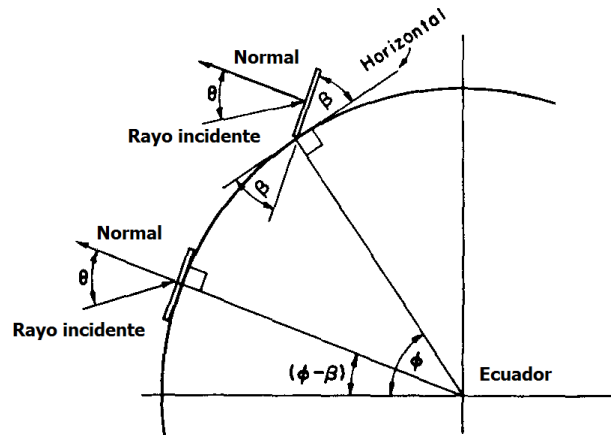


Figura 3.3: Sección de la Tierra mostrando  $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  y  $(\phi - \beta)$  para el hemisferio norte

Si se desea girar la superficie en un ángulo azimut  $\gamma$ , el coseno de  $\theta$  se puede calcular mediante la ecuación 3.9.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) + \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) \cos(\beta) \\ & - \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \sin(\omega) \sin(\beta) \sin(\gamma) \\ & + \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\omega) \sin(\beta) \cos(\gamma) \end{aligned} \quad (3.9)$$

- **Radiación del albedo**

Para la determinación de la radiación del albedo, es necesario conocer el coeficiente de albedo o reflectividad ( $\rho_{ref}$ ), que corresponde a la relación entre la energía reflejada y la energía incidente sobre la superficie del suelo. En la tabla 3.2 se enuncian valores aproximados de la reflectividad de suelos.

**Tabla 3.2: Coeficiente de albedo o reflectividad**

<b>Tipo de Superficie</b>	<b>Reflectividad</b>
Bosque	0,06-0,2
Suelo Cultivado	0,07-0,14
Asfalto Seco	0,09-0,15
Cultivos Herbáceos	0,12-0,25
Situación Urbana	0,14-0,22
Césped	0,15-0,25
Asfalto Mojado	0,18
Césped Fresco	0,26
Tejas Rojas	0,33
Acero	0,35
Nieve Mojada	0,55-0,75
Aluminio	0,85

Un modelo simplificado establece que la irradiación del albedo para una superficie inclinada corresponde a la ecuación 3.10.

$$R(\beta) = G(0) \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \rho_{ref} \quad (3.10)$$

Con  $R(\beta)$  la irradiación del albedo para una superficie inclinada en  $\beta$ ,  $G(0)$  la insolación global sobre el plano horizontal.

### 3.1.1.4 Índice de claridad

El índice de claridad, denominado usualmente  $K_T$ , corresponde a la razón entre la radiación global y la radiación extraterrestre. Para el desarrollo de la simulación es necesario obtener los índices diarios medios mensuales (los índices representativos de cada mes), y estos se deben calcular mediante la ecuación 3.11. Valores típicos del índice de claridad van desde 0,25 (un muy nublado día) a 0,75 (un día muy soleado).

$$K_{Tam} = \frac{G_{dm}(0)}{B_{dm}(0)} \quad (3.11)$$

Con:

$K_{Tdm}$ : Índice de claridad del día medio mensual

$G_{dm}(0)$ : Irradiación global horizontal diaria media mensual

$B_{dm}(0)$ : Irradiación global horizontal extraterrestre media mensual

Respecto a la obtención de  $G_{dm}(0)$  y  $B_{dm}(0)$  no se realizará profundización, ya que se escapa al alcance de esta memoria, dada la temática a desarrollar. La obtención de  $K_{Tdm}$  permite obtener posteriormente, la radiación difusa y directa, las cuales son necesarias para conocer la insolación sobre una superficie inclinada, uno de los modelos más utilizados para cumplir esta tarea corresponde al método de Liu y Jordan (1960). [10]

### 3.1.2 Fuentes de datos respecto a insolación solar

Para el desarrollo de un sistema híbrido basado en energías renovables, se debe ser cuidadoso en la selección de los datos adecuados (más cercanos), respecto a los recursos renovables, ya que de lo representativa de esta base de datos, dependerá en gran medida que la configuración y estrategias seleccionadas por HOMER sean las óptimas para la situación real. Por lo que se debe tener pleno conocimiento de la localidad a la que pertenecen, y bajo qué condiciones se obtuvieron los datos (registro) o bajo qué supuestos se calcularon (modelos o proyecciones). De no ser así se pueden dimensionar erróneamente los equipos, causando problemas de abastecimiento si se sub-dimensiona o exceso en los costos de adquisición si se sobredimensiona.

En la actualidad se encuentran variadas fuentes de datos respecto a la insolación horizontal media diaria para cada mes, ya sean mediciones en terreno o satelitales, o utilización de modelos.

A continuación se describen las fuentes de información de las cuales se pueden obtener datos respecto a localidades de Chile.

#### 3.1.2.1 Caracterización de fuentes de datos para recurso solar

- **Norma técnica para Sistemas Solares Térmicos acogidos a la franquicia tributaria de la Ley N° 20.365:** en este documento desarrollado el 2010, se encuentra información de la radiación solar global media mensual sobre superficie horizontal [ $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$ ] durante 12 meses, para las 345 comunas de Chile. Existiendo también un registro respecto a la radiación solar difusa media mensual sobre superficie horizontal [ $\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$ ]. [11]
- **Registro Solarimétrico:** Consiste en un informe editado por la CNE, PNUD, GEF y UTFSM el año 2008, que entrega información respecto a irradiancia en 76 localidades de Chile, distribuidas de norte a sur (incluyendo territorio antártico). Específicamente informa la insolación global mensual en plano

horizontal con unidades [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ], la insolación global mensual en diferentes inclinaciones y azimut con unidades [ $\text{kWh}/\text{m}^2$ ], también la radiación total horaria promedio mensual para distintas orientaciones (azimut) e inclinaciones de superficies con unidades [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] y porcentaje de radiación difusa horaria con respecto a radiación total para distintas orientaciones, en unidades [%]. [12]

- **Datos NASA:** es una herramienta disponible en la web de NASA SSE (Surface meteorology and Solar Energy Data Set) que ha recopilado satelitalmente información durante los últimos 22 años. Entregando la insolación global diaria media mensual a 10 [m] sobre la superficie y muchas otras magnitudes climatológicas importantes, entre ellas el índice de claridad medio mensual. Necesita como parámetros de entrada la latitud y longitud del lugar. La gran ventaja es que ofrece datos de cualquier localidad de la Tierra. [13]
- **Simulación de la CNE:** se encuentra disponible en la web, y corresponde a una herramienta de simulación desarrollada a través del Proyecto Cóndor por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que entrega información respecto a la insolación diaria media mensual, sólo cada tres meses (Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre) a una altura de 10 [m]. La simulación se basa en el modelo WRF (Weather Research and Forecasting). Genera un documento, que para su desarrollo requiere que se incorpore la latitud y longitud. La simulación no está disponible para el extremo sur de Chile. [14]
- **Datos de HOMER:** el programa que se utiliza para la optimización, HOMER, ofrece los datos vía internet, específicamente la insolación diaria media mensual y los índices de claridad diarios medios mensuales. Se debe introducir la latitud y longitud, y la zona horaria de la localidad sobre la cual se requiere analizar. [15]
- **Modelos de radiación:** se puede establecer la insolación diaria media mensual a través de modelos de radiación. Se puede mencionar el modelo Perrin de Brichambaut, que permite modelar tres tipos de cielo (claro, normal y contaminado). Para escoger los parámetros adecuados se deben conocer las características de la localidad analizar. Es necesario conocer la latitud de la zona y los días medios mensuales de cada mes.

### 3.1.3 Aplicación de metodología a la Posta de Boyeruca

#### 3.1.3.1 Ubicación de la localidad

A continuación se señalan los parámetros asociados a la Posta de Boyeruca para buscar datos estadísticos u operar el programa de simulación:

- Latitud ( $\emptyset$ ):  $34,67^\circ$  latitud sur ( $-34,67^\circ$ )

- Longitud: 72° longitud oeste (-72°)
- Zona Horaria: GMT -03:00 durante primavera y verano, y GMT -04:00 en otoño e invierno
- Coeficiente de albedo o reflectividad ( $\rho_{ref}$ ): la posta está cubierta de pasto, por lo cual se escoge la media del intervalo para césped 0,2 (tabla 3.2).

### 3.1.3.2 Registros obtenidos

De la búsqueda de la insolación diaria media mensual [kWh/m<sup>2</sup>/día] en las fuentes informativas, se obtiene para las coordenadas de Boyeruca y la comuna de Vichuquén la información resumida en la tabla 3.3 y en la figura 3.4.

Tabla 3.3: Insolación media diaria obtenida para la localidad de Boyeruca

Fuente\Mes [kWh/m <sup>2</sup> /día]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Media Anual
Vichuquén-Norma Técnica	6,88	6,09	4,79	3,19	1,92	1,41	1,73	2,48	3,7	5,01	6,33	6,81	4,19
NASA (22 años)	8,16	6,97	5,56	4,09	2,73	2,25	2,56	3,37	4,82	6,2	7,63	8,39	5,23
Simulación CNE (Dgf)	NA	NA	6,48	NA	NA	1,64	NA	NA	4,8	NA	NA	8,22	5,29
HOMER	8,12	6,97	5,75	3,98	2,63	2,19	2,3	3,22	4,49	5,97	7,26	8,14	5,08
Modelo cielo normal	8,54	7,77	6,48	4,89	3,6	2,99	3,23	4,34	5,9	7,39	8,37	8,75	6,02

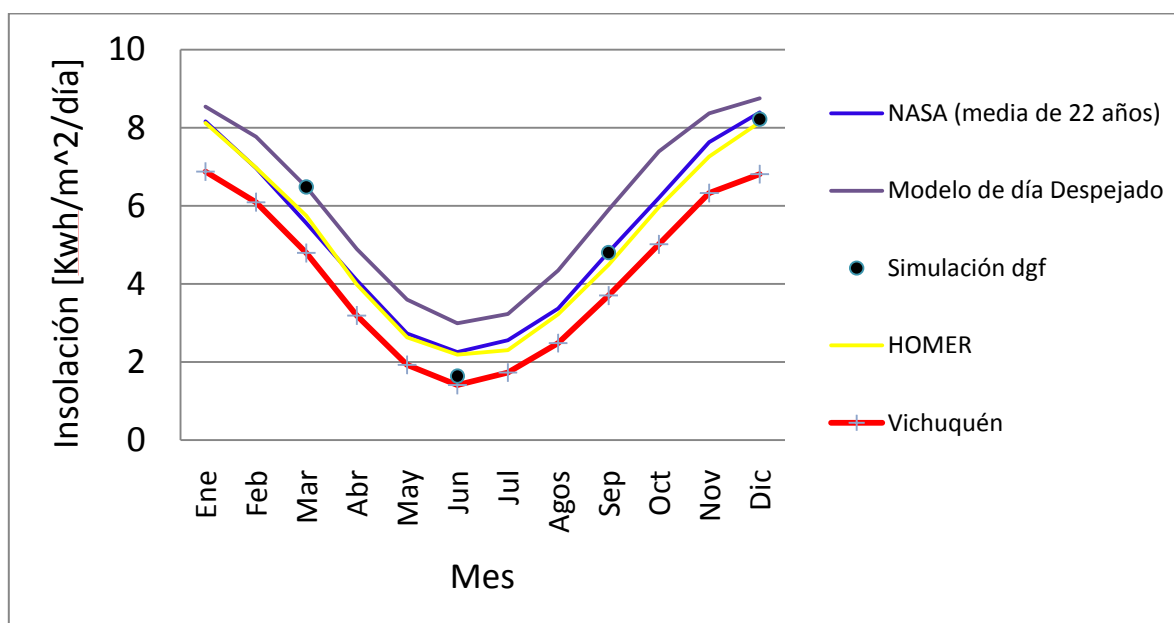


Figura 3.4: Resumen de datos obtenidos respecto a insolación diaria media para Boyeruca

Se observa que el registro NASA, la simulación de CNE (Dgf) y la base de datos HOMER presentan valores similares, mientras la insolación para Vichuquén (comuna a la que pertenece Boyeruca) registra valores diarios medios mensuales menores.

En este caso, para la incorporación a HOMER se introduce la estadística perteneciente a la norma técnica como registro, ya que se establece un criterio conservador.

### 3.1.3.3 Índice de claridad

Al introducir las coordenadas de Boyeruca y la zona horaria, en conjunto con los datos de insolación diaria media mensual sobre un plano horizontal, HOMER calcula los índices de claridad medios (tabla 3.4). A través de este índice el modelo utilizado por HOMER, puede conocer qué porcentaje de la insolación global corresponde a directa y cuanto a difusa para poder desarrollar el modelo interno.

Tabla 3.4: Índices de claridad entregados por HOMER para Boyeruca

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic
Índice de claridad	0,574	0,561	0,529	0,46	0,367	0,317	0,362	0,401	0,452	0,491	0,543	0,554

### 3.1.3.4 Orientación del Panel Fotovoltaico

De la geometría expresada en la sección 3.1.1, queda al descubierto que la orientación y la inclinación del generador fotovoltaico es fundamental. El análisis de HOMER ofrece las siguientes alternativas de seguimiento para los módulos fotovoltaicos:

- Sin movimiento
- Eje Horizontal, mensualmente, semanalmente, diariamente ó continuamente ajustado.
- Eje vertical, continuamente ajustado.
- Dos ejes

Se aplica la ecuación 3.8 para conocer cuánto varía la radiación incidente y por ende la corriente, variando el ángulo de inclinación del panel ( $\beta$ ). Específicamente se realiza la comparación de la irradiancia incidente sobre un panel fotovoltaico, tomando como caso base cuando el panel se encuentra totalmente horizontal (inclinación  $\beta=0$ ), respecto a ubicarlo en el ángulo de inclinación que se aproxima al óptimo para un sistema fijo anual. Es decir, sin seguimiento, que corresponde a dejar la inclinación igual a la latitud ( $\beta = \emptyset$ ), en negrita.

También se realiza la comparación con un sistema de seguimiento mensual, habiendo calculado previamente el ángulo óptimo para cada mes (en rojo). Para esta comparación se utilizó el supuesto de que la mayor parte de la radiación corresponde a directa, de ahí que se utilice la ecuación 3.8. En la tabla 3.5 se observa el resumen comparativo para los diferentes ángulos. Se asumió que el panel fotovoltaico apunta de forma fija hacia el norte (azimut=180°), que corresponde al ángulo en que se debe fijar en el hemisferio sur de no existir seguimiento a través de un eje vertical.

Tabla 3.5: Comparación fraccional entre la radiación directa obtenida para diversos ángulos y la radiación directa sobre un plano horizontal.

$\beta^\circ \setminus \text{Mes}$	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>0</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>5</b>	1,018	1,030	1,051	1,081	1,114	1,134	1,125	1,093	1,061	1,036	1,020	1,014
<b>10</b>	1,027	1,053	1,094	1,153	1,219	1,260	1,241	1,179	1,113	1,065	1,033	1,020
<b>12</b>	1,029	1,060	1,109	1,180	1,259	1,308	1,285	1,210	1,132	1,074	1,036	<b>1,021</b>
<b>14</b>	<b>1,030</b>	1,065	1,123	1,205	1,297	1,354	1,327	1,240	1,149	1,082	1,037	1,020
<b>15</b>	1,029	1,067	1,129	1,217	1,315	1,376	1,348	1,255	1,157	1,085	1,038	1,019
<b>16</b>	1,029	1,069	1,135	1,228	1,333	1,398	1,368	1,269	1,165	1,088	<b>1,038</b>	1,018
<b>20</b>	1,023	1,074	1,156	1,271	1,401	1,482	1,444	1,321	1,193	1,097	1,035	1,010
<b>21</b>	1,021	<b>1,074</b>	1,160	1,281	1,417	1,502	1,462	1,333	1,199	1,098	1,033	1,007
<b>25</b>	1,010	1,072	1,173	1,316	1,477	1,576	1,529	1,378	1,219	<b>1,101</b>	1,024	0,993
<b>30</b>	0,988	1,062	1,182	1,350	1,541	1,659	1,603	1,424	1,236	1,096	1,005	0,968
<b>32</b>	0,978	1,056	<b>1,182</b>	1,361	1,563	1,688	1,629	1,439	1,240	1,092	0,995	0,956
<b><math>\Phi=34,6</math></b>	<b>0,962</b>	<b>1,045</b>	<b>1,181</b>	<b>1,373</b>	<b>1,590</b>	<b>1,724</b>	<b>1,661</b>	<b>1,457</b>	<b>1,243</b>	<b>1,084</b>	<b>0,980</b>	<b>0,939</b>
<b>36</b>	0,953	1,039	1,180	1,378	1,602	1,741	1,676	1,465	<b>1,244</b>	1,079	0,972	0,929
<b>40</b>	0,923	1,018	1,172	1,389	1,634	1,785	1,714	1,483	1,241	1,062	0,945	0,897
<b>44</b>	0,889	0,991	1,158	<b>1,392</b>	1,657	1,821	1,744	1,494	1,233	1,039	0,912	0,861
<b>45</b>	0,880	0,984	1,153	1,392	1,661	1,828	1,750	1,496	1,230	1,032	0,903	0,852
<b>48</b>	0,851	0,960	1,138	1,389	1,672	1,847	1,765	<b>1,498</b>	1,219	1,011	0,876	0,821
<b>50</b>	0,830	0,943	1,126	1,385	1,677	1,857	1,772	1,497	1,209	0,995	0,856	0,799
<b>53</b>	0,797	0,914	1,106	1,375	<b>1,680</b>	1,868	1,779	1,493	1,192	0,969	0,824	0,765
<b>55</b>	0,774	0,894	1,090	1,367	1,679	1,872	1,781	1,487	1,179	0,950	0,801	0,741
<b>56</b>	0,762	0,884	1,082	1,362	1,678	1,873	<b>1,782</b>	1,484	1,172	0,941	0,789	0,729
<b>58</b>	0,737	0,862	1,065	1,351	1,674	<b>1,874</b>	1,780	1,476	1,157	0,920	0,765	0,703

De querer utilizar un sistema de seguimiento horizontal con variación mensual, es necesario utilizar la ecuación 3.8 ya que HOMER no informa respecto a cuáles son los  $\beta_s$  óptimos mensuales, a pesar de ser datos necesarios para regular mensualmente la inclinación. Para la simulación expuesta en este trabajo de título se utiliza un sistema con inclinación  $\beta^\circ = \Phi^\circ = 34,6^\circ$ , que es lo recomendado. De querer ahorrarse los cálculos (aunque se pierde eficiencia global), la bibliografía aconseja que para invierno la inclinación corresponda a  $\beta^\circ = \Phi^\circ + 15^\circ$ , y en verano  $\beta^\circ = \Phi^\circ - 15^\circ$ . [10]

### 3.2 Recurso eólico

El 3% de la energía solar que alcanza la superficie es convertida en energía eólica ( $3,6 \times 10^{12}$  [kW]), y el 35% de esta energía es disipada en una franja de 1 kilómetro sobre la superficie de la tierra ( $1,2 \times 10^{12}$  [kW]). La energía eólica es la fuente de energía eléctrica con más mayor tasa de crecimiento en la



actualidad, desde el año 1997 al año 2007 la tasa de crecimiento promedio en todo el mundo fue del 28%. [16]

### 3.2.1 Datos necesarios para la definición del recurso eólico

Para la definición del recurso eólico y su incorporación a HOMER, es necesario conocer mayor cantidad de información que para el recurso solar. Esto debido a que la distribución de la velocidad del viento no es tan predecible como la radiación solar, y posee un factor aleatorio, que hace que el recurso deba describirse mediante una función de distribución. Así cada localidad posee una distribución de viento asociada, que suele representarse con una Weibull de dos parámetros.

Para el desarrollo de la simulación en HOMER se puede introducir información respecto a la velocidad del viento a través de dos entradas:

- Importar un registro anual obtenido a través de un anemómetro de forma directa: para esta situación es ideal contar con la mayor cantidad de datos, idealmente con un paso temporal pequeño (orden de los minutos), de esta forma el mismo programa calcula los parámetros de Weibull que describen la distribución que mejor representa la malla de datos incorporada. Se necesita conocer a la altura sobre el suelo y la altura sobre el nivel del mar en que está instalado el anemómetro.
- Conocer las medias mensuales de la velocidad del viento: esto es más accesible, ya que existen diversos datos en la web. La dificultad es que si se desea gran precisión, se debe conocer de antemano: el parámetro de forma de la Weibull que describe el recurso (si no se conoce, se puede escoger tentativamente un valor entre 1,5 y 2,5), el patrón diurno de intensidad y la hora promedio de la jornada en que se produce la mayor velocidad del viento.

Para la comprensión respecto al potencial eólico es necesario conocer aspectos sobre distribución de la velocidad del viento y su potencial energético.

#### 3.2.1.1 Potencial energético del viento

La potencia  $P$  disponible en el viento con aire con densidad  $\rho_{air}$ , que pasa a través de un área  $A$  perpendicular al viento a una velocidad  $v$ , está dada por la ecuación 3.12:

$$P = \frac{1}{2} \rho_{air} A v^3 \quad (3.12)$$

La densidad decrece con el incremento de la temperatura sobre el nivel de mar, pero este efecto es normalmente despreciable e ignorado, porque estas variaciones tienden a un promedio a lo largo del año. Sin embargo, la variación de densidad debido a la altura no debe ser despreciada ya que es significativa, por ejemplo a 1600 [m] de altura sobre el nivel del mar, la densidad disminuye en 14% en comparación con la densidad del aire al nivel del mar, por lo tanto, la potencia del viento para una misma velocidad y área se reduce en 14% a 1600 [m] de altura. [16]

### 3.2.1.2 Límite de Betz

Para cualquier generador eólico independiente del diseño, existe un límite en la obtención de energía que no se puede superar, tal límite es llamado límite de Betz y corresponde a 0,593. Es decir, el generador no puede obtener más del 59,3% de la potencia del viento que incide sobre el área barrida.

### 3.2.1.3 Rugosidad

La rugosidad se mide a través de la “longitud de rugosidad”, y se clasifica por clases. La longitud de rugosidad ( $z_0$ ) corresponde a la altura sobre el nivel del suelo a la cual la velocidad del viento es teóricamente cero. La longitud de rugosidad permite conocer cómo se ve afectado el perfil de velocidad del viento en una zona. La ecuación 3.13 establece una relación logarítmica que permite determinar la velocidad del viento  $v_z$  a la altura  $z$ . También existen expresiones dadas por una ley de potencia, pero por simplicidad se utiliza la relación logarítmica. Se debe conocer con anterioridad el valor de la velocidad  $v_h$  a la altura  $h$ .

$$v_z = v_h \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)} \quad (3.13)$$

En la tabla 3.6 se detallan las longitudes de rugosidad características para cada superficie.[15] y [17]

Tabla 3.6: Longitud de rugosidad para distintas superficies

Superficie	Longitud de rugosidad [m]
Muy liso, hielo o lodo	0,00001
Mar abierto en calma	0,0002
Desierto liso	0,001
Nieve	0,003
Césped	0,008
Césped rugoso	0,01
Campo abierto	0,03
Cultivos	0,05
Pocos árboles	0,1
Muchos árboles, pocas construcciones	0,25
Bosque y arboledas	0,5
Centro de ciudad, altas construcciones	3

### 3.2.1.4 Variación anual y estacional

Mientras las variaciones de las medias anuales de la velocidad del viento son difíciles de predecir, la variación del viento durante el año puede ser bien caracterizada en términos de distribución de probabilidad. La distribución de Weibull es una buena representante de la variación media horaria de la velocidad del viento sobre un año en muchos lugares típicos. La distribución de Weibull de dos parámetros toma la forma expresada en la ecuación 3.14.

$$F(v) = \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.14)$$

Donde  $F(v)$  es la fracción del tiempo en la que la velocidad media horaria del viento excede  $v$ . Se caracteriza por dos parámetros, un parámetro de escala ( $c$ ) y un parámetro de forma ( $k$ ), que describe la variabilidad alrededor de la media. El parámetro  $c$  está relacionado a la velocidad media del viento anual ( $\bar{v}$ ) mediante las ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3.15)$$

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (3.16)$$

Donde  $\Gamma$  es la función completa gamma.

La función de densidad de distribución corresponde se expresa en la ecuación 3.17.

$$f(v) = k \left(\frac{v^{k-1}}{c^k}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (3.17)$$

En la figura 3.5 se muestran funciones de densidad de distribución con distintos parámetros de forma  $k$ . Menores  $k$  (por ej. 1,2 ó 1,5) indican una gran variabilidad respecto a la media, mientras que mayores  $k$  (por ej. 2,5 o 3) indican que la variación de las medias horarias del viento con respecto a la media anual es pequeña.[17]

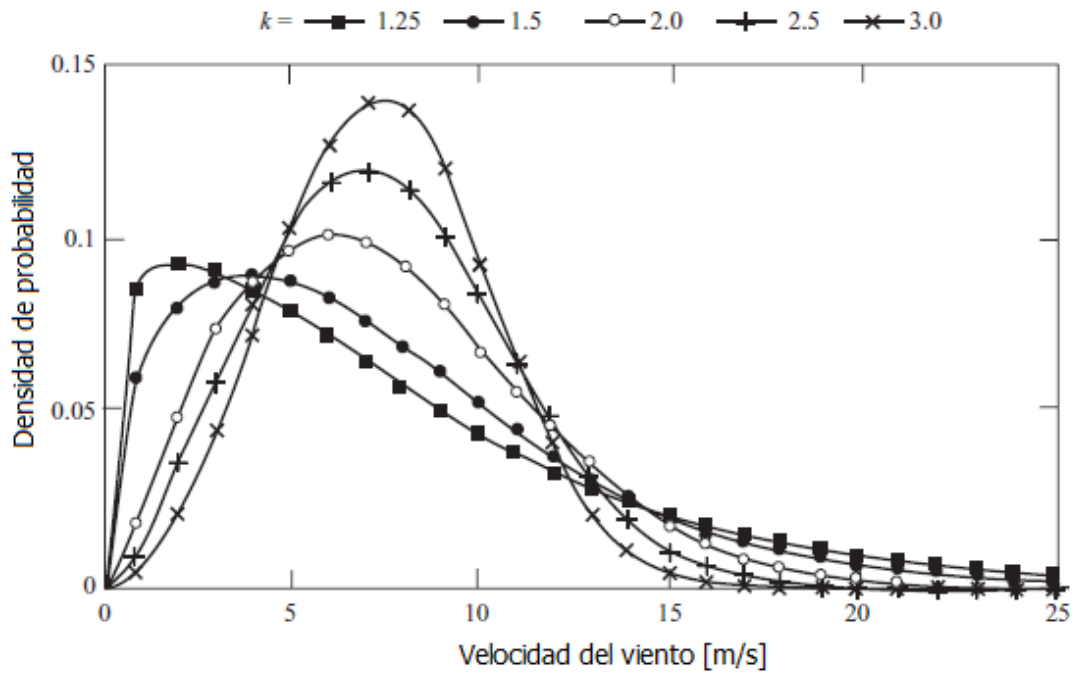


Figura 3.5: Comportamiento de Weibull en función de la variación del parámetro de forma

### 3.2.1.5 Factor de autocorrelación

El factor de autocorrelación ( $r_1$ ) es una medida de cuan fuertemente la velocidad del viento depende de las velocidad en las horas previas. Este factor es independiente del valor parámetro de Weibull  $k$  y el rango típico se encuentra entre 0,80 y 0,95.

### 3.2.1.6 Patrón diurno de intensidad

El Patrón diurno de intensidad es una medida de cuan fuertemente la velocidad del viento tiende a depender de la hora en que se encuentre. Porque el viento es típicamente afectado por la radiación solar, gran parte de las localidades muestran algunos patrones diarios en la velocidad del viento. Los Patrones diurnos son a menudo visibles cuando se imprimen en un gráfico evaluando un largo periodo de tiempo. Se coloca como ejemplo la figura 3.6, donde queda claramente marcada la tendencia. El valor de este indicador va desde 0 a 0,4.

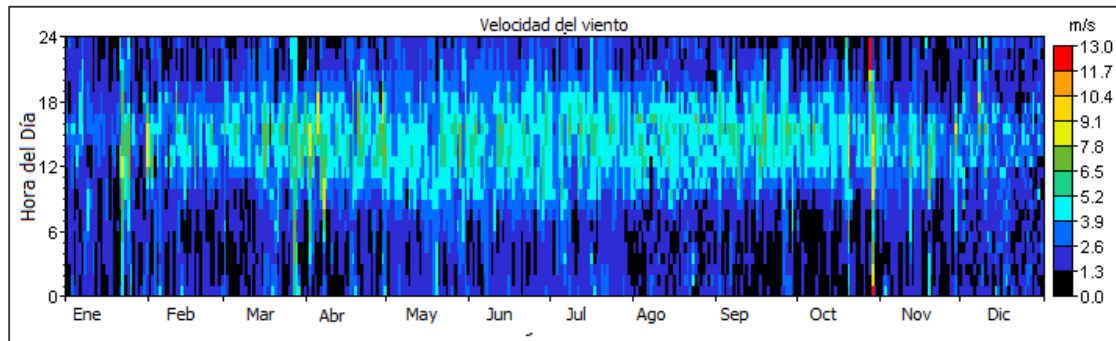


Figura 3.6: Mapa ejemplificador de patrones diurnos de intensidad

### 3.2.2 Fuentes de datos respecto a velocidad del viento

- **Mediciones CNE:** en la web se encuentran ocho mediciones directas a través de estaciones de monitoreo. El paso temporal para las mediciones es de 10 [min], y se registran a las altura de 20[m], 30[m] y 40[m]. [18]
- **Proyecto Eolo:** corresponde a un proyecto de evaluación del potencial de energía eólica en Chile, realizado en 1993 por el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Informa respecto a la velocidad media cada distintos pasos temporales dependiendo de la localidad (por ej. cada 1, 2 ó 3 [h]), durante uno o más años. Cuenta con el análisis de alrededor de cuarenta localidades desde Arica a Pta. Arenas. También ofrece mapas de viento con medias anuales. [19]
- **Datos NASA:** es una herramienta disponible en la web de NASA SSE (Surface meteorology and Solar Energy Data Set) que ha recopilado satelitalmente información durante los últimos 22 años. Entregando la velocidad media mensual para los doce meses a 10 [m] sobre la superficie y muchas otras magnitudes importantes. Necesita como parámetros de entrada la latitud y longitud del lugar. La gran ventaja es que ofrece datos de cualquier localidad de la Tierra. [13]
- **Simulación de la CNE:** se encuentra disponible en la web, y corresponde a una herramienta de simulación desarrollada a través del Proyecto Cóndor por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, que entrega información respecto a la velocidad del viento medio mensual sólo para cuatro meses (Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre) a una altura de 10[m], 50[m] y 75[m]. La simulación se basa en el WRF (Weather Research and Forecasting). Para que genere el documento se necesita incorporar la latitud y longitud, la simulación no está disponible para el extremo sur de Chile. [14]

### 3.2.3 Aplicación de metodología a la Posta de Boyeruca

#### 3.2.3.1 Parámetros asociados a la localidad

A continuación se señalan los parámetros esenciales de Posta de Boyeruca para buscar datos estadísticos respecto al recurso eólico u operar el programa de simulación:

- Latitud ( $\emptyset$ ): 34,67° latitud sur (-34,67°)
- Longitud: 72° longitud oeste (-72°)
- Altitud sobre el nivel del mar: prácticamente cero.
- Altura en la que se ubica anemómetro: 20[m], ya que para la descripción del recurso eólico de Boyeruca se utiliza el registro de velocidad del viento realizado en Faro Punta Carranza a tal altura.
- Parámetros Weibull: HOMER los obtiene al importar el registro de la velocidad del viento.
- Patrón diario de intensidad: HOMER lo obtiene al importar el registro de la velocidad del viento.
- Hora de máxima velocidad del viento: HOMER la obtiene al importar el registro de la velocidad del viento.
- Longitud de la rugosidad ( $z_0$ ): se utiliza 0,03 [m] ya que luego de la observación en terreno se observa que el suelo corresponde a campo, entre cultivo y césped rugoso, y se encuentra en una zona bastante alejada de otras casas.

#### 3.2.3.2 Registros obtenidos

De la búsqueda de la velocidad del viento media mensual se obtiene la tabla 3.7, representada en la figura 3.7.

**Tabla 3. 7: Datos obtenidos respecto a recurso eólico en Boyeruca y zonas cercanas**

Fuente\Mes [m/s]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	Media anual
CNE (10[m])	NA	NA	4,35	NA	NA	4,46	NA	NA	4,05	NA	NA	4,69	<b>4,39</b>
NASA (10[m])	4,40	4,40	4,00	4,10	4,50	4,50	4,80	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	<b>4,43</b>
Pta. Carranza (20[m])	5,58	4,46	5,13	5,2	4,00	4,88	5,48	5,20	4,43	5,33	5,99	6,05	<b>5,14</b>

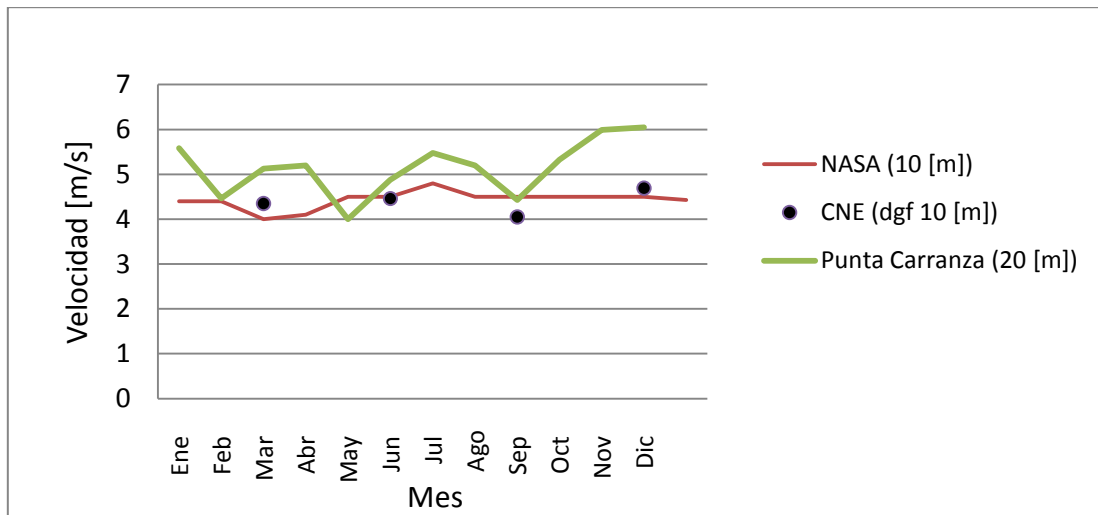


Figura 3.7: Velocidad del viento de Boyeruca y medición directa en Punta Carranza

Se utiliza el registro proporcionado por la CNE para Faro Punta Carranza, debido a que representa una completa medición durante un año y medio (29 de enero de 2006 al 8 de junio de 2007) con un intervalo temporal de 15 [min] entre mediciones. El lugar de la medición se encuentra 115 [km] al sur de Boyeruca, en un sector costero.

Dado que la medición no pertenece exactamente al lugar en que se requiere calcular el recurso, y más aún corresponde sólo a un año y medio de medición,[10] propone la técnica de escalamiento, la cual consiste en combinar la riqueza de las mediciones de un lugar cercano (Por ej. Faro Carranza con 52.560 datos en un año) con la de una fuente informativa que posea las medias históricas para el lugar exacto donde se pretende instalar el aerogenerador (se recomienda una fuente informativa histórica con más de 10 medias anuales.). Esto ya que es usual que existan años cuya velocidad media se escape en demasía a la del pasado o la del año siguiente año. Para realizar el escalamiento, las medias anuales deben ser calculadas a una distancia sobre el suelo común. Para cumplir lo último, la media anual de la NASA se traslada desde los 10[m] de altura a los 20 [m], utilizando la ecuación 3.13, y poder hacer las medias comparables. La ecuación 3.18 permite obtener el factor de escalamiento.

$$f_{esc} = \frac{\bar{v}_{maHist}(h)}{\bar{v}_{maMed}(h)} \quad (3.18)$$

Con:

$f_{esc}$ : Factor de escalamiento

$\bar{v}_{maHist}(h)$ : Velocidad media anual histórica a una altura  $h$  (idealmente más de 10 años).

$\bar{v}_{maMed}(h)$ : Velocidad media anual del registro anual detallado a una altura  $h$ .

$h$ : Altura a la cual se realizó el registro detallado.

HOMER facilita el trabajo al usuario, para que este no tenga que escalar los datos de la base de datos importada, ya que ofrece incorporar como dato entrante el promedio anual histórico, evitando así que se modifique externamente la base de datos que se importa.

A pesar de tal herramienta, a continuación se detalla el procedimiento para obtener el factor de escalamiento:

La información de NASA (22 años) informa que  $\bar{v}_{maHist}(10[m])=4,433[m/s]$ . Por lo tanto utilizando la ecuación 3.13, para la longitud de rugosidad del lugar equivalente a 0,03 se tiene que:

$$\bar{v}_{maHist}(20[m]) = 4,433 \frac{\ln\left(\frac{20}{0,03}\right)}{\ln\left(\frac{10}{0,03}\right)} = 4,962 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Por lo tanto el factor de escalamiento que deben sufrir los datos de faro Punta Carranza corresponde a:

$$f_{esc} = \frac{4,962}{5,14} = 0,96$$

### 3.2.3.3 Resultados HOMER

De la incorporación del registro detallado de Faro Punta Carranza se obtienen los diversos parámetros que caracterizan al recurso eólico, con el posterior escalamiento se obtiene la tabla 3.8, que resume la información respecto a la distribución de la velocidad del viento.

**Tabla 3. 8: Resumen de parámetros del recurso eólico para Faro Punta Carranza**

Parámetro	Factor de autocorrelación ( $r_1$ )	Patrón diario de intensidad	Parámetro de forma ( $k$ )	Parámetro de escala ( $c$ )	Hora de mayor velocidad del viento
Valor	0,93	0,127	1,82	5,6	12:00

En la figura 3.8 se muestra el perfil de la velocidad del viento anual generado para Boyeruca en base al registro de Faro Carranza y los datos NASA.



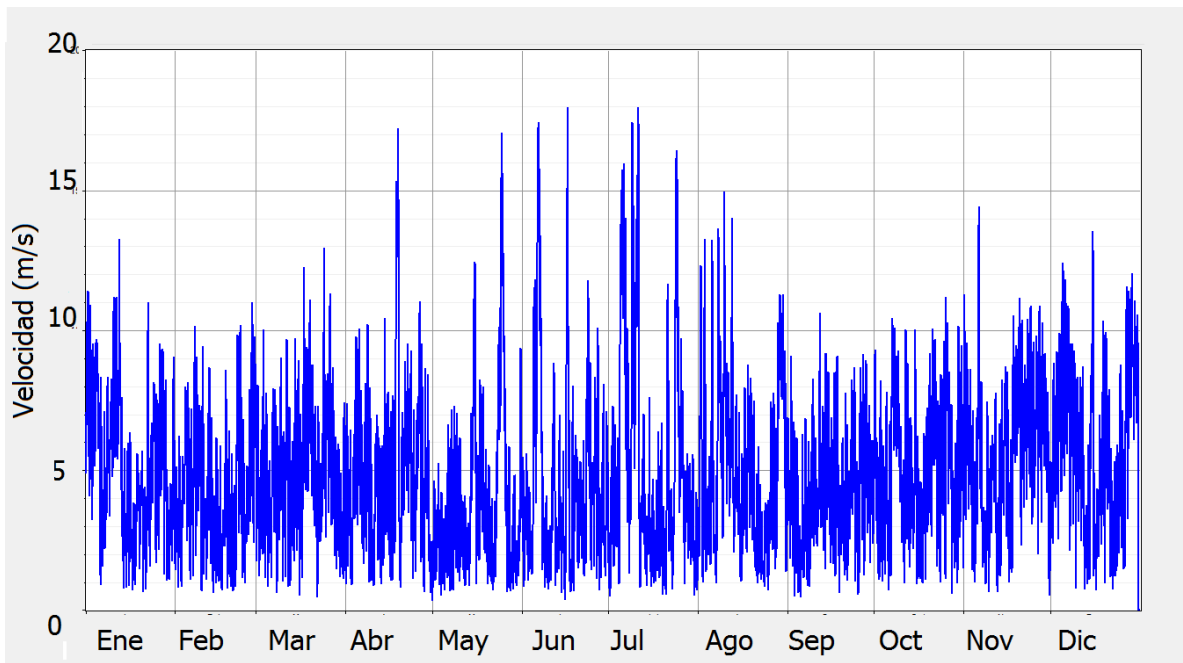


Figura 3.8: Velocidad anual del viento para Boyeruca adaptada del registro de Faro Punta Carranza mediante escalamiento

En la figura 3.9 se puede observar la distribución del viento obtenida para Boyeruca a 20[m] de altura sobre la superficie, la cual se describe como una Weibull de parámetros  $k = 1,82$  y  $c = 5,6 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

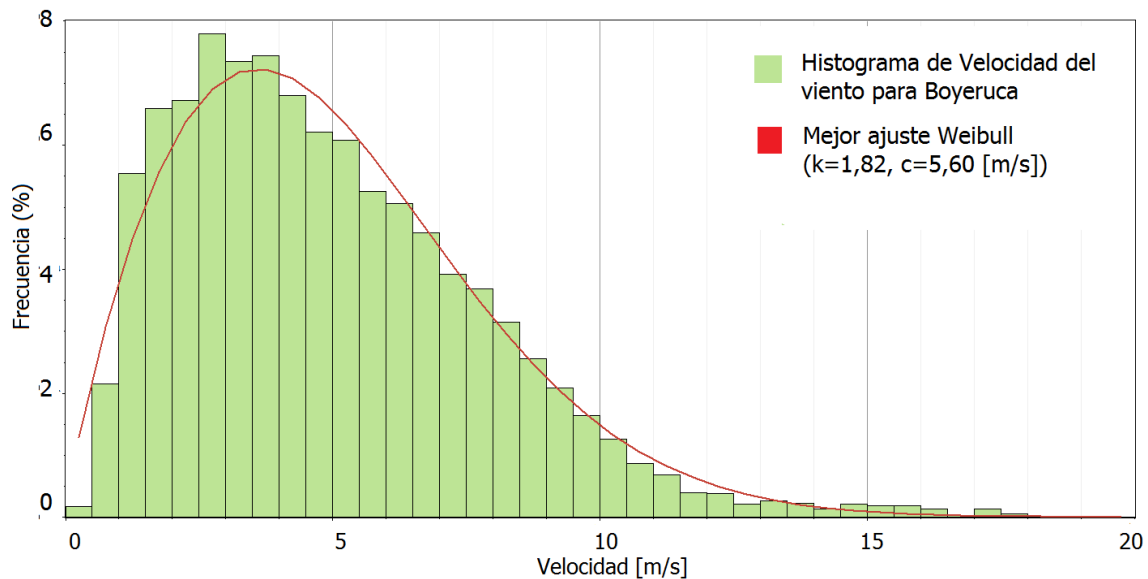
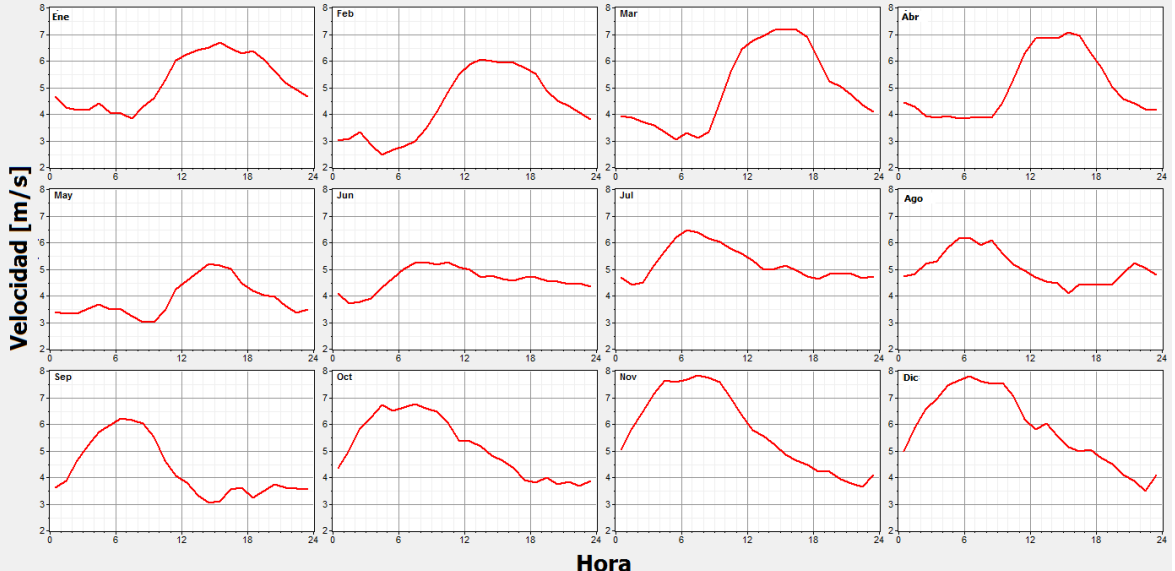


Figura 3.9: Distribución obtenida para Boyeruca basada en mediciones de Faro Carranza y media anual NASA

En la figura 3.10 se muestran los perfiles de velocidad diarios característicos para cada mes del año, a lo largo de 24 [h].



**Figura 3.10: Distribución media mensual de la velocidad del viento a lo largo del día**

## Capítulo 4

# Cálculo de la demanda de energía eléctrica

El presente proyecto desarrolla una metodología para la elaboración de un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel, y dentro de los parámetros de entrada, la demanda de energía eléctrica tiene una gran relevancia, ya que el dimensionamiento y configuración de los equipos tiene directa relación con el consumo. Es necesario conocer la energía utilizada y su distribución en el tiempo.

En este capítulo se establece la demanda actual de la posta, la cual se obtuvo a través de un data logger que se instaló durante el mes de noviembre de 2010 en la Posta de Boyeruca, el instrumento midió el consumo de la posta en conjunto con la vivienda en que se aloja el paramédico a cargo de la misma, ya que comparten el mismo tablero electrónico.

Como segunda etapa se establece una demanda modificada eficiente. Esto ya que en la actualidad las cargas existentes no presentan un enfoque hacia el ahorro energético, específicamente las luminarias. Frente a la instalación de un sistema híbrido, basado en fuentes renovables conectado a la red se hace necesario mejorar aspectos vinculados a eficiencia energética.

En una tercera etapa se desarrolla una demanda eléctrica básica, que corresponde a la demanda que el sistema híbrido debe ser capaz de cubrir en caso de corte en el suministro de electricidad. A través de la Posta de Boyeruca se ejemplifica la determinación de la demanda.

### 4.1 Determinación de demanda eléctrica actual

El consumo eléctrico de la Posta de Boyeruca y de la vivienda del profesional de la salud, es costeado por la municipalidad de Vichuquén. El abastecimiento eléctrico proviene de la red eléctrica, y está a cargo de EMELECTRIC (Empresa eléctrica de Melipilla, Colchagua y Maule).

#### 4.1.1 Características del recinto y las cargas presentes

El horario de atención de la posta es de lunes a viernes en la mañana de 8:30 a 13:30 [hrs], y en la tarde de lunes a jueves de 14:30 a 18:00 hrs. La posta consta con 7 piezas (1 sala de estar, 5 boxes de atención y 1 baño). Para obtener las cargas asociadas a la posta se desconectó y apagó todo en el recinto de salud, quedando conectado sólo el refrigerador de la casa contigua como carga base, y se fueron activando las cargas de forma paulatina hasta que se alcanzara el estado estacionario. Así se obtuvo una demanda agregada creciente con el encendido, con la cual se detallan las cargas unitarias. La tabla 4.1 especifica los valores obtenidos. Se aconseja esta técnica de medición de cargas, ya que las demandas pronosticadas según fabricante no calzan exactamente con lo medido, en algunos casos.

**Tabla 4.1: Demanda eléctrica unitaria y agregada medida en la Posta de Boyeruca**

<b>Carga\Demanda</b>	<b>Demanda agregada [W]</b>	<b>Demanda por carga [W]</b>
<b>Casa (Refrigerador)</b>	163	163
<b>Posta (Cargas citadas inferiormente)</b>		
Entrada (Ampolleta incandescente de 80[W] nominal)	243	80
Sala de espera (4 fluorescentes pequeños de 49 [W] nominal c/u)	449	206
Box 3 (2 fluorescentes de 80[W] nominal c/u)	609	160
Box 2 (2 fluorescentes de 80[W] nominal c/u)	794	185
Box1 (1 fluorescente de 80[W] nominal c/u )	871	77
Box 1 negatoscopio (4 fluorescentes de 49 [W] nominal c/u)	1071	200
Box 4 (2 fluorescentes de 80 [W] nominal c/u)	1256	185
Box 4 lámpara personal (una ampolleta incandescente de 40[W] nominal)	1295	39
Baño (ampolleta- ventilador)	1335	40
Pasillo (2 fluorescentes de 49[W] nominal c/u)	1459	124
Radio (13[W] según especificación)	1465	6

El data logger se conecta al panel eléctrico. El consumo máximo de potencia que puede realizar la posta en conjunto con la vivienda contigua, es de 6 [kW], ya que posee un sistema de corte de suministro automático cuando se sobrepasa esa potencia. En la posta se encuentra un esterilizador antiguo cuya demanda sobrepasa los 6 [kW], por lo que no se puede utilizar.

#### 4.1.2 Medición de la demanda eléctrica actual

El data logger utilizado (marca Wattson) posee una capacidad de almacenamiento de 28 días, con un paso temporal de 5 [min] entre medición. El registro se realizó durante 21 días, lo que permitió establecer los patrones de utilización eléctrica. Para la descripción del consumo se agrupan las demandas asociadas a cada día de la semana.

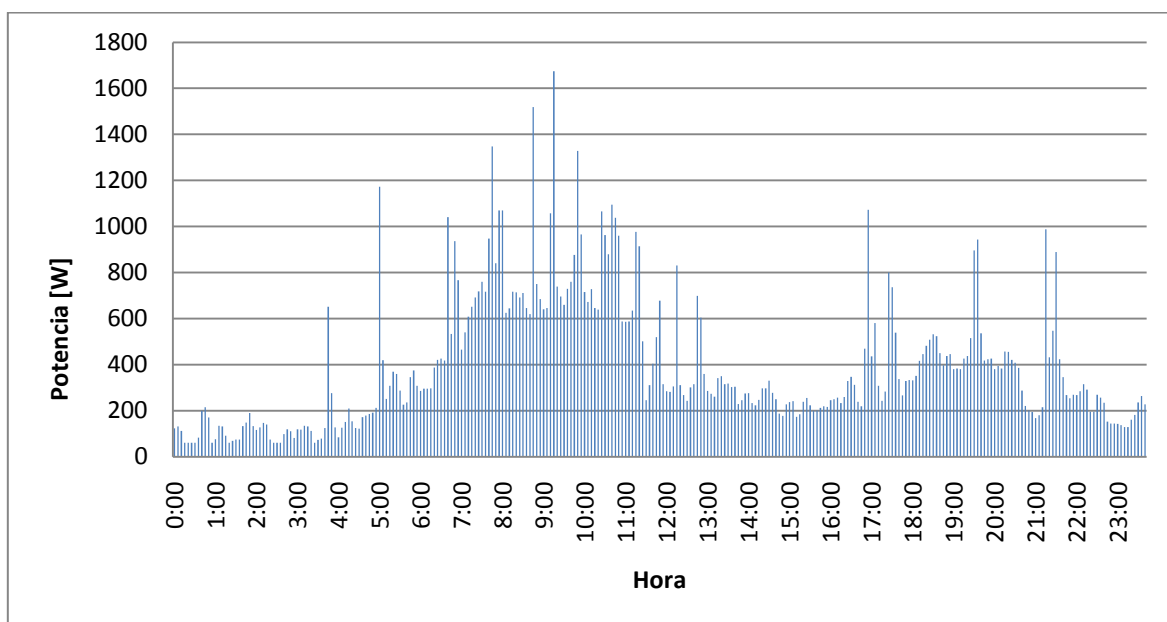
En la tabla 4.2 se resumen los valores respecto a energía consumida por día de la semana, potencia media y máxima, para esto se agrupó de a tres días (uno por cada día de la semana), se promedió la energía diaria consumida entre los tres días, y se buscó la demanda máxima entre los tres días. La única carga que se encuentra constantemente activa corresponde al refrigerador, la cual posee un patrón de demanda intermitente que se explicará posteriormente. De la observación de la demanda de los 21 días (específicamente en la madrugada, donde sólo se encuentra el refrigerador conectado), se establece que el refrigerador consume en promedio 2,9 [kWh] al día.

**Tabla 4.2: Resumen de demanda eléctrica de Boyeruca, obtenido durante 21 días de medición mediante data logger.**

Día	Energía [kWh]	Potencia media [kW]	Potencia máxima [kW]	Energía sin refrigerador [kWh]
Lunes	9,466	0,394	2,722	6,566
Martes	9,652	0,402	2,63	6,752
Miércoles	7,59	0,316	2,689	4,69
Jueves	8,108	0,338	4,796	5,208
Viernes	6,222	0,259	2,361	3,322
Sábado	5,253	0,219	2,663	2,353
Domingo	5,856	0,244	3,071	2,956

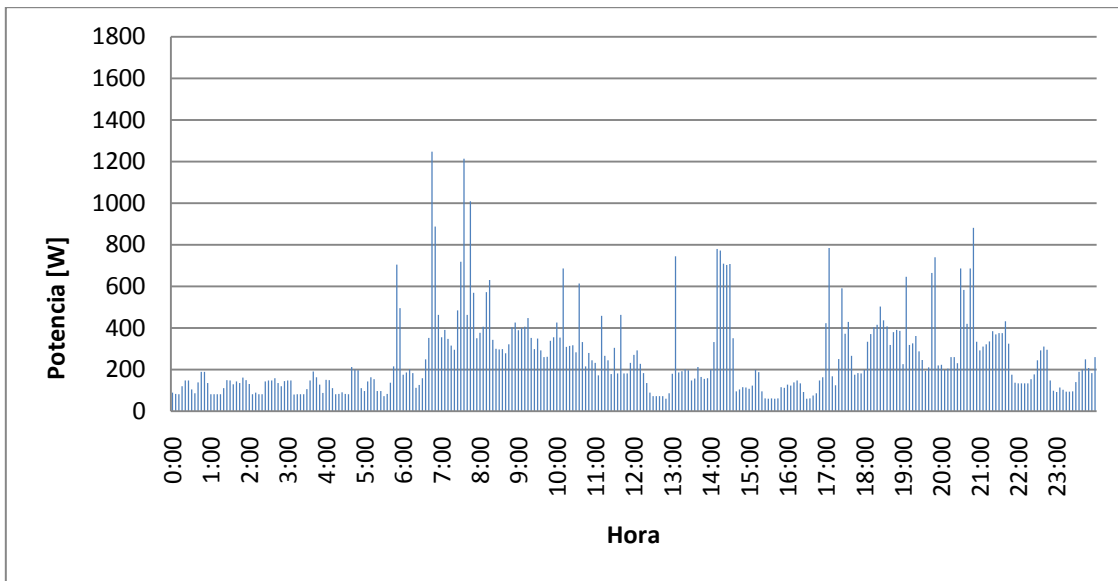
Queda al descubierto la presencia de tres demandas características. De lunes a jueves se consume una energía similar, el viernes una demanda menor y el fin de semana disminuye más aún. Lo que concuerda con el pronóstico, dado el horario de funcionamiento de la posta.

La figura 4.1 muestra el gráfico de consumo para el día lunes, en representación de un día perteneciente a los días en que se atiende en las dos jornadas (mañana y tarde). Se presenta el gráfico del lunes y no el del promedio de los cuatro días, ya que queda en exceso suavizado y se pierden los peaks.



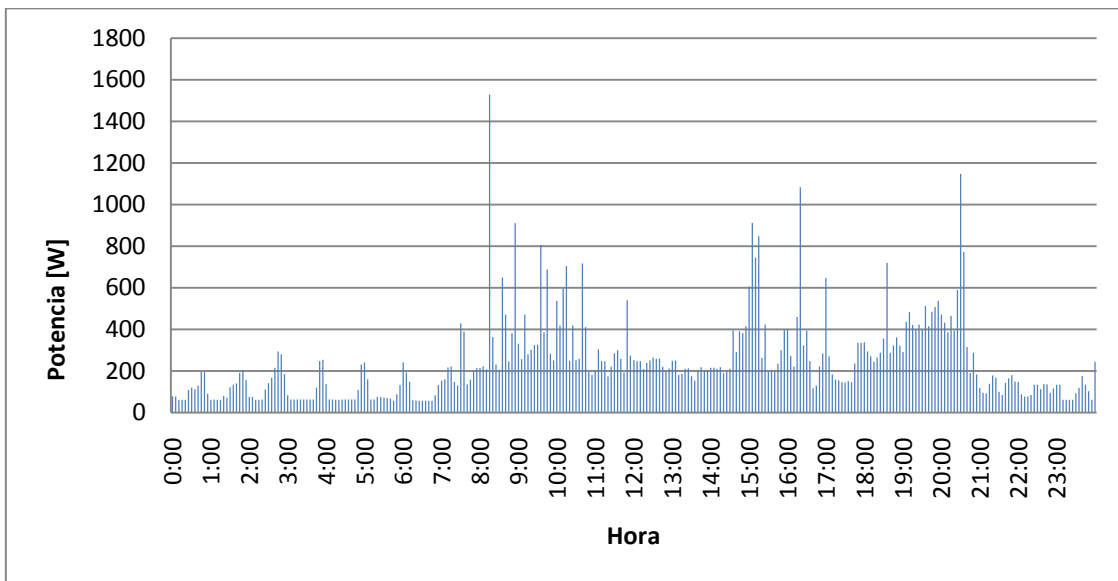
**Figura 4.1: Demanda eléctrica característica de un lunes**

La figura 4.2 muestra el gráfico representativo del día viernes.



**Figura 4.2: Demanda eléctrica característica de un viernes**

La figura 4.3 muestra el gráfico representativo del fin de semana (domingo).



**Figura 4.3: Demanda eléctrica característica del fin de semana**

Para introducir la demanda actual a HOMER, se tienen dos alternativas:

- Incorporar las potencias medias horarias de cada mes para días de semana y fines de semana (24x12x2=576 datos en total), e introducir información respecto a la variabilidad de los datos, específicamente, la desviación estándar en la medición de potencias medias diarias y la desviación estándar entre los datos horarios y el perfil medio diario.
- Importar directamente un registro de consumo anual con un paso temporal de menor magnitud posible. Mediante este procedimiento, HOMER calcula las desviaciones estándar.

Para la introducción de datos a HOMER, respecto a la demanda de la Posta de Boyeruca se utiliza la primera opción. Para mejorar la precisión, debido a las variaciones estacionales en el consumo eléctrico (luminarias y calefacción), se recomienda escalar el consumo de los meses consiguiendo las facturas de los meses anteriores hasta conformar el año.

## 4.2 Demanda eléctrica actual modificada

El desarrollo de un sistema híbrido debe ir acompañado del mejoramiento de la eficiencia energética. En lo que corresponde a luminarias, la posta puede disminuir su demanda. En la tabla 4.3 se expone una comparación entre eficiencias para diferentes tipos de luminarias presentes en el mercado chileno.

**Tabla 4.3: Comparación de eficiencia energética entre productos presentes en el mercado chileno**

Tecnología	Intensidad luminosa (lumen)	Eficiencia (lumen/Watt)
Ampolleta incandescente clara 60 [W]	715	11,92
Fluorescente 40 [W]	2500	62,5
Ampolleta ahorro de energía 20 [W](1)	1100	55
Ampolleta ahorro de energía 20 [W](2)	1200	60
LED 8 [W]	715	89,38

Para reducir la demanda se deben reemplazar las ampollas incandescentes por ampollas de ahorro de energía, y también se reduce el exceso de iluminación proveniente del sobredimensionamiento de los tubos fluorescentes de los boxes y pasillo. No se utiliza LED a pesar de ser lo más eficiente, debido a su elevado costo. La tabla 4.4 muestra las variaciones en iluminación.

**Tabla 4.4: Demanda actual modificada con luminarias de ahorro energético**

	Demanda agregada [W]	Demanda por carga [W]
<b>Casa</b> (Refrigerador)	163	163
<b>Posta</b> (Cargas citadas inferiormente)		
Entrada (Ampolleta de ahorro de energía de 20 [W] nominal)	183	20
Sala de espera (2 ampollas de ahorro de energía 20 [W] nominal c/u)	223	40
Box 3 (2 ampollas de 20 [W] nominal c/u)	263	40
Box 2 (2 ampollas de 20 [W] nominal c/u)	303	40
Box 1 (2 ampollas de 20 [W] nominal c/u )	343	40
Box 1 negatoscopio (4 fluorescentes de 49 [W] nominal c/u)	539	196
Box 4 (2 ampollas de 20 [W] nominal c/u )	579	40
Box 4 Lámpara personal (una ampolleta incandescente de 15[W] nominal)	594	15
Baño (ampolleta- ventilador)	634	40
Pasillo (2 ampollas de 15 [W] nominal c/u )	664	30
Radio (13[W] según especificación)	670	6

Del análisis de los datos medidos para los días hábiles, se obtiene que el consumo del refrigerador representa el 36 % de la demanda. Se asume como supuesto que en los días hábiles el consumo eléctrico de las luminarias corresponde a un 30% y los gastos varios (radio, televisión, computador, lavadora, etc.) al 34% restante.

De la Tabla 4.4 se obtiene que con el cambio de luminarias, la carga instalada se reduce de 1296 [W] a 501 [W], es decir, una disminución del 61%. Se asume la misma disminución en la demanda asociada a luminarias, lo cual genera una demanda eléctrica en luminarias del 39% a lo que se utilizaba durante la medición. Por lo tanto, bajo el consumo medido, la demanda asociada a las luminarias cambiadas correspondería a un 14 % ( $0,36 \times 0,39$ ) en los días hábiles, es decir, 1,15 [kWh/día].

Entonces se tiene que el refrigerador y las luminarias consumirían 4,10 [kWh], que representaría un 50% de la demanda actual. De la mejoría en la utilización de los demás equipos se obtiene que la demanda modificada para los días hábiles representa un 75% de la demanda actual, es decir 6,15[kWh/día].

Para los fines de semana se obtiene del registro de medición, que el consumo asociado al refrigerador corresponde a 2,9 [kWh/día] de 5,55 [kWh/día], es decir el 53%. Asumiendo una reducción global del 75%, la demanda modificada para los fines de semana corresponde a 4,17 [kWh/día].

La tabla 4.5 muestra el resumen de la actual demanda eléctrica modificada (reducción a un 75% de la demanda actual), al introducir luminarias de ahorro de energía y cambiar levemente hábitos del profesional de la salud (apagar luces, desconectar equipos que no se utilicen, entre otros).

**Tabla 4.5: Resumen demanda actual modificada**

Días	Energía [kWh]	Potencia media [kW]	Potencia máxima [kW]
Hábiles	6,15	0,26	2,27
Fin de semana	4,17	0,17	2,15

En las figuras 4.4 y 4.5 se presenta la demanda energética modificada (con cambio de luminarias) para los días hábiles y el fin de semana.



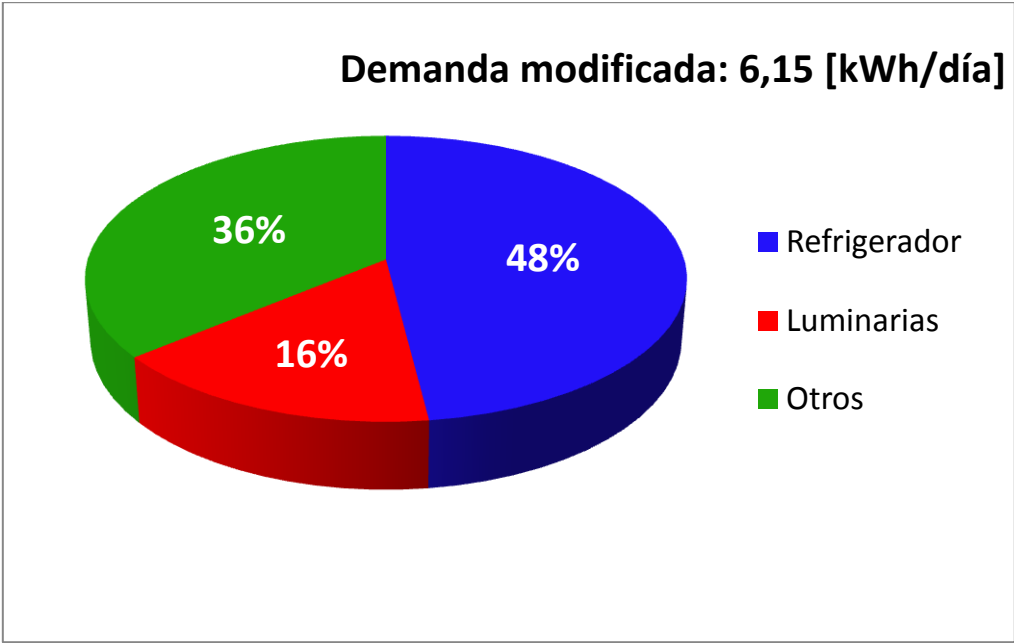


Figura 4.4: Demanda eléctrica modificada para un día hábil

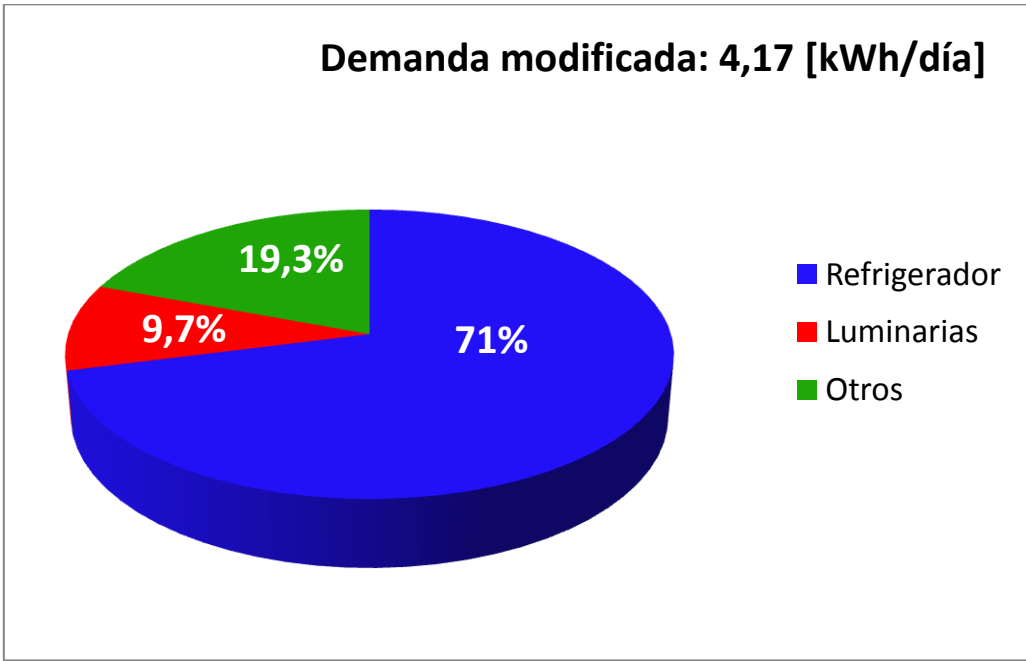


Figura 4.5: Demanda eléctrica modificada para un día característico del fin de semana

### 4.3 Demanda eléctrica básica

Como condición de diseño, el sistema híbrido debe asegurar el abastecimiento a una demanda básica frente a un corte del suministro eléctrico de forma prolongada. Por lo tanto la definición de la demanda básica debe ser desarrollada con precisión, ya que de ésta dependerá en gran medida el dimensionamiento del sistema híbrido. Para el desarrollo de la demanda básica se considera la utilización de lo estrictamente necesario. Fuera de la demanda básica se encuentran todos los equipos eléctricos que se utilicen para calefacción del interior u otros equipos de alta potencia que se pudiesen utilizar en la vivienda (hervidor de agua, lavadora, tostadora, aspiradora, entre otros). El criterio para la definición de la demanda básica se centra en la iluminación, refrigerador, negatoscopio, radio y otros consumos menores.

Para el desarrollo de la demanda básica se utilizan como referencias las tendencias presentes en la demanda actual, es decir, se apunta hacia los mismos patrones de consumo. Diferenciando entre los días de semana (días en que está operativa la posta) y el fin de semana. Se toma en cuenta la posta y la vivienda.

HOMER posee una deficiencia, que también hace alusión [10], y es que cuando se incorporan las medias de potencia horarias se pierde la posibilidad de incorporar los transientes de los equipos o grandes consumos de corta duración, ya que al ingresar una potencia media horaria, se suavizan en demasía las potencias máximas.

El refrigerador es un equipo que funciona de forma intermitente, aproximadamente, un 25% del tiempo, y con un periodo característico de 15 a 20 [min] [20]. Por lo tanto, su comportamiento no puede ser incorporado de forma realista, ya que se debe introducir una potencia media horaria, lo que causa que se pierda información valiosa respecto a la distribución de consumo interno dentro de esa hora.

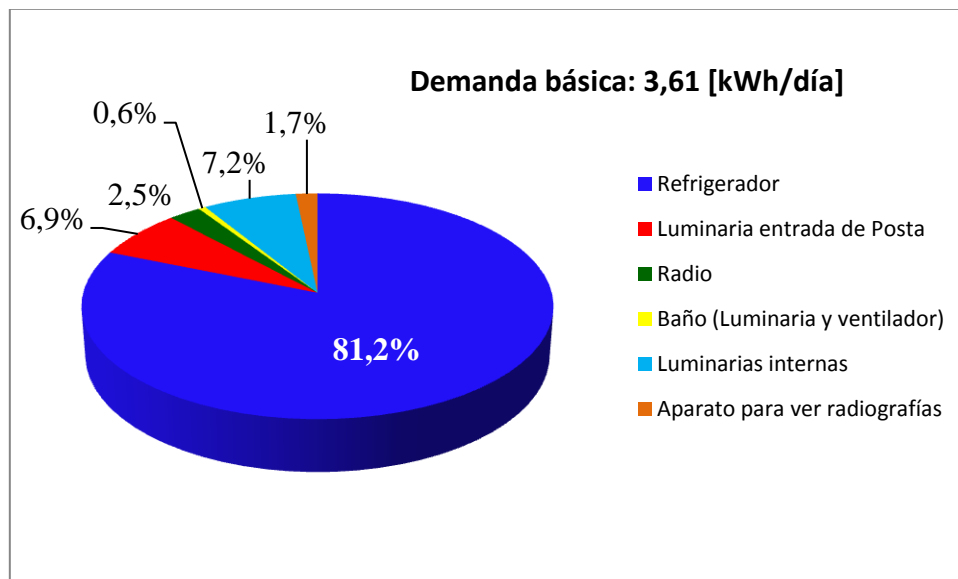
En la tabla 4,6 se define la demanda básica para los días de semana (en que está operativa la posta) a través de las potencias medias horarias, se detallan los horarios de utilización de las cargas.

**Tabla 4.6: Demanda básica para días hábiles**

Hora	Refrigerador	Luminaria entrada de Posta	Radio	Baño (Luminaria y ventilador)	Luminarias internas	Aparato para ver radiografías	Total Potencia [W]
0:00-1:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
1:00-2:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
2:00-3:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
3:00-4:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
4:00-5:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
5:00-6:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
6:00-7:00	122,2	20	0	0	0	0	142,2
7:00-8:00	122,2	20	6	7	40	0	195,2
8:00-9:00	122,2	0	6	0	40	30	198,2
9:00-10:00	122,2	0	6	0	0	0	128,2
10:00-11:00	122,2	0	6	0	0	0	128,2

<b>11:00-12:00</b>	122,2	0	6	7	0	0	135,2
<b>12:00-13:00</b>	122,2	0	6	0	0	0	128,2
<b>13:00-14:00</b>	122,2	0	6	0	0	0	128,2
<b>14:00-15:00</b>	122,2	0	6	0	0	0	128,2
<b>15:00-16:00</b>	122,2	0	6	0	0	0	128,2
<b>16:00-17:00</b>	122,2	0	6	0	0	0	128,2
<b>17:00-18:00</b>	122,2	0	6	0	0	30	158,2
<b>18:00-19:00</b>	122,2	0	6	7	10	0	145,2
<b>19:00-20:00</b>	122,2	10	6	0	40	0	178,2
<b>20:00-21:00</b>	122,2	20	6	0	40	0	188,2
<b>21:00-22:00</b>	122,2	20	6	0	40	0	188,2
<b>22:00-23:00</b>	122,2	20	0	0	40	0	182,2
<b>23:00-24:00</b>	122,2	20	0	0	40	0	182,2
<b>Total [Wh/día]</b>	<b>2932,8</b>	<b>250</b>	<b>90</b>	<b>20,1</b>	<b>260</b>	<b>60</b>	<b>3612,9</b>
<b>%</b>	<b>81,2%</b>	<b>6,9%</b>	<b>2,5%</b>	<b>0,6%</b>	<b>7,2%</b>	<b>1,7%</b>	<b>100,0%</b>

La figura 4.6 grafica la demanda energética básica para los días de semana (lunes a viernes). Respecto a los peaks de potencia estos alcanzan los 0,7 [kW], pero al introducir los datos a HOMER, éste los suaviza a 0,6 [kW], producto del paso horario.



**Figura 4.6: Demanda de energía básica para la Posta de Boyeruca, para los días de semana (lunes a viernes)**

Se establece la demanda básica para los fines de semana, consumo en la cual no participa la posta, sólo la casa (tabla 4.7).

**Tabla 4.7: Demanda básica de energía para fin de semana**

<b>Hora</b>	<b>Refrigerador</b>	<b>Luminaria entrada de Posta</b>	<b>Radio</b>	<b>Baño (Luminaria y ventilador)</b>	<b>Luminarias internas casa</b>	<b>Total Potencia [W]</b>
<b>0:00-1:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>1:00-2:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>2:00-3:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>3:00-4:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>4:00-5:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>5:00-6:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>6:00-7:00</b>	122,2	20	0	0	0	142,2
<b>7:00-8:00</b>	122,2	20	6	7	0	155,2
<b>8:00-9:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>9:00-10:00</b>	122,2	0	6	0	20	148,2
<b>10:00-11:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>11:00-12:00</b>	122,2	0	6	7	0	135,2
<b>12:00-13:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>13:00-14:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>14:00-15:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>15:00-16:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>16:00-17:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>17:00-18:00</b>	122,2	0	6	0	0	128,2
<b>18:00-19:00</b>	122,2	0	6	7	0	135,2
<b>19:00-20:00</b>	122,2	7	6	0	40	175,2
<b>20:00-21:00</b>	122,2	20	6	0	40	188,2
<b>21:00-22:00</b>	122,2	20	6	0	40	188,2
<b>22:00-23:00</b>	122,2	20	0	0	40	182,2
<b>23:00-24:00</b>	122,2	20	0	0	40	182,2
<b>Energía Total [Wh]</b>	2932,8	246,8	90	21	220	3510,6
<b>%</b>	83,5%	7,0%	2,6%	0,6%	6,3%	100%

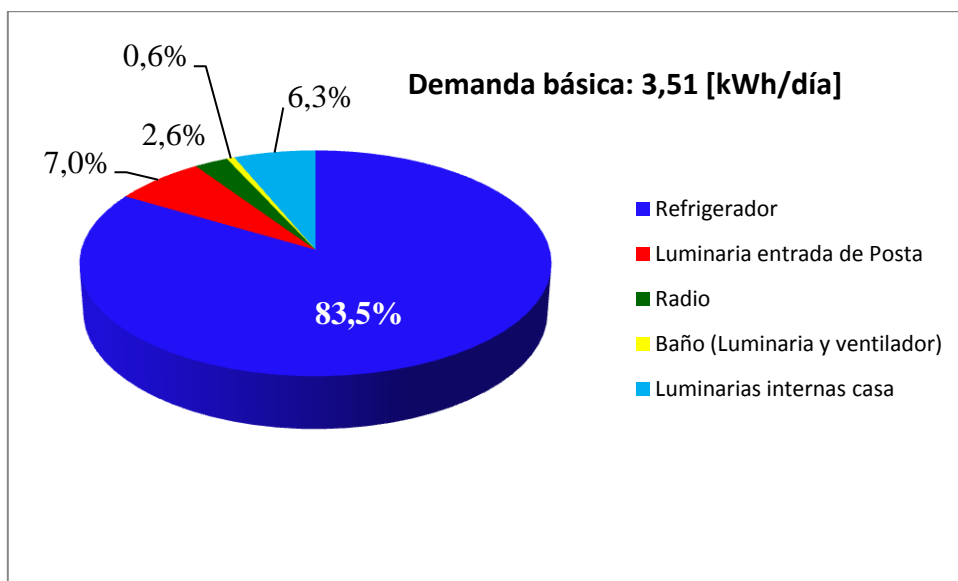


Figura 4.7: Demanda energética básica para la Posta de Boyeruca el fin de semana

Las tablas 4.8 y 4.9 muestran un resumen comparativo entre la demanda actual, la demanda modificada y la demanda básica, para los días de semana y para el fin de semana respectivamente.

Tabla 4.8: Resumen comparativo entre la demanda actual, la actual modificada y la básica para los días hábiles

Patrón de consumo	Energía diaria media [kWh]	Potencia máxima diaria [kW]
<b>Demanda actual</b>	8,2	3,04
<b>Demanda actual modificada</b>	6,15	2,27
<b>Demanda Básica</b>	3,61	0,694

Tabla 4.9: Resumen comparativo entre la demanda actual, la demanda actual modificada y la demanda básica para los días del fin de semana

Patrón de consumo	Energía diaria media [kWh]	Potencia máxima diaria [kW]
<b>Demanda actual</b>	5,56	2,87
<b>Demanda actual modificada</b>	4,17	2,15
<b>Demanda Básica</b>	3,51	0,354

Para incorporar los datos se utilizan las mismas desviaciones estándar del registro de datos original de 21 días

- Desviación estándar día a día: 31,7%
- Desviación estándar en la diferencia entre los datos horarios y el perfil diario medio: 55,1%

## 4.4 Costos asociados a energía eléctrica

La tarifa corresponde a la clase BT1 (clientes de baja tensión con consumo menor a 10 [kW]), la cual para noviembre de 2010 se compone de los costos expresados en la tabla 4.10:

Tabla 4.10: Costos asociados al suministro de red eléctrica

Cargo fijo mensual [US\$]	2,058
Uso del sistema troncal [US\$/kWh]	$5,9 \times 10^{-4}$
Precio energía [US\$/kWh]	0,294

## 4.5 Medición Neta

Para el desarrollo de sistemas de abastecimiento de consumidores basados en ERNC que se encuentran conectados a la red, es fundamental la definición del marco regulatorio respecto a la posibilidad de inyección de los excedentes eléctricos generados. En este sentido surge el sistema de Medición Neta (Net Metering), que le permite al recinto conectarse a la red eléctrica local e inyectar energía. Este sistema opera a través de un medidor bi-direccional que registra el flujo de energía en ambas direcciones, tanto de consumo como de generación, o en su defecto dos medidores independientes que miden la electricidad consumida y generada en un mismo periodo de consumo.

Net Metering ha sido aplicado en más de 40 estados de EE.UU. y de Australia, provincias de Canadá y países como Italia y Dinamarca. En Chile, aún no existe un instrumento normativo al respecto, sólo se han presentado cuatro proyectos de ley. Debido a la inexistencia de especificación legal, en el análisis del presente trabajo se establece un modelo simplificado. Se considera un escenario base en el cual los excedentes de energía inyectados a la red por el consumidor-generador se cotizan al 60% del valor de la energía adquirida (sin considerar costo de transmisión) y, posteriormente, mediante un análisis de sensibilidad se analiza el caso más favorable en que la unidad de energía excedente posee el mismo valor que la unidad consumida. En la figura 4.8 se observa un trío de relojes que grafican de forma simplificada el sistema de Medición Neta. [21]



Figura 4.8: Relojes que representan de forma simplificada el sistema Net Metering

## Capítulo 5

# Modelación de los componentes del sistema híbrido

En el presente capítulo se exponen los componentes necesarios para la elaboración de un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel conectado a la red. Se realiza una descripción de cada equipo, caracterizando sus variables asociadas y destacando la información requerida para el diseño del sistema. Se enuncian y caracterizan diversos modelos presentes en el mercado en Chile y los costos (fijos y variables) vinculados a los mismos, para la caracterización de los equipos se utilizan códigos compuestos por letras y números que representan su capacidad asociada, esto para guardar reserva de los nombres originales (en Anexos se encuentran decodificados).

El sistema híbrido PV-Eólico-Diesel en estudio incluye los siguientes componentes físicos: paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, baterías electroquímicas (selladas o abiertas), regulador de carga, generador de corriente alterna diesel, inversor (convertidor DC / AC), rectificador (convertidor AC / DC) y MPPT (Maximum Power Point Tracker). En la figura 5.1 se puede apreciar el esquema del sistema híbrido en estudio.

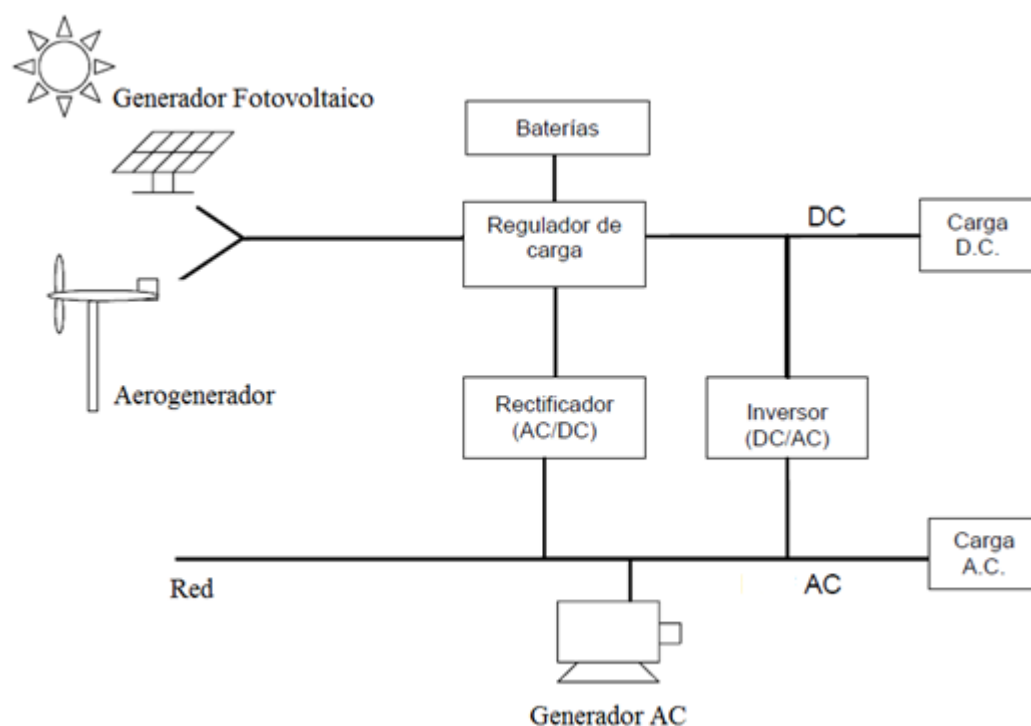


Figura 5.1: Esquema básico de sistema híbrido en estudio

## 5.1 Generador fotovoltaico

### 5.1.1 Descripción

Un generador fotovoltaico convierte la radiación solar en electricidad con una tensión y corriente que varían dependiendo del nivel de radiación, de la temperatura y de otros factores meteorológicos, así como de los parámetros constructivos del mismo. Un generador fotovoltaico se constituye habitualmente por varios paneles o módulos fotovoltaicos, que pueden conectarse en serie y/o paralelos, estos módulos a su vez generalmente constan de varias celdas que se encuentran en una estructura rígida que asegura la estanqueidad, favorece la captación de radiación solar y evacuación de calor apuntando hacia la obtención de un mayor rendimiento.

Los paneles poseen una cubierta superior constituida por vidrio templado liso que posee propiedades específicas, tales como: alta resistencia a impactos, bajo índice de retención de material particulado y alta transparencia a la radiación solar. La cubierta inferior en cambio es opaca y protege al panel de agentes externos. Entre las dos cubiertas y envolviendo las celdas y las conexiones eléctricas se encuentra el material encapsulante, cuyas principales funciones son proteger a las celdas de vibraciones y ser adhesivo a las cubiertas. En la figura 5.2 se aprecia el montaje de las partes señaladas.

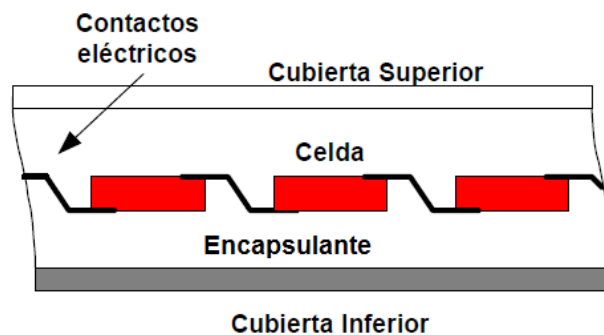
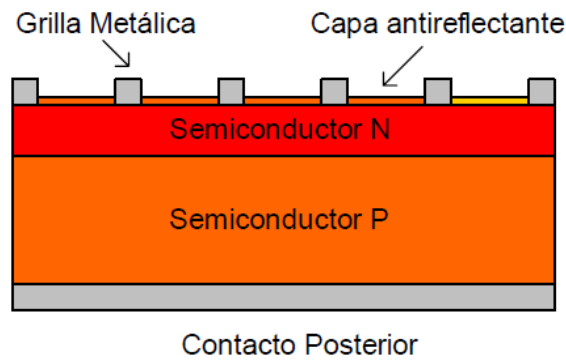


Figura 5.2: Estructura básica de un módulo fotovoltaico

La celda es el componente fundamental del panel fotovoltaico, corresponde a la unión de dos semiconductores, en la que la zona que recibe la radiación corresponde al semiconductor tipo N y la parte posterior al semiconductor tipo P. La electricidad se extrae a través de una grilla metálica que se ubica en el lado receptor de radiación, en la parte posterior se encuentra una capa metálica. La figura 5.3 muestra la celda.





**Figura 5.3: Componentes de la celda fotovoltaica**

Existen distintas tecnologías de celda fotovoltaica, que presentan diferencias considerables en costo y eficiencia. En la tabla 5.1 se entrega un resumen respecto a la eficiencia para distintas celdas.[10]

**Tabla 5.1: Tabla de eficiencias características para distintas tecnologías de celdas fotovoltaicas**

Material	Eficiencia (%)
Silicio Amorfo	5
Silicio Policristalino	9
Silicio Monocristalino	12
Arseniuro de Galio	25

### 5.1.2 Curvas características

La potencia entregada por una celda fotovoltaica se describe como una función dependiente de la tensión, es decir  $P = f(V)$ , ya que a su vez la intensidad depende de la tensión, es decir  $I = f(V)$ . Estas relaciones se expresan gráficamente en las figura 5.4.

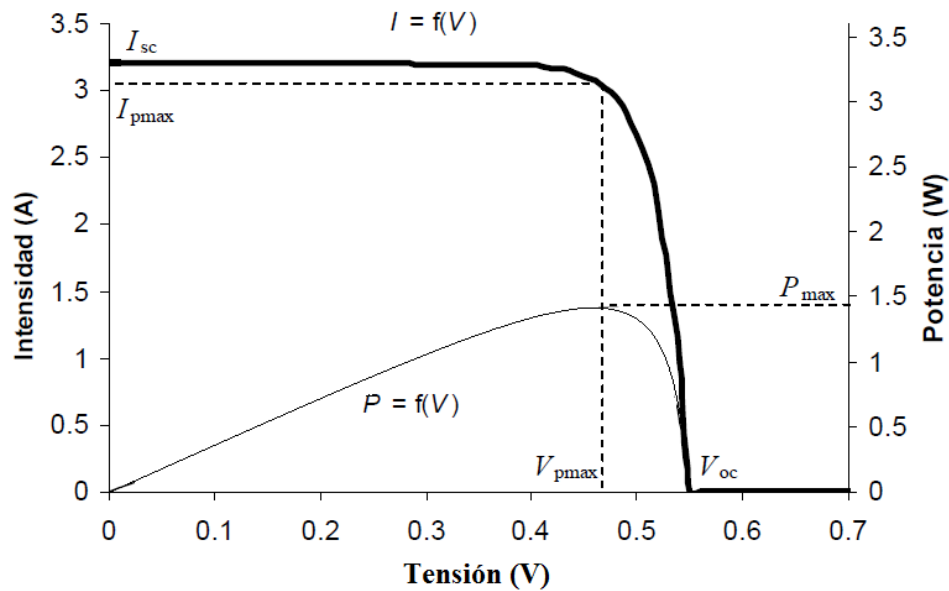


Figura 5.4: Curvas características de un generador fotovoltaico

Para la comprensión del comportamiento de la celda se definen los parámetros más determinantes:

- Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ): Es la corriente en la celda cuando sus bornes están cortocircuitados, es decir  $V=0$ .
- Tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ): Es la tensión cuando no hay carga conectada, es decir  $I=0$ .
- Potencia máxima ( $P_{max}$ ): Es el máximo de la función potencia ( $P = IV$ ), para esta potencia se obtiene la corriente de potencia máxima ( $I_{P_{max}}$ ) y la tensión de potencia máxima ( $V_{P_{max}}$ ).
- Tensión nominal ( $V_{NomPan}$ ): Tensión para la que está diseñado (tensión nominal DC en donde se conectará el panel).
- Eficiencia ( $\eta$ ): Es la razón entre la máxima potencia que se puede obtener del módulo fotovoltaico y la radiación incidente sobre la superficie del panel.

Las características antes mencionadas están definidas para condiciones estándar, lo cual significa que están determinadas por un nivel de irradiancia de  $1 \text{ [kW/m}^2\text{]}$ , una temperatura interna de celda de  $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$  y una distribución espectral incidente A.M 1,5, siendo A.M: masa de aire=  $1/\text{sen}(\alpha_s)$ , donde  $\alpha_s$  corresponde a la elevación del sol.

### 5.1.3 Modelos presentes en el mercado

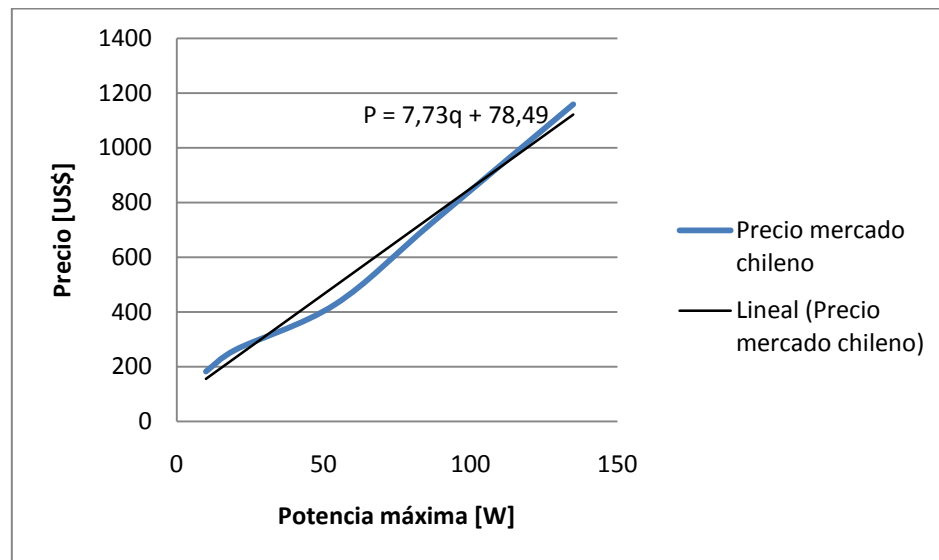
El grueso de los módulos fotovoltaicos presentes en el mercado de Chile, tienen una potencia nominal centrada en el rango entre  $10 \text{ [W]}$  y  $280 \text{ [W]}$  y una eficiencia entre  $9\%$  y  $14\%$ . Existen diferencias importantes en los precios, presentándose como opción más económica los paneles con 10 años de garantía, y como alternativa más cara los que ofrecen 25 años, es por esto que se destacan a continuación estas dos tendencias en Chile.

En la tabla 5.2 se caracterizan los módulos cotizados en el mercado chileno que poseen una garantía de 25 años y en la tabla 5.3 los de 10 años. Las especificaciones de los paneles expuestos son bajo condiciones estándar. Para los modelos SK se garantiza que la disminución de potencia no será mayor al 10% de la potencia especificada para el modulo dentro de un plazo de 12 años y que la pérdida no será mayor al 20 % dentro de un plazo de 25 años.

**Tabla 5.2: Caracterización de paneles fotovoltaicos presentes en el mercado chileno con garantía de 25 años**

Panel	Potencia de salida máxima [W]	Tolerancia [%]	Tensión óptima [V]	Corriente óptima [A]	Toc [V]	Icc [A]	Tamaño [m <sup>2</sup> ]	Eficiencia %	Precio (US\$)
SK10	10	NA	16,9	0,6	21,5	0,62	0,107	9,3	182,7
SK20	20	NA	16,9	1,2	21,5	1,24	0,183	10,9	261,7
K50	54	+15-5	17,4	3,11	21,7	3,31	0,416	13,0	427,9
K85	87	+10-5	17,4	5,02	21,7	5,34	0,656	13,3	726,3
K135	135	+5-5	17,7	7,63	22,1	8,37	1,002	13,5	1158,4

En la figura 5.5 se grafican los costos de adquisición asociados al mercado de paneles fotovoltaicos en Chile, obteniéndose la línea de tendencia, que informa de un costo que se aproxima a los 7,73 [US\$/Watt][22].



**Figura 5.5: Costo de adquisición de generadores fotovoltaicos con garantía de 25 años**

**Tabla 5.3: Caracterización de paneles fotovoltaicos presentes en el mercado chileno con garantía de 10 años**

Panel	Potencia de salida máxima [W]	Tensión nominal [V]	Tensión óptima [V]	Corriente óptima [A]	Toc [V]	Icc [A]	Tamaño [m <sup>2</sup> ]	Eficiencia [%]	Precio [US\$]
T10	10	12	17,4	0,58	21,6	1,36	0,13	4,7%	211,8
T20	20	12	16,8	1,21	21,7	1,32	0,25	6,1%	326,1
T50	50	12	17,4	2,87	21,6	3,27	0,45	9,8%	507,8
T65	65	12	17,5	3,7	22,0	4,1	0,51	10,6%	610,7

<b>T75</b>	75	12	17,3	4,33	21,6	4,78	0,59	10,9%	687,8
<b>T100</b>	100	12	15,4	6,6	18,6	8,25	0,92	13,8%	723,0
<b>T110</b>	110	12	15,5	7,1	18,9	8,6	0,92	14,0%	785,2
<b>T160</b>	160	24	36,2	4,42	43,6	4,79	1,27	14,1%	1137,8
<b>T165</b>	165	24	36,4	4,53	43,9	4,82	1,30	14,3%	1150,6
<b>T210</b>	210	24	28,4	7,48	36,4	7,99	1,66	16,6%	1265,3
<b>T220</b>	220	24	28,9	7,6	36,6	8,18	1,66	16,6%	1321,8

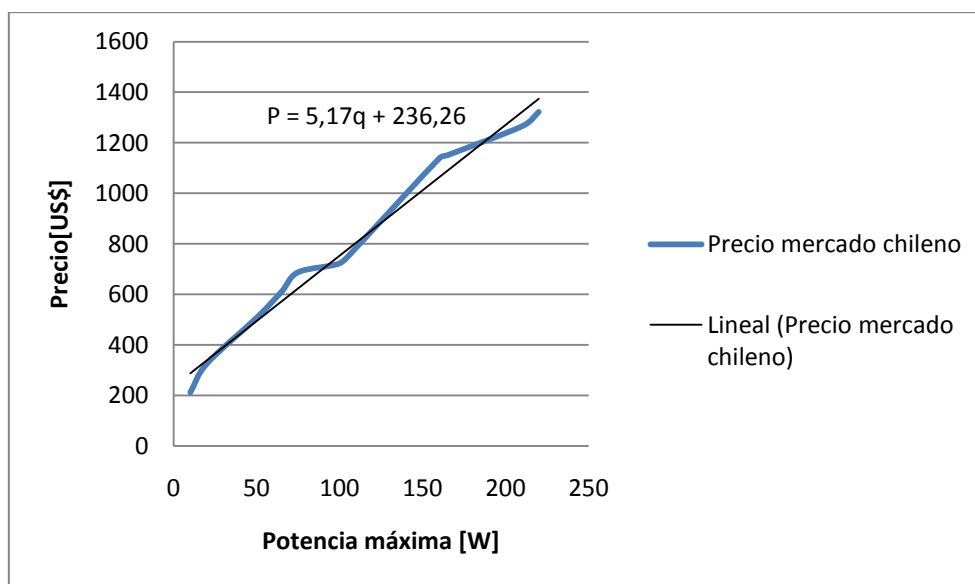


Figura 5.6: Costo de adquisición de generadores fotovoltaicos con garantía de 10 años[23]

En la tabla 5.4 y figura 5.7 se pueden observar los precios de adquisición, costos de operación y mantenimiento extraídos de una publicación internacional [24].

Tabla 5.4: Costos de adquisición y O&M asociados a generadores fotovoltaicos extraídos de publicación internacional

Potencia máxima [kW]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7	8
Adquisición [US\$]	4216	8432	12648	16443	20378	23891	30918	36539	42161	49187	56214
Costo O & M [US\$/año]	42,16	46,38	52,00	56,21	61,84	70,27	84,32	98,37	112,43	126,48	140,54

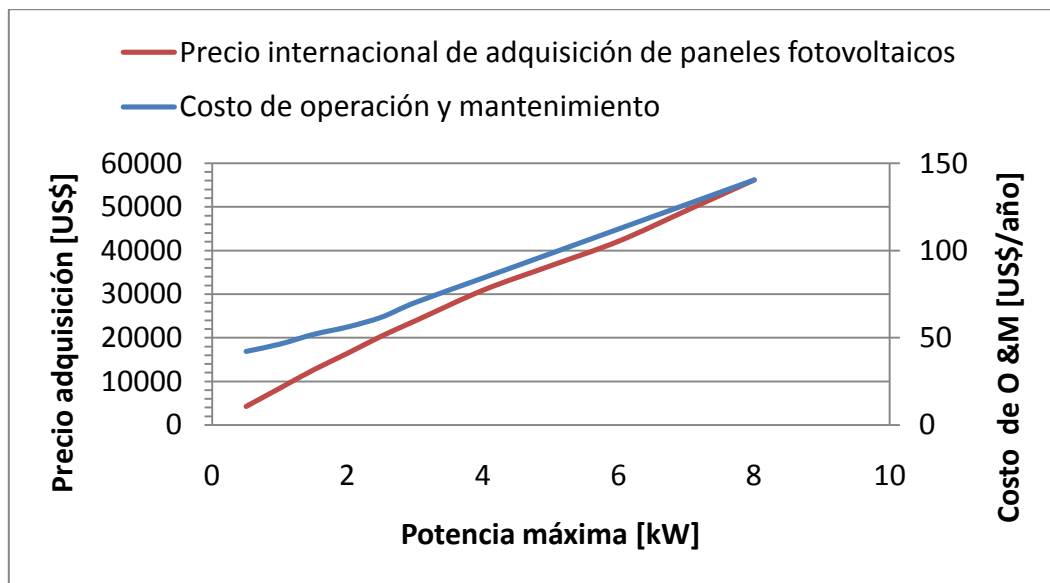


Figura 5.7: Costos de adquisición y O&M asociados a generadores fotovoltaicos extraídos de publicación internacional

#### 5.1.4 Aplicación a Boyeruca

Para la simulación se utilizan como posibles alternativas los paneles policristalinos de alto rendimiento que ofrecen 25 años de garantía, por ser superiores bajo el enfoque técnico-económico para una evaluación de proyecto de 25 años. HOMER determina la configuración de paneles óptimos (cuáles y cuántas unidades permiten el óptimo). La configuración suministrará en 24 [VDC] nominales, por motivos que se explican en el Capítulo 6 de estrategia y control.

## 5.2 Aerogenerador

Un aerogenerador es un dispositivo que transforma parte de la energía cinética del viento en energía eléctrica. Posee un rotor (conjunto buje y palas) que captura la energía cinética y la transmite al generador eléctrico a través de un eje. Entre el rotor y el generador puede existir un multiplicador de velocidad, pero para modelos pequeños (orden de pocos kW) no se utiliza. Los aerogeneradores pueden ser de eje horizontal o eje vertical. Para el desarrollo de sistemas híbridos, se utilizan en mayor medida los aerogeneradores de eje horizontal con tres palas, dada su alta eficiencia.

### 5.2.1 Características fundamentales

Una turbina eólica convierte energía cinética en algún otro tipo de energía, esta transformación se puede lograr mediante el principio de arrastre aerodinámico o por sustentación aerodinámica. Es la sustentación el método generalmente utilizado por las turbinas que producen energía eléctrica. La sustentación aerodinámica se basa, en que una diferencia de presiones en torno a un cuerpo genera fuerzas.

La potencia que posee una masa de aire en movimiento se expresó a través de la ecuación 3.12, y se conoce que el límite de extracción corresponde al Límite de Betz (16/27). Para la utilización de aerogeneradores se define el factor de potencia ( $C_p$ ), el cual depende de un factor adimensional denominado  $\lambda$  que relaciona la velocidad tangencial en la punta de la pala y la velocidad del viento incidente.

En el desarrollo de cualquier proyecto eólico es necesario conocer la curva de potencia del aerogenerador, la cual corresponde a la curva de potencia de generación eléctrica versus velocidad del viento, esta curva es fundamental para la selección adecuada del modelo de aerogenerador que se utilizará, ya que permite proyectar la generación eléctrica para un determinado recurso eólico. En la figura 5.8 se presenta una curva de potencia característica.

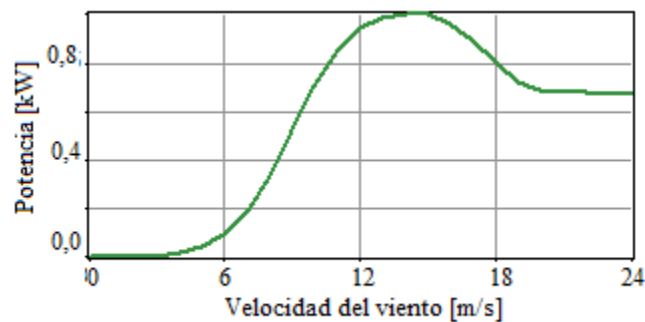


Figura 5.8: Curva de potencia característica de un aerogenerador de 1 [kW]

A continuación se definen diversos términos que están vinculados a los aerogeneradores, y que son necesarios para la comprensión de las especificaciones técnicas de los mismos:

- Número de palas (aspas, álabes o hélices): Indica el número de palas que conforman el rotor, suelen ser dos o tres.
- Diámetro del rotor: Corresponde al diámetro del área que barren las palas.
- Área barrida: Área circular descrita por las palas en su giro.
- Velocidad de arranque (*cut-in*): Es la velocidad de viento en la que el aerogenerador comienza a rotar.
- Velocidad nominal: Corresponde a la mínima velocidad del viento en la que el aerogenerador produce su potencia nominal (usualmente es la potencia máxima).
- Velocidad de frenado o de corte (*cut-out*): Es la velocidad del viento en que el aerogenerador comienza a frenar, para que no se dañe.
- Velocidad de supervivencia: Es la velocidad del viento en la que el aerogenerador podría comenzar a sufrir daños.

### 5.2.2 Aerogeneradores presentes en el mercado

En el mercado se encuentra una amplia gama de turbinas eólicas que varían en potencia máxima producida, perfil de curva de potencia, garantía y precio principalmente. Para la generación de sistemas

híbridos de pequeña escala la gran mayoría utiliza generadores de imanes permanentes, con salida de corriente DC. En la Tabla 5.5 se muestran los costos promedios de adquisición, operación y mantenimiento para generadores eólicos, obtenidos de una publicación internacional.[24]

Tabla 5.5: Costos internacionales de adquisición y O & M para generadores eólicos

Potencia máxima [W]	275	640	1760	3500	6500
Adquisición [US\$]	3194,36	4234,31	5781,60	9169,90	14078,79
Costo O & M [US\$/año]	70,26	70,26	70,26	77,29	84,32

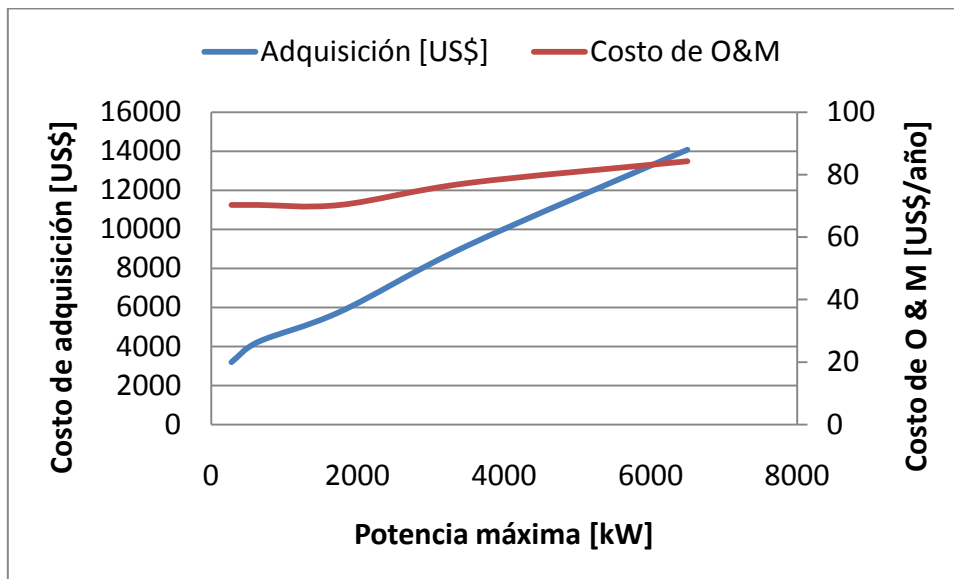


Figura 5.9: Costos internacionales para aerogeneradores

Dentro del mercado chileno la gran mayoría de equipos no cuenta con la garantía apropiada, por lo cual se escogen sólo dos equipos que presentan garantía durante tres años y que poseen todas las especificaciones necesarias, los cuales se especifican en la tabla 5.6.

Tabla 5.6: Unidades eólicas presentes en el mercado con potencia adecuada para estudio realizado a la Posta de Boyeruca

Aerogenerador	Potencia máxima [W]	Tensión nominal [VDC]	Velocidad de arranque [m/s]	Velocidad óptima [m/s]	Cp	Velocidad de supervivencia [m/s]	Precio [US\$]
A400	475	12-24-36-48	3,58	12,5	0,225	49,2	1685,2
A1000	1000	12-24-36-48	3,10	11,6	0,183	55,0	5898

En las figuras 5.10 y 5.11 se aprecian las curvas de potencia para los respectivos aerogeneradores.



Figura 5.10: Curva de potencia para equipo A400

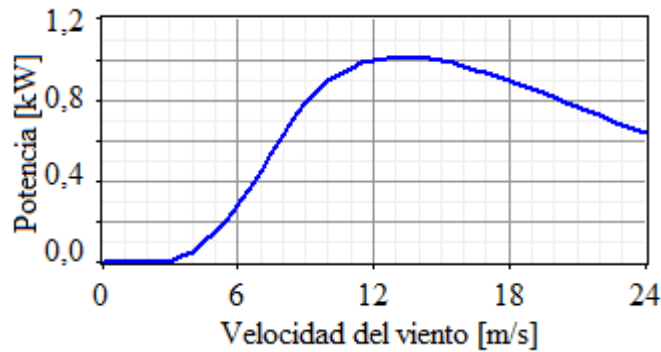


Figura 5.11: Curva de potencia para equipo A1000

### 5.2.3 Aplicación a Boyeruca

Dado que el peak de potencia de la demanda básica no supera los 0,7 [kW], los dos aerogeneradores señalados, anteriormente, se utilizan como posibles alternativas. Se deja la opción para utilizar cero, una o dos unidades (del mismo o diferente modelo). Mediante la optimización se escogerá si la configuración óptima debe utilizar energía eólica, y qué unidad(es) es(son) conveniente(s). Se debe introducir a HOMER la curva de potencia (velocidad del viento y potencia generada). Los costos de O&M se extraen de la tabla 5.5 y los de adquisición de los precios nacionales de la tabla 5.6. Se realiza la modelación para una torre de 5[m] de altura.

## 5.3 Generador AC

En el presente trabajo se estudia la participación de un generador AC en el sistema híbrido, específicamente, se estudia la incorporación de un generador diesel debido a su utilización frecuente en sistemas de mediana y alta capacidad. También pueden utilizarse generadores a gasolina, a gas, a hidrógeno, entre otros.



El generador diesel tiene la ventaja de producir energía a una demanda eléctrica variable y responder rápidamente a fluctuaciones de la misma. Cuando se utiliza en sistemas híbridos aislados, puede proporcionar el respaldo de potencia en momentos de insuficiente entrega proveniente desde las fuentes renovables.

Los generadores diesel se componen principalmente por un motor de combustión interna ensamblado a un generador eléctrico, generalmente síncrono (aunque también existen asíncronos). Cuando un generador trabaja aislado de la red eléctrica para una determinada carga (intensidad y factor de potencia fijos), al aumentar la excitación se incrementa la tensión de salida, mientras que al aumentar la potencia mecánica (aumentando el flujo de combustible), aumenta la velocidad de giro y consecuentemente la frecuencia.

Cuando un generador trabaja conectado a la red eléctrica (la frecuencia y la tensión están fijadas por la red), al aumentar la excitación incrementa la energía reactiva entregada por el generador y al aumentar la potencia mecánica aumenta la potencia activa entregada por el alternador a la red. Usualmente, los generadores eléctricos incorporan sistemas de control de frecuencia y de tensión.

Gran cantidad de fabricantes aconsejan que el funcionamiento mínimo del generador diesel sea de 30 minutos, y que su utilización se realice cuando la carga supere el 30% o 40% de su capacidad nominal [10], ya que por debajo de estas magnitudes la eficiencia decrece de forma considerable, junto a un fuerte incremento de los costos de mantención, ya que la cámara de combustión no alcanza la temperatura de operación nominal, produciéndose una gran acumulación de carbono en las paredes de los cilindros, reduciendo dramáticamente la vida útil del equipo. Los generadores diesel suelen tener una vida útil de operación de 7000 a 20000 [h].

### 5.3.1 Curvas características

Para generadores diesel de velocidad constante, la tasa de consumo es bien aproximada por la ecuación 5.1.

$$F_{cons} = A P_{cons} + B P_{nom} \quad (5.1)$$

En que:

$F_{cons}$ : Se expresa en [l/h] y corresponde al consumo de combustible diesel por cada hora en que se está produciendo a una potencia de salida  $P_{cons}$  [kW].

$P_{nom}$ : Corresponde a la potencia nominal del aerogenerador.

$A$  y  $B$ : Representan las constantes de la recta de consumo, donde  $B$  representa el escalón inicial y  $A$  simboliza la pendiente de la recta.

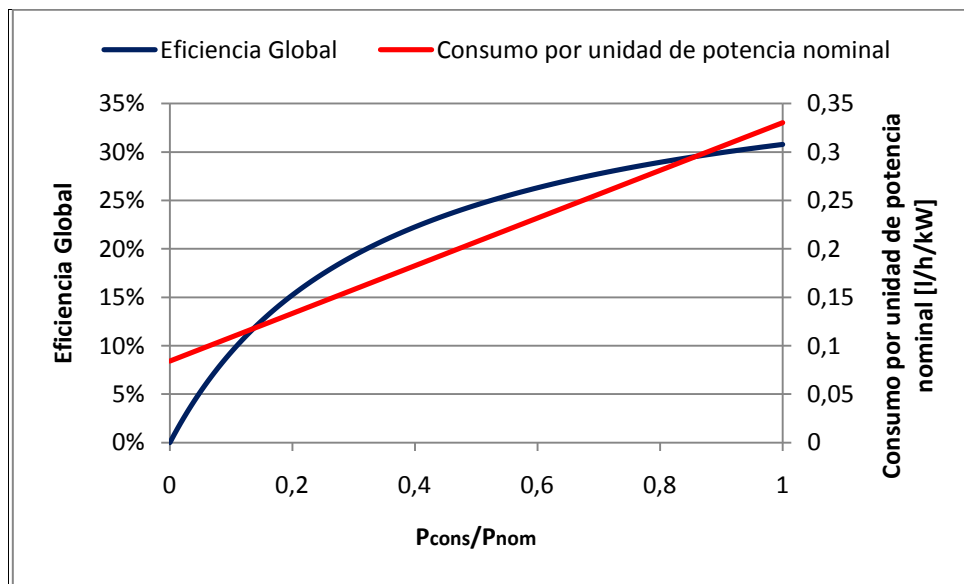
Skarstein y Ullen (1989) proponen  $A=0,246$  [l/h/kW] y  $B=0,8415$  [l/h/kW] [25]. Mediante el modelo lineal expuesto, se puede obtener una aproximación a la cantidad de energía eléctrica de salida del generador por cada litro de diesel consumido ( $\eta_{Gen}$  en [kWh/l]), la cual se representa en la ecuación 5.2.

$$\eta_{Gen} = \frac{P_{cons}}{F_{cons}} = \frac{1}{A + \frac{BP_{nom}}{P_{cons}}} \quad (5.2)$$

Introduciendo el poder calorífico inferior del diesel (PCI) en la ecuación 5.2 se puede obtener la eficiencia global del generador diesel ( $\eta_{GenGlob\%}$ ), la cual se expresa en la ecuación 5.3.

$$\eta_{GenGlob\%} = \frac{\eta_{Gen} \left[ \frac{kWh}{l} \right]}{PCI_{diesel} \left[ \frac{kWh}{l} \right]} 100 = \frac{100P_{cons}}{F_{cons} PCI_{diesel}} \quad (5.3)$$

La figura 5.12 muestra la curva de consumo por unidad de potencia nominal y eficiencia global de un generador diesel que se comporta bajo el modelo propuesto por Skarstein y Ullen. Es decir  $A=0,246$  [l/h/kW] y  $B= 0,08415$  [l/h/kW] con el poder calorífico inferior estándar del diesel (42780 [kJ/kg]) y una densidad de 0,839 [kg/l].



**Figura 5.12:** Curvas características de consumo por unidad de potencia nominal y eficiencia global para un generador diesel aplicando el modelo propuesto por Skarstein y Ullen

La eficiencia máxima global varía de acuerdo al tamaño del generador diesel, es por esto que la figura 5.12 es característica de equipos de gran dimensión (a plena carga se observa una alta eficiencia de alrededor de 30%).

Respecto a costos de adquisición y mantenimiento en la tabla 5.7 se especifican precios internacionales característicos [24]

Tabla 5.7: Costos de adquisición y operación para generadores diesel extraídos de publicación internacional

Generador Diesel [KVA]	1,9	3	4	5,5	7
Adquisición [US\$]	1783,4	2127,7	2670,2	3251,9	3934,9
Costo mantenimiento [US\$/h]	0,21	0,24	0,25	0,31	0,34

### 5.3.2 Aplicación a Boyeruca

El equipo diesel que se utilizará para la evaluación del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel será un equipo de 1,5 [kVA] (menor tamaño comercial para equipos de generación diesel). Para equipos de generación diesel de menor potencia nominal la eficiencia se reduce, y para equipos pequeños de generación cercanos a 2 [kW] presentes en el mercado la eficiencia máxima se encuentra entre 15% y 20%, por lo que los parámetros A y B que mejor se adaptan cambian. Por simplicidad se conserva el parámetro B y se modifica el A, de tal forma, que a plena carga el generador diesel tenga una eficiencia de 20%, con lo cual se obtiene  $A = 0,41$  [l/h/kW]. Las curvas características para este generador se pueden apreciar en la figura 5.13. Respecto a los costos se interpola para 1,5 [kVA] de la tabla 5.7.

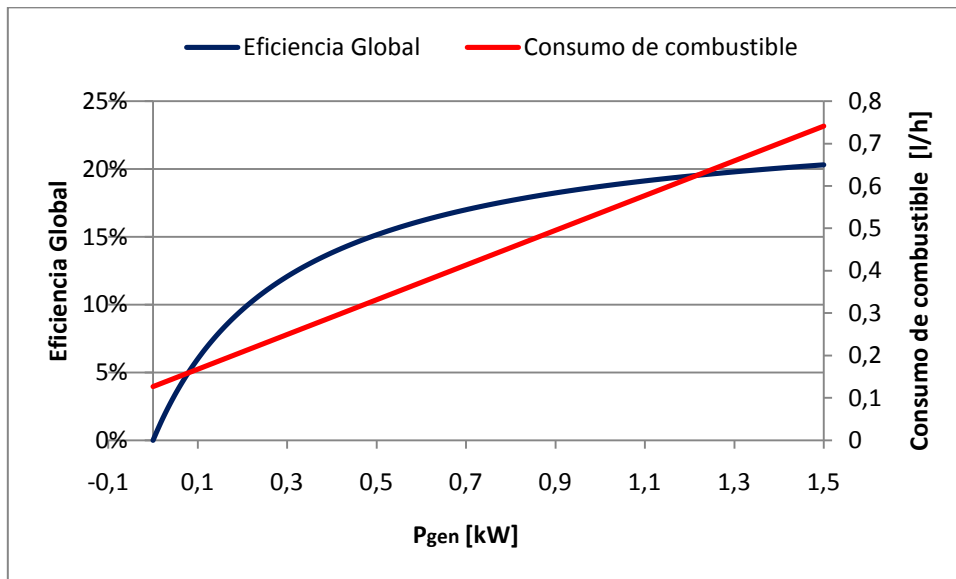


Figura 5.13: Modelo lineal de consumo adaptado a generadores de 1,5 [kW], con  $A=0,41$  [l/h/kW]

## 5.4 Batería electroquímica

En el desarrollo de la metodología de diseño de un sistema híbrido conectado a la red, los acumuladores son fundamentales cuando el sistema actúa de forma autónoma, es decir cuando se deja de recibir electricidad de la red (durante el corte de suministro eléctrico). En esta situación cuando el sistema se comporta de forma similar a un sistema aislado, las baterías proporcionan la cantidad de energía que las

fuentes renovables no son capaces de cubrir directamente por indisponibilidad en ese momento. Actuando cuando la generación con diesel es muy costosa en comparación con el uso de las baterías (criterio económico).

En la actualidad existen diferentes tipos de baterías electroquímicas, entre las que se encuentran: Plomo-ácido, Ión-litio, Níquel-cadmio, Níquel-metal híbrido, Sodio-azufre, Sodio-cloruro de níquel. Del total de las baterías alrededor del 90% corresponde a baterías de Plomo-ácido, ya que se le puede realizar en todo momento mantenimiento, lo que se suma a su excelente adaptabilidad a sistemas híbridos aislados.

Las baterías más adecuadas dentro de las de Plomo-ácido para sistemas híbridos son las de tipo estacionario, que permiten ciclos profundos de carga y descarga (pudiendo llegar a 70-80%), no siendo recomendable la realización de descargas en elevada tasa.

Las baterías más utilizadas en aplicaciones fotovoltaicas o híbridas presentan una tensión nominal de 12 o 24 [V]. Es necesario definir parámetros que permiten caracterizar las baterías, ya que de estos dependerá su selección:

- Tensión de carga: Tensión necesaria para vencer la resistencia que opone la batería a ser cargada.
- Capacidad nominal ( $C_{nom}$ ): Es la cantidad de energía eléctrica que puede obtenerse mediante la descarga total de una batería inicialmente cargada al máximo. La capacidad de un acumulador se mide en Amperios-hora (A·h) para un determinado tiempo de descarga.
- Profundidad de descarga (Depth of Discharge, DOD): corresponde al porcentaje de la energía que se ha utilizado de un acumulador completamente cargado. Por ej. una batería de 200 [Ah] que se le han extraído 50 [Ah], ha sufrido una profundidad de descarga del 25%.
- Estado de carga (State of Charge, SOC): corresponde al porcentaje de la energía que posee acumulada en un determinado momento la batería. Por lo tanto cuando la batería se encuentra totalmente cargada, ésta posee un SOC de 100%. Las baterías no pueden ser descargadas completamente, por lo que se recomienda no disminuir de un determinado SOC (estado de carga mínimo  $SOC_{min}$ , entre 30 a 40%) con el objetivo de no dañar las baterías por excesiva descarga.
- Vida útil: Corresponde al periodo de utilización que abarca desde el momento en que la capacidad de la batería es de 100% hasta que esta se ha reducido en un 80%. Esta dependerá de las condiciones de operación, principalmente de los regímenes de carga y descarga. El número de ciclos de carga/descarga (ciclos de vida) que puede realizar una batería hasta finalizar su vida útil depende de la profundidad de descarga (DOD) de tales ciclos. En la figura 5.14 se puede apreciar una curva representativa respecto al número de ciclos de carga-descarga en función de la profundidad de descarga.

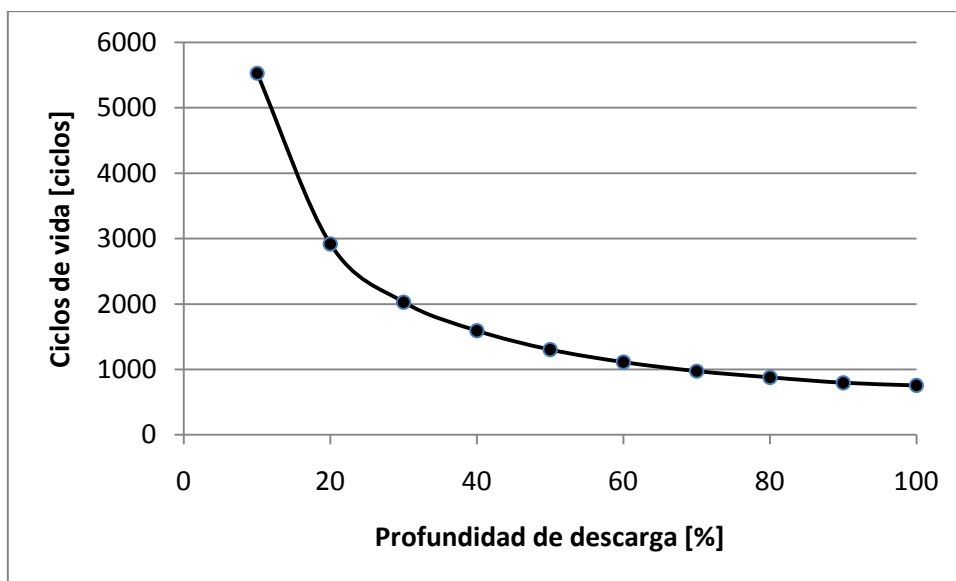


Figura 5.14: Curva característica de ciclos de vida en función de la profundidad de descarga

- Ciclos completos equivalentes: Son los ciclos necesarios para ciclar la misma energía, que en el caso de que los ciclos fuesen del 100% de la profundidad de descarga.
- Eficiencia del proceso carga-descarga (eficiencia global de batería,  $\eta_{GloBat}$ ): Es la razón entre la energía que entrega la batería a las cargas en la descarga y la energía que absorbe la batería en el proceso de carga. Corresponde al producto entre la eficiencia del proceso de carga y la eficiencia del proceso de descarga. Se encuentra entre el 60 y el 85%.

Respecto a los modelos de carga y descarga de baterías y modelos de cálculo de vida no se profundiza debido a que tales operaciones las desarrolla el programa simulador.[10]

#### 5.4.1 Baterías presentes en el mercado

Como referencia de costos internacionales de adquisición, operación y mantenimiento (O&M) para un banco de baterías de 48 [VDC] se presenta la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Costos de adquisición y O&M para un banco de baterías de 48[VDC]

Capacidad nominal[Ah]	43	96	200	462	924	1848
Capacidad nominal [kWh]	2,06	4,61	9,60	22,18	44,35	88,70
Corriente máxima [A]	7	12	24	51	102	204
Eficiencia global [%]	80	80	80	80	80	80
Adquisición [US\$]	871,3	1450,3	3176,1	5716,9	10680,6	20237,0
Costo O & M [US\$/h]	112,42	126,48	143,34	175,66	210,80	267,01

Dentro del mercado chileno se destaca la presencia de dos tipos de batería de Plomo-ácido. Las AGM (Absorbed Glass Mat) y las de Gel, las que poseen diferentes características y costos asociados. En las tablas 5.9 y 5.10 se especifican costos en el mercado chileno para cada batería. El detalle respecto a curvas características para cada batería se encuentra en Anexos.

**Tabla 5.9: Características de baterías AGM presentes en el mercado chileno**

Batería AGM	Tensión nominal [VDC]	Capacidad [Ah]	Adquisición [US\$]
P26	12	26	93,33
P55	12	55	181,07
P100	12	100	291,36
P210	12	210	744,85

**Tabla 5.10: Características de baterías Gel presentes en el mercado chileno**

Batería de Gel	Tensión nominal [VDC]	Capacidad [Ah]	Descarga máxima [A]	Adquisición [US\$]
G100	12	100	100	373,5
G200	12	200	200	781,9

#### 5.4.2 Aplicación a Boyeruca

Se calcula el voltaje conveniente para trabajar en DC, teniendo presente que la corriente máxima demandada debe ser menor a la corriente pico del inversor que se escoja, y menor a la corriente máxima de descarga del banco de baterías. De la demanda eléctrica básica se tiene que el peak de potencia es de 694 [W], imponiendo un factor de seguridad de 1,5, se tiene un peak de potencia de 1040 [W].

Si se asume un voltaje de 24 [VDC], la corriente máxima será de 42 [A], y como se necesitan baterías de a pares (caso 12 [VDC]) para trabajar en 24 [VDC], de ser sólo un par, cada una sería sometida a una descarga máxima de 42 [A], corriente que se encuentra por debajo de la descarga máxima de las baterías G100 y G200 respectivamente que se introducen a HOMER. En lo que concierne a la carga máxima, HOMER no genera configuraciones que superen la carga máxima del banco de almacenamiento.

### 5.5 Inversor

La función de un inversor es convertir la tensión DC en AC, ya que los paneles fotovoltaicos, gran parte de aerogeneradores de pequeña escala y baterías, actúan en base a tensión continua, mientras casi la totalidad de la carga suele utilizar tensión alterna. Además, al trabajar con tensiones DC bajas (12, 24 o 48 [VDC]) se puede necesitar secciones de cable elevadas. Existen también inversores que incluyen rectificador (convierten AC a DC), los que reciben el nombre de convertidores bidireccionales.

Se definen a continuación aspectos necesarios para el conocimiento de los inversores:

- Potencia nominal aparente [VA]: corresponde a la potencia aparente (activa + reactiva) que puede suministrar de forma indefinida. Los inversores ofrecen la posibilidad de suministrar durante corta duración (del orden de segundos) entre 200% y 300% de la potencia nominal, para permitir regímenes transientes de las cargas.
- Eficiencia: corresponde a un parámetro que varía de acuerdo a la potencia de salida en que se utiliza el equipo, suele estar entorno al 90% cuando se utiliza el 70% de la potencia nominal de salida. Para potencias del orden del 10% de la nominal cae drásticamente.
- Existen inversores para diversas aplicaciones dependiendo de los requerimientos, por lo que los precios también varían dada su complejidad. Los inversores de mayor simplicidad son incapaces de funcionar en paralelo con generadores AC o conectarse a la red, ya que no pueden sincronizarse con la onda de tensión. Otro factor fundamental es la vida útil, la cual depende plenamente del régimen de utilización, aunque no se encontraron estudios al respecto se utiliza una vida útil de 15 a 20 años. Los costos asociados a mantenimiento son prácticamente nulos por lo que no se consideran.

### 5.5.1 Inversores presentes en el mercado chileno

Para el desarrollo de este trabajo, el inversor a utilizar para los sistemas híbridos debe ofrecer la posibilidad de trabajar de forma paralela a un generador AC o/y a la red, y también poder actuar de forma aislada. Debe ser capaz de trabajar como rectificador si se desea tener la opción de cargar las baterías con el generador Diesel o con la red.

En la tabla 5.11 se observan los costos en el mercado chileno de inversores (sin rectificador) sin capacidad de funcionar de forma sincronizada con la tensión de un sistema externo.[22]

**Tabla 5.11: Inversores simples, sin posibilidad de conversión bidireccional ni sincronizarse con sistema externo**

Inversor	Tensión nominal de entrada [V]	Potencia nominal aparente [VA]	Potencia pico [VA]	Eficiencia máxima [%]	Adquisición [US\$]
V180	12,24 o 48	180	350	88	234,5
V350	12,24 o 48	350	700	89	331,2
V750	12,24 o 48	750	1400	93	637,8
V1200	12,24 o 48	1200	2400	93	1049,3
V1600	12,24 o 52	1600	3000	93	1419,7
V2000	12,24 o 53	2000	4000	94	1769,5

En la tabla 5.12 se observan las características y costo de adquisición para equipos bidireccionales que pueden sincronizarse a la red o/y generación mediante generador AC [22].

**Tabla 5.12: Inversor-rectificador con posibilidad de sincronizarse a la red u otra fuente externa**

Inversor	Tensión nominal de entrada [VDC]	Potencia nominal aparente [VA]	Potencia pico [VA]	Eficiencia máxima [%]	Corriente de carga como rectificador [A]	Adquisición [US\$]
<b>VC800</b>	12 o 24	800	1600	92 o 94	35 o 16	1556,6
<b>VC1200</b>	12 ó 24	1200	2400	93 ó 94	50 ó 25	1927,1
<b>V1600</b>	12 ó 24	1600	3000	93 ó 94	70 ó 40	2348,8
<b>V2000</b>	12 ó 24	2000	4000	93 ó 94	80 ó 50	2724,2
<b>V3000</b>	12,24 ó 48	3000	6000	93, 94 ó 95	125, 70 ó 35	3395,0

### 5.5.2 Aplicación a Boyeruca

Para un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red que sea capaz de cubrir la demanda eléctrica frente a un corte de suministro eléctrico, es necesario utilizar un inversor como los citados en la tabla 5.12. Específicamente, se introducirán como posibles alternativas los equipos de 800 y 1200 [VA], 1600 y 2400 [VA] de potencia pico respectivamente, ya que el peak de la demanda básica es menor a 1[kW].

Los equipos citados poseen la funcionalidad “no-break”, la cual en caso de corte de suministro de la red, activan rápidamente (menos de 20 milisegundos) el sistema autónomo. También estos equipos pueden funcionar en paralelo con otro inversor del mismo modelo, lo que brinda la posibilidad de incrementar el tamaño del sistema híbrido (tecnología modular).

## 5.6 Rectificador

Permite convertir la corriente eléctrica alterna en continua, empleando tristores o diodos dependiendo de la tecnología. Son relativamente simples y económicos. Pueden ser bidireccionales (inversor y rectificador). Gran parte de estos aparatos tienen tensiones de entrada adaptables. En este trabajo de investigación se considera una eficiencia máxima de 93%. Los inversores citados anteriormente son bidireccionales, por lo cual los costos del rectificador están asociados a tales equipos.

## 5.7 Regulador de carga

El regulador de carga optimiza la cantidad de energía que se entrega a las baterías, controla la profundidad de descarga, evita la sobrecarga (impidiendo la gasificación en las baterías de Plomo-ácido) y desconecta los consumos en caso de descarga excesiva (evitando la estratificación del electrolito y la sulfatación), favoreciendo a la vida útil de las baterías. La complejidad de estos aparatos varía de acuerdo a sus funciones. El regulador de carga tiene la misión de regular la corriente que es absorbida por las baterías controlando la tensión eléctrica, que sirve como indicador para conocer el estado de carga de las baterías.



Sus características más importantes son: tensión nominal (12, 24 o 48 VDC), intensidad máxima que puede circular a través de él, valores de tensión de corte por alta (sobrecarga) y valores de tensión de corte por baja (sobredescarga).

## Capítulo 6

# Restricciones, fases, estrategias de control y análisis de sensibilidad.

### 6.1 Restricciones técnicas y económicas

- El sistema de abastecimiento debe ser capaz de abastecer una demanda básica frente a un corte de suministro eléctrico prolongado, durante un periodo a determinar. Para la aplicación a la Posta de Boyeruca se escogen dos meses de autonomía como parámetro de diseño.
- El sistema híbrido PV-Eólico-Diesel conectado a la red debe ser capaz de inyectar excedentes eléctricos a la red. Dado que aún no existe una normativa legal definida respecto a este tema en Chile, en la aplicación para el caso base se simplifica valorizando la energía inyectada al 60% del valor de la energía obtenida de la red. Posteriormente se cambia el valor a 100% en un análisis de sensibilidad.
- La evaluación del sistema híbrido conectado a la red se evalúa para una vida útil de 25 años.
- La tasa anual de interés para la evaluación del proyecto es del 6%.
- No se contempla en la evaluación del proyecto penalizaciones, ni premios económicos por la cantidad de emisiones liberadas, debido a las bajas magnitudes energéticas asociadas. Tampoco se limitan las emisiones de gases contaminantes.
- La limitante de potencia extraída de la red, depende del tipo de tarifa contratada, para la Posta de Boyeruca corresponde al tipo BT1, por lo que se fija en 10 [kW].

### 6.2 Fases de simulación

Una vez incorporados todos los datos necesarios para la realización de la optimización (ya definidos en capítulos anteriores), se procede a través de las siguientes etapas:

- Definición e inclusión del periodo de autonomía: se establece el tiempo (días o meses) que se pretende que el sistema híbrido sea capaz de abastecer de forma autónoma la demanda básica anualmente. HOMER no ofrece esta opción directa, pero se puede realizar indirectamente, estableciendo que para el periodo en el cual se quiere lograr autonomía (suministro eléctrico cortado) el costo por kWh de energía de la red sea muy elevado, de tal manera que al realizar la optimización, no se presente como opción rentable el comprar electricidad de la red en los días o meses

especificados y se abastezca a través de un sistema paralelo. También se debe fijar la demanda básica para el periodo en que el sistema híbrido funcionará de forma autónoma, simulando un corte de suministro eléctrico.

- **Cálculo de soluciones:** HOMER evalúa económicamente todas las soluciones posibles que cumplen con las restricciones técnicas. Posterior a esto, entrega un resumen de todas las configuraciones posibles, ordenándolas bajo criterio económico (de mayor a menor VAN) y separándolas también por tipo de tecnología.

- **Selección de solución óptima:** en diversas ocasiones puede ocurrir que la solución óptima bajo el criterio económico no será un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento (por ej. la solución más conveniente puede ser sólo un generador diesel, sólo PV con almacenamiento, entre otras), por lo cual quedará a criterio de quien selecciona la tecnología, si escoge la mejor solución económica global o el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento que más le conviene económicamente. En este trabajo se realiza un análisis completo para la Posta de Boyeruca.

- **Realización de análisis de sensibilidad:** Ya habiendo analizado la solución óptima, es conveniente revisar las soluciones óptimas para el mismo problema pero con ligeras modificaciones. Debido a las condiciones fluctuantes de diversas variables involucradas, y el gran periodo de evaluación, se aconseja la realización de un análisis de sensibilidad en el cual se varíen parámetros en torno a la situación más probable (caso base) con el objetivo de tomar la mejor alternativa, observando la variación en las respuestas al modificar porcentualmente alguna magnitud.

### 6.3 Estrategias de Control

Para la realización de la simulación HOMER utiliza las estrategias de control eléctrico de Barley and Winn, las cuales determinarán la forma en cómo se administra la energía, y corresponden a:

- **Load Following Strategy (LF, Seguimiento de la demanda):** esta estrategia se basa en que el generador diesel, cuando tiene que suministrar energía, suministra la potencia estrictamente necesaria para completar la demanda (el déficit presentado por las fuentes alternativas para cubrir la demanda del recinto), sin generar energía adicional para cargar las baterías. Las baterías se cargan sólo con fuentes renovables.
- **Cycle Charging Strategy (CC, Ciclo de carga):** esta estrategia difiere de la anterior, ya que cuando las baterías no pueden completar la demanda, el generador Diesel funciona a potencia plena (nominal), cargando las baterías con la potencia sobrante. Si funcionando a potencia plena, hay energía sobrante, entonces en lugar de proporcionar la potencia nominal, suministrará sólo la potencia necesaria.
- **Combined Strategy (Combinada):** esta estrategia es una combinación de las dos anteriores. Si lo que falta por completar de la demanda es inferior a un valor denominado Potencia Crítica de

Carga  $L_c$ , se aplica la estrategia “Ciclo de carga”, mientras que si es superior, se aplica la estrategia “Seguimiento de la demanda”.

Las estrategias de abastecimiento autónomo de control tienen como principio básico la utilización de las fuentes renovables para suministrar la potencia demandada por el recinto y la utilización de energía sobrante en cargar las baterías. En otro caso, si el abastecimiento a través de las fuentes renovables no es suficiente para abastecer toda la demanda, entonces se utilizan las baterías para suministrar la carga faltante. Si el kWh proveniente de la batería tiene un valor más bajo que el kWh del generador diesel a partir de un determinado valor de potencia demandada, se utiliza éste último para suplir la demanda no abastecida.

Para la evaluación en la fase final para la Posta de Boyeruca, se establece que se debe asegurar el suministro eléctrico en todo momento, y no se establece un mínimo de fracción desde fuentes renovables en la producción.

## 6.4 Análisis de sensibilidad

Se pueden efectuar análisis de sensibilidad en una gran cantidad de variables asociadas a:

- Potencial energético
- Demanda eléctrica
- Oferta eléctrica de red
- Costos
- Restricciones
- Estrategias de control

Por lo cual es muy amplia la posibilidad de variar magnitudes, pero existe la limitante temporal ya que el número de configuraciones posibles se incrementa exponencialmente con el número de variables sujetas al análisis. Para el caso aplicado (Posta de Boyeruca) se presentan como variables de mayor incertidumbre el costo del diesel y el costo de la energía proveniente de la red, ya que si bien se conoce actualmente su valor existe desconocimiento respecto a su valor en el futuro. Respecto al precio de la electricidad se utiliza la tasa proyectada para 2010 y 2030 de 3,5% anual [26]. Se realiza el análisis de sensibilidad para el recurso solar, el precio del diesel y el contrato de Medición Neta.

## Capítulo 7

# Resultados de la aplicación a la Posta de Boyeruca

En el presente capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos al aplicar la metodología desarrollada, al caso de la Posta de Boyeruca. Debido a la gran cantidad de información extraíble, se presentan los resultados desde un plano general hasta la descripción específica de las soluciones de mayor relevancia para el periodo de autonomía seleccionado (2 meses). Finalmente se incluyen los análisis de sensibilidad. Es importante destacar que todas las evaluaciones consideran un horizonte de evaluación de 25 años.

### 7.1 Sistemas de abastecimiento económicamente óptimos para distintos periodos de autonomía

Se aplica la metodología a la Posta de Boyeruca, utilizando los datos expuestos en los capítulos anteriores. En una primera etapa se realizan distintas simulaciones variando el intervalo de tiempo de corte de suministro eléctrico, es decir se modifica el periodo en el que el sistema debe abastecer la demanda básica. Se observa cómo varían las soluciones más convenientes económicamente, que presenta HOMER para cada tecnología en función del periodo de autonomía para el cual se diseña.

En la figura 7.1 se resume el costo por unidad de energía en función del periodo de autonomía eléctrica (intervalo de corte de suministro eléctrico) para el cual se diseña. Cada curva representa el menor costo de energía asociado a la combinación de distintas fuentes energéticas (11 tecnologías diferentes). En la gráfica se aprecia que de no existir cortes de suministro eléctrico es mucho más conveniente el abastecimiento a través de la red, mientras el costo se incrementa con la incorporación de componentes.

De no existir cortes de suministro eléctrico, el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel conectado a la red con almacenamiento presenta el mayor coste por unidad de energía (0,669 [US\$/kWh]) con una producción de energía renovable del 58% del total (incluyendo en el total lo consumido de la red).

Para 2 días (4 veces en un mes), 5 días (4 veces en un mes) y 1 mes de autonomía anual, la mejor solución bajo el criterio económico, corresponde a utilizar un generador diesel AC durante el corte de suministro eléctrico, con un costo por la energía de 0,502, 0,57 y 0,631 [US\$/kWh] respectivamente.

Para 2 meses de autonomía, la mejor solución corresponde a la incorporación del generador diesel AC con almacenamiento, y el valor asociado a la energía corresponde a 0,699 [US\$/kWh].

Para 3, 4, 5 y 6 meses de autonomía la opción más conveniente corresponde a un sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento, y los costos de energía asociados corresponden a 0,766, 0,836, 0,877 y 0,938 [US\$/kWh] respectivamente.

Para 7 meses de autonomía, existen 2 sistemas de abastecimiento que presentan el mismo costo, un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento y un sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento, ambos con un costo por unidad de energía de 1,013 [US\$/kWh].

El sistema híbrido PV-Eólico-Diesel comienza a encontrarse cerca de la solución óptima para una autonomía mayor a 3 meses, los valores asociados a esta tecnología desde 3 a 6 meses de autonomía corresponden a 0,789, 0,856, 0,897 y 0,953, encontrándose a 3, 2,4, 2,3 y 1,6% por sobre el costo de la mejor solución.

Desde 7 meses de autonomía en adelante, el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red corresponde a la mejor opción económica. Específicamente para el caso de autonomía total (los 12 meses del año durante 25 años), el costo de la energía corresponde a 1,41 [US\$/kWh].

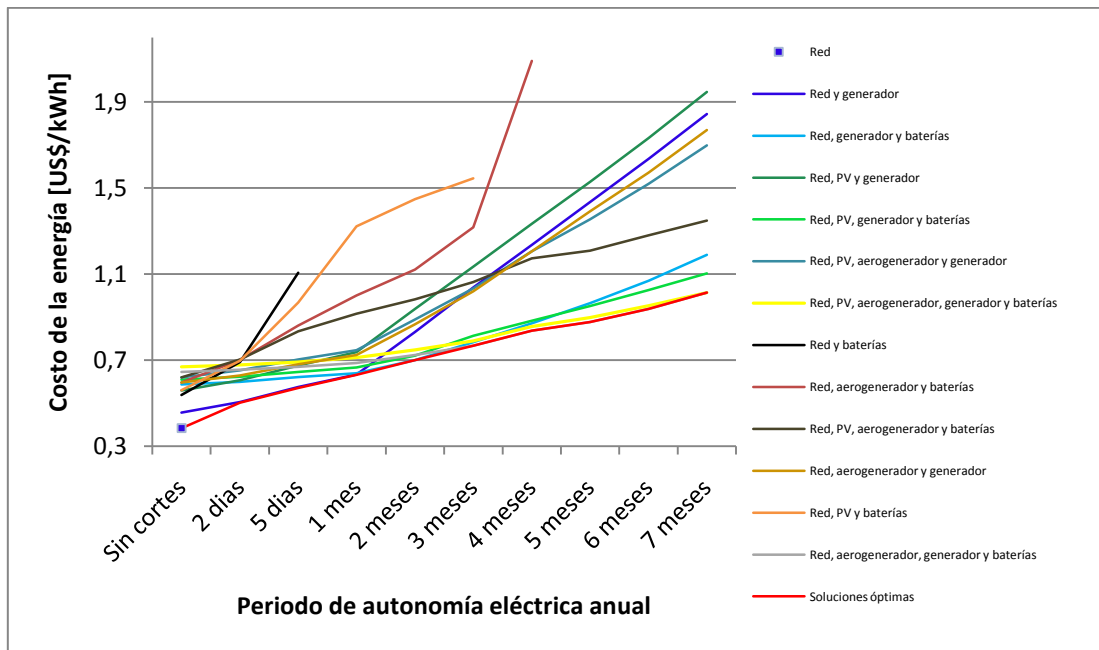


Figura 7.1: Soluciones económicamente óptimas para cada tecnología en función del intervalo de autonomía

En la tabla 7.1 se observa el resumen de los componentes, NPC, costo de la energía asociado y fracción renovable asociado a la solución óptima para cada periodo de autonomía de diseño.

Tabla 7.1: Resumen de cada solución económicamente óptima para cada periodo de autonomía (intervalo de corte de suministro eléctrico)

Autonomía	Tecnología óptima	Especificación de componentes	NPC [US\$]	Costo de la energía [US\$/kWh]	Fracción renovable %
Sin cortes	Red		10006	0,383	0
2 días (4 veces en un mes)	Red y generador	Generador AC 1,5 [kVA]	12999	0,502	0
5 días (4 veces en un mes)	Red y generador	Generador AC 1,5 [kVA]	14588	0,570	0

<b>1 mes</b>	Red y generador	Generador AC 1,5 [kVA]	15761	0,631	0
<b>2 meses</b>	Red, generador y batería	Generador AC 1,5 [kVA] y 2 baterías en serie G100	17168	0,699	0
<b>3 meses</b>	Red, aerogenerador, generador y baterías	Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 2 baterías en serie G100	18196	0,766	58%
<b>4 meses</b>	Red, aerogenerador, generador y baterías	Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 2 baterías en serie G100	19220	0,836	59%
<b>5 meses</b>	Red, aerogenerador, generador y baterías	Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 4 baterías G100	19472	0,877	62%
<b>6 meses</b>	Red, aerogenerador, generador y baterías	Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 4 baterías G100	20099	0,938	63%
<b>7 meses</b>	Red, aerogenerador, generador y baterías	Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 6 baterías G100	20917	1,013	65%
	Red, PV, aerogenerador, generador y baterías	PV 270 [W], Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 4 baterías G100	20920	1,013	74%
<b>1 año</b>	Red, PV, aerogenerador, generador y baterías	PV 405 [W], Aerogenerador A1000, Generador AC 1,5 [kVA] y 6 baterías G100	23615	1,41	88%

Cada solución económicamente óptima asociada a cada periodo de corte de suministro eléctrico, posee una distribución energética diferente, en la figura 7.2 se puede observar la generación eléctrica asociada a cada fuente y las pérdidas vinculadas a almacenamiento y conversión.

El consumo de diesel es lineal con el periodo de autonomía hasta los 2 meses, lo que resulta lógico, ya que se consume sólo el déficit que no puede abastecer la red debido al coste de suministro eléctrico.

Para una autonomía de 2 meses, se observa la participación de almacenamiento a la generación con diesel. La inclusión de almacenamiento se debe a que resulta más conveniente trabajar en un punto de operación más alto con el generador diesel, abasteciendo la demanda básica y cargando las baterías a la vez. Ya cargadas las baterías conviene que éstas alimenten la demanda básica y se apague el generador diesel. Lo anterior debido a que el generador diesel mejora su eficiencia a mayor potencia (figura 5.13), por lo que es óptima tal operación, en vez de trabajar a menor potencia y sin almacenamiento (baja eficiencia del generador). También se observa que la estrategia sólo utiliza la energía proveniente del generador diesel para cubrir el déficit, y no inyecta a la red.

La adhesión de energía eólica (aerogenerador A1000) al sistema red-generador diesel a partir de 3 meses de autonomía como solución óptima, refleja que esta opción se vuelve menos costosa que cubrir la

demanda básica sólo con energía proveniente de un generador diesel. De la gráfica se desprende que la producción total (2748 [kWh/año]) supera al consumo (1859 [kWh/año]), lo cual evidencia que la posibilidad de inyectar excedentes a la red juega un rol fundamental en que sea la primera opción desde el punto de vista económico. Para 7 meses de autonomía existen dos soluciones óptimas (costos similares), pero el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento se impone en fracción de energía renovable por sobre el sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento (74% v/s 65%).

Las configuraciones de menor costo para los periodos de autonomía entre los 8 y 12 meses corresponden a sistemas híbridos PV-Eólico-Diesel con almacenamiento, específicamente para la simulación del abastecimiento de la totalidad (12 meses durante 25 años) a través de un sistema autónomo con posibilidad de vender excedentes eléctricos. El aporte de la generación fotovoltaica al total de la producción corresponde al 21%, mientras la generación eólica comprende el 66% y la unidad diesel el 13%.

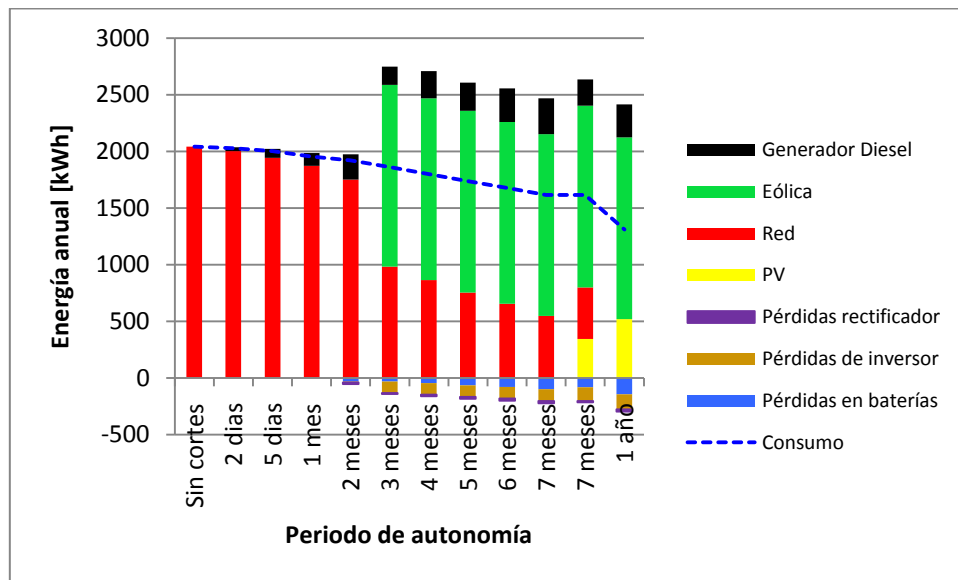


Figura 7.2: Distribución energética de generación, consumo y pérdidas de almacenamiento y conversión

Se presenta en la tabla 7.2 la descomposición de costos para cada solución.

Tabla 7.2: Costos asociados a cada solución económicamente óptima para cada intervalo de autonomía

Periodo de autonomía	Inversión	Reemplazo	O&M	Combustible	Recuperación	Total
Sin cortes	0	0	10006	0	0	10006
2 días (4 veces al mes)	2275	0	10299	616	-191	12999
5 días (4 veces al mes)	2275	489	10666	1470	-312	14588
1 mes	2275	703	10817	2083	-117	15761
2 meses	4578	1345	9386	2106	-247	17168
3 meses	10476	3794	3215	1516	-804	18197
4 meses	10476	4193	3004	2232	-685	19220
5 meses	11222	4464	2483	2146	-844	19471



<b>6 meses</b>	11222	5019	2261	2558	-961	20099
<b>7 meses (Opción 1)</b>	12338	5301	1701	2532	-956	20916
<b>7 meses (Opción 2)</b>	13538	5100	1253	1993	-965	20919
<b>1 año</b>	15812	6644	-398	2349	-792	23615

## 7.2 Configuración económicamente óptima de cada tecnología para un corte de suministro eléctrico de 2 meses.

Anteriormente se mostraron las soluciones de menor costo factibles para distintos periodos de autonomía (desde 2 días a 1 año). En esta sección se enuncian los resultados para un periodo de autonomía escogido de 2 meses, esto ya que se considera un parámetro de diseño adecuado para un recinto como la Posta de Boyeruca, que luego del terremoto restableció su suministro eléctrico después de 2 meses. A continuación en la tabla 7.3 se entrega un resumen de las distintas tecnologías, ordenadas por NPC.

**Tabla 7.3: Detalle de la configuración económicamente óptima para cada tecnología para un periodo de autonomía de 2 meses, ordenadas por el costo total presente.**

Sistema	PV [kW]	A1000	GD [kVA]	DCG 12 110	Convertor [kW]	Estrategia de control	Capital inicial	NPC	Costo energía [US\$/kWh]	Fracción renovable
Diesel conectado a la red con almacenamiento	0	0	1,5	2	0,8	CC	4580	17168	0,699	0
PV-diesel conectado a la red con almacenamiento	0,09	0	1,5	2	0,8	CC	5304	17664	0,720	0,06
Eólico-diesel conectado a la red con almacenamiento	0	1	1,5	2	0,8	CC	10476	17752	0,723	0,57
PV-Eólico-Diesel conectado a la red con almacenamiento	0,05	1	1,5	2	0,8	CC	10904	18355	0,748	0,59
Diesel conectado a la red	0	0	1,5	0	0	CC	2275	20427	0,832	0
Eólico-diesel conectado a la red	0	1	1,5	0	0,8	CC	9730	21250	0,866	0,57
PV-Eólico-Diesel-conectado a la red	0,05	1	1,5	0	0,8	CC	10158	21813	0,889	0,58
PV-diesel conectado a la red	0,41	0	1,5	0	0,8	CC	7306	22999	0,937	0,25
PV-Eólico conectado a la red con almacenamiento	0,54	1	0	12	0,8	LF	17180	24086	0,982	0,74
Eólico conectado a la red con almacenamiento	0	2	0	14	1,6	LF	19984	27506	1,121	0,78
PV conectado a la red con almacenamiento	2,16	0	0	22	1,2	LF	29278	35517	1,448	0,75

De la tabla 7.3, se observa que la mejor solución bajo el criterio económico para 2 meses de autonomía corresponde al sistema generador diesel con almacenamiento, mientras que la utilización de un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento se encuentra en la cuarta posición (15% más costosa que la primera opción), precedido por un sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento (11,4% más costosa) y un sistema híbrido PV-Diesel con almacenamiento (10,9% más costoso).

La tecnología eólica conectada a la red con almacenamiento y PV conectada a la red con almacenamiento se encuentran entre las opciones de mayor costo, 60% y 100% superior a la solución más conveniente bajo criterio económico.

El detalle respecto a la distribución de los costos asociada a la configuración más conveniente para cada tecnología se observa en la figura 7.3, en la que se observa como para la solución basada en un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel conectado a la red con almacenamiento, el 59% del costo total corresponde a inversión. Cada tecnología se representa con el conjunto de iniciales de los equipos principales que participan en ella (R: Red, PV: Fotovoltaica, G: Generador diesel, A: Aerogenerador y B: Baterías).

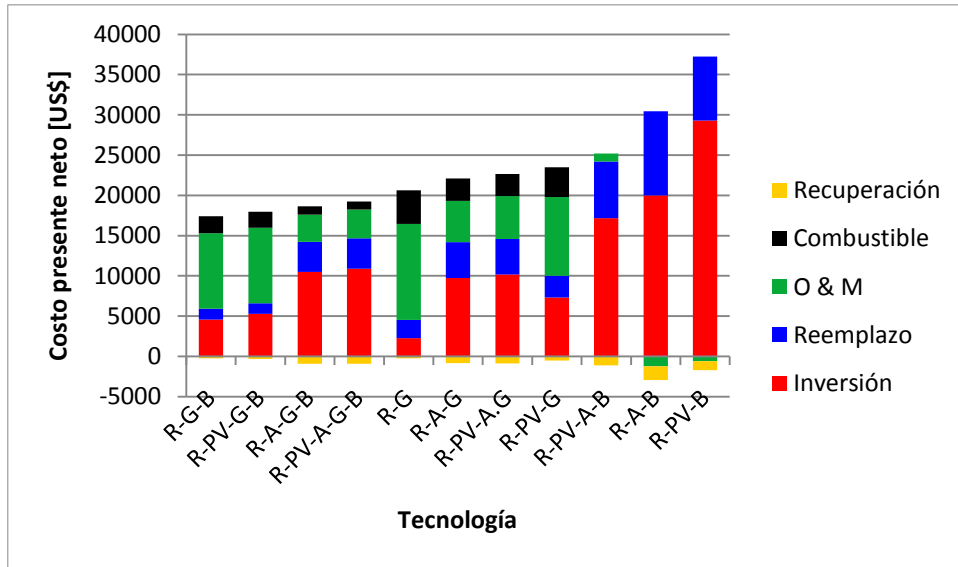


Figura 7.3: Detalle respecto a la distribución de costos asociada a la configuración más conveniente para cada tecnología

Respecto a las emisiones de  $CO_2$  en la figura 7.4 se muestra a través de las barras la cantidad anual asociada. En la misma figura 7.4 se aprecia también en azul, la fracción renovable del total de la producción (en el total se incluye lo comprado a la red) que corresponde a la mejor solución económica para cada tecnología.

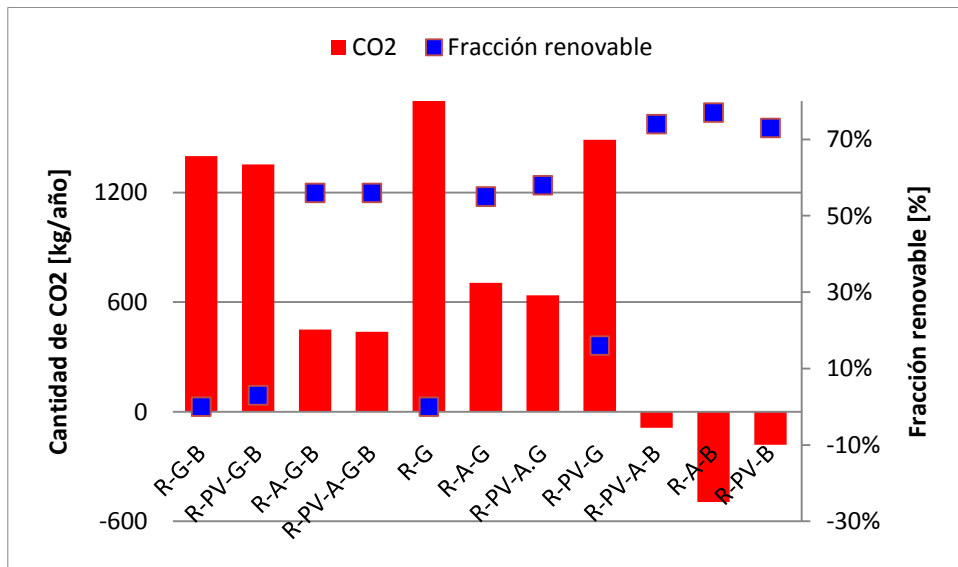


Figura7.4: Emisiones de  $CO_2$  (rojo) y fracción de producción renovable (azul)

Las distintas magnitudes energéticas anuales (generación, pérdidas, consumo y venta) para las soluciones más convenientes por tecnología se visualizan en la figura 7.5, donde se observa que en todos los sistemas en que participa la unidad eólica se produce un gran excedente de energía, lo cual implica que el VAN tiene una importante dependencia del sistema de Medición Neta.

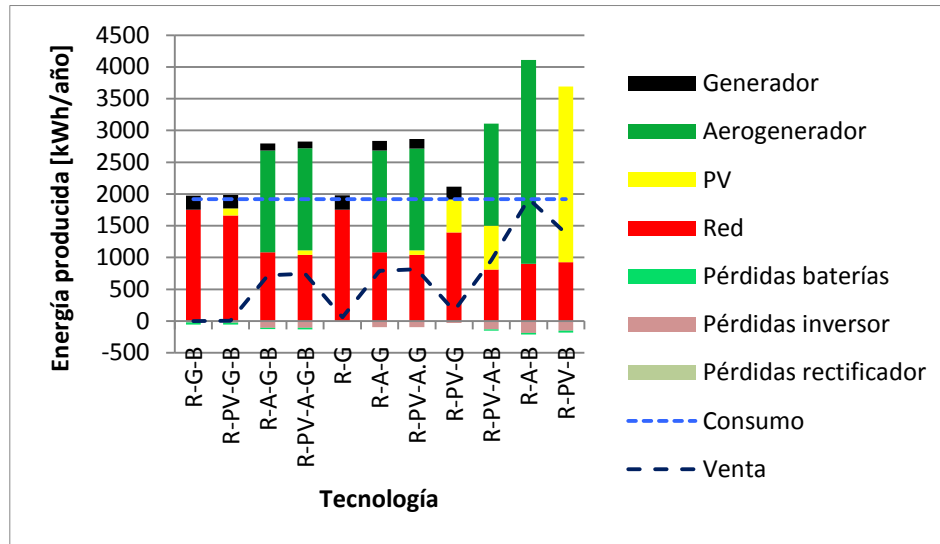


Figura 7.5: Distribución energética de generación, consumo, pérdidas de almacenamiento y conversión, y venta

### 7.3 Sistema de abastecimiento más conveniente para un corte de suministro eléctrico de 2 meses.

Tal como se enunció en la sección anterior, la configuración óptima bajo el criterio económico para el periodo de 2 meses de autonomía escogido para la Posta de Boyeruca, corresponde a la utilización durante el corte de suministro eléctrico del generador diesel AC de 1,5 [kVA] en conjunto con un sistema de acumulación de 2 baterías G100 y un inversor-rectificador de 0,8 [kW].

Se observa en la figura 7.6 la utilización del generador durante el mes de junio y julio para cubrir la demanda básica, mientras el resto del año se utiliza sólo la red. En las tablas 7.4, 7.5 y 7.6 se muestra el resumen respecto a la configuración y operación de los equipos que la conforman. Así la tabla 7.4 informa del generador diesel, la tabla 7.5 respecto al sistema de almacenamiento y la tabla 7.6 respecto al convertor (inversor-rectificador).

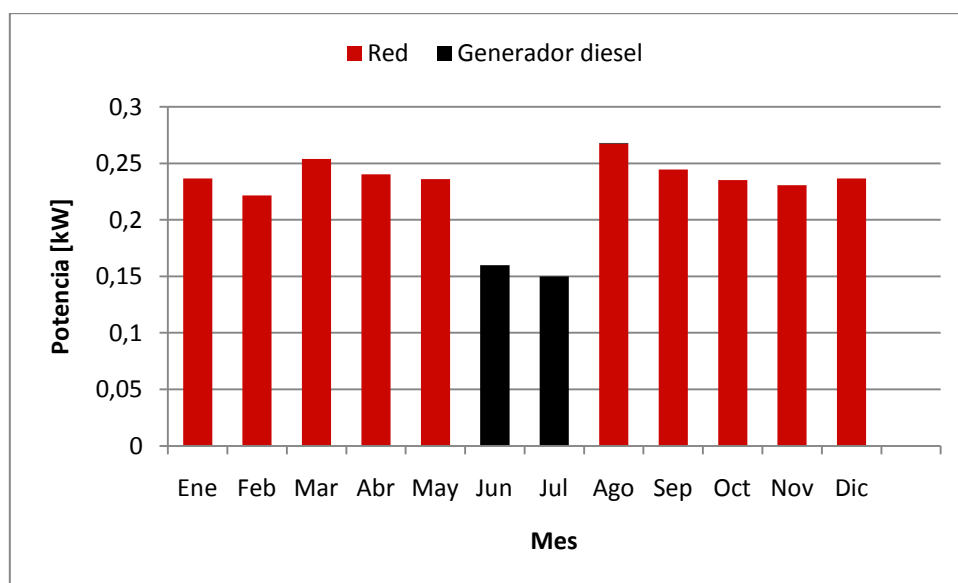


Figura 7.6: Generación eléctrica asociada a la solución óptima bajo criterio económico para 2 meses de autonomía para la Posta de Boyeruca

Tabla 7.4: Detalle técnico respecto a la operación del Generador AC que participa en la solución más conveniente para 2 meses de corte de suministro eléctrico para la Posta de Boyeruca

Cantidad	Valor
Horas de operación [h/año]	317
Número de encendidos [encendidos/año]	106
Vida operacional [años]	31,5
Factor de capacidad [%]	1,71
Costo energético fijo [US\$/h]	0,51
Costo marginal de generación [US\$/kWh]	0,52
Producción eléctrica [kWh/año]	224
Potencia de salida media [kW]	0,71
Potencia eléctrica máxima de salida [Kw]	1,23
Consumo de combustible [l/año]	135
Consumo específico de combustible [l/kWh]	0,602
Eficiencia eléctrica media [%]	16,9

Tabla 7.5: Detalle técnico respecto a la operación del banco de baterías que participa en la solución más conveniente para 2 meses de corte de suministro eléctrico para la Posta de Boyeruca

Cantidad	Valor
Baterías por arreglo	2
Arreglos en paralelo	1
Baterías	2
Voltaje de trabajo de arreglo (V)	24

Capacidad nominal [kWh]	2,64
Capacidad nominal utilizable [kWh]	1,85
Autonomía [h]	8,43
Vida útil energética [kWh]	1390
Costo por energía utilizada [US\$/kWh]	0,6
Energía entrante [kWh/año]	169
Energía saliente [kWh/año]	136
Pérdidas [kWh/año]	33
Vida esperada [años]	9,14

**Tabla 7.6: Detalle técnico respecto a la operación del Inversor-Rectificador que participa en la solución más conveniente para 2 meses de corte de suministro eléctrico para la Posta de Boyeruca**

Cantidad	Inversor	Rectificador
Capacidad [kW]	0,8	0,8
Potencia media saliente [kW]	0,01	0,02
Mínima potencia saliente [kW]	0	0
Máxima potencia saliente [kW]	0,45	0,79
Factor de capacidad [%]	1,8	2,4
Horas de operación [h/año]	1064	317
Energía entrante [kWh/año]	136	182
Energía saliente [kWh/año]	128	169
Pérdidas [kWh/año]	8	13

En lo que concierne a gases contaminantes, al incorporar las tasas de producción sugeridas por HOMER se obtiene la tabla 7.7 que indica la cantidad anual de gases contaminantes emanados a la atmósfera por la configuración óptima expuesta.

**Tabla 7.7: Emisiones asociadas a la configuración óptima (generador diesel con almacenamiento)**

Contaminante	Emisiones [kg/año]
<b>CO<sub>2</sub></b>	1318
<b>CO</b>	0,878
Hidrocarburos sin quemar	0,097
MP	0,066
<b>SO<sub>2</sub></b>	5,51
<b>NO<sub>x</sub></b>	10,2

## 7.4 Sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red óptimo para un corte de suministro eléctrico de 2 meses

Para el periodo de autonomía escogido (2 meses), la solución más económica de abastecimiento, como se observó, no corresponde a la configuración en que se centra el desarrollo de este trabajo, que es la de un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red. Particularmente, para el caso de la Posta de Boyeruca, esta opción se posiciona como la cuarta tecnología más conveniente, ya que en el segundo lugar se encuentra la tecnología híbrida PV-Diesel con almacenamiento conectada a la red, y en el tercer lugar la tecnología híbrida Eólica- Diesel con almacenamiento conectada a la red.

La solución híbrida PV-Eólica-Diesel más económica y que permite validar la metodología desarrollada está compuesta por un panel fotovoltaico K50, un aerogenerador A1000, un generador Diesel AC de 1,5 [kVA], un arreglo de 2 baterías G100 y un inversor-rectificador VC800.

La potencia mensual media se ilustra en la figura 7.7, donde se aprecia la potencia asociada a cada fuente. La generación eólica corresponde a la fuente de abastecimiento mayoritaria, especialmente, en los meses de verano.

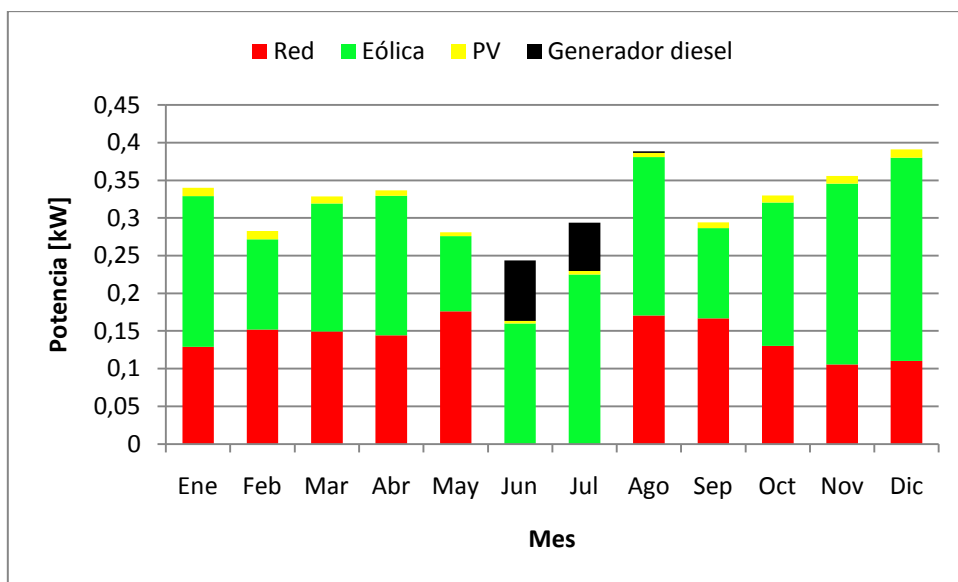


Figura 7.7: Producción energética asociada a cada fuente para solución óptima híbrida PV-Eólica-Diesel

La producción anual de energía (incluyendo lo comprado a la red) se distribuye de la siguiente forma:

- Generación fotovoltaica: corresponde a 69 [kWh/año] que representa el 2%
- Generación eólica: corresponde a 1605 [kWh/año] que representa el 57%
- Generación mediante generador diesel: corresponde a 108 [kWh/año] que representa el 4%
- Red: corresponde a 1044 [kWh/año] que representa el 37 %

De la totalidad de la energía producida (incluyendo lo comprado a la red), 1920 [kWh] corresponden a lo consumido anualmente en el recinto y 744 [kWh] a lo vendido a la red, representando un 72% y 28% del total, respectivamente.

El detalle respecto a la generación fotovoltaica se enuncia en la tabla 7.8.

**Tabla 7.8: Detalle respecto a generación fotovoltaica del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca**

Cantidad	Valor
Capacidad nominal [kW]	0,054
Potencia media generada [kW]	0,01
Energía media generada [kWh/día]	0,189
Factor de capacidad [%]	14,6
Producción anual [kWh/año]	69,1
Penetración en la demanda [%]	3,6
Horas de operación [h/año]	4372
Costo de energía [US\$/kWh]	1,05

El detalle respecto a la generación eólica se enuncia en la tabla 7.9.

**Tabla 7.9: Detalle respecto a generación eólica del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca**

Cantidad	Valor
Máxima potencia de generación [kW]	1
Potencia media de salida [kW]	0,18
Factor de capacidad [%]	18,3
Producción total [kWh/año]	1605
Penetración en la demanda %	83,6
Horas de penetración [h/año]	6776
Costo de energía [US\$/kWh]	0,429

El detalle respecto a la generación con el generador diesel se enuncia en la tabla 7.10.

**Tabla 7.10: Detalle respecto a generación con diesel del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca**

Cantidad	Valor
Horas de operación [h/año]	156
Número de encendidos [encendidos al año]	52
Vida operacional [años]	64,1
Factor de capacidad %	0,82
Costo fijo de generación [US\$/h]	0,52
Costo marginal de generación [US\$/kWh]	0,517

Energía producida [kWh/año]	108
Potencia de salida media [kW]	0,691
Máxima potencia de salida [kW]	1,11
Consumo de diesel [l/año]	65,4
Consumo específico de combustible [l/kWh]	0,607
Eficiencia media [%]	16,8

El detalle respecto al almacenamiento se observa en la tabla 7.11.

**Tabla 7.11: Detalles operacionales del sistema de abastecimiento del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca**

Cantidad	Valor
Baterías por string	2
String en paralelo	1
Baterías	2
Voltaje [VDC]	24
Capacidad nominal [kWh]	2,64
Capacidad nominal utilizable [kWh]	1,85
Autonomía [h]	8,43
Vida útil [kWh]	1390
Energía entrante [kWh/año]	104
Energía saliente [kWh/año]	84
Pérdidas [kWh/año]	20
Esperanza de vida [años]	10

El detalle respecto al Inversor-rectificador se observa en la tabla 7.12.

**Tabla 7.12: Detalles operacionales para el Inversor-rectificador del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento más conveniente para la Posta de Boyeruca**

Cantidad	Inversor	Rectificador
Capacidad [kWh]	0,8	0,8
Potencia media de salida [kW]	0,18	0,01
Máxima potencia de salida [kW]	0,8	0,79
Factor de capacidad [%]	22,8	1,2
Horas de operación [h/año]	7183	154
Energía entrante [kWh/año]	1702	87
Energía saliente [kWh/año]	1600	81
Pérdidas [kWh/año]	102	6



En lo que concierne a emisión de  $CO_2$ , la utilización de este sistema tiene asociado 337 [kg] por año.

Económicamente, la tecnología híbrida PV-Eólica-Diesel con almacenamiento conectada a la red tiene un costo superior en 6,5% sobre la solución más económica (generador diesel y baterías con conexión a la red). En la tabla 7.13 se detallan los costos del sistema híbrido.

**Tabla 7.13: Costos asociados al sistema híbrido PV-Eólica-Diesel con almacenamiento conectado a la red más económico para 2 meses de autonomía**

Componente	Capital	Reemplazo	O&M	Combustible	Recuperación	Total
PV	428	0	499	0	0	927
A1000	5898	2461	895	0	-458	8796
Generador diesel	1658	0	399	1020	-236	2841
Red	617	0	1781	0	0	2398
G100	746	649	0	0	-87	1308
Inversor-rectificador	1557	650	0	0	-121	2086
Sistema	10904	3760	3574	1020	-902	18356

En la tabla 7.14 se visualiza la energía comprada a la red, la energía entregada y el valor neto, para la configuración óptima híbrida PV-Eólica-Diesel

**Tabla 7.14: Resumen de Medición Neta de la energía para sistema híbrido PV-Eólico-Diesel más conveniente**

Mes	Energía comprada	Energía vendida	Energía neta
Ene	96	67	29
Feb	102	38	63
Mar	111	47	64
Abr	104	54	51
May	131	38	92
Jun	0	64	-64
Jul	0	97	-97
Ago	127	70	57
Sep	120	24	96
Oct	97	64	33
Nov	76	82	-6
Dic	82	101	-19
Anual	1044	744	299

## 7.5 Análisis de sensibilidad

Es importante observar cómo cambian los resultados expuestos al variar las magnitudes de las principales variables que presentan incertidumbre en el escenario futuro: radiación solar, el precio del petróleo, modalidad de venta de excedentes eléctricos y precios de equipos. Se evalúan las consecuencias

de cambiar la fuente de radiación solar desde una fuente conservadora a una más holgada con un incremento del 21% en la radiación global anual. También se analizan las consecuencias de un incremento del 30% y 60% en el precio del petróleo, respecto al valor base escogido. Posteriormente se estudian los resultados bajo una modalidad de venta de electricidad al mismo precio que el de compra. Finalmente se estudian los efectos de utilizar los precios de los equipos en el mercado internacional, en vez de los precios en el mercado nacional. Los tres primeros análisis de sensibilidad se realizan para observar específicamente como varían las soluciones para el diseño que contempla un periodo de autonomía de 2 meses, mientras que el cuarto contempla un análisis de cómo repercute la variación de precios para los diferentes periodos de autonomía.

### 7.5.1 Variación del recurso solar

De la sección 3.1 quedó en evidencia que existen discrepancias respecto a la radiación para una misma zona. Para el caso base se escogió la fuente más conservadora, la cual corresponde a la Norma para Sistemas Solares Térmicos para la comuna de Vichuquén, y que ofrece una media anual de 4,19 [kWh/m<sup>2</sup>/día]. Por lo que para el análisis de sensibilidad se opta por la fuente de datos de radiación de HOMER, la cual ofrece un incremento en la radiación anual a 5,08 [kWh/m<sup>2</sup>/día] (incremento del 21%).

En la figura 7.8 se informa de los efectos sobre el costo de la energía para las diferentes tecnologías en que participa una componente fotovoltaica al incrementar la radiación global en 21%. Se aprecia que el incremento de radiación solar reduce en menor grado el costo de la energía de las soluciones óptimas para las tecnologías híbridas PV-Diesel con almacenamiento, PV-Eólica-Diesel con almacenamiento y PV-Eólica con almacenamiento. Mientras que para la tecnología PV con almacenamiento se produce una reducción en el costo de la energía cercano al 60% del valor original. Esto se explica ya que en los sistemas híbridos corresponde a una porción, mientras que para PV con almacenamiento la radiación solar corresponde a la totalidad del potencial energético en los dos meses de corte de suministro eléctrico. Por lo cual una variación del recurso impacta directamente en el precio de la energía generada.

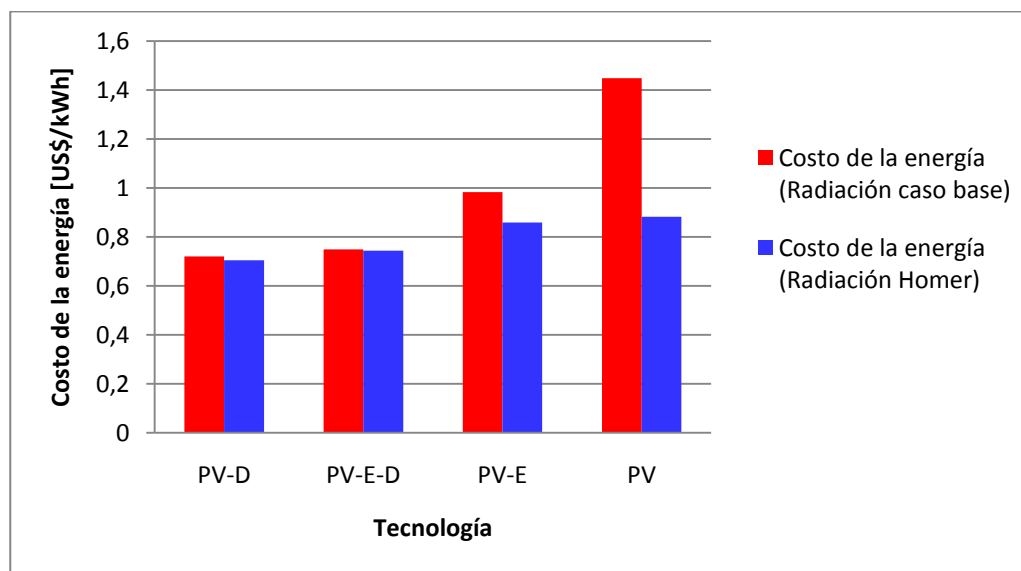


Figura 7.8: Comparación del costo de la energía para cada tecnología incrementando la radiación solar en 21%

En la tabla 7.15 se aprecia cómo afecta a la fracción energética fotovoltaica aportada por el sistema, el incremento de la radiación solar de un 21%. La primera columna corresponde a la fracción energética solar en el caso base (4,19 [kWh/m<sup>2</sup>/día), mientras que la segunda a la fracción energética solar con el incremento del 21% en la radiación (5,08 [kWh/m<sup>2</sup>/día]). Se observa un importante crecimiento en la fracción solar en los sistemas híbridos (primeros tres), mientras que para la tecnología PV con almacenamiento se mantiene la fracción.

**Tabla 7.15: Comparación de fracción solar producida para diferentes tecnologías variando la radiación en 21%**

Tecnología de abastecimiento conectada a la red	Fracción solar [%]	
PV-Diesel con almacenamiento	6	35
PV-Eólica-Diesel con almacenamiento	2	6
PV-Eólica con almacenamiento	22	44
PV con almacenamiento	75	75

### 7.5.2 Variación del precio del diesel

Para el escenario base se consideró el precio del diesel actual en Chile, es decir 1,22 US\$ (enero 2011), lo cual es muy conservador considerando que el periodo de evaluación corresponde a 25 años, y que en el contexto actual existe una clara tendencia al alza de precio.

Al aumentar de 1,22 [US\$/l] a 1,6 [US\$/l] el precio del diesel, manteniendo todas las demás magnitudes fijas, se obtiene que la mejor solución bajo el criterio económico continúa siendo el generador diesel con almacenamiento conectado a la red, en donde se conservan todas las características técnicas, pero se ve afectado el costo por unidad de energía, el cual se incrementa en 4%. Mientras que el costo marginal de generación asociado, exclusivamente, a la producción con el generador diesel aumenta de 0,517 [US\$/kWh] a 0,678 [US\$/kWh], es decir, en 31%.

Existe un cambio para la segunda tecnología más conveniente, ya que la Eólica-Diesel con almacenamiento desplaza al tercer lugar a la PV-Diesel con almacenamiento (mantienen el mismo dimensionamiento). El sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento se mantiene en la cuarta posición con un ligero incremento del costo asociado de 18355 [US\$] a 18673 [US\$], es decir del 1,7%.

Las configuraciones de las tecnologías PV, eólica e híbrida PV-Eólica con almacenamiento mantienen las mismas características y costos asociados.

De incrementarse de 1,22 [US\$/l] a 2 [US\$/l] el precio del diesel, manteniendo todos los demás parámetros con el mismo valor del caso base, se obtiene un cambio en la tecnología más conveniente, siendo el sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento la mejor opción, con un costo de energía de

0,750 [US\$/kWh], relegando al generador diesel con almacenamiento a la segunda posición (0,754 [US\$/kWh]).

En la tercera posición se mantiene el sistema PV-Diesel con almacenamiento (0,771 [US\$/kWh]). El sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento se mantiene en la cuarta posición, con un incremento del NPC a 19007 [US\$], es decir un incremento del 3,5%. Los demás sistemas en que no participa el generador diesel no ven afectados sus costos.

### 7.5.3 Variación del precio de venta de los excedentes electricidad

Para el caso base se consideró un precio de venta de 60% el valor del precio de compra de la energía eléctrica, para este análisis se incrementa el precio de venta a 100%. Es decir, a la posibilidad de que simplemente la aguja pueda girar en ambos sentidos, con el mismo valor asociado por unidad de energía. Es importante mencionar que se considera la posibilidad de vender más de lo que se compra de forma mensual, pero en el global anual el valor neto de energía debe ser positivo (Medición Neta Anual).

En la tabla 7.15 se observa la comparación en el costo por unidad de energía, entre el caso base y el caso evaluado mediante el análisis de sensibilidad, quedando al descubierto que las tecnologías mantienen sus posiciones, pero existe una reducción en el costo de la energía asociado a cada sistema salvo por la primera opción (diesel con almacenamiento) donde no se producen excedentes. La mejoría es reducida para el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento, sólo de 1,7 %. Los sistemas de generación totalmente renovable, son los que se ven más favorecidos (los tres últimos de la tabla) ya que inyectan gran cantidad de excedentes de energía

**Tabla 7.15: Comparación del costo de la unidad de energía entre caso base, en que los excedentes se pueden vender al 60% del valor de compra y el caso modificado en que tienen el mismo valor. La comparación es entre las mejores soluciones de cada tecnología para un diseño con 2 meses de corte de suministro eléctrico.**

Sistema	Caso base [US\$/kWh]	Caso modificado [US\$/kWh]	Variación [%]
<b>Diesel con almacenamiento</b>	0,699	0,699	0,0
<b>PV-diesel con almacenamiento</b>	0,72	0,711	-1,3
<b>Eólico-diesel con almacenamiento</b>	0,723	0,72	-0,4
<b>PV-Eólico-Diesel con almacenamiento</b>	0,748	0,735	-1,7
<b>Diesel</b>	0,832	0,828	-0,5
<b>Eólico-diesel</b>	0,866	0,848	-2,1
<b>PV-Eólico-Diesel</b>	0,889	0,87	-2,1
<b>PV-diesel</b>	0,937	0,931	-0,6
<b>PV-Eólico con almacenamiento</b>	0,982	0,947	-3,6
<b>Eólico con almacenamiento</b>	1,121	1,039	-7,3
<b>PV con almacenamiento</b>	1,448	1,337	-7,7

#### 7.5.4 Variación conjunta de precio del diesel y precio de venta de excedentes

Se realiza la variación conjunta de las dos variables, modificando el precio del diesel de 1,22 [US\$/l] a 2 [US\$/l] y el precio de los excedentes de energía eléctrica de 60% a 100% del precio de compra de electricidad de la red.

Se comparan los resultados entre el caso base y el modificado en la tabla 7.16. Para el caso modificado, el sistema Eólico-Diesel con almacenamiento se transforma en la mejor alternativa, con un NPC de 18108 [US\$] y un costo de energía asociado de 0,738 [US\$/kWh]. El sistema híbrido PV-Eólico-Diesel se transforma en la tercera mejor alternativa con un NPC de 18692 [US\$] y un costo de energía de 0,762 [US\$/kWh].

**Tabla 7.16: Comparación de las soluciones más convenientes para cada tecnología, entre el caso base (diesel a 1,22[US\$/l] y precio de excedentes al 60% del precio de la energía consumida de la red) y el caso modificado (diesel a 2 [US\$/l] y precio de excedentes al mismo precio que energía consumida).**

Sistema	Caso base	Caso modificado	Variación [%]
Diesel con almacenamiento	0,699	0,754	7,9
PV-diesel con almacenamiento	0,72	0,771	7,1
Eólico-diesel con almacenamiento	0,723	0,738	2,1
PV-Eólico-Diesel con almacenamiento	0,748	0,762	1,9
Diesel	0,832	0,937	12,6
Eólico-diesel	0,866	0,921	6,4
PV-Eólico-Diesel	0,889	0,941	5,8
PV-diesel	0,937	1,028	9,7
PV-Eólico con almacenamiento	0,982	0,947	-3,6
Eólico con almacenamiento	1,121	1,039	-7,3
PV con almacenamiento	1,448	1,214	-16,2

El sistema híbrido Eólico-diesel con almacenamiento conectado a la red que representa la solución más económica para el caso modificado, está compuesto por una turbina A1000 que genera 1605 [kWh/año] (57% del total de la producción), un generador diesel de 1,5 [kVA] (4% del total de la producción), y obtiene 1080 [kWh] de la red (39% del total).

La demanda eléctrica total de la posta correspondería a 1920 [kWh] (73% de la producción) y se inyectarían a la red 721 [kWh] (27% de la producción). El sistema tiene un banco de dos baterías G100 y un inversor-rectificador VC800 de 0,8 [kVA] de potencia nominal aparente. La fracción renovable producida corresponde al 57,4 %, y las emisiones asociadas al abastecimiento total son de 374 [kg/año].

Respecto al sistema híbrido PV-Eólico-Diesel conectado a la red con almacenamiento que representa la mejor solución, corresponde al mismo sistema presentado en el capítulo 7.4.

### 7.5.5 Variación del precio de los equipos del mercado nacional al mercado internacional

Para el caso base se utilizaron los precios de equipos en el mercado nacional, donde se observan precios de hasta 300% el valor en los mercados internacionales para los módulos fotovoltaicos. Debido a esta gran diferencia, se realiza un análisis utilizando los valores de los equipos en el mercado internacional, estableciendo una comparación entre el costo de la energía producida con los precios en el mercado nacional y el mercado internacional. Se destaca que se utilizan los mismos equipos para el análisis.

En la figura 7.9 se aprecia la comparación del costo por unidad de energía de las tecnologías PV-Eólica-Diesel con almacenamiento óptimas para diferentes periodos de autonomía, entre el diseño con precios nacionales (azul) y precios internacionales (rojo). Se observa que a mayor autonomía el costo por unidad de energía se incrementa a una mayor tasa para las configuraciones con precios nacionales que con precios internacionales. Se aprecia que el costo por unidad de energía con equipos comprados en Chile se encuentra en torno a un 60% más costoso que el costo por unidad de energía de un sistema con equipos comprados en países donde el mercado se encuentra desarrollado (España, Alemania, entre otros).

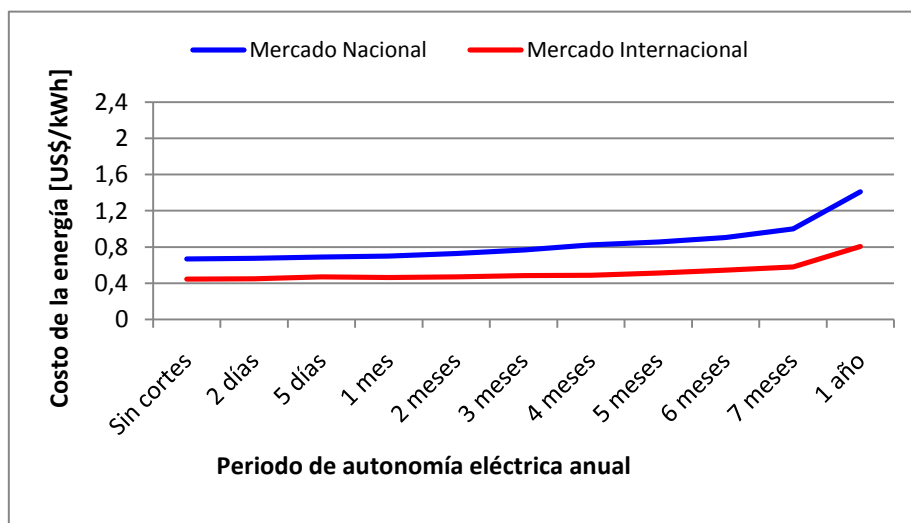
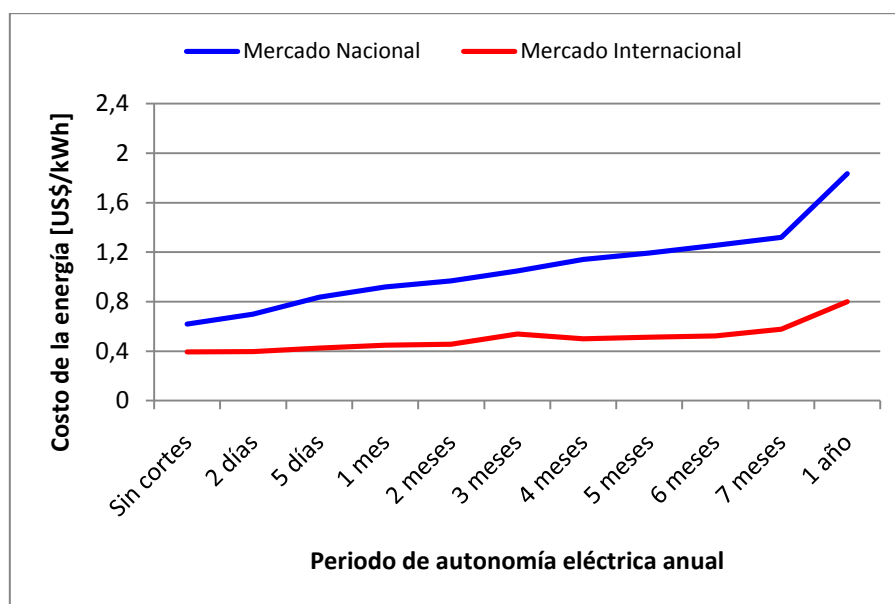


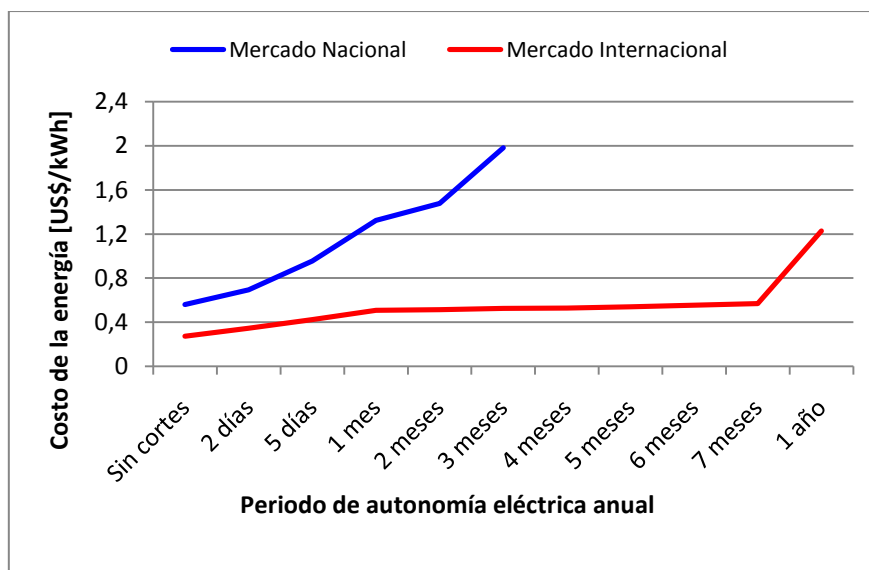
Figura 7.9: Comparación del costo de energía para sistema Híbrido PV-Eólico-Diesel con precios nacionales e internacionales

En la figura 7.10 se observa la comparación del costo por unidad de energía para los sistemas óptimos PV-Eólico con almacenamiento, con precios nacionales (línea azul) y precios internacionales (línea roja). En esta comparación queda en evidencia una mayor diferencia en el costo por unidad de energía al variar el mercado en el cual se adquieren los equipos.



**Figura 7.10: Comparación del costo de energía para sistema Híbrido PV-Eólico con precios nacionales e internacionales**

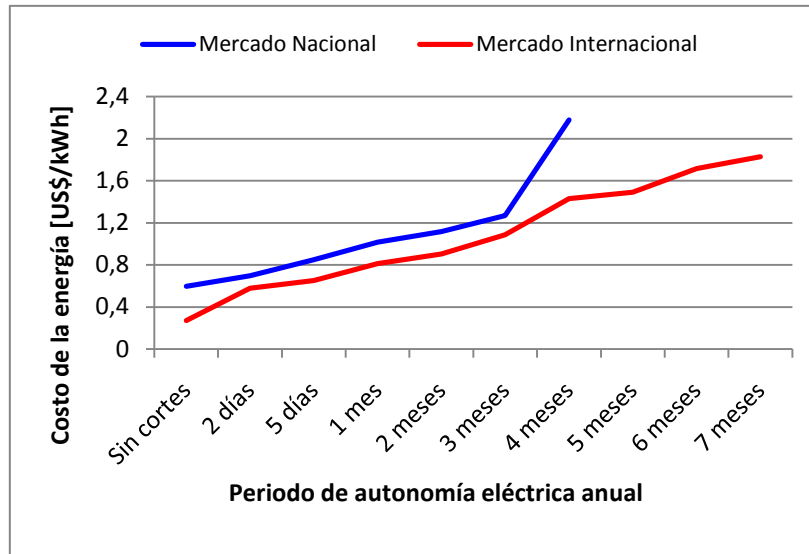
En la figura 7.11 se aprecia la comparación del costo por unidad de energía para las soluciones óptimas en base a tecnología PV con almacenamiento. Queda en evidencia una creciente diferencia a medida que aumenta la autonomía, lo cual informa que la tecnología fotovoltaica no presenta un mercado maduro en Chile lo cual repercute de forma negativa en el desarrollo de esta tecnología.



**Figura 7.11: Comparación del costo de energía para sistema PV para precios nacionales e internacionales**

En la figura 7.12 se observa la comparación del costo por unidad de energía para los sistemas óptimos Eólicos con almacenamiento, utilizando precios de equipos nacionales (curva azul) y precios internacionales (curva roja). Claramente el costo por unidad de energía generada es mayor al adquirir los equipos con precios nacionales en comparación con adquirirlos en el mercado internacional. Pero no se

observa una diferencia porcentual tan alta ni creciente como lo que ocurre con los equipos fotovoltaicos. Esto muestra que el mercado de los aerogeneradores se encuentra más desarrollado que el de los módulos fotovoltaicos. Esto produce en términos globales, que para la Posta de Boyeruca la tecnología renovable más económica y preponderante sea la eólica.



**Figura 7.12:** Comparación del costo de energía de sistema PV para diferentes periodos con precios nacionales e internacionales



## Capítulo 8

# Conclusiones

### 8.1 Conclusiones respecto a la metodología desarrollada

El trabajo realizado permitió desarrollar una metodología para el diseño de un sistema de abastecimiento híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red, entregando una guía que permite la elaboración de un sistema de abastecimiento eléctrico que sea capaz de ofrecer autonomía energética a un determinado recinto, en caso de un corte del suministro eléctrico, cuyo periodo de corte lo define quien diseña. Además, el sistema tiene la capacidad de inyectar los excedentes eléctricos a la red mediante el sistema de Medición Neta (Net Metering). Esta memoria coopera directamente con un área escasamente desarrollada, ya que la mayor cantidad de estudios respecto a sistemas híbridos se realizan sobre configuraciones aisladas o conectadas a la red sin considerar cortes de suministro eléctrico.

A través de la metodología aquí desarrollada, se pueden estimar datos utilizables de radiación solar y energía eólica en un lugar específico de Chile, mediante el análisis en zonas cercanas. Se enuncian las principales fuentes de datos de irradiación solar y velocidad del viento, planteándose el procedimiento para su adaptación y utilización a un sitio específico en el cual se planifique desarrollar el sistema de abastecimiento eléctrico. Se caracterizan también todos los demás parámetros que permiten determinar el potencial energético solar y eólico.

En lo que concierne a la demanda eléctrica, se verifica lo importante de que su definición sea lo más cercana al consumo real, para el correcto dimensionamiento y configuración del sistema de abastecimiento. Se establece un procedimiento para la determinación de una demanda modificada asociada a un consumo más eficiente (ahorro energético a través del cambio de luminarias), y se define el procedimiento para la determinación de una demanda básica que corresponda a un consumo eficiente y restringido durante el periodo de autonomía.

Del estudio de los componentes de un sistema híbrido, quedó al descubierto que cada tecnología tiene asociado detalles importantes, que se deben observar en el proceso de selección, características que tienen directa relación con la eficiencia y vida útil de los equipos.

A través de la utilización de HOMER, quedó de manifiesto que es una gran herramienta de optimización económica para sistemas de abastecimiento energético híbridos, al caracterizar técnica y económicamente cada sistema de abastecimiento posible (para la Posta de Boyeruca se analizaron 118.000 por cada simulación), entregando de forma ordenada las alternativas. Lo cual favorece la eficiencia en el diseño de las tecnologías híbridos renovables, y por ende su expansión. Pero HOMER también presenta variadas limitantes que se hicieron visibles durante el proceso de incorporación de información. Se pueden citar: la imposibilidad de incluir tasas de variación anual en ciertos aspectos económicos (por ej. costo

diesel o precio de la red) o una deficiencia debido al paso temporal de una hora con que evalúa, en donde las demandas energéticas de corta duración y transientes se atenúan, simplificando en demasía el proceso. Otra desventaja es que equipos como los inversores y rectificadores presentan eficiencias variables de acuerdo al punto de aplicación, variabilidad que no se puede introducir a HOMER.

## 8.2 Conclusiones respecto al caso de la Posta de Boyeruca

De la ejemplificación y validación de la metodología al caso de la Posta de Boyeruca se obtienen las siguientes conclusiones:

- En una evaluación de 25 años con las condiciones actuales, la tecnología económicamente más conveniente dentro de las evaluadas para un periodo de corte de suministro eléctrico entre un día y un mes por año, corresponde a un generador diesel de 1,5 [kVA] que opere, exclusivamente, durante el corte. Al ampliar el periodo de corte a 2 meses, continúa siendo conveniente el generador, pero se incluye un sistema de almacenamiento, lo cual demuestra que en el proceso de selección juega un rol importante la curva de eficiencia del generador diesel, siendo conveniente en este caso trabajar a plena carga abasteciendo la demanda y cargando las baterías, para luego mantener apagado el generador mientras se descargan las baterías hasta el mínimo estado de carga.

Para mayor cantidad de meses de autonomías (3 a 6 meses) se incorpora la energía eólica al sistema expuesto, imponiéndose esta fuente sobre la fotovoltaica. Finalmente para una autonomía de 7 meses o superior, la solución óptima corresponde a un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento. En este caso la porción instalada PV es menor a la componente eólica, pero va incrementando a mayor autonomía. A mayor periodo de autonomía el costo de la energía para las soluciones óptimas se incrementa con tendencia lineal, desde 0,501 [US\$/kWh] para 2 días a 1,41 [US\$/kWh] para un sistema totalmente autónomo (12 meses durante 25 años). En lo que concierne a fracción renovable de producción, esta también incrementa con la autonomía (analizando la solución óptima de cada periodo).

La posibilidad de inyección de excedentes de energía mediante “Medición Neta” resulta una herramienta importante en favorecer la eficiencia y la evaluación económica de los proyectos que involucran alta autonomía. Específicamente, cuando la fuente es eólica o/y PV, ya que evitan la pérdida de los excedentes, que en algunos superan el 50% de lo producido, cantidad que no se almacena por el costo de agregar mayor cantidad de baterías.

- Para el caso específico de 2 meses de autonomía para la Posta de Boyeruca, el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento corresponde a la cuarta tecnología más conveniente con un NPC de 18.355 [US\$], que representa un costo 7% mayor al de la mejor alternativa, y tiene asociada una fracción de producción renovable del 59%. En esta solución la generación mayoritaria pertenece a la eólica (57%), luego la red (37%), después el generador diesel (4%) y,

finalmente, PV (2%). La tecnología diesel sin almacenamiento se encuentra en la quinta posición lo que confirma la importancia de la curva de eficiencia del generador diesel. La tecnología híbrida Eólica-Diesel con almacenamiento se impone en el tercer lugar, y la híbrida PV-Diesel con almacenamiento en el segundo, pero con una escasa fracción de producción PV (6%).

De las demás soluciones se concluye que la producción eólica con almacenamiento y PV con almacenamiento, son por sí solas muy caras ubicándose en el décimo y undécimo lugar de tecnologías respectivamente bajo criterio económico, con gran potencia instalada (2 aerogeneradores de 1 [kW] de potencia máxima y 2,160 [kW] en generación fotovoltaica). También, es claro que a mayor penetración de ERNC (solar y/o eólica) en las soluciones, mayor es la inversión pero se reducen drásticamente los costos de O&M.

### 8.3 Conclusiones respecto a los análisis de sensibilidad

- El incremento en la radiación anual reduce en menor grado el porcentaje el costo asociado a la tecnología híbrida PV-Eólica-Diesel con almacenamiento óptima. Ya que a pesar del incremento del potencial energético, la unidad de energía generada continúa siendo elevada debido al alto costo de los paneles asociados y a su reducida participación en el global de la producción.
- El incremento en la radiación global reduce el dimensionamiento de los equipos fotovoltaicos asociados al sistema PV con almacenamiento.
- De aumentar el precio del diesel a 1,6 [US\$/l] se mantiene el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento en el cuarto lugar, pero el proyecto sería sólo 4,8 % más costoso que la solución óptima diesel con almacenamiento. Las 4 tecnologías más económicas mantienen su configuración (equipos y estrategia de despacho).
- De aumentar el precio del diesel a 2 [US\$/l] el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento se mantiene en el cuarto lugar, pero el proyecto sería sólo 3,2 % más caro que la solución óptima. La tecnología más económica cambia, el sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento desplaza al generador diesel con almacenamiento. Todos los sistemas que involucran generación diesel aumentan su costo, mientras las renovables con almacenamiento no se ven afectadas.
- De existir un sistema Net Metering, en el cual los excedentes inyectados se coticen al mismo valor que la energía consumida, con posibilidad de acumulación anual, todas las tecnologías con ventas de excedentes se ven favorecidas, particularmente, el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel que disminuye su costo en 3,7 % al aumentar el precio de venta de los excedentes de 60% a 100% al precio de compra.

- Para el escenario en que se incrementan, conjuntamente, el precio del petróleo y el precio de venta de los excedentes, el sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento pese a aumentar el precio respecto al caso base, se ubica en la tercera tecnología más conveniente, siendo sólo 3,2 % más costosa que el sistema híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento (tecnología más conveniente).
- El sistema más conveniente desde el punto de vista económico para la Posta de Boyeruca (2 meses de autonomía), bajo los criterios utilizados dependerá plenamente de la evolución del precio del diesel, de las características del convenio de venta de los excedentes de electricidad y sobre todo del desarrollo de los mercados de los equipos. De continuar con el alza del diesel actual e implementarse un sistema de Medición Neta que incentive en gran medida las ERNC, el sistema más conveniente sería el híbrido Eólico-Diesel con almacenamiento.

#### **8.4 Conclusiones generales obtenidas respecto a la utilización de sistemas híbridos**

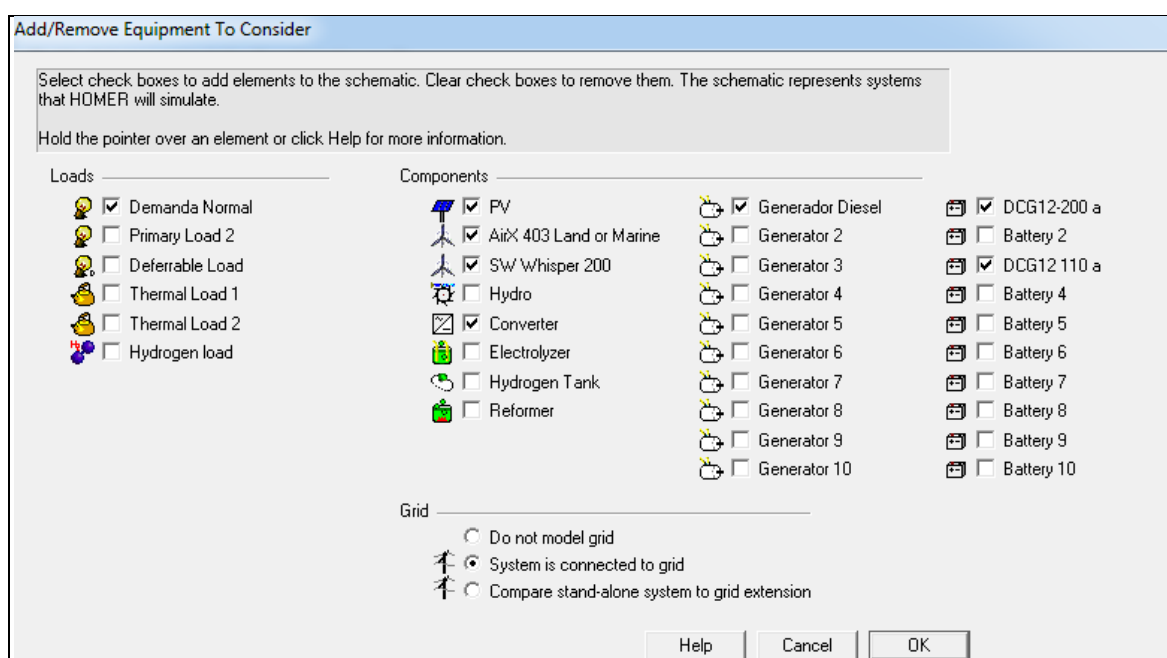
- En términos generales, queda al descubierto que dada la condición actual, los sistemas de abastecimiento híbridos PV-Eólico-Diesel con almacenamiento, representan una opción conveniente de abastecimiento para recintos que presenten cortes de suministros excesivamente prolongados. Y no representan una opción económica para requerimientos de bajos periodos de autonomía. Lo anterior dada la situación actual con los elevados precios de este mercado en Chile.
- Se observa como el generador diesel se complementa muy bien con el carácter fluctuante de las ERNC, permitiéndole ahorrar un importante gasto en lo que significaría baterías o incremento en el dimensionamiento de los equipos renovables.
- Es importante en el momento de seleccionar el equipo diesel, dimensionarlo de forma adecuada, ya que para reducir costos y emisiones, lo ideal es trabajar en la zona más elevada de la curva de eficiencia (idealmente, a plena carga).
- El sistema de Medición Neta incentiva la utilización de ERNC e incluye un nuevo personaje, el “consumidor-generador”, lo cual favorece la autonomía local. Mientras más conveniente sea en lo económico el sistema de Medición Neta para el posible “consumidor-generador”, se expandirán más rápidamente las ERNC, ya que la Medición Neta aumenta la eficiencia y disminuye los costos de sistemas de abastecimiento con fuentes renovables. Ya que quita la barrera típica de los sistemas sin posibilidad de inyección, barrera asociada a la variabilidad del recurso solar y eólico, y su compatibilidad con el perfil de demanda. EL trabajo conjunto con la red permite inyectar cuando hay excedentes y consumir energía, cuando se necesita.

- Del cambio de escenario realizado al utilizar precios internacionales en vez de nacionales, se observa que la falta de maduración del mercado de los generadores fotovoltaicos en Chile y en menor medida de los aerogeneradores y demás componentes, desfavorece en demasía su utilización. Este factor es el fundamental en los elevados costos de la generación renovable para la aplicación a la “Posta de Boyeruca”. Quedando de manifiesto que los sistemas híbridos, se verán favorecidos a medida que el mercado se encuentre más desarrollado. Particularmente el mercado de los generadores fotovoltaicos, el cual presenta precios de hasta un 300% del valor de un mismo equipo en el mercado internacional.

# Anexos

## Anexos A: Guía para la aplicación de la metodología

En una primera etapa se define el recinto sobre el cual se estudia la implementación del sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red. Luego en HOMER se establecen las cargas y componentes que participan del análisis. En la evaluación no participan cargas térmicas, tampoco las cargas de hidrógeno, debido a que es una tecnología cara y en reciente desarrollo, por las mismas razones tampoco se analizan componentes como celda de combustible, tanque de hidrógeno y reformador con vapor. En la figura A.1 se muestra la ventana que describe la selección.



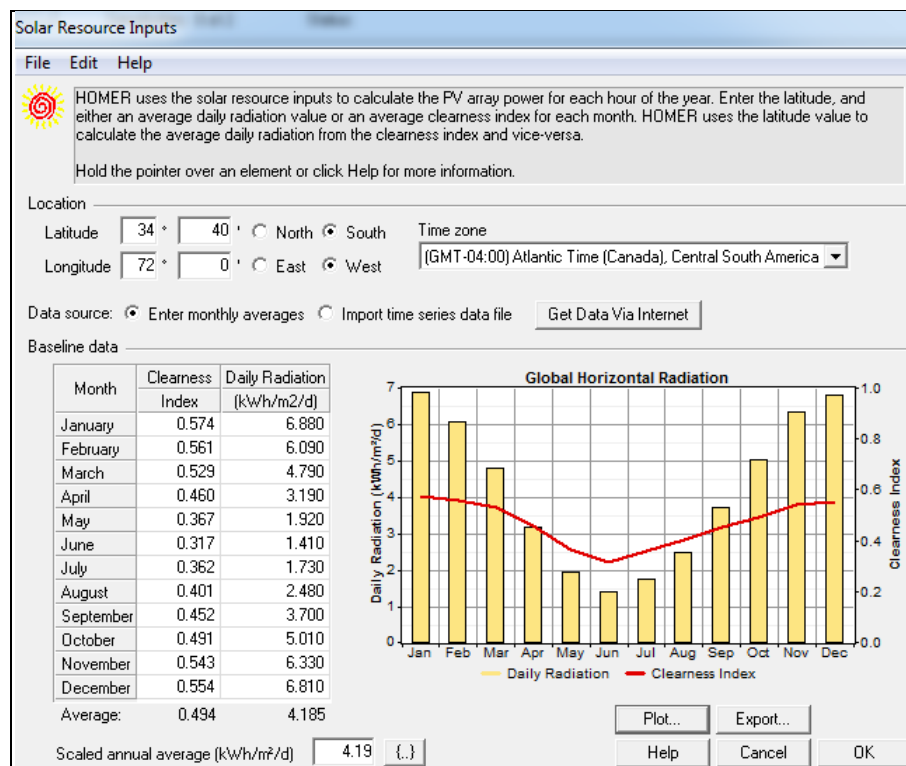
**Figura A.1: Selección de equipos, tipo de carga y almacenamiento que participa en el sistema de abastecimiento**

Se buscan datos de libre utilización asociados a las fuentes energéticas solar y eólica, en las zonas más cercanas al recinto, pudiendo ser estos datos: medidos en terreno, proyecciones satelitales o simulaciones mediante algún modelo. Para datos solares basta con conocer la irradiación global diaria media representativa de cada mes ( $[kWh/m^2/día]$ ), mientras que para el viento se requiere de un intervalo menor entre los datos de velocidad del viento obtenidos, idealmente un intervalo de 15 minutos o menor durante al menos un año.

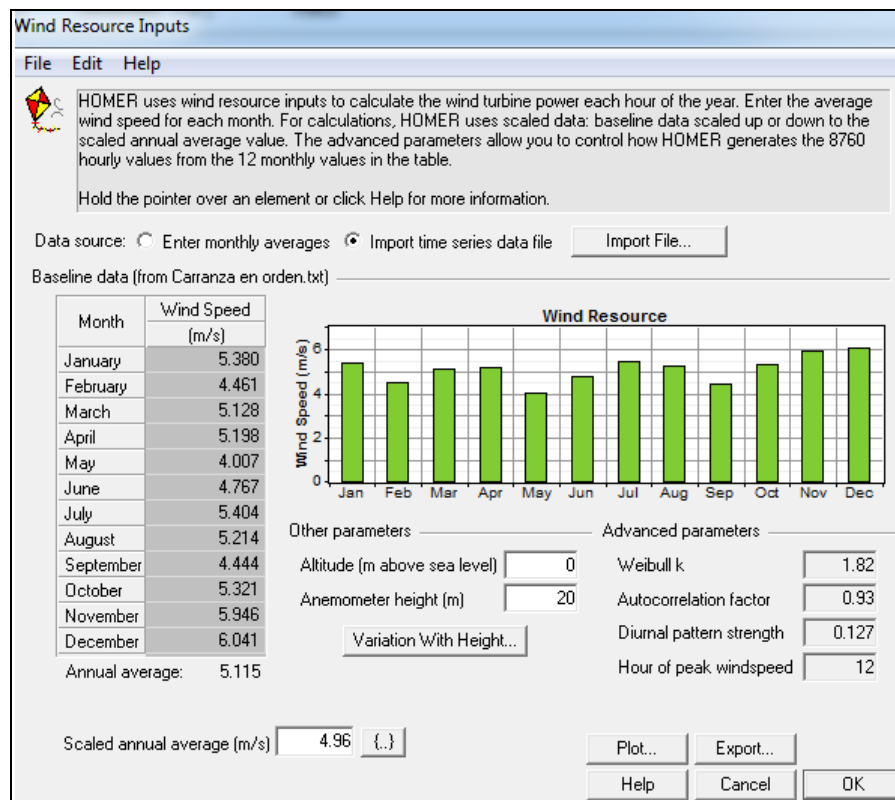
Otra alternativa es conocer la velocidad media mensual del viento y el parámetro de forma de la distribución probabilística asociada a la zona de estudio o de algún lugar cercano. Una vez obtenido los datos respecto a irradiación y velocidad del viento se escoge un criterio de selección, ya que los datos varían de acuerdo a la fuente [Capítulo 3].

Para la radiación solar se puede usar un criterio conservador, escogiendo el conjunto de datos de irradiación proveniente de la fuente que ofrece una menor media anual, o un criterio más holgado que promedie los valores mensuales de todas las fuentes, o algún otro criterio. Para el viento en cambio se aconseja obtener el registro anual (por lo menos un año de evaluación) de la velocidad del viento de una zona cercana, y escalar a través de HOMER la velocidad media anual de este registro a la velocidad media anual obtenida de los datos NASA. Esto permite obtener la geometría de la distribución probabilística y escalarlo al cuadrante en que se ubica el recinto.

Existen parámetros que se deben incorporar, tal como la latitud, longitud, altura de medición, altura sobre el nivel del mar del recinto, longitud de rugosidad entre otros. En las figuras A.2 y A.3 se observa la incorporación de datos respecto a la radiación solar y a la distribución de viento para el caso de la Posta de Boyeruca. También se deben añadir datos respecto a la fuente energética no renovables (precio y límite de consumo).



**Figura A.2: Interfaz de introducción de datos respecto a Recurso Solar**



**Figura A.3: Interfaz de introducción de datos respecto a Recurso Eólico**

Se establece la demanda eléctrica del recinto midiendo a través de un data logger con un paso de 5 minutos entre medición, estableciendo el patrón de consumo característico, distinguiendo la demanda en los días laborales y en los del fin de semana (ya que tienen demandas características). Ya que no existen medidas de ahorro energético, se realiza una disminución del consumo a través del cálculo de una “demanda modificada” que incorpora luminarias de ahorro energético, lo que para el caso de la posta Boyeruca permite un ahorro del 25%.

También para el periodo de corte de suministro eléctrico se define un “demanda básica”, que consiste en definir un perfil donde las cargas conectadas sean sólo las estrictamente necesarias (refrigerador, radio, luminarias y negatoscopio) utilizándose de forma restringida. Es importante definir la potencia peak para la demanda modificada y para la demanda básica.

Se incorpora a HOMER la “demanda eléctrica modificada”, que se introduce como perfil de consumo durante los días que el recinto se encuentra con abastecimiento de electricidad de la red (días en que no hay corte del suministro eléctrico). Posteriormente se incorpora a HOMER la “demanda eléctrica básica” para los días en que el sistema debe funcionar de forma autónoma sin suministro de la red (bajo corte de suministro eléctrico).

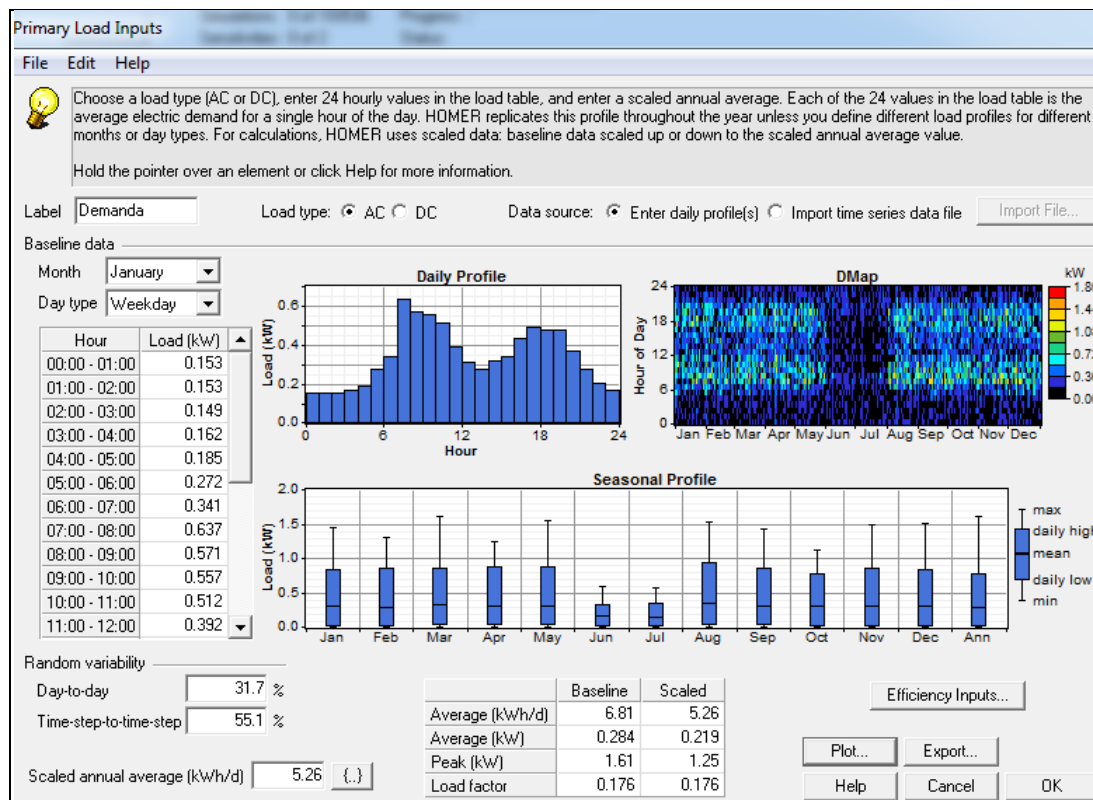
Para el desarrollo de la etapa enunciada se debe haber definido como parámetro de diseño, el periodo de corte de suministro eléctrico para el cual se desarrolla el proyecto, para así incorporar ambas demandas en los meses correspondientes.



En el caso de la Posta de Boyeruca, para poder establecer un completo análisis se analizaron todos los periodos posibles de corte de suministro eléctrico dadas las restricciones de HOMER, estos son: sin cortes (0 día), 2 días a la semana en un mes, 5 días a la semana en un mes y desde 1 mes hasta los 12 meses (todo el año sin suministro). El estudio detallado se realizó sobre un periodo de autonomía de 2 meses al año, ya que este fue el tiempo que la posta estuvo sin energía eléctrica después del terremoto. Además de ser un periodo holgado considerando que la simulación involucra 25 años de evaluación, y cada año tendrá asociado un corte de tales características.

En la figura A.4 se observa la resultante al incluir la demanda eléctrica modificada y la demanda eléctrica básica en el patrón de consumo, se destaca que se escogió junio y julio como meses de corte de suministro eléctrico, ya que es en invierno cuando se registran la mayor cantidad de cortes en la zona escogida (para otras zonas puede variar el intervalo y momento del corte).

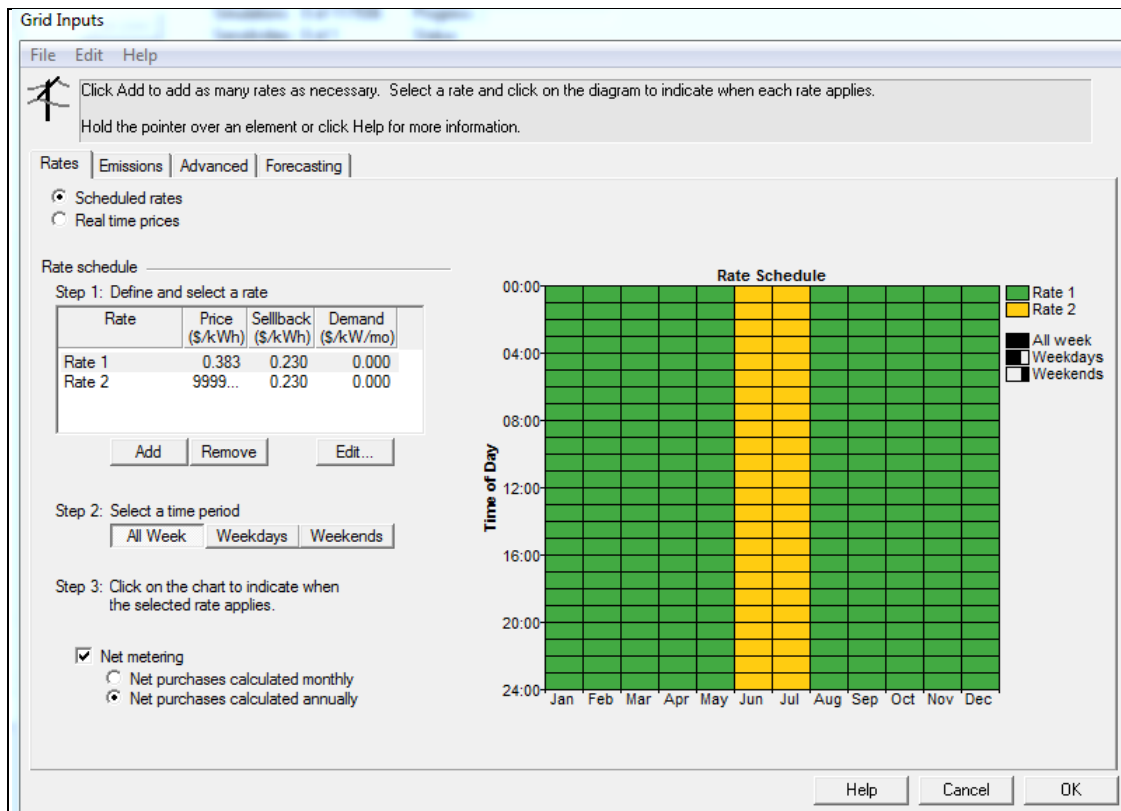
Los ítems asociados a las desviaciones estándar se obtienen del cálculo a través del registro original obtenido mediante data logger, mientras que se escoge la opción “Introducir perfil diario” y no “Importar serie de datos de archivo”, ya que no se posee un registro anual, sólo se tienen 21 días para el caso de la Posta de Boyeruca, por lo cual se calculan manualmente a través de una planilla de cálculo, los promedios horarios para “días laborales” y “fin de semana” de los datos registrados por el data logger. Se escala a un 75% la demanda registrada, para así obtener la “demanda eléctrica modificada”, en los meses que el recinto se encuentra abastecido por la red.



**Figura A.4: Introducción de demanda eléctrica modificada y demanda eléctrica básica a HOMER**

Posteriormente, se restringe la venta de electricidad desde la red para el periodo en que se presenta el corte de suministro eléctrico (2 meses para la Posta de Boyeruca), lo cual se realiza elevando a un gran valor la tarifa de la red para tal periodo, y como el criterio de selección de HOMER es económico, automáticamente, la solución óptima considera otro tipo de sistema de abastecimiento (distinto a la red) para esos meses de autonomía.

Esto se logra introduciendo dos tipos de tarifas: una para los meses de conexión a la red que considera el valor de la electricidad con que se diseña y otra excesivamente alta para los meses de corte de suministro eléctrico. La Figura A.5 muestra la incorporación de ambas tarifas. En esta ventana se coloca toda la información referente a las propiedades del suministro eléctrico de la red.



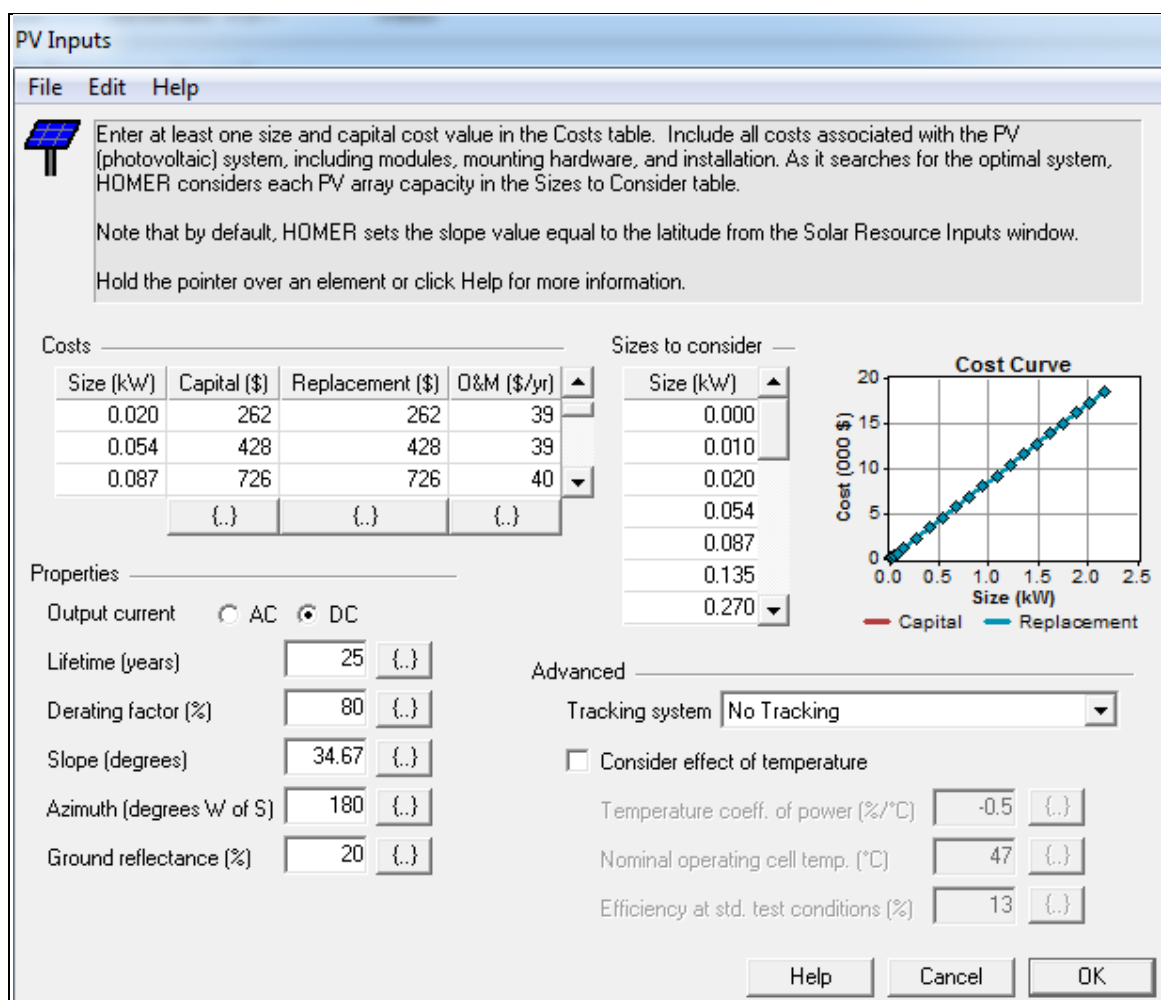
**Figura A.5: Incorporación de tarifa diferenciada durante junio y julio para lograr autonomía**

Luego se definen los posibles equipos que participarán en las diversas configuraciones.

Ya que el presente trabajo se centra en un sistema híbrido PV-Eólico-Diesel con almacenamiento conectado a la red, se buscan equipos presentes en el mercado con sus características técnicas y económicas. Éstos deben encontrarse en el orden de potencias que se ajusten a la demanda eléctrica, para que en el proceso de selección, HOMER evalúe variadas configuraciones, y que la seleccionada sea la más conveniente. Es decir, que la capacidad de los componentes introducidos no limite la configuración.

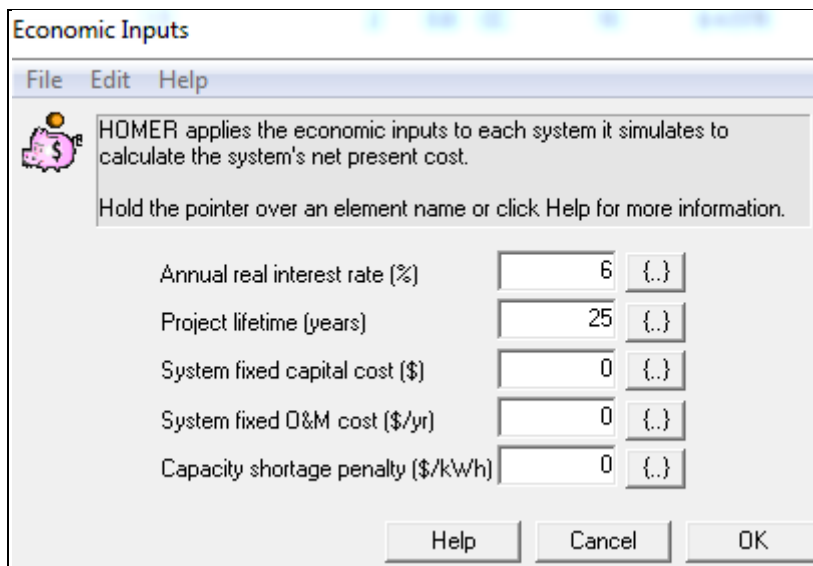
Es importante mencionar que HOMER no restringe la incorporación de cantidades para cada equipo introducido, lo que permite obtener un rango amplio en la capacidad para cada componente (por ej. 1,2 o 3 unidades de aerogeneradores A1000).

En lo que concierne a características técnicas y económicas, en el Capítulo 5 se encuentra el detalle de los principales equipos presentes en el mercado chileno para una demanda pequeña (casa, posta rural, escuela rural, entre otros). Un ejemplo de incorporación es el que se expone en la figura A.6, el que corresponde a los paneles fotovoltaicos.

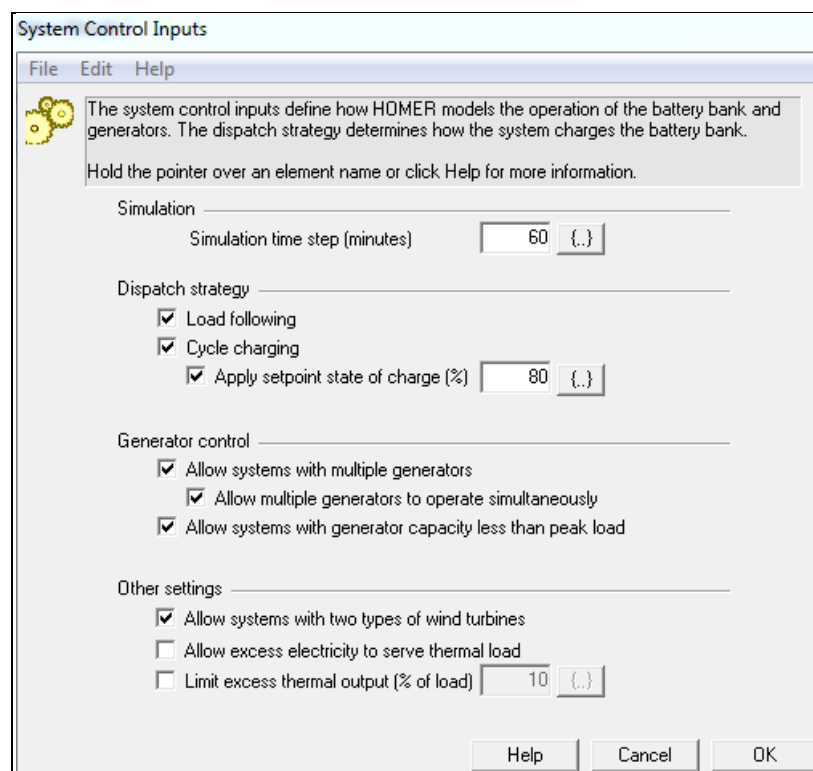


**Figura A.6: Incorporación de datos asociados a los paneles fotovoltaicos**

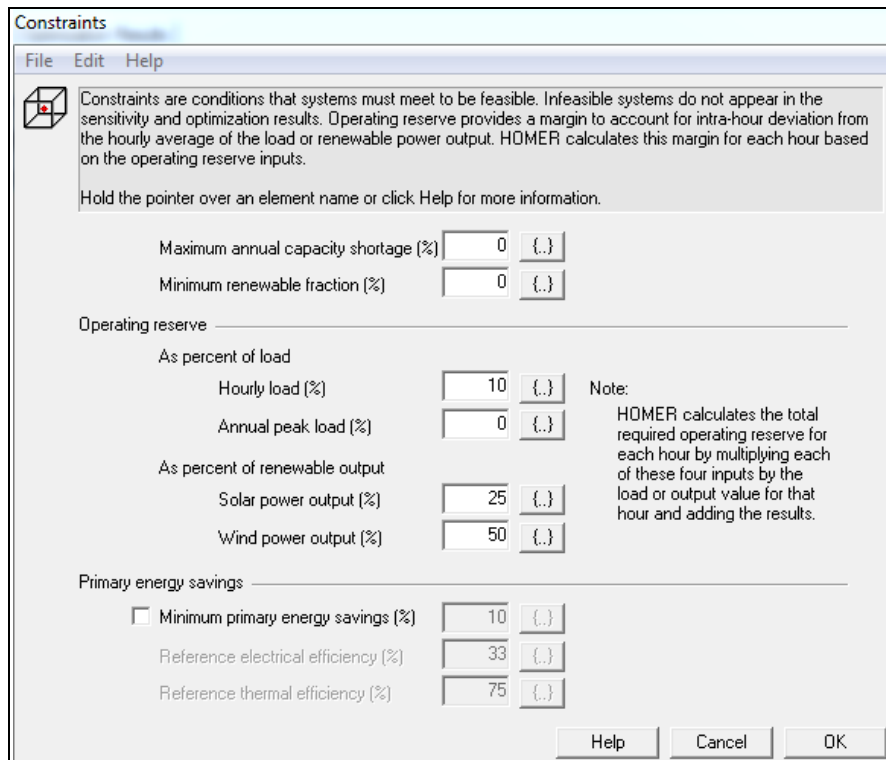
En lo referente a la fijación de criterios económicos de medición, sistema de control, penalizaciones y límites de emisiones, y restricciones, queda a criterio de quien realice la simulación ya que depende en demasía del objetivo y el tamaño del proyecto. Para el caso de la Posta de Boyeruca los inputs corresponden a los expuestos en las figuras A.7, A.8 y A.9. No se consideran límites ni penalizaciones por emisiones, debido a la pequeña demanda eléctrica asociada.



**Figura A.7: Incorporación de parámetros económicos**

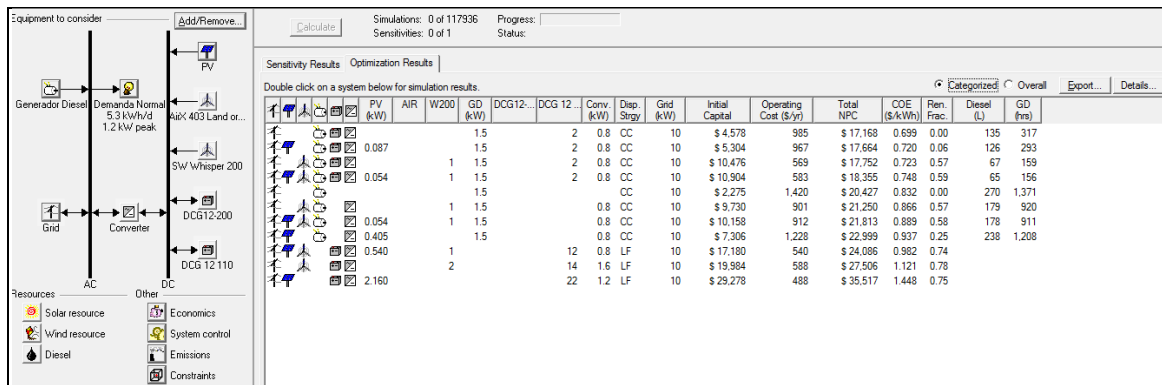


**Figura A.8: Incorporación de parámetros asociados a sistema de control y despacho energético**



**Figura A.9: Restricciones operacionales**

Ya ingresados los datos, anteriormente, expuestos se simula y HOMER optimiza, luego presenta las configuraciones de menor costo en forma ordenada. Se puede observar de manera específica la configuración y estrategia más convenientes para cada tecnología (por ej. PV-Eólica con almacenamiento conectada a la red). Se obtiene un completo detalle técnico y económico para cada solución. La evaluación se centra en la tecnología PV-Eólica-Diesel con conexión a la red. En la figura A.10 se visualizan los resultados ordenados por NPC para las distintas tecnologías.



**Figura A.10: Resultados entregados por HOMER bajo criterio económico**

Se pueden incluir análisis de sensibilidad para observar la dependencia de las soluciones respecto a las variables analizadas. Se recomienda modificar el precio del diesel y el contrato de venta de la los excedentes de energía para observar la evolución de la tecnología híbrida, y observar bajo qué magnitudes resulta ser la más conveniente.

## Anexos B: Codificación de equipos utilizados

A continuación se enuncian los códigos asociados a los equipos que se utilizaron para el desarrollo del trabajo.

- Paneles Fotovoltaicos

**Tabla B.1: Códigos para paneles fotovoltaicos**

<b>Código</b>	<b>Equipo real</b>
SK10	Solartec KS10
SK20	Solartec KS20
K50	Kyocera KC50T
K85	Kyocera KC85T
K135	Kyocera KD135SX-UPU

- Aerogeneradores

**Tabla B.2: Códigos para aerogeneradores**

<b>Código</b>	<b>Equipo real</b>
A400	AirX marine
A1000	WHISPER200

- Baterías AGM y Gel

**Tabla B.3: Códigos para baterías AGM**

<b>Código</b>	<b>Equipo real</b>
P26	POWER PS SONIC PS-12260
P55	POWER PS SONIC PS-12550
P100	POWER PS SONIC PS-121000
P210	POWER PG SONIC PG-12V200

**Tabla B.4: Códigos para baterías de Gel**

<b>Código</b>	<b>Equipo real</b>
G100	POWER PS SONIC DCG12-100
G200	POWER PS SONIC DCG12-200

- Inversores simples

**Tabla B.5: Códigos para inversores simples**

<b>Código</b>	<b>Equipo real</b>
V180	Victron Phoenix 12/180
V350	Victron Phoenix 12/180
V750	Victron Phoenix 12/180
V1200	Inversor Victron Phoenix C 12/2000
V1600	Inversor Victron Phoenix C 12/1200
V2000	Inversor Victron Phoenix C 12/1600

- Inversor-rectificador con posibilidad de sincronizarse a la red

**Tabla B.6: Códigos para inversor-rectificador con posibilidad de sincronizarse a red**

<b>Código</b>	<b>Equipo real</b>
VC800	Victron Multiplus C 24/800/16
VC1200	Victron Multiplus C 24/1200/25
V1600	Victron Multiplus C 24/1600/40
V2000	Victron Multiplus C 24/2000/50
V3000	Victron Multiplus C 24/3000/70

# Bibliografía

- [1] Seeling-Hochmuth, "A combined optimisation concet for the design and operation strategy of hybrid-PV energy systems", *ScienceDirect*, p. 1, 1997.
- [2] CNE. (2003) SUBDERE. [En línea]. [http://www.subdere.gov.cl/1510/articles-79484\\_recurso\\_1.pdf](http://www.subdere.gov.cl/1510/articles-79484_recurso_1.pdf)
- [3] National Renewable Energy Laboratory. (2004) NREL. [En línea]. [https://analysis.nrel.gov/homer/includes/downloads/HOMERBrochure\\_Spanish.pdf](https://analysis.nrel.gov/homer/includes/downloads/HOMERBrochure_Spanish.pdf)
- [4] Instituto de Ecología Política. (2010) Iniciativas para la Reconstrucción Sustentable de Caleta Boyeruca, Región del Maule. [En línea]. <http://www.boyeruca.org/wp-content/uploads/2010/03/INFORME.TECNICO-FINAL.pdf>
- [6] D. Yogi Goswami y Frank Kreith,. Florida: D. Yogi Goswami y Frank Kreith, 2007, pp. 5-1.
- [7] Guillermo Jiménez Estévez, Ignacio Alarcón Áreas Dr. Rodrigo Palma Behnke,. Santiago, 2009, pp. 26-27.
- [8] William Beckman John A. Duffie,,: John Wiley & Sons, INC., 1980, pp. 13-21.
- [9] Roberto Román. (2009) cursos. [En línea]. <https://www.ucursos.cl/ingenieria/2009/2/ME716/1/historial/>
- [10] Rodolfo Lufo López,.., 2007, pp. 40-53.
- [11] SEC. Norma Técnica que determina algoritmo para la verificación de la contribución solar mínima de los Sistemas Solares Térmicos acogidos a la franquicia tributaria de la Ley N°20365. [En línea]. [http://www.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/02\\_Noticias/descargas\\_noticias/Norma\\_Tecnica\\_Actualizada.pdf](http://www.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/02_Noticias/descargas_noticias/Norma_Tecnica_Actualizada.pdf)
- [12] PNUD,GEF, UTFSM CNE, "Registro Solarimétrico", Santiago de Chile, 2008.
- [13] NASA. (2010) NASA. [En línea]. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- [14] Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Proyecto Cóndor. [En línea]. <http://condor.dgf.uchile.cl>
- [15] HOMER. Base de datos HOMER. [En línea]. <http://HOMERenergy.com>



- [16] Dale E. Berg, "Energy Conversion", en *Energy Conversion.*, 2007, pp. 6-1-6-8.
- [17] David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bassanyi Tony Burton,.: John Wiley & Sons, 2001, pp. 19-20.
- [18] CNE. Estaciones de monitoreo. [En línea]. [http://www.minenergia.cl//minwww/opencms/03\\_Energias/Otros\\_Niveles/renovables\\_noconvencionales/Tipos\\_Energía/eolica.html](http://www.minenergia.cl//minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_noconvencionales/Tipos_Energía/eolica.html)
- [19] Departamento de Geofísica de la Facultad de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, "Proyecto Eolo", 1993.
- [20] IEE, "Synergy Potential of Smart Appliances", Bonn Alemania, 2008.
- [21] David Watts. Net Metering. [En línea]. <http://smartgridchile.com/NetMetering.aspx>
- [22] Solener, Precios paneles Fotovoltaicos con garantía de 25 años.
- [23] Eshia Energía, Precios de paneles fotovoltaicos con 10 años de garantía.
- [24] José L. Bernal-Agustín Rodolfo Dufo-López, "Multi-objective design of PV– wind– diesel– hydrogen– battery systems", *Sciencedirect*, pp. 2566-2567, 2008.
- [25] R. Glenn Macleod. (1999) A Fuzzy Controller for a Hybrid Wind/Diesel System with Storage. [En línea]. <http://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/ftp04/mq39683.pdf>
- [26] Chile Sustentable. Propuesta Ciudadana para el Cambio. [En línea]. [www.escenariosenergeticos.cl/./escenario-chile-sustentable-2º-ejercicio2.pdf](http://www.escenariosenergeticos.cl/./escenario-chile-sustentable-2º-ejercicio2.pdf)
- [27] Comisión Nacional de Energía. (2003) cne.cl. [En línea]. [http://www.cne.cl/cnewww/opencms/04\\_Programas/02\\_PER/metas\\_de\\_Gobierno\\_2006\\_2010.html](http://www.cne.cl/cnewww/opencms/04_Programas/02_PER/metas_de_Gobierno_2006_2010.html)