



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO/ECONÓMICA DE UN SISTEMA
HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA ESCUELAS DE
QUINCHAO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

LUIS DAVID GUERRA BAEZA

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO ROMÁN LATORRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
SEPTIEMBRE DE 2013

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: LUIS GUERRA BAEZA
FECHA: 25/09/2013
PROF. GUÍA: Sr. ROBERTO ROMÁN LATORRE

“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD TÉCNICO/ECONÓMICA DE UN SISTEMA HÍBRIDO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA ESCUELAS DE QUINCHAO”

En localidades de difícil acceso, aisladas de la red eléctrica, es común el uso de generadores en base a motores diesel para el abastecimiento de electricidad. Si bien esta solución es fácil de implementar, posee características que llevan a considerar otro tipo de soluciones. Las principales falencias de un generador diesel para el abastecimiento de electricidad son: el alto costo de generación, asociado al costo directo de combustible y costos de mantenimiento del equipo, la disponibilidad de la electricidad y la emisión de contaminantes.

En este estudio se busca solucionar los problemas de generación eléctrica de trece escuelas de la comuna de Quinchao, perteneciente al archipiélago de Chiloé. Actualmente la generación eléctrica en estas escuelas se realiza mediante generadores diesel, por lo que el concepto de disponibilidad se torna crítico, considerando que una falla en el equipo significa la suspensión de las jornadas escolares. Es por esto que se busca estudiar sistemas de generación eléctrica complementarios al sistema convencional, que funcionen con fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC) solar fotovoltaica y eólica. Se utiliza para esto un software de simulación de sistemas híbridos de generación llamado Homer Energy, el cuál utiliza un criterio de selección económico, que se complementa con criterios técnicos de calidad y confiabilidad de equipos, para resolver qué configuración es la mejor para solucionar los problemas de generación en las escuelas.

Para ello se realiza una diferenciación de dos grupos de escuelas: pequeñas (grupo A) y grandes (grupo B). Se selecciona una escuela del grupo A y dos escuelas del grupo B para realizar mediciones relacionadas a la calidad de los recursos energéticos solar y eólico y al consumo eléctrico a lo largo del día, ambos parámetros necesarios para realizar una correcta simulación. Esto se integra con una selección acabada de equipos de cada una de las tecnologías consideradas para componer el sistema de generación. Esta selección se realiza en base a equipos presentes en el mercado chileno, poniendo énfasis en las condiciones climáticas bajo las cuales deben trabajar.

Realizada la simulación para un periodo de funcionamiento de 10 años y bajo los criterios económicos y técnicos implementados, se obtiene que para escuelas pequeñas, la configuración óptima consiste en un sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento. Mientras que para escuelas grandes, la configuración óptima consiste en un sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento. En ambos casos se obtiene una reducción de los costos totales de generación y lo que es más importante, un aumento en la disponibilidad de la electricidad en las escuelas.

Agradecimientos:

A mis padres, por su esfuerzo y apoyo incondicional, sin los cuales esto jamás hubiese sido posible. Todo lo que soy y he logrado es gracias a su sacrificio y amor y por eso estaré eternamente agradecido y orgulloso de ser su hijo.

A mis hermanas, Francisca y Catalina, gracias por todos esos momentos y recuerdos imborrables, por todas esas peleas y discusiones que duran un rato y se transforman en risas y alegría. No tienen idea de lo importantes que son para mí, y sepan que siempre estaré ahí para ustedes.

A la familia, abuelos y abuelas, tíos y tías, primos y primas, que de alguna u otra manera han sido parte de mi desarrollo personal.

A mi profesor Roberto Román, por su tiempo y dedicación que permitieron llevar adelante un proyecto tan interesante y entretenido.

A mis amigos mecánicos, “los de la B”, por su compañía en todos esos momentos de estrés, de estudio, de trabajos y tareas interminables que se olvidaban luego con un buen asado y un buen carrete. Gracias por hacer esta etapa de la vida mucho más placentera y agradable.

Finalmente, a los amigos de la vida, los “SVX”. Con orgullo puedo decir que me faltan dedos de las manos para contarlos a todos y nada de lo que escriba puede transmitir lo agradecido que estoy por la amistad y la confianza de tantos años. Simplemente gracias!

Tabla de contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcances generales	3
2. Antecedentes	4
2.1 Recursos energéticos no convencionales	4
2.1.1 Energía Solar	4
2.1.2 Energía eólica.....	4
2.2 Sistema híbrido de generación eléctrica.....	5
2.3 Componentes principales de sistema híbrido	7
2.3.1 Paneles Fotovoltaicos	7
2.3.2 Aerogenerador.....	9
2.3.3 Generador eléctrico	10
2.3.4 Baterías electroquímicas de ciclo profundo	10
2.3.5 Inversor.....	11
2.3.6 Regulador de carga.....	11
2.4 Localidades donde se realiza el estudio	12
2.4.1 Escuela rural Capilla Antigua.....	13
2.4.2 Escuela rural Ostricultura.....	13
2.4.3 Escuela rural La Capilla	13
2.5 Generación actual.....	14
2.6 Fuentes de datos de recursos renovables.....	15
3. Metodología y parámetros de la simulación	16
3.1 Software para la simulación	16
3.1.1 Estrategias de Control	16
3.2 Metodología	17
3.2.1 Simulación mediante HOMER.....	17
3.2.2 Optimización mediante HOMER	18
3.3 Parámetros de la simulación.....	18
3.3.1 Cargas.....	18
3.3.2 Recursos	19
3.3.3 Componentes.....	21

4. Determinación de recursos energéticos renovables.....	27
4.1 Recurso solar.....	27
4.1.1 Consideraciones para la simulación	28
4.2 Recurso eólico.....	31
4.2.1 Consideraciones para la simulación	33
5. Determinación de la demanda de energía eléctrica.....	36
5.1 Cargas eléctricas para las escuelas del grupo A.....	36
5.1.1 Escuela rural Capilla Antigua, Isla Quenac.....	37
5.2 Consideraciones en la simulación	40
5.3 Cargas eléctricas para las escuelas del grupo B	42
5.3.1 Escuela rural Ostricultura, Isla Apiao	42
5.3.2 Escuela rural La Capilla, Isla Chaulinec	45
5.3.3 Escuelas grandes: Tipo B	48
6. Selección de equipos del sistema	50
6.1 Paneles fotovoltaicos en el mercado chileno.....	50
6.1.1 Costos de operación y mantenimiento.....	52
6.1.2 Consideraciones para la simulación	52
6.2 Aerogeneradores en el mercado chileno	53
6.2.1 Costos de operación y mantenimiento.....	54
6.2.2 Consideraciones para la simulación	54
6.3 Generadores Diesel AC en el mercado chileno.....	56
6.4 Baterías electroquímicas en el mercado chileno	56
6.4.1 Costos de operación y mantenimiento.....	57
6.5 Inversores en el mercado chileno	57
7. Alcances generales del método aplicado.....	58
7.1 Alcances de la simulación	58
7.2 Consideraciones técnicas.....	58
7.2.1 Autonomía del sistema	59
7.3 Análisis de sensibilidad.....	59
8. Resultados	60
8.1 Resultados para escuelas del grupo A.....	60
8.1.1 Descripción general del sistema propuesto	61
8.1.2 Esquema del sistema de generación para escuelas pequeñas	62

8.1.3	Costos del sistema	63
8.1.4	Distribución de generación eléctrica	64
8.1.5	Consideraciones para la implementación	65
8.2	Resultados para las escuelas del grupo B	66
8.2.1	Descripción general del sistema propuesto	67
8.2.2	Esquema del sistema de generación para escuelas grandes.....	68
8.2.3	Costos del sistema	69
8.2.4	Distribución de generación eléctrica	70
8.2.5	Consideraciones para la implementación	71
8.3	Análisis de sensibilidad.....	72
8.3.1	Precio del combustible	72
8.3.2	Variación de los recursos renovables	73
9.	Análisis de resultados.....	74
10.	Conclusiones	76
10.1	Conclusiones generales del proyecto	76
10.2	Conclusiones respecto a las soluciones presentadas	76
11.	Bibliografía	78
12.	Anexos	79
	Anexo 1: Detalle de los equipos del sistema para escuelas pequeñas	79
	Anexo 2: Detalle de los equipos del sistema para escuelas grandes	81
	Anexo 3: Datos de cargas eléctricas utilizados para la simulación	84
	Anexo 4: Códigos de equipos utilizados	86

Índice de figuras

Figura 2.1 Esquema sistema híbrido de generación eléctrica.....	6
Figura 2.2 Curvas características de un módulo fotovoltaico. (Markvart & Castañer, 2003).....	8
Figura 2.3 Mapa de rutas, Archipiélago de Chiloé. (Chiloeweb).....	12
Figura 3.1 Ejemplo de curva característica de potencia de una turbina eólica.....	23
Figura 4.1 Insolación diaria media para la escuela Capilla Antigua.	27
Figura 4.2 Insolación diaria media para la escuela Ostricultura.	28
Figura 4.3 Insolación diaria media para la escuela La Capilla.....	28
Figura 4.4 Promedio de Insolación media mensual obtenida del Explorado Solar.....	29
Figura 4.5 Distribución anual de radiación global.	30
Figura 4.6 Velocidad de viento media mensual para la escuela Capilla Antigua.	31
Figura 4.7 Velocidad de viento media mensual para la escuela Ostricultura.....	32
Figura 4.8 Velocidad de viento media mensual para la escuela La Capilla.	32
Figura 4.9 Promedio de velocidad de viento media mensual obtenida del Explorado Eólico.	34
Figura 4.10 Distribución anual de velocidad de viento.....	34
Figura 4.11 Distribución media mensual de la velocidad de viento a lo largo del día.....	35
Figura 5.1 Perfil de demanda eléctrica diaria para la escuela Capilla Antigua, perteneciente a las escuelas del grupo A.	39
Figura 5.2 Perfil diario de consumo eléctrico mensual para escuelas del grupo A de la comuna de Quinchao.	41
Figura 5.3 Perfil de demanda eléctrica diaria para la escuela Ostricultura, perteneciente a las escuelas del grupo B.....	44
Figura 5.4 Perfil de demanda eléctrica diaria para la escuela La Capilla, perteneciente a las escuelas del grupo B.....	47
Figura 5.5 Demanda registrada en la escuela “La Capilla”, perteneciente al grupo B, en un día normal de clases.	47
Figura 5.6 Perfil diario de consumo eléctrico mensual para escuelas del grupo B de la comuna de Quinchao	49
Figura 6.1 Costo directo de paneles fotovoltaicos modelo K.....	50
Figura 6.2 Costo directo de paneles fotovoltaicos modelo C.....	51
Figura 6.3 Curva de potencia característica para AG1500.....	53
Figura 6.4 Curva de potencia característica para AG3500.....	54

Figura 8.1 Esquema del sistema de generación FV-Diesel con almacenamiento para escuelas pequeñas.....	62
Figura 8.2 Gráfico de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.....	63
Figura 8.3 Potencia media mensual asociada a cada una de las tecnologías del sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.....	64
Figura 8.4 A: Potencias medias de generación para el sistema FV-Diesel con almacenamiento. B: Potencias medias de generación para el sistema FV-Eólico Diesel con almacenamiento.	66
Figura 8.5 Esquema del sistema de generación FV-Eólico Diesel con almacenamiento para escuelas grandes.	68
Figura 8.6 Gráfico de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento. 69	
Figura 8.7 Potencia media mensual asociada a cada una de las tecnologías del sistema FV-Diesel con almacenamiento.....	70

Índice de tablas

Tabla 1.1 Grupo A: Escuelas pequeñas de la comuna de Quinchao.	2
Tabla 1.2 Grupo B: Escuelas grandes de la comuna de Quinchao.....	2
Tabla 2.1 Grupo electrógeno de las tres escuelas consideradas en el estudio.....	14
Tabla 2.2 Consumo de combustible para las escuelas de la comuna de Quinchao.	14
Tabla 4.1 Insolación media mensual entregada por el Explorador Solar.....	29
Tabla 4.2 Índice de claridad para la zona seleccionada.	30
Tabla 4.3 Velocidad de viento media mensual entregada por el Explorador Eólico.....	33
Tabla 5.1 Demanda agregada de equipos presentes en la escuela rural “Capilla Antigua”.	38
Tabla 5.2 Demanda agregada de equipos presentes en la escuela rural “Ostricultura”.....	43
Tabla 5.3 Demanda agregada de equipos presentes en la escuela rural “La Capilla”.	45
Tabla 6.1 Paneles fotovoltaicos modelo KM en el mercado chileno. (Heliplast)	50
Tabla 6.2 Paneles fotovoltaicos modelo Cx en el mercado chileno. (Esol)	51
Tabla 6.3 Generadores eólicos en el mercado chileno. (Antusolar).....	53
Tabla 6.4 Costos de adquisición, operación y mantenimiento de aerogeneradores.	54
Tabla 6.5 Valores característicos de rugosidad superficial.	55
Tabla 6.6 Costos de adquisición, operación y mantenimiento de generadores diesel.....	56
Tabla 6.7 Baterías plomo-ácido AMG en el mercado chileno	56
Tabla 6.8 Baterías plomo-ácido Gel en el mercado chileno.....	57

Tabla 6.9 Costos de adquisición, operación y mantenimiento del banco de baterías electroquímicas.	57
Tabla 6.10 Inversores con rectificador en el mercado chileno.....	57
Tabla 8.1 Detalle de las configuraciones óptimas según criterio económico para escuelas del grupo A, ordenadas por el valor actual neto NPC.	60
Tabla 8.2 Detalle de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento a 10 años.	63
Tabla 8.3 Detalle de las configuraciones óptimas según criterio económico, para escuelas del grupo B, ordenadas por el valor actual neto NPC.	66
Tabla 8.4 Detalle de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento...	69
Tabla 12.1 Resumen de la generación solar del sistema FV-Diesel con almacenamiento.....	79
Tabla 12.2 Resumen de la generación con combustible diesel del sistema FV-Diesel con almacenamiento.....	79
Tabla 12.3 Resumen del banco de baterías del sistema FV-Diesel con almacenamiento.	80
Tabla 12.4 Resumen del Inversor-Rectificador del sistema FV-Diesel con almacenamiento.	80
Tabla 12.5 Resumen de la generación solar del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento	81
Tabla 12.6 Resumen de la generación Eólica del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento..	81
Tabla 12.7 Resumen de la generación con combustible diesel del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.....	82
Tabla 12.8 Resumen del banco de baterías del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.	82
Tabla 12.9 Resumen del Inversor-Rectificador del sistema Eólico-Diesel con almacenamiento.	83
Tabla 12.10 Potencias medias horarias correspondientes al perfil estándar de demanda utilizado para la simulación en escuelas pequeñas (Grupo A).	84
Tabla 12.11 Potencias medias horarias correspondientes al perfil estándar de demanda utilizado para la simulación en escuelas grandes (Grupo B).	85
Tabla 12.12 Códigos utilizados para aerogeneradores.	86
Tabla 12.13 Códigos utilizados para baterías electroquímicas.	86
Tabla 12.14 Códigos utilizados para los inversores de voltaje.	86
Tabla 12.15 Códigos utilizados para paneles fotovoltaicos.	87

1. Introducción

En lugares aislados es común el uso de generadores en base a motores diesel para el abastecimiento de energía eléctrica. Esta solución es relativamente sencilla de implementar y cuenta con el respaldo de años de uso, sin embargo, presenta varias falencias. La más evidente es la dependencia absoluta del combustible fósil y por lo tanto la inevitable tendencia al alza de los costos asociados. Además presenta problemas de mantención lo que disminuye la confiabilidad de este sistema de generación y por lo tanto su disponibilidad.

Es por esto que se ha dispuesto estudiar un sistema de generación eléctrica complementario al sistema convencional que funcione con fuentes de energías renovables no convencionales (ERNC) solar fotovoltaica (FV) y eólica. Este sistema será aplicado a escuelas rurales de la comuna de Quinchao, en el archipiélago de Chiloé.

Los sistemas FV son muy confiables, no poseen partes móviles y por lo tanto tienen poca tendencia a fallar, además de contar con costos asociados cada vez más bajos. Sin embargo pueden existir problemas en la calidad del recurso solar debido a la ubicación geográfica en la que se instalará este sistema.

Por otro lado, los sistemas eólicos son confiables y tienen costos asociados razonables. Su principal desventaja es la difícil instalación y problemas asociados de mantención. Sin embargo, si se escoge un equipo adecuado y de buena calidad estos problemas se minimizan.

Ambos sistemas se complementan de manera excelente y por lo tanto se perfilan como la mejor solución a este tipo de problemas en distintas localidades.

Dentro del marco del proyecto “Estudio de factibilidad de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para escuelas de Quinchao” (1), se pretende mejorar la situación actual de generación para 13 escuelas de la comuna. Para ello se realiza una diferenciación de dos grupos de escuelas: pequeñas y grandes, en base a la cantidad de alumnos, a la cantidad de salas y a la cantidad de recintos en cada una de ellas.

El grupo de escuelas pequeñas se denomina “Grupo A” y el detalle de las escuelas que lo componen se puede observar en la Tabla 1.1. El grupo de escuelas grandes se denomina “Grupo B” y el detalle de las escuelas que lo componen se puede observar en la Tabla 1.2.

Se selecciona una escuela del grupo A y dos escuelas del grupo B para realizar mediciones relacionadas a la calidad de los recursos energéticos renovables y al consumo eléctrico a lo largo del día. Las escuelas consideradas para realizar mediciones son: Escuela rural “Capilla Antigua”, escuela rural “Ostricultura” y escuela rural “La Capilla” (en negrita).

Tabla 1.1 Grupo A: Escuelas pequeñas de la comuna de Quinchao.

Escuela	Nº de alumnos	Nº Profesores (Asistentes)	Nº salas clases	Otros Recintos	Consumo (litros/mes)	Costo directo combustible
Capilla antigua	9	3 (2)	3	5	120	\$ 78.480
Fco. de Villagra	11	1 (2)	1	5	120	\$ 78.480
Amanecer 2000	20	4 (4)	4	8	100	\$ 65.400
Llingua	26	3 (2)	2	6	120	\$ 78.480
El Estero	9	1 (1)	2	5	100	\$ 65.400

Tabla 1.2 Grupo B: Escuelas grandes de la comuna de Quinchao.

Escuela	Nº de alumnos	Nº Profesores (Asistentes)	Nº salas clases	Otros Recintos	Consumo (litros/mes)	Costo directo combustible
La capilla Chaulinec	54	5 (6)	6	7	300	\$ 196.200
Ostricultura	73	6 (5)	5	7	300	\$ 196.200
Metahue	38	5 (5)	4	6	350	\$ 228.900
Alao	65	6 (6)	6	6	300	\$ 196.200
La Villa	20	4 (2)	3	5	250	\$ 163.500
Los Pinos	63	8 (5)	8	7	400	\$ 261.600
La capilla Cahuach	44	4 (6)	4	8	240	\$ 156.960
San Francisco	96	11 (11)	10	14	360	\$ 235.440

1.1 Objetivos

El objetivo del proyecto consiste en determinar la configuración de un sistema híbrido FV-eólico-Diesel con almacenamiento, flexible y modular, que permita reducir los costos totales asociados a la generación eléctrica en escuelas de la comuna de Quinchao.

Dentro de los objetivos específicos del estudio se considera:

- Dimensionar el recurso disponible de ERNC en las localidades.
- Determinar los consumos eléctricos a lo largo del día para conocer con exactitud la distribución de la demanda en las escuelas.
- Establecer el tipo de tecnología de generación que será incorporada en el sistema y seleccionar los equipos adecuados de acuerdo a las características geográficas de la zona.
- Utilizar la herramienta computacional HOMER para dimensionar la mezcla de ERNC, baterías y sistema convencional que permita reducir los costos totales asociados a la generación eléctrica.

1.2 Alcances generales

- La simulación en HOMER se realiza con el objetivo de obtener una mejor solución desde la perspectiva económica, la cual es complementada posteriormente con criterios técnicos para obtener la mejor solución global.
- Una vez finalizada la simulación se presentan los resultados obtenidos ordenados según el menor VAN (Valor Actual Neto) y con las respectivas consideraciones técnicas.
- Al realizar la simulación se consideran los costos totales de cada componente que incluyen: costo de adquisición, costo de traslado a la zona, costo de instalación y costo de operación y mantenimiento. Estos costos son presentados en dólares (US\$) con una tasa de cambio revisada por última vez el 27 de abril de 2013 (1 USD = 473 CLP) y están sujetos a los cambios característicos del mercado.
- Para efectos de la simulación se considera sólo la inserción de tecnologías confiables y probadas en sistemas similares de generación dejando de lado nuevas tecnologías como por ejemplo las pilas de hidrógeno.

2. Antecedentes

2.1 Recursos energéticos no convencionales

2.1.1 Energía Solar

El sol origina de manera directa o indirecta todas las fuentes de energías renovables existentes (solar, eólica, mareomotriz, etc.).

A la distancia que se encuentra nuestro planeta del Sol (cerca a los 149,5 millones de kilómetros) la energía proveniente de él es calculable analíticamente según modelos térmicos de radiación y que dejan explícitamente el valor de $1.367 \text{ [W/m}^2\text{]}$ (2) como la cantidad de radiación solar que incide directamente a nuestra atmósfera, valor llamado constante solar.

La energía solar que corresponde a la recibida directamente del sol en forma de radiación electromagnética puede ser aprovechada de dos formas dependiendo de la tecnología utilizada: energía solar fotovoltaica o energía solar térmica. La fotovoltaica utiliza la radiación solar y aprovecha las propiedades físicas de ciertos materiales semiconductores para generar electricidad, mientras la energía térmica utiliza directamente la energía recibida del sol para calentar un fluido de trabajo y utilizarlo por ejemplo en un ciclo termodinámico convencional.

2.1.2 Energía eólica

La energía eólica es aquella que se obtiene del viento, en otras palabras, es la energía cinética generada por el efecto del movimiento de masas de aire o corrientes de aire.

La energía eólica es un recurso renovable, limpio y abundante que ha ido ganando fuerzas en los últimos años debido a estas características. Posee algunas inconveniencias como la intermitencia del viento, lo que disminuye su confiabilidad e imposibilita la dependencia total de este tipo de energía.

La energía eólica se produce por el movimiento de masas de aire que se desplazan desde zonas con alta presión atmosférica hacia zonas adyacentes con baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Con el fin de aprovechar eficientemente la energía eólica es importante conocer:

- Variaciones día/noche y estacionales del viento.
- Velocidad de viento v/s altura sobre el suelo.
- Velocidad mínima y máxima del viento.

La energía del viento se aprovecha mediante el uso de máquinas eólicas (aeromotores) que transforman la energía eólica en energía cinética de rotación. Para que los aerogeneradores sean capaces de utilizar la energía del viento, es necesario que este supere una velocidad mínima llamada “cut-in speed” que depende

del aerogenerador utilizado y generalmente fluctúa entre los 3 [m/s] y 4 [m/s]. La velocidad del viento además no debe superar los 25 [m/s], velocidad llamada “cut-out speed”

2.2 Sistema híbrido de generación eléctrica

Los sistemas híbridos de generación eléctrica son aquellos que se basan en más de una fuente de energía en cualquier combinación tanto de fuentes renovables (FV, eólica, mini hidráulica. etc.) como también fuentes convencionales.

Un sistema híbrido puede funcionar de manera aislada o conectado a la red eléctrica. Independiente de esto, el sistema generador puede integrar los siguientes equipos:

- Módulos fotovoltaicos
- Aerogenerador
- Turbina hidráulica
- Generador AC

Se puede integrar uno o más de cada uno de estos equipos en un sistema, y no es obligatorio que estén todos ellos presentes. Complementario a estos equipos se utiliza un banco de baterías dependiendo de los requerimientos operacionales del sistema, un regulador de carga para las baterías, un inversor y un rectificador para la corriente generada.

En general el sistema se puede diseñar para cumplir con una serie de criterios definidos principalmente por el usuario final. Los criterios más utilizados a la hora de diseñar un sistema híbrido de generación corresponden a económicos, medioambientales o de eficiencia.

La Figura 2.1 muestra un esquema de un sistema híbrido genérico como el que se propone para las escuelas rurales.

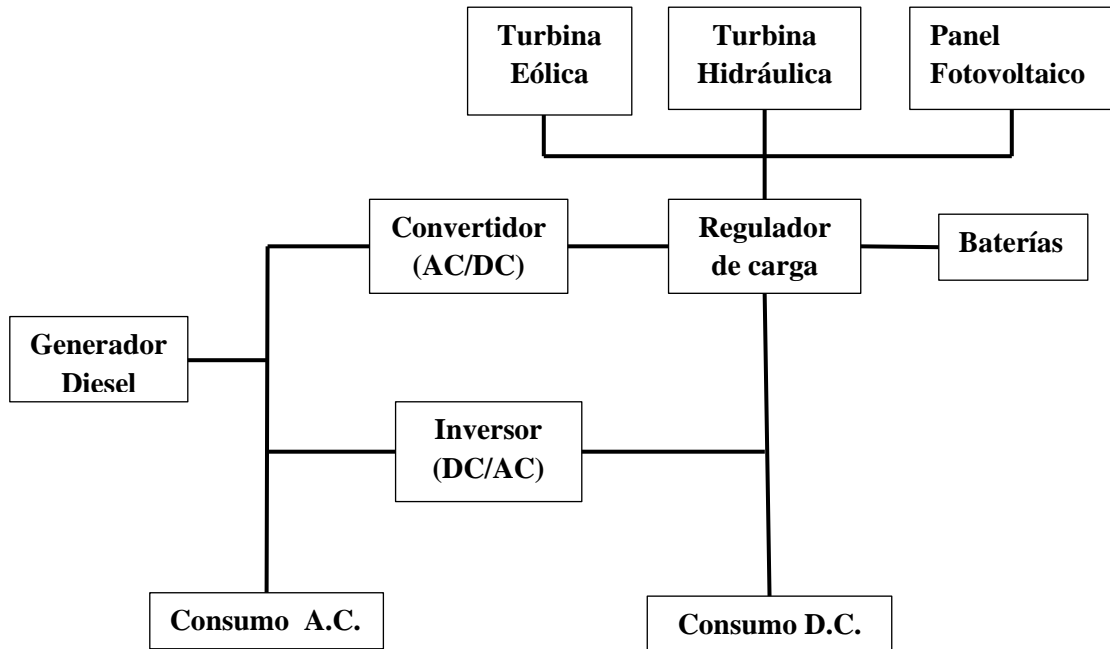


Figura 2.1 Esquema sistema híbrido de generación eléctrica.

En particular, para este estudio se descarta la utilización de la tecnología hidráulica, debido a que las islas poseen poca altura y por lo tanto carecen de caudales aprovechables para poder ser parte del sistema generador.

Se considera por lo tanto la utilización de dos tecnologías complementarias al motor convencional: módulos fotovoltaicos y aerogeneradores, para aprovechar tanto el recurso solar como el recurso eólico respectivamente. Si bien ambos recursos renovables, tanto el solar como el eólico, tienen la desventaja de ser intermitentes y estacionales, al ser complementados en un solo sistema esta desventaja se minimiza. Pues en épocas de verano, cuando el recurso solar abunda, el recurso eólico es escaso. Y en épocas de invierno la situación se invierte, provocando así que la estacionalidad del sistema sea mucho más suave y menos evidente.

2.3 Componentes principales de sistema híbrido

2.3.1 Paneles Fotovoltaicos

La energía fotovoltaica es la energía eléctrica obtenida a través de los fotones procedentes de la luz solar mediante células fotovoltaicas. Este tipo de energía es cada día más importante debido a la mayor necesidad de energías limpias que permitan un desarrollo sostenible.

La producción eléctrica está basada en el fenómeno físico denominado "efecto fotovoltaico", que básicamente consiste en convertir la luz solar en energía eléctrica por medio de unos dispositivos semiconductores denominados células fotovoltaicas. Estas células están elaboradas a base de silicio puro (uno de los elementos más abundantes en la naturaleza, componente principal de la arena) con adición de impurezas de ciertos elementos químicos (boro y fósforo), y son capaces de generar cada una de ellas una corriente de 2 a 4 Amperios, a un voltaje de 0,46 a 0,48 Voltios, utilizando como fuente de energía la radiación luminosa. (3)

Las células se montan en serie sobre módulos fotovoltaicos o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión (rebota) y otra parte por transmisión (atraviesa la célula). El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente.

2.3.1.1 Tipos de paneles fotovoltaicos

Existen diferentes tipos de paneles solares en función de los materiales empleados, los métodos de fabricación que se empleen y la forma final.

- Silicio Mono-cristalino: de rendimiento energético hasta 15 - 17%.
- Silicio Poli-cristalino: de rendimiento energético hasta 12 - 14 %
- Silicio Amorfo: con rendimiento energético menor del 10 %;
- Otros materiales: Arseniuro de galio, di-seleniuro de indio y cobre, telurio de cadmio.

En la actualidad la tecnología más considerada para la producción de electricidad solar por vía fotovoltaica es la basada en el uso de módulos fotovoltaicos planos, que incorporan células de silicio, ya sea mono o poli-cristalino, o módulos fotovoltaicos de alta concentración, éstos últimos siendo los más modernos tienen la ventaja de ser más eficientes (18%-33%) pero para ello deben tener un seguimiento constante respecto de la posición del sol y aprovechan solo la radiación directa.

2.3.1.2 Curvas características

La curva característica de un módulo fotovoltaico relaciona la intensidad de corriente con la tensión del módulo, lo que se traduce en una curva de potencia que depende de la tensión. Estas relaciones se pueden apreciar en la Figura 2.2.

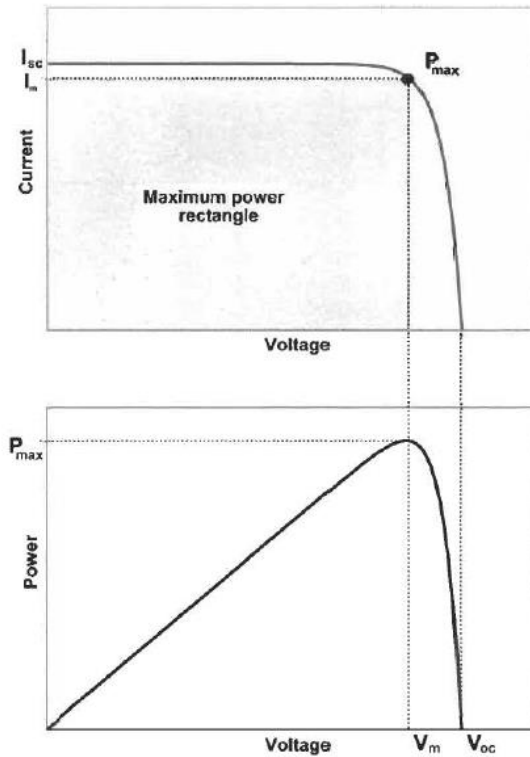


Figura 2.2 Curvas características de un módulo fotovoltaico. (4)

Las curvas características están definidas por los siguientes puntos:

- Punto de máxima potencia (MPP).
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}).
- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}).
- Potencia (P).
- Factor de llenado o Fill factor (FF).

La corriente en los módulos fotovoltaicos es proporcional a la radiación solar incidente, y el voltaje tiende a disminuir con altas temperaturas, obteniéndose pérdidas de potencia cercanas al 4% por cada 10°C de aumento en la temperatura de operación. Es por esto que un sistema fotovoltaico sometido a igual radiación solar incidente, generará menos energía en un lugar con altas temperaturas que en un lugar frío.

2.3.2 Aerogenerador

Un aerogenerador es un dispositivo eléctrico accionado por un aeromotor que transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica.

La energía cinética del aire proporciona energía mecánica a un rotor (buje y palas) que a través de un sistema mecánico de transmisión hace girar el rotor de un generador.

Existen variados tipos de aerogeneradores, principalmente diferenciados por: disposición del eje de rotación, potencia nominal generada y velocidad mínima de arranque.

2.3.2.1 Características fundamentales

Una masa de aire en movimiento posee una potencia que se expresa mediante la ecuación (2.1).

Donde “ ρ_{air} ” es la densidad del aire, “A” el área perpendicular que atraviesa y “ v ” su velocidad.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A \cdot v^3 \quad (2.1)$$

Independiente del diseño de un generador eólico, existe un límite máximo de energía que se puede obtener, que se conoce como límite de Betz y que corresponde al 59,3% de la potencia del viento que incide sobre el área de barrido del aerogenerador.

Para poder utilizar al máximo el potencial de la energía eólica es necesario conocer la curva de potencia del aerogenerador utilizado. Esta curva relaciona la potencia de generación eléctrica con la velocidad del viento, y es fundamental para seleccionar el aerogenerador que se ajuste mejor a las características de la localidad donde será instalado el sistema.

Existe una serie de parámetros que permiten definir un aerogenerador y sus características. Estos parámetros se nombran a continuación:

- Número de aspas.
- Área circular de barrido.
- Diámetro del rotor.
- Velocidad mínima o de arranque (cut-in).
- Velocidad máxima o de corte (cut-out).
- Velocidad nominal (velocidad mínima de viento a la cual se produce la potencia nominal).

2.3.3 **Generador eléctrico**

Un generador eléctrico es un dispositivo capaz de transformar energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Esta transformación es posible mediante la acción de un campo magnético sobre conductores eléctricos en un estator. Este accionamiento está basado en la ley de Faraday, que postula que cuando se produce un movimiento relativo entre los conductores y el campo magnético, se produce una fuerza electromotriz (F.E.M.)

Los generadores diesel producen energía de manera rápida y pueden responder por lo tanto de manera adecuada a posibles fluctuaciones en la demanda.

Se estudia la incorporación de un generador eléctrico diesel al sistema híbrido, pues es alternativa que se utiliza actualmente en la localidad del estudio.

2.3.4 **Baterías electroquímicas de ciclo profundo**

Las baterías electroquímicas juegan un rol fundamental cuando forman parte de un sistema aislado. Las baterías convierten y almacenan la energía eléctrica en forma química, y luego suministran dicha energía a un sistema o artefacto eléctrico cuando sea requerido.

El tiempo que demora una batería en descargarse hasta el mínimo para luego cargarse hasta el 100% de su capacidad se conoce como “ciclo”. Se llaman baterías de ciclo profundo porque están diseñadas para resistir descargas de hasta un 80% de su capacidad total.

Existen diferentes tipos de baterías electroquímicas. Las más conocidas son de plomo-ácido, ión-litio, níquel-cadmio (Ni-Cd) y las de hidruro de níquel (Ni-MH). Las baterías de ciclo profundo más utilizadas corresponden a las del tipo plomo-ácido, ya que son fáciles de mantener y se adaptan de manera excelente a sistemas híbridos aislados de la red eléctrica.

En promedio, las baterías electroquímicas tienen una vida útil cercana a los dos mil ciclos en forma continuada. En general, las variables que determinan la vida útil de una batería son: Condiciones de uso, mantención realizada y la más importante de todas, la profundidad de descarga a lo largo del tiempo.

Existe una serie de parámetros que permiten definir una batería y sus características. Estos parámetros se nombran a continuación:

- **Tensión de carga:** Es la tensión para superar la resistencia de la batería a ser cargada.
- **Capacidad nominal (Ah):** Corresponde a la cantidad de energía eléctrica que se obtiene al realizar una descarga total de una batería 100% cargada.
- **Profundidad de descarga (DOD):** Corresponde al porcentaje de energía eléctrica utilizado respecto de la capacidad total de la batería.

- Estado de carga (SOC): Es el porcentaje de energía eléctrica acumulada respecto de la capacidad total de la batería. (0%: descargada; 100%: totalmente cargada)
- Eficiencia global: Corresponde a la razón entre la energía que entrega la batería en la descarga y la energía que absorbe en el proceso de carga.

2.3.5 Inversor

Los inversores convierten la corriente continua (DC) de baja tensión (12V, 24V o 48V) en corriente alterna (AC) de alta tensión (110V, 220V). Este cambio de voltaje se realiza debido a que la mayoría de los equipos del sistema híbrido de generación (paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, batería electroquímicas) funcionan en base a corrientes continuas bajas, mientras que la gran mayoría de los aparatos eléctricos presentes en las escuelas y en los hogares utilizan corriente alterna.

Existen también los convertidores de voltaje, que funciona de manera similar al inversor pero cumple el rol contrario: convierte la corriente alterna (AC) en corriente continua (DC).

La capacidad (o tamaño) de un inversor está determinada por la cantidad máxima de watts continuos que puede proveer, y por lo tanto, está directamente relacionado con la demanda eléctrica en la localidad que se desea alimentar. Para seleccionar el equipo adecuado se debe asegurar que el inversor provea cantidad de watts superior a la media en cualquier instante de tiempo y que además sea capaz de responder a los peaks en la demanda.

2.3.6 Regulador de carga

Los reguladores de carga tienen como objetivo principal proteger a las baterías frente a cargas y descargas demasiado profundas. Controla constantemente el estado de carga de las baterías y la profundidad de descarga, aumentando de esta forma su vida útil.

Cuando funcionan con sistemas fotovoltaicos, los reguladores permiten desconectar completa o parcialmente los paneles solares de las baterías, sin que éstas sufran algún daño. Cuando las baterías de ciclo profundo llegan a su nivel máximo de carga, el regulador, de manera gradual, restringe el paso de la energía derivada de los paneles solares.

Las características más importantes de los reguladores de carga son: tensión nominal (12, 24 o 48 VDC), intensidad máxima, tensión de corte por sobrecarga y tensión de corte por sobre descarga.

2.4 Localidades donde se realiza el estudio

Se seleccionan tres escuelas, de las trece donde se aplicará el sistema híbrido de generación eléctrica, para realizar mediciones del perfil de consumo eléctrico a lo largo del día y para referenciar geográficamente a la hora de generar reportes respecto a las condiciones meteorológicas asociadas. La selección de las escuelas se realiza en base a la cantidad de alumnos, como muestra la Tabla 1.1 y la Tabla 1.2, donde se observa gran variabilidad, esperando de esta manera obtener una variabilidad similar en cuanto a perfiles de demanda eléctrica en cada una de las escuelas.

Todas las escuelas se encuentran ubicadas en la comuna de Quinchao perteneciente al archipiélago de Chiloé (Figura 2.3).



Figura 2.3 Mapa de rutas, Archipiélago de Chiloé. (5)

La descripción de cada una de las tres localidades seleccionadas se detalla a continuación:

2.4.1 **Escuela rural Capilla Antigua**

La escuela rural Capilla Antigua se encuentra en la isla Quenac perteneciente a la comuna de Quinchao. La ubicación específica es:

- Latitud: S 42° 28'
- Longitud: W 73° 22'
- Altura: 58 [m]

2.4.2 **Escuela rural Ostricultura**

La escuela rural Ostricultura se encuentra en la isla Apiao perteneciente a la comuna de Quinchao. La ubicación específica es:

- Latitud: S 42° 36'
- Longitud: W 73° 12'
- Altura: 56 [m]

2.4.3 **Escuela rural La Capilla**

La escuela rural La Capilla se encuentra en la isla Chaulinec perteneciente a la comuna de Quinchao. La ubicación específica es:

- Latitud: S 42° 38'
- Longitud: W 73° 16'
- Altura: 49 [m]

2.5 Generación actual

Actualmente la generación de energía eléctrica en las escuelas se realiza íntegramente mediante grupos electrógenos. Por lo tanto, el costo de generación está ligado directamente al costo de los combustibles utilizados. Se muestra en la Tabla 2.1 el grupo electrógeno de las tres escuelas consideradas para realizar mediciones.

Tabla 2.1 Grupo electrógeno de las tres escuelas consideradas en el estudio.

Nombre escuela	Grupo electrógeno
Escuela rural "Capilla Antigua"	Honda, 2 kW
Escuela rural "Ostricultura"	Gesan, de 11 kW
Escuela rural "La Capilla"	SDMO, 10.5 kVA / 8,4 kW

Se muestra además en la Tabla 2.2 la distribución de consumo de combustible (litros/mes) y de costo directo de combustible (pesos) para cada una de las escuelas de la comuna de Quinchao. Se observa además una estimación respecto a la energía eléctrica entregada diariamente por el generador y la potencia media diaria de trabajo de este.

Tabla 2.2 Consumo de combustible para las escuelas de la comuna de Quinchao. (*)Estimación realizada considerando una eficiencia nominal igual a 25% para cada uno de los grupos electrógenos.

Escuela	Consumo (litros/mes)	Costo Combustible (\$/mes)	Energía generador diaria (kWh)*	Potencia media diaria (kW)*
Capilla Antigua	120	78.480	13,6	0,57
Ostricultura	300	196.200	34,0	1,41
La Capilla, Chaulinec	300	196.200	34,0	1,41
Fco. de Villagra	120	78.480	13,6	0,57
Metahue	350	228.900	39,6	1,65
Alao	300	196.200	34,0	1,41
La Villa	250	163.500	28,3	1,18
Amanecer 2000	100	65.400	11,3	0,47
Llingua	120	78.480	13,6	0,57
Los Pinos	400	261.000	45,3	1,89
La Capilla, Cahuach	240	156.960	27,2	1,13
El Estero	100	65.400	11,3	0,47
San francisco	360	235.440	40,7	1,70

En base al costo directo de combustible que se observa en la Tabla 2.2 y considerando los costos de almacenamiento, envasado en barriles y traslado a cada una de las escuelas, se obtiene un costo total de combustible igual a 1,8 [US\$/lt]. Este costo es utilizado como base para las simulaciones.

2.6 Fuentes de datos de recursos renovables

Para lograr un buen resultado en el desarrollo del estudio es necesario contar con la mayor cantidad de datos confiables y de calidad. En particular, la selección de estos datos se reflejará directamente en el resultado obtenido al buscar la mejor mezcla de sistema renovable y convencional que minimice el costo asociado de funcionamiento. Por lo tanto, utilizar datos de mala calidad, con errores poco sutiles respecto de la realidad tendrá como consecuencia un sistema poco confiable, y que no cumple con el requisito principal de diseño, el económico.

Existen varias fuentes de las cuales se puede obtener datos de radiación solar incidente y características del viento para una localidad. El objetivo es contar con la mayor cantidad de datos para poder contrastarlos y tomar decisiones acerca de su calidad.

- **NASA SSE:** Es una herramienta disponible a través de internet desde la cual se puede obtener datos de radiación global diaria media mensual e índices de nubosidad entre otras magnitudes de interés además de velocidad media mensual del viento. Para su uso es necesario conocer las coordenadas específicas de una localidad (latitud y longitud). (6)
- **EXPLORADOR SOLAR/EÓLICO:** Herramienta desarrollada por el Departamento de Geofísica de una Universidad de Chile en conjunto con el Ministerio de Energía, que presenta información pública detallada sobre el recurso solar y datos climatológicos en Chile. Para su uso es necesario conocer las coordenadas específicas de una localidad (latitud y longitud). (7) (8)
- **HOMER:** El mismo programa que se utiliza para la selección de las alternativas permite obtener datos desde internet de radiación solar diaria media mensual e índices de nubosidad medios mensuales. Para su uso es necesario conocer las coordenadas específicas de una localidad (latitud y longitud) además de la zona horaria. (9)

3. Metodología y parámetros de la simulación

3.1 Software para la simulación

Existen variados programas para el desarrollo y análisis de sistemas de energía, entre los cuales se puede mencionar RETScreen, SAM, HYBRID2, PV-DesingPro y HOMER.

Para la realización de este proyecto, se selecciona HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), pues es un programa bastante utilizado actualmente y es uno de los más flexibles en términos de la diversidad de sistemas que puede simular. Utiliza como parámetro de optimización un análisis económico que funciona perfectamente para sistemas híbridos con ERNC y generadores a combustión interna.

HOMER, es una herramienta desarrollada por el U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), que simula un sistema de generación eléctrica en operación mediante balances de energía para un funcionamiento equivalente de un año. El programa evalúa cada una de las posibles configuraciones de componentes en base a costos y dependiendo del ciclo de evaluación elabora una lista con los sistemas más convenientes. Además, permite realizar análisis de sensibilidad al observar como varían los resultados al realizar una modificación en los parámetros de entrada establecidos.

Homer puede simular sistemas aislados o conectados a la red eléctrica e incluir en el análisis cualquier combinación de módulos fotovoltaicos (FV), aerogeneradores, mini-hidro, motores-generadores y baterías de almacenamiento.

Cuando un sistema contiene un banco de baterías de almacenamiento y una o más fuentes de generación, se requiere una estrategia de control, que determina cómo el sistema carga las baterías.

3.1.1 Estrategias de Control

Las estrategias de control son las reglas que rigen la operación del generador y el banco de baterías. El programa HOMER puede simular bajo dos estrategias de control, seguimiento de la demanda (LF: Load Following Strategy) y ciclo de carga (CC: cicle charging strategy)

Seguimiento de la demanda: Consiste en que generador produce solo lo necesario para satisfacer la demanda. (Cubre el déficit de las fuentes renovables). Esta estrategia tiende a ser óptima cuando hay gran potencia renovable en el sistema.

Ciclo de carga: Consiste en que cuando el generador debe funcionar, lo hace a su máxima capacidad. Los excedentes del generador son utilizados para cargar el banco de baterías. Esta estrategia tiende a ser óptima cuando hay poco/nada de potencia renovable en el sistema.

3.2 Metodología

El programa HOMER realiza tres tareas principales:

1. **Simulación:** Modela el rendimiento de un sistema generador particular para cada hora dentro de un año con el fin de determinar su factibilidad técnica y su costo total.
2. **Optimización:** Simula diferentes configuraciones de sistemas en busca del que cumpla con requerimientos técnicos al menor costo en el ciclo de vida.
3. **Análisis de sensibilidad:** Realiza optimizaciones bajo un rango de parámetros de entrada con el fin de disminuir la incertidumbre respecto a su evolución en el tiempo.

3.2.1 Simulación mediante HOMER

El proceso de simulación determina como se va a comportar un sistema bajo ciertas condiciones en un periodo fijo de tiempo. El proceso de simulación cumple dos objetivos principales:

- Determinar si un sistema es factible técnicamente. Un sistema se considera factible si puede satisfacer todas las condiciones impuestas por el usuario, principalmente respecto a satisfacer las demandas eléctricas.
- Determina el costo total del sistema, que corresponde a los costos de adquisición, instalación y operación, durante el ciclo de vida del mismo.

El programa realiza una simulación de la operación de una configuración específica de un sistema a lo largo de un año. Con un intervalo de tiempo de una hora, el programa calcula la cantidad de energía generada mediante fuentes renovables y la compara con la demanda eléctrica medida. Luego el programa decide qué hacer con la energía sobrante en caso de que ésta sea mayor a la demanda, o como satisfacer el déficit eléctrico en caso de que ésta sea menor a la demanda.

De forma paralela HOMER determina los ítems necesarios para poder calcular el costo de ciclo de vida del sistema. Entre estos ítems se encuentran: consumo anual de combustible, vida útil esperada de los equipos, horas de operación del generador.

El costo de ciclo de vida de un sistema se representa finalmente por el valor actual neto (VAN; NPC: net present cost), el cual incluye todos los costos que se realizan durante la vida útil del sistema, como por ejemplo: costos de adquisición de equipos (inversión), costos de remplazo de equipos, costos de mantención de equipos, costos de combustible.

3.2.2 Optimización mediante HOMER

El proceso de optimización consiste en encontrar la mejor configuración posible para un sistema. Se considera como la mejor configuración aquella que sea capaz de satisfacer todas las condiciones impuestas por el usuario al menor costo posible.

En el proceso de optimización, el programa HOMER simula varias configuraciones, descartando aquellas que no cumplen con las condiciones iniciales, y luego las presenta ordenadas según el menor valor actual neto (VAN).

El objetivo principal del proceso es determinar el valor óptimo para cada una de las variables de interés. Algunas variables de interés que pueden ser manipuladas por el usuario son: Número de turbinas eólicas, tamaño del arreglo fotovoltaico, tamaño de los generadores diesel, número de baterías en el sistema, estrategia de control de carga, etc.

3.3 Parámetros de la simulación

En esta sección se muestra como el programa HOMER modela la operación física de un sistema.

Se describen los tres parámetros de entrada necesarios para realizar la simulación: Las cargas eléctricas o térmicas que el sistema debe satisfacer; Los recursos energéticos disponibles ya sean renovables o convencionales; Y finalmente, los componentes del sistema.

3.3.1 Cargas

Las cargas hacen referencia a la demanda eléctrica o térmica que debe satisfacer un sistema. Sin la existencia de este tipo de demandas, la existencia de sistemas generadores no se justificaría. Por lo tanto, la determinación de las cargas es el primer paso hacia la definición de un sistema de generación eléctrica.

Existen tres tipos de cargas que el programa HOMER puede modelar:

- Carga primaria: corresponde a la demanda eléctrica que se debe suministrar de acuerdo a un horario en particular (luminarias, computadores, electrodomésticos, etc.)
- Carga diferible: corresponde a la demanda eléctrica que se puede suministrar en cualquier momento dentro de un período de tiempo. (bombas de agua, estaciones de carga de baterías, etc.)
- Carga térmica: corresponde a la demanda de calor

Dadas las condiciones de las localidades a las cuales se busca electrificar- escuelas rurales donde la principal carga corresponde a iluminación y uso de ciertos aparatos electrónicos- es que se define una única carga primaria, descartando la existencia de cargas diferibles o térmicas.

3.3.1.1 Carga primaria

La carga primaria es aquella que el sistema generador debe satisfacer en un instante específico. Cuando se enciende un electrodoméstico, por ejemplo, el sistema debe proveer de energía instantáneamente para su uso.

Existen dos maneras de incorporar los datos de demanda eléctrica al programa HOMER:

1. La primera opción consiste en ingresar las potencias medias horarias de casa mes separando días de la semana y fines de semana, por lo tanto, un total de 576 datos ($24 \times 12 \times 2 = 576$). Se debe introducir además información respecto a la variabilidad de los datos incorporados (desviación estándar de potencias medias)
2. La segunda opción consiste en importar un registro de consumo anual con un intervalo temporal fijo (a menor paso temporal, mayor precisión en el perfil de demanda). De esta manera, el programa HOMER calcula las desviaciones estándar necesarias para la simulación.

3.3.2 Recursos

Los recursos se refieren a todo aquello que es exterior al sistema que es utilizado para generar energía eléctrica por el sistema. Los recursos pueden ser renovables o convencionales, dentro de los cuales se considera:

- Recurso solar
- Recurso eólico
- Recurso hídrico
- Biomasa
- Combustible

Los recursos renovables y/o convencionales disponibles en una localidad específica afectan directamente el comportamiento de un sistema de generación, dado que determinan la cantidad de energía eléctrica que el sistema es capaz de producir.

Es por esto que una definición detallada de los recursos existentes, considerando aspectos como la intermitencia horaria o la estacionalidad, son elementos esenciales a la hora de simular un sistema de manera correcta.

3.3.2.1 Recurso Solar

El recurso solar depende fuertemente de la posición geográfica y del clima de una localidad. Para poder modelar un sistema de generación que contenga un arreglo fotovoltaico, es necesario ingresar al programa datos del recurso solar de una localidad en específico. Los datos de recurso solar indican la radiación

global incidente (radiación directa del sol, más la radiación difusa) que llega a la superficie en un determinado año.

Existen tres maneras de ingresar los datos de radiación al programa HOMER:

1. Medias horarias de radiación global horizontal, medidas en $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$.
2. Medias mensuales de radiación global horizontal, medidas en $\left[\frac{kWh}{m^2\ dia}\right]$
3. Medias mensuales de índice de claridad. [0,1]

3.3.2.2 Recurso eólico

El recurso eólico depende de patrones de circulación atmosférica además factores geográficos. Para poder modelar un sistema de generación que contenga una turbina eólica, es necesario ingresar al programa datos de velocidad de viento anuales.

Existen dos maneras de ingresar los datos de velocidad de viento al programa HOMER:

1. Se puede importar datos de velocidad de viento con un intervalo de una hora para un periodo de un año.
2. Se pueden ingresar velocidades de viento medias mensuales (12 datos), con los cuales el programa puede generar datos horarios de velocidad de viento. Para que esto sea posible, es necesario ingresar además algunos parámetros estadísticos como lo son: El factor de forma de Weibull, el factor de auto correlación, el patrón diurno de intensidad y la hora promedio del día en que se registra el máximo de velocidad de viento.

Además, se debe ingresar los siguientes parámetros de entrada:

- Altura del anemómetro sobre la superficie a la cual se realizó la medición o estimación de la velocidad de viento.
- Altura sobre el nivel del mar de la localidad en específico.

Si la altura del anemómetro es diferente a la altura de la turbina eólica, el programa recalcula la velocidad de viento a la altura de la turbina utilizando la ley logarítmica (supone que la velocidad de viento es proporcional al logaritmo de la altura sobre la superficie) o utilizando la ley de potencias, (supone que la velocidad de viento varía exponencialmente con la altura).

3.3.2.3 Combustible

Se deben ingresar las propiedades físicas del o los combustible que se utiliza como recurso para la generación eléctrica. Las propiedades que se debe ingresar son:

- Densidad
- Poder calorífico inferior (LHI)

- Contenido de carbón
- Contenido de azufre

Se debe indicar además el precio unitario del combustible $\left(\frac{\$}{L}, \frac{\$}{m^3} \text{ ó } \frac{\$}{kg}\right)$ y el límite de consumo anual permitido.

3.3.3 Componentes

Los componentes son las partes de un sistema de potencia que tienen como objetivo generar, entregar, convertir o almacenar energía eléctrica.

A continuación se muestra como el programa HOMER modela cada uno de los componentes de un sistema de generación eléctrica, incluyendo sus propiedades y los parámetros que debe ingresar el usuario para realizar una correcta simulación.

3.3.3.1 Arreglo fotovoltaico

El programa modela el arreglo fotovoltaico como un sistema que genera electricidad directamente proporcional a la radiación solar incidente sobre él. Para calcular la potencia de salida del arreglo, considerando el efecto de la temperatura sobre el panel, se utiliza la ecuación (3.1):

$$P_{PV} = f_{PV} Y_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,STC})] \quad (3.1)$$

Dónde:

f_{PV} : Es el factor de reducción.

Y_{PV} : Es la capacidad nominal del arreglo fotovoltaico [kW].

G_T : Es la radiación solar global incidente en la superficie del arreglo $\left[\frac{kW}{m^2}\right]$.

$G_{T,STC}$: Es la radiación solar incidente bajo condiciones estándar $\left[1 \frac{kW}{m^2}\right]$.

α_p : Es el coeficiente de temperatura de la energía [%/°C].

T_c : Es la temperatura del panel fotovoltaico en cada momento de medición [°C].

$T_{c,STC}$: Es la temperatura del panel fotovoltaico bajo condiciones estándar [25 °C].

El factor de reducción es un valor que permite cuantificar algunas condiciones de operación que se alejen del óptimo para el arreglo fotovoltaico. Algunos ejemplos son: Suciedad en los paneles, altas temperaturas, condiciones degenerativas de los materiales del panel, etc.

La potencia nominal es aquella que el arreglo fotovoltaico produciría bajo condiciones estándar de funcionamiento (C.E.: $1 \left[\frac{kW}{m^2}\right]$ de irradiación, $T = 25 \text{ °C}$). La potencia nominal da cuenta tanto del área como de la eficiencia del módulo fotovoltaico, por lo tanto estos parámetros no se hacen explícitos en la simulación.

La radiación solar global incidente en el arreglo fotovoltaico se calcula a través de la radiación global horizontal en una zona utilizando el modelo HDKR (10), como se muestra en la ecuación (3.2):

$$\overline{G_T} = (\overline{G_b} + \overline{G_d}A_i)R_b + \overline{G_d}(1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) + \overline{G} \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (3.2)$$

Dónde:

β : Es la inclinación de la superficie [°].

ρ_g : Es la reflectancia del suelo, llamada albedo [%]

\overline{G} : Es la radiación global horizontal promedio sobre la superficie terrestre $\left[\frac{kW}{m^2} \right]$.

$\overline{G_b}$: Es la radiación directa promedio $\left[\frac{kW}{m^2} \right]$.

$\overline{G_d}$: Es la radiación difusa promedio $\left[\frac{kW}{m^2} \right]$.

A_i : Es el índice de anisotropía.

R_b : Es la razón entre la radiación directa sobre la superficie inclinada y la radiación directa sobre la superficie horizontal.

f : Es un factor utilizado para dar cuenta de que existe mayor influencia de la radiación difusa proveniente del horizonte que de la radiación difusa proveniente del cielo.

En términos económicos, se deben especificar todos los costos asociados a la implementación de un arreglo fotovoltaico dentro del sistema. Estos costos se dividen en: Capital inicial de adquisición, costo de instalación, costos de operación y mantenimiento y costo de remplazo de equipos.

3.3.3.2 Turbina eólica

Para calcular la energía generada por una turbina eólica, el programa HOMER utiliza su curva característica de potencia, un gráfico de potencia de salida relacionado con la velocidad del viento a la altura del eje del generador.

En la Figura 3.1 se muestra un ejemplo de la curva de potencia de un aerogenerador.

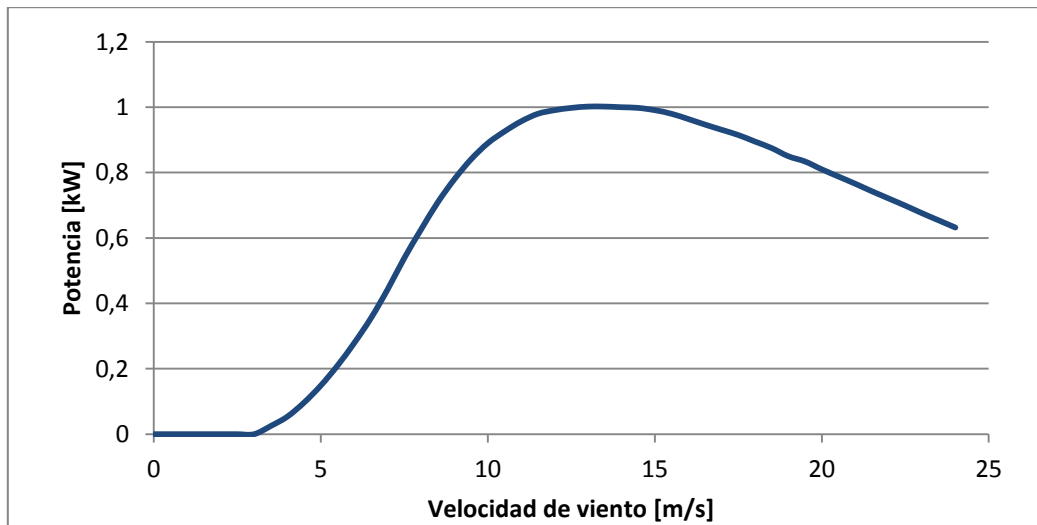


Figura 3.1 Ejemplo de curva característica de potencia de una turbina eólica.

El proceso por el cual se realiza el cálculo de la potencia de salida se puede describir en 3 pasos:

1. Utilizando los datos medidos, se determina la velocidad media de viento para cada hora a la altura del anemómetro utilizado.
2. Utilizando la ley logarítmica o la ley de potencia, se calcula la velocidad de viento a la altura del eje del generador.
3. Utilizando la curva de potencia, se determina la potencia de salida de la turbina eólica.

El usuario debe especificar la curva de potencia para cada turbina eólica que ingrese como equipo generador, además de la altura del eje a la cual se instalará y la vida útil del equipo.

En términos económicos, el usuario debe especificar todos los costos asociados a la implementación de una o más turbinas eólicas dentro del sistema. Estos costos se dividen en: Capital inicial de adquisición, costo de instalación, costos de operación y mantenimiento y costo de remplazo de equipos.

3.3.3.3 Generador diesel

El programa simula uno o más generadores diesel en funcionamiento tomando en cuenta una serie de parámetros, como lo son: Potencia de salida máxima y mínima, vida útil expresada en horas de operación, tipo de combustible que utiliza y la curva característica de consumo de combustible.

La curva de consumo de combustible relaciona la cantidad de combustible consumido con la energía eléctrica producida.

La curva de consumo puede ser aproximada por la ecuación(3.3) :

$$F = F_0 Y_{gen} + F_1 P_{gen} \quad (3.3)$$

Dónde:

Y_{gen} : Es la potencia de salida medida del generador [kW]

P_{gen} : Es la potencia nominal del generador [kW]

F_0 : Es la constante de intercepción en la curva de consumo.

F_1 : Es una constante que representa la pendiente de la curva de consumo.

En términos económicos, el usuario debe especificar todos los costos asociados a la implementación de uno o más generadores diesel dentro del sistema. Estos costos se dividen en: Capital inicial de adquisición, costo de instalación, costos de operación y mantenimiento y costo de remplazo de equipos. Los costos de operación no deben considerar el costo de combustible, pues ese costo es calculado por el programa de manera aparte.

El programa HOMER calcula el costo fijo de energía y el costo marginal de generación. El costo fijo de energía corresponde al costo de mantener al generador en funcionamiento, y se calcula utilizando la ecuación (3.4):

$$C_{gen,fixed} = C_{om,gen} + \frac{C_{rep,gen}}{R_{gen}} + F_0 Y_{gen} c_{fuel,eff} \quad (3.4)$$

Dónde:

$C_{om,gen}$: Es el costo de operación y mantenimiento por hora de funcionamiento.

$C_{rep,gen}$: Es el costo de remplazo.

R_{gen} : Es el tiempo de vida en horas.

$c_{fuel,eff}$: Es el precio efectivo del combustible [US\$/L].

F_0 : Es la constante de intercepción en la curva de consumo.

El costo marginal de generación, correspondiente al costo por cada [kWh] de generación adicional, se obtiene utilizando la ecuación (3.5):

$$C_{gen,mar} = F_1 c_{fuel,eff} \quad (3.5)$$

Dónde:

$c_{fuel,eff}$: Es el precio efectivo del combustible [US\$/L].

F_1 : Es una constante que representa la pendiente de la curva de consumo.

3.3.3.4 Banco de baterías

El programa modela una batería capaz de almacenar energía eléctrica, considerando como características principales a la rapidez en la que puede ser cargada o descargada, cuánto puede ser descargada de una vez sin que se produzcan daños y cuantos ciclos de carga y descarga puede soportar antes de que sea necesario reemplazarla.

Las propiedades físicas que el programa utiliza para determinar estos factores son: voltaje nominal, curva de capacidad, curva de tiempo de vida y el estado mínimo de carga. Se asume que estas propiedades permanecen constantes durante toda la vida útil de las baterías. El tiempo de vida del banco de baterías se puede estimar a través de la ecuación (3.6):

$$R_{batt} = \min\left(\frac{N_{batt} Q_{lifetime}}{Q_{thrpt}}, R_{batt,f}\right) \quad (3.6)$$

Dónde:

N_{batt} : Es el número de baterías en el banco.

$Q_{lifetime}$: Es el rendimiento de una batería a lo largo de su vida útil.

Q_{thrpt} : Es la cantidad de energía que circula por el banco de baterías en un año.

$R_{batt,f}$: La vida útil máxima de una batería independientemente del rendimiento.

En términos económicos, el usuario debe especificar todos los costos asociados a implementación de un banco de baterías dentro del sistema. Estos costos se dividen en: Capital inicial de adquisición, costos de mantenimiento y costo de reemplazo de equipos. Se considera que el costo de operación del banco de baterías es nulo.

Para conocer el costo marginal de energía, el programa utiliza dos conceptos: el costo por [kWh] de energía que circula por el banco de baterías, llamado costo de desgaste de la batería, y el costo promedio de energía almacenada en el banco de baterías, llamado costo de energía de la batería.

Para calcular el costo de desgaste, se utiliza la ecuación (3.7):

$$C_{bw} = \frac{C_{rep,batt}}{N_{batt} Q_{lifetime} \sqrt{\eta_{rt}}} \quad (3.7)$$

Dónde:

$C_{rep,batt}$: Es el costo de reemplazo del banco de baterías [US\$]

N_{batt} : Es el número de baterías en el banco.

$Q_{lifetime}$: Es el rendimiento de una batería a lo largo de su vida útil.

η_{rt} : Es el rendimiento de un ciclo de carga y descarga.

3.3.3.5 **Inversor**

Se debe indicar al programa si el inversor puede funcionar de forma inversa conectado a la red o a un generador alterno. Además se deben introducir las eficiencias de inversión y rectificación, las cuales se asumen constantes.

En términos económicos, el usuario debe especificar todos los costos asociados a implementación de un inversor de voltaje dentro del sistema. Estos costos se dividen en: Capital inicial de adquisición, costos de operación y mantenimiento y costo de remplazo de equipos.

4. Determinación de recursos energéticos renovables

La determinación de los recursos renovables disponibles en la zona está asociada a la cantidad de datos cronológicos que se encuentran en las fuentes mostradas en el capítulo preliminar.

Cabe destacar, como se ha mencionado anteriormente, que a menor espacio temporal entre datos obtenidos, existe mayor precisión en el modelo, así como también frente a una mayor cantidad de fuentes asociadas.

4.1 Recurso solar

Se muestran a continuación en la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3, las curvas de insolación horizontal media diaria representativa para cada mes del año y para cada una de las tres localidades consideradas en el estudio.

Se muestran tres curvas en cada una de las figuras, correspondientes a los datos obtenidos de cada una de las tres fuentes utilizadas para la determinación de la insolación horizontal.

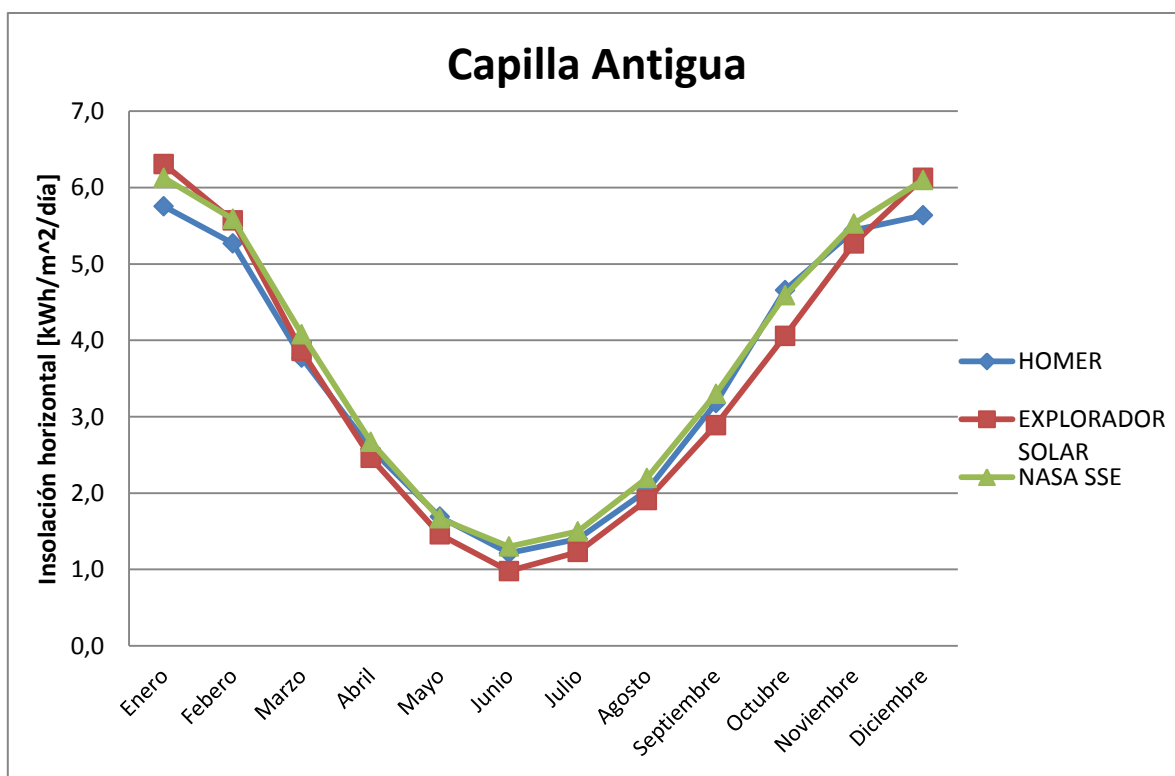


Figura 4.1 Insolación diaria media para la escuela Capilla Antigua.

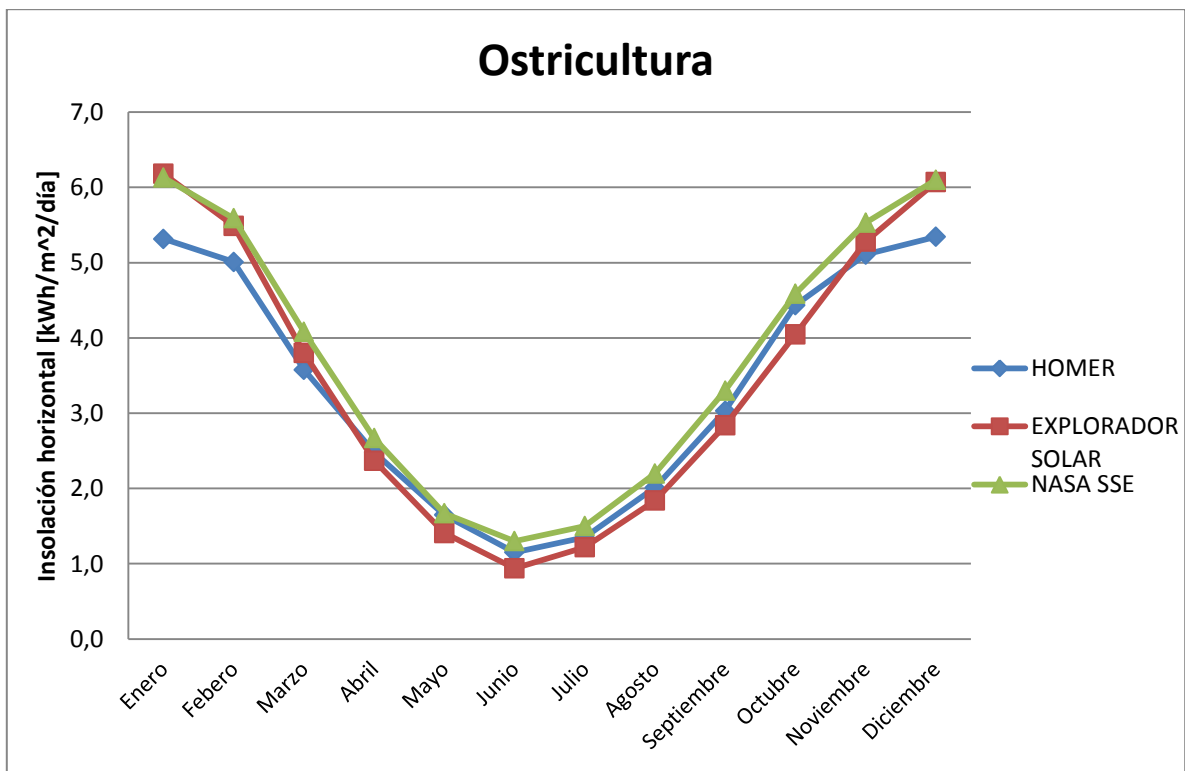


Figura 4.2 Insolación diaria media para la escuela Ostricultura.

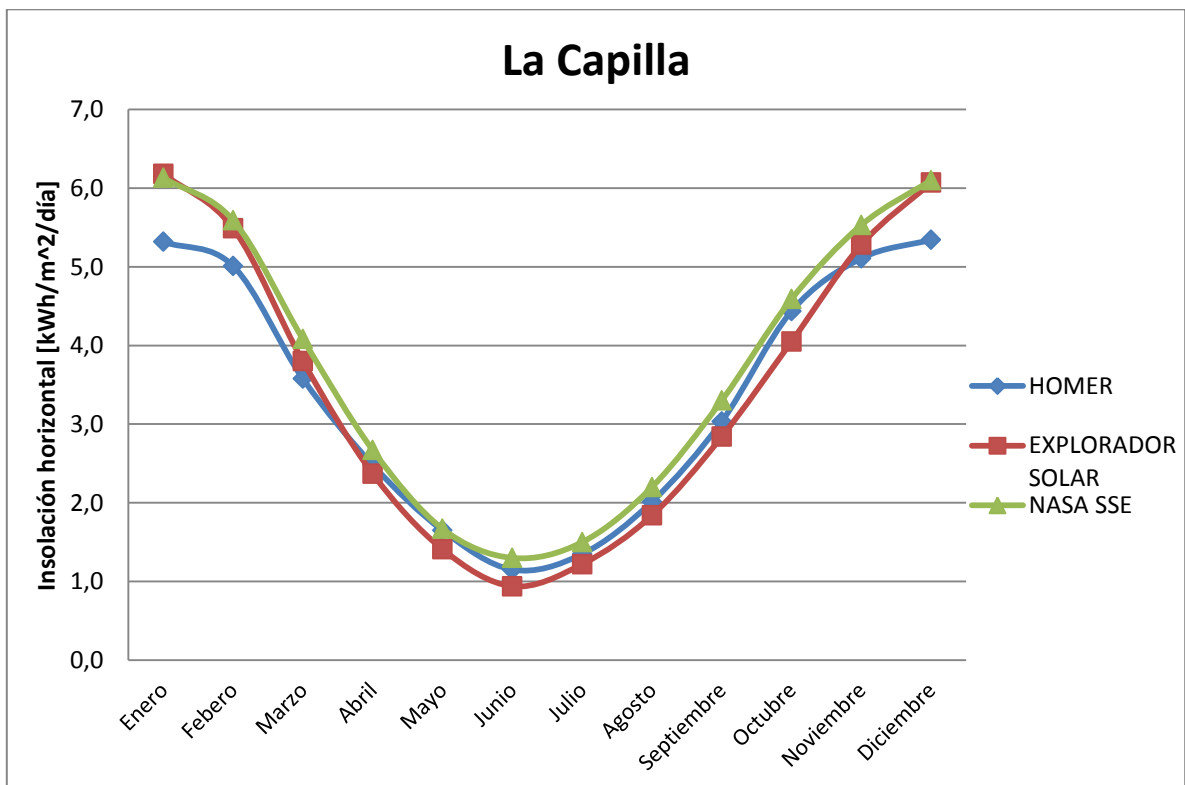


Figura 4.3 Insolación diaria media para la escuela La Capilla.

4.1.1 Consideraciones para la simulación

Existen dos maneras de incorporar los datos del recurso solar al programa HOMER:

1. Importar un registro anual de irradiación que tenga un intervalo de tiempo fijo que puede ser definido por el usuario.
2. Conocer la insolación global media diaria para cada mes del año en un plano horizontal y el índice de claridad media asociado a cada mes, el cual el programa facilita al introducir la ubicación (latitud, longitud) y la zona horaria de una zona determinada.

Se puede observar en la Figura 4.1, Figura 4.2 y Figura 4.3 que los valores medios entregados por el explorador solar corresponden a los más bajos para la mayoría de los meses del año. Por lo tanto, se escoge esta fuente para ser utilizada en la simulación de modo de mantener un criterio conservador en la selección de datos. Además, cuenta con un registro anual con un intervalo de 1 hora (60 minutos) entre datos, ideal para entregar mayor confiabilidad a la simulación.

En la Tabla 4.1 y en la Figura 4.4 se muestra la insolación promedio obtenida por el explorador solar. En la Figura 4.5 se muestra la distribución que se utiliza para realizar la simulación en HOMER.

Tabla 4.1 Insolación media mensual entregada por el Explorador Solar.

Sector	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg. Año
Capilla Antigua	6,31	5,57	3,86	2,46	1,46	0,98	1,23	1,91	2,89	4,06	5,27	6,13	3,51
Ostricultura	6,18	5,49	3,80	2,37	1,41	0,94	1,22	1,84	2,84	4,05	5,28	6,07	3,46
La Capilla	6,16	5,48	3,80	2,40	1,42	0,92	1,22	1,86	2,88	4,03	5,21	6,07	3,45
Avg. mensual	6,22	5,51	3,82	2,41	1,43	0,95	1,22	1,87	2,87	4,05	5,25	6,09	3,47

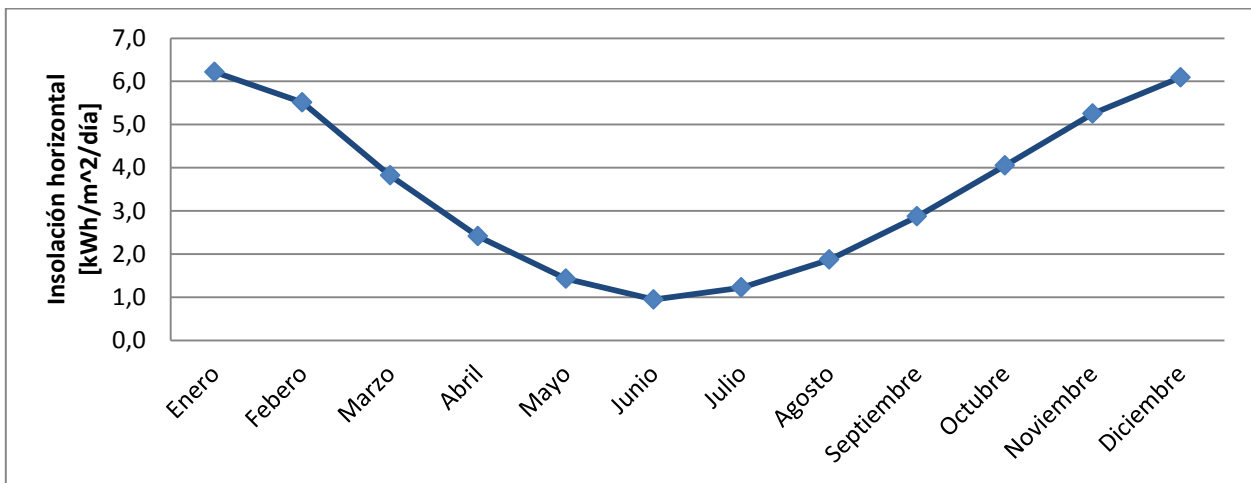


Figura 4.4 Promedio de Insolación media mensual obtenida del Explorador Solar.

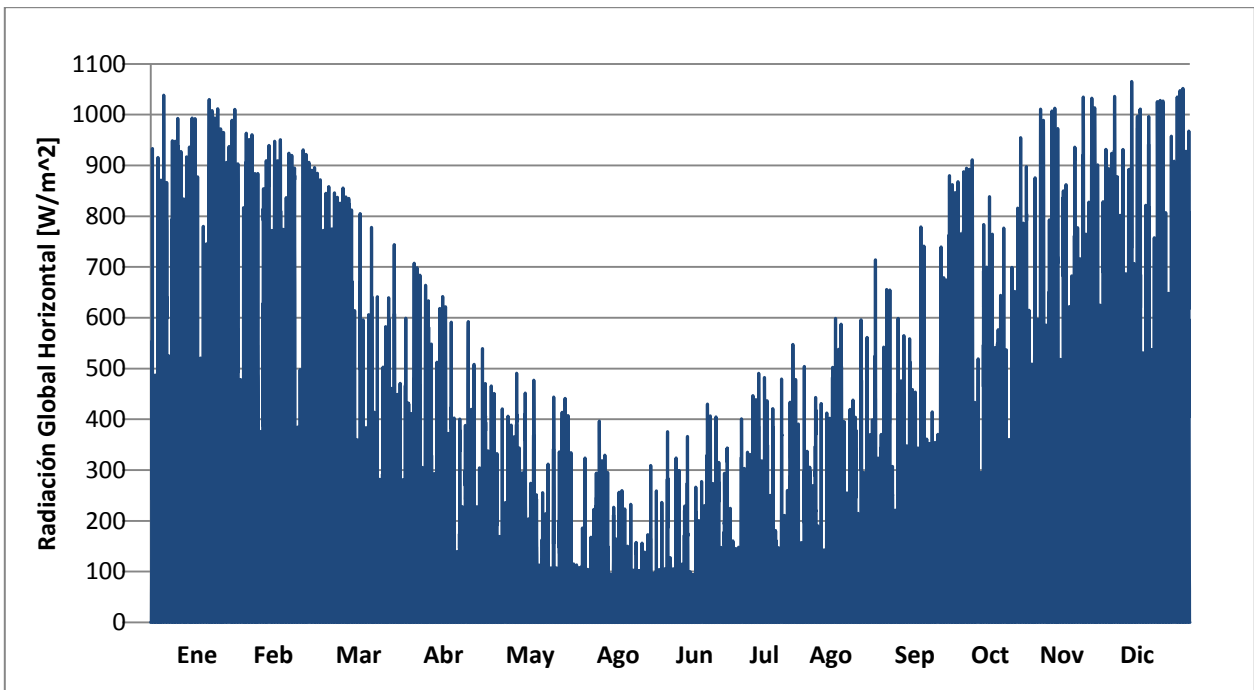


Figura 4.5 Distribución anual de radiación global.

Utilizando los datos de insolación horizontal media obtenidos para la zona, en conjunto con los datos de posición (latitud, longitud) y la zona horaria correspondiente, el programa calcula los índices de claridad para cada mes, como se puede ver en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Índice de claridad para la zona seleccionada.

Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0,521	0,527	0,465	0,416	0,36	0,3	0,347	0,375	0,396	0,42	0,456	0,493

4.2 Recurso eólico

Se muestran a continuación en la Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8, las curvas de velocidad de viento media diaria representativa para cada mes del año y para cada una de las tres localidades consideradas en el estudio.

Se muestran tres curvas en cada figura correspondientes a las fuentes de datos escogidas para distintas alturas características.

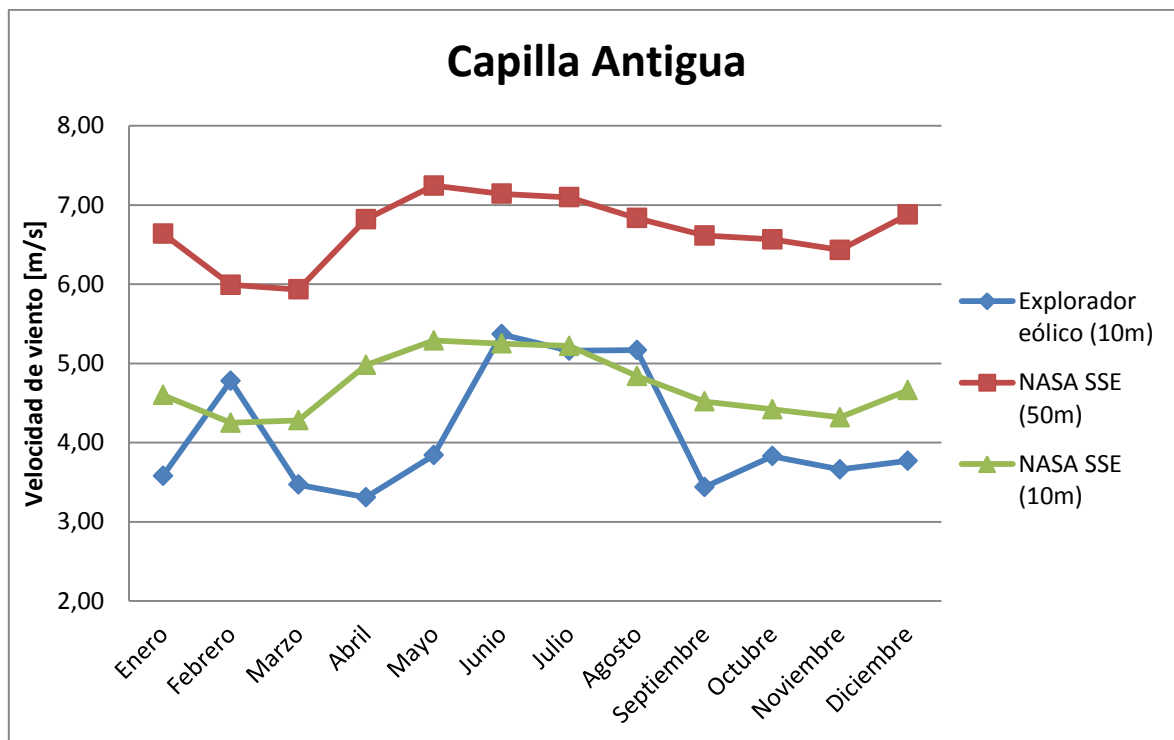


Figura 4.6 Velocidad de viento media mensual para la escuela Capilla Antigua.

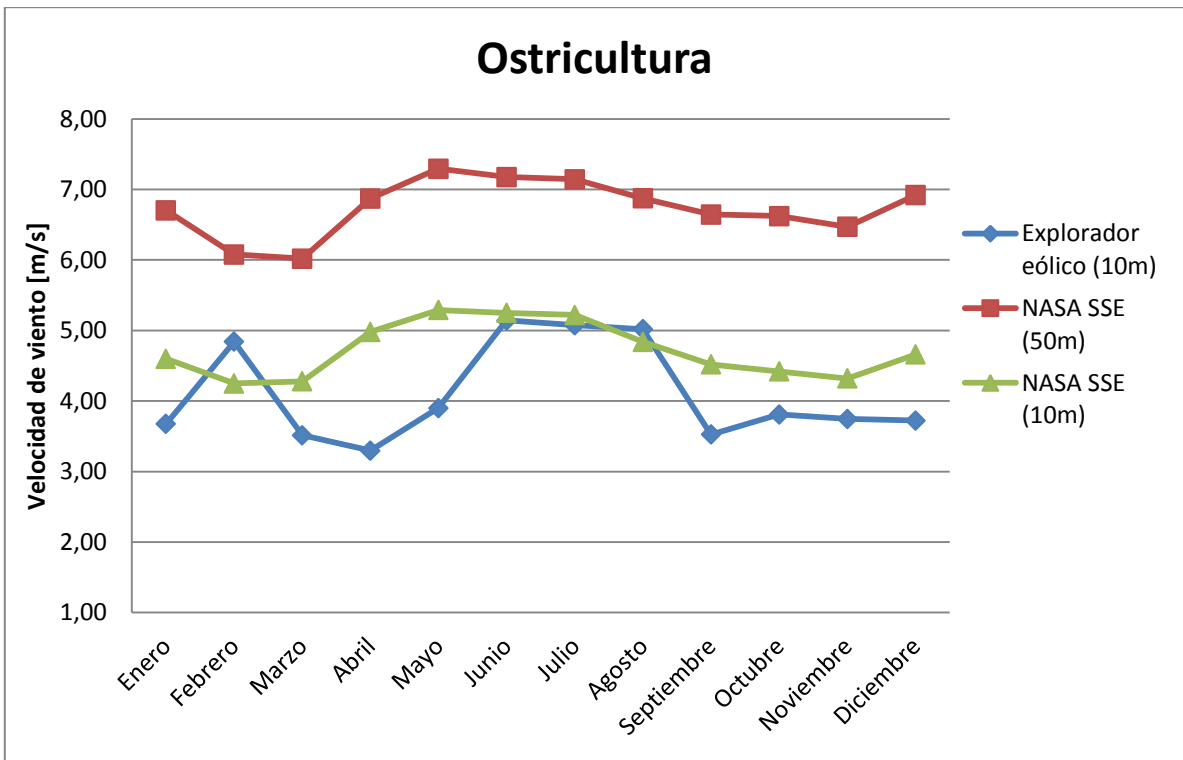


Figura 4.7 Velocidad de viento media mensual para la escuela Ostricultura.

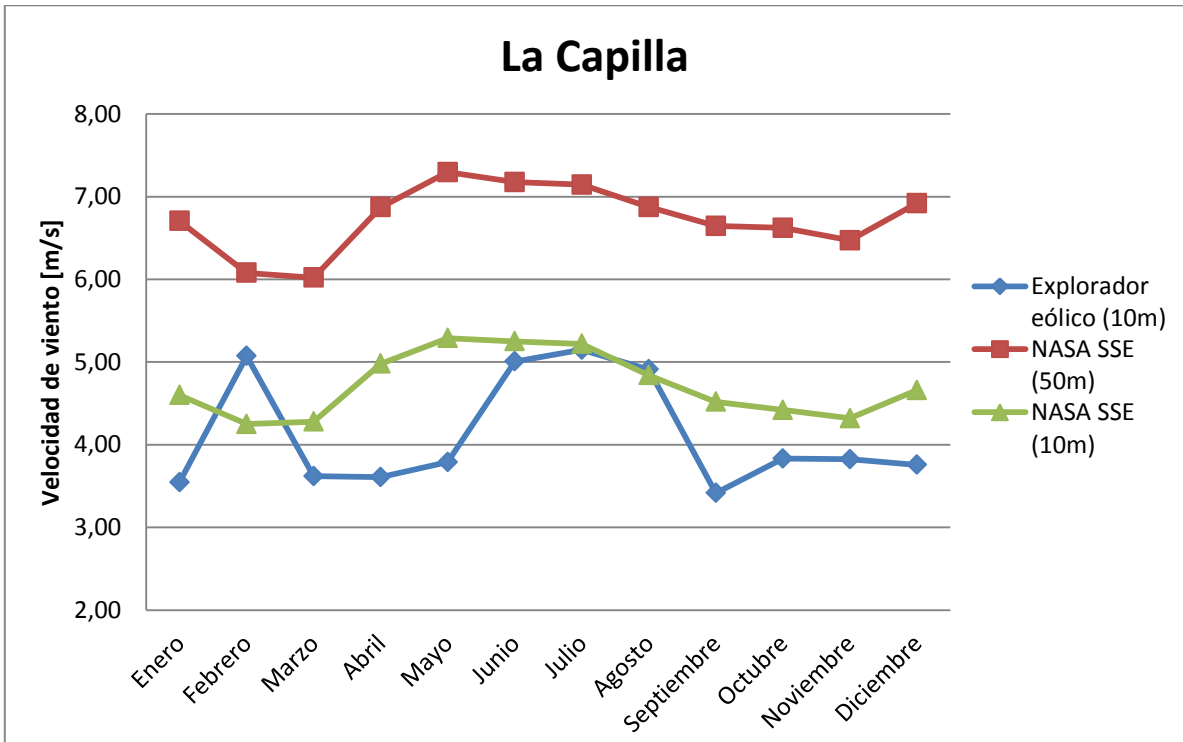


Figura 4.8 Velocidad de viento media mensual para la escuela La Capilla.

4.2.1 Consideraciones para la simulación

Existen dos maneras de incorporar los datos del recurso eólico al programa HOMER:

1. Importar un registro anual de velocidad de viento obtenido de forma directa y que tenga un intervalo de tiempo fijo pequeño (idealmente del orden de minutos).
2. Conocer la velocidad de viento media para cada mes del año.

Si bien para la segunda opción existe una mayor cantidad de fuentes, se debe tener en cuenta que se necesita información extra para obtener mayor precisión en la simulación, como lo es: Los parámetros de Weibull asociados al recurso, el modelo diurno de intensidad y la hora promedio del día a la que se produce la mayor velocidad de viento. Mientras que para la primera opción solo es necesario conocer la altura sobre el nivel del mar de la localidad y la altura sobre el suelo a la que se realiza la medición. Al introducir los datos, el programa calcula los parámetros de Weibull asociados.

Para definir correctamente el recurso eólico, se necesita mayor cantidad de información debido a lo fluctuante que es el comportamiento del viento. En ese sentido, el explorador eólico cuenta con un registro anual con un intervalo de 1 hora (60 minutos) entre datos, por lo que cumple con los requerimientos.

Además, se puede observar en la Figura 4.6, Figura 4.7 y Figura 4.8, que los valores medios entregados por el explorador eólico corresponden a los más bajos para la mayoría de los meses del año. Por lo tanto, se escoge esta fuente para ser utilizada en la simulación de modo de mantener un criterio conservador en la selección de datos.

En la Tabla 4.3 y en la Figura 4.9 se muestra la insolación promedio obtenida por el explorador solar. En la Figura 4.10 se muestra la distribución que se utiliza para realizar la simulación en HOMER.

Tabla 4.3 Velocidad de viento media mensual entregada por el Explorador Eólico.

Sector	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Avg. Año
Capilla Antigua	3,58	4,78	3,47	3,31	3,84	5,37	5,16	5,17	3,44	3,83	3,66	3,77	4,11
Ostricultura	3,68	4,84	3,52	3,30	3,90	5,14	5,08	5,02	3,53	3,81	3,75	3,72	4,11
La Capilla	3,55	5,07	3,62	3,61	3,79	5,01	5,15	4,91	3,42	3,83	3,82	3,76	4,13
Avg. mensual	3,60	4,90	3,53	3,40	3,84	5,17	5,13	5,03	3,46	3,82	3,74	3,75	4,12

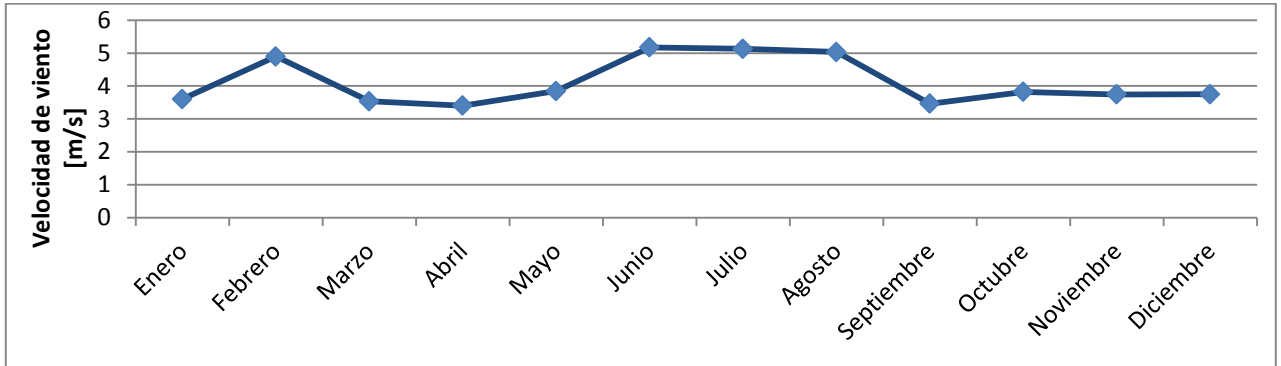


Figura 4.9 Promedio de velocidad de viento media mensual obtenida del Explorado Eólico.

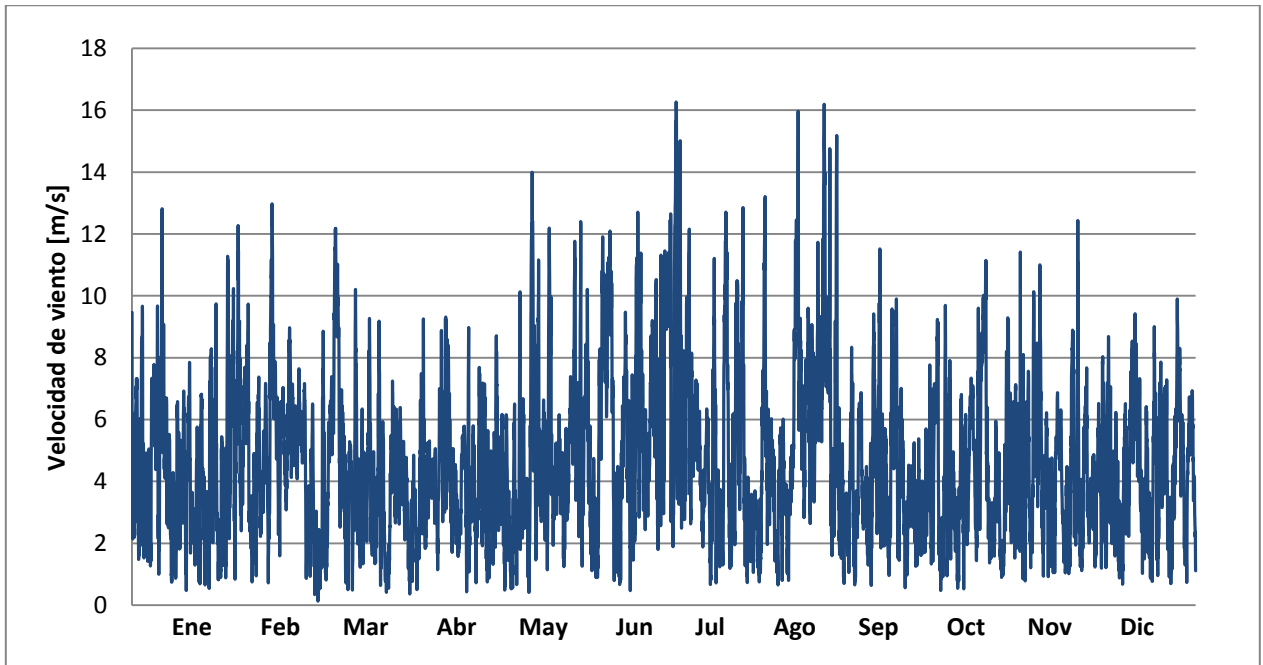


Figura 4.10 Distribución anual de velocidad de viento.

En la Figura 4.11 se puede observar la distribución de la velocidad de viento característica a lo largo de las 24 horas para cada mes del año.

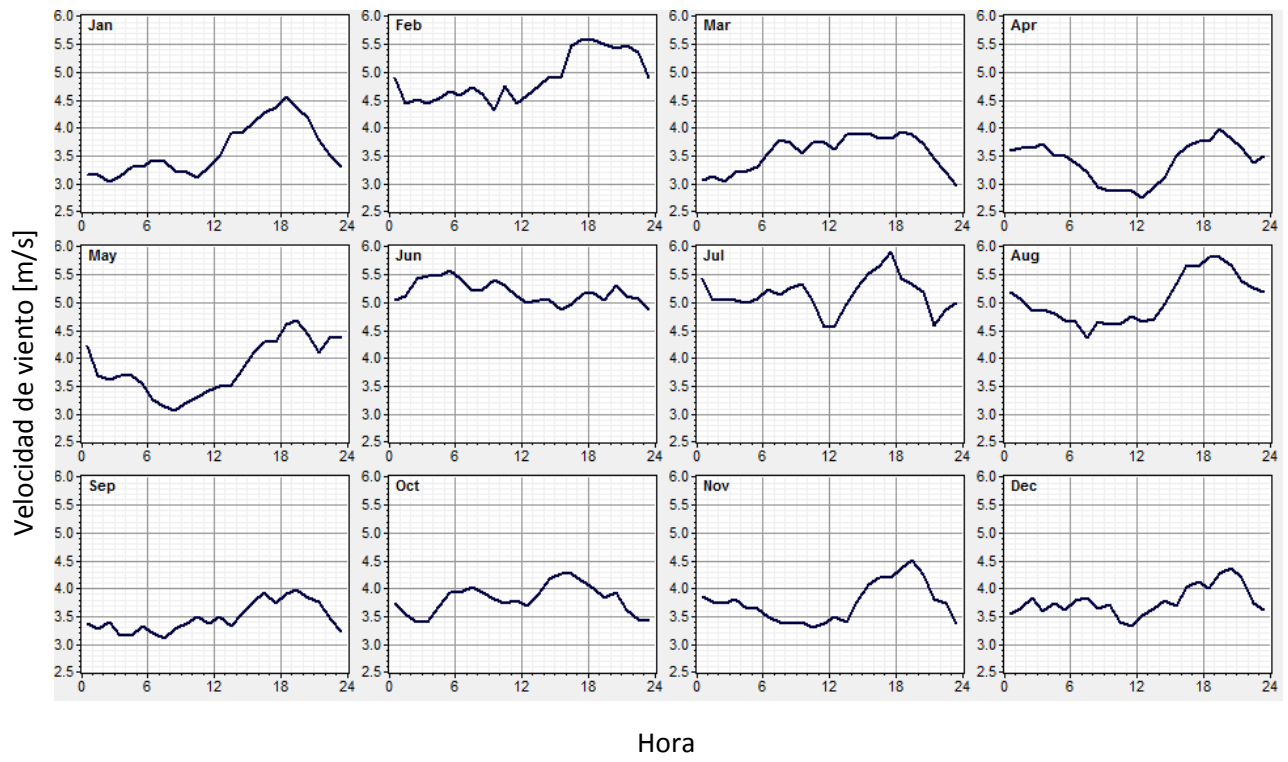


Figura 4.11 Distribución media mensual de la velocidad de viento a lo largo del día.

5. Determinación de la demanda de energía eléctrica

Se muestra a continuación la metodología utilizada para caracterizar la demanda eléctrica actual de cada uno de los grupos de escuelas establecidos.

Como se menciona al comienzo del informe, se realiza una diferenciación entre dos grupos de escuelas (escuelas pequeñas y escuelas grandes) basada en la cantidad de alumnos y la cantidad de dependencias en cada una de ellas. Se selecciona la escuela “Capilla Antigua” como escuela representativa del grupo de escuelas pequeñas, para realizar mediciones de consumo eléctrico y para obtener los datos de demanda requeridos para realizar la simulación. Lo mismo ocurre con las escuelas “Ostricultura” y “La Capilla”, las cuales se utilizan como representativas del grupo de escuelas grandes, llamado grupo B.

Existen dos maneras de incorporar los datos de demanda eléctrica al programa HOMER:

1. La primera opción consiste en ingresar las potencias medias horarias de cada mes separando días de la semana y fines de semana, por lo tanto, un total de 576 datos ($24 \times 12 \times 2 = 576$). Se debe introducir además información respecto a la variabilidad de los datos incorporados (desviación estándar de potencias medias)
2. La segunda opción consiste en importar un registro de consumo anual con un intervalo temporal fijo (a menor paso temporal, mayor precisión en el perfil de demanda). De esta manera, el programa HOMER calcula las desviaciones estándar necesarias para la simulación.

En particular, dado que no existe un registro de datos anuales para los consumos en las escuelas, se utiliza la primera opción.

El procedimiento preliminar consiste en realizar una estimación del perfil de demanda para cada hora del día en cada una de las escuelas. Para ello se supone que cada aparato eléctrico consume en base a las cargas nominales entregadas por los fabricantes.

Se efectúa por lo tanto una descripción detallada de cada una de las dependencias consideradas en el estudio, teniendo en cuenta todos los equipos conectados a la red. Luego, a través de una entrevista con cada uno de los directores(as) de las escuelas, se determinan los horarios característicos de funcionamiento para cada uno de los equipos y se construye un perfil de demanda eléctrica asociado, del cual se obtienen los 576 datos necesarios para realizar las simulaciones respectivas en el programa HOMER.

Se efectúa además una segunda medición en las escuelas “Ostricultura” de isla Apiao y “La Capilla” de isla Chaulec, pertenecientes al grupo B (escuelas grandes) en la cual se conecta un registrador de datos (data logger) llamado “Whattson” directamente al grupo electrógeno de manera de medir directamente el consumo eléctrico en cada una de las dependencias y perfeccionar el perfil obtenido mediante estimaciones.

5.1 Cargas eléctricas para las escuelas del grupo A

Como se mencionó anteriormente, para el grupo A de escuelas se utilizan las mediciones realizadas en la escuela rural Capilla Antigua, las cuales se detallan a continuación.

5.1.1 Escuela rural Capilla Antigua, Isla Quenac

5.1.1.1 Distribución de instalaciones

Se realiza a continuación una descripción detallada de la distribución de las instalaciones presentes en la escuela Capilla Antigua de la isla Quenac.

El recinto alimentado por el generador diesel correspondiente comprende 2 dependencias: La escuela rural y una pequeña casa que es utilizada por un profesor del establecimiento.

La escuela cuenta con un hall central que cumple también el rol de gimnasio para actividades recreativas durante la época de invierno.

Dentro de las dependencias de la escuela se encuentran 3 salas de clases de características similares.

La escuela posee además una cocina y un comedor, en los cuales se prepara y sirve desayuno y almuerzo a los alumnos.

Finalmente hay una pequeña oficina de dirección, la cual cuenta con una luminaria de tubos fluorescentes.

En el recinto habitacional se consideran los siguientes ítems: Un ambiente compartido para la cocina, living y comedor. Dos dormitorios pequeños. Un baño.

Existen también equipos complementarios que aportan al desarrollo integral de los alumnos durante el horario escolar. Todos los equipos presentes en la escuela se pueden observar en el detalle en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Demanda agregada de equipos presentes en la escuela rural “Capilla Antigua”.

Ítem	Descripción	Demanda unitaria [W]	Demanda por ítem [W]	Demanda agregada [W]
Escuela				
Hall	6 Fluorescentes doble tubo	40	480	480
Pasillo	3 Fluorescentes doble tubo	40	240	720
Biblioteca	1 Fluorescente doble tubo	40	80	800
Sala 1	6 Fluorescentes doble tubo	40	480	1280
	3 Computadores escritorio	150	450	1730
Sala 2	6 Fluorescentes doble tubo	40	480	2210
	1 Computador escritorio	150	150	2360
	1 Multifuncional	990	990	3350
	1 Proyector	240	240	3590
Sala 3	1 Fluorescente doble tubo	40	80	3670
Comedor	3 Fluorescentes doble tubo	40	240	3910
Cocina	2 Fluorescentes doble tubo	40	160	4070
	1 Radio	5	5	4075
	1 Televisor	55	55	4130
	1 Despensa con ampollita	60	60	4190
Sala Dirección	1 Fluorescente tubo simple	40	40	4230
	1 Multifuncional	990	990	5220
	1 Minicomponente			5220
Casa				
Puerta entrada	1 Ampolleta	60	60	5280
(cocina, living, comedor)	1 Ampolleta de ahorro	20	20	5300
	1 Televisor	67	67	5367
	1 Decodificador			5367
2 Dormitorios	1 Ampolleta de ahorro c/u	20	40	5407
Baño	1 Ampolleta de ahorro	20	20	5427
			TOTAL	5427

5.1.1.2 Determinaciones en perfil de demanda

El uso real de cada uno de los componentes mencionados anteriormente depende directamente de la hora, día y época del año. Algunas de las consideraciones que se realizan al momento de construir el perfil de demanda son:

- El año escolar comienza la segunda semana de marzo y termina la tercera semana de diciembre. Separando el primer y segundo semestre por un período de vacaciones de invierno en la tercera y cuarta semana de julio. Fuera de estas fechas, las dependencias de la escuela no se utilizan, y se considera por lo tanto que el consumo eléctrico en la escuela para este periodo es nulo.
- Los alumnos solo asisten a clases de lunes a viernes y no se realizan actividades extra programáticas regulares fuera de estos días, por lo tanto el consumo durante los fines de semana es nulo.
- Las clases comienzan a las 8:45 y terminan a las 16:00, por lo tanto el uso de luminarias comienza alrededor de las 8:30 y termina alrededor de las 18:00 cuando termina el horario laboral de los profesores.
- La casa presente en el recinto se utiliza solo una vez terminada la jornada escolar y hasta aproximadamente las 23:00 horas.

5.1.1.3 Perfil de demanda diaria para Capilla Antigua

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se construye una curva de demanda eléctrica estimada para dos épocas características del año. La Figura 5.1 muestra la muestra la curva mencionada, en la cual se consideran únicamente los equipos en los cuales su uso se pueda considerar de carácter continuado.

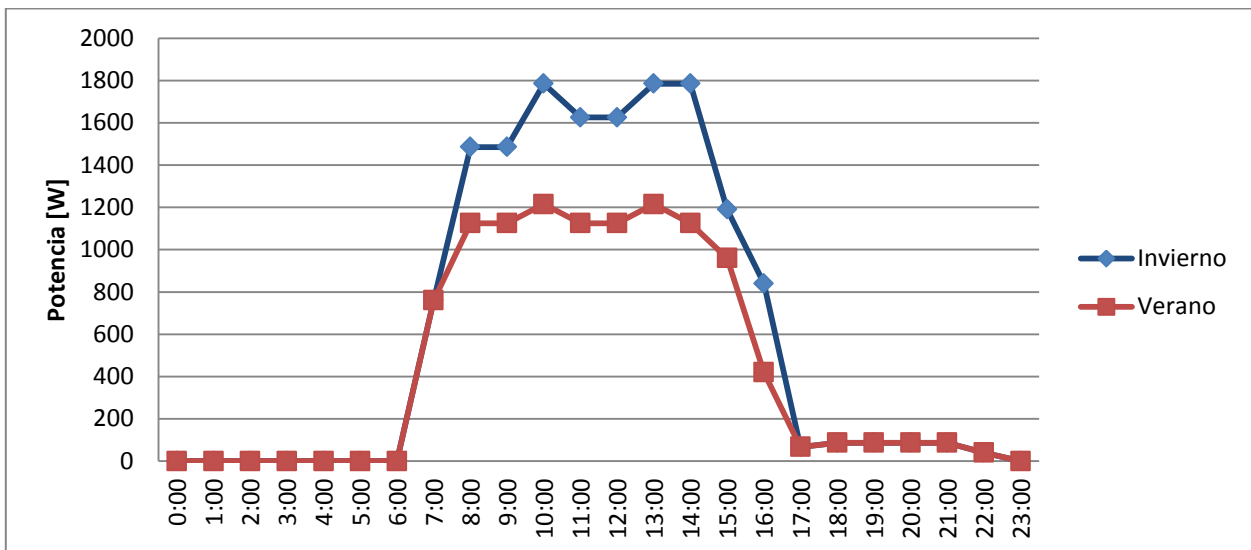


Figura 5.1 Perfil de demanda eléctrica diaria para la escuela Capilla Antigua, perteneciente a las escuelas del grupo A.

5.2 Consideraciones en la simulación

Considerando una desviación estándar de un 20% en la diferencia entre los datos horarios y el perfil medio diario, se obtiene la siguiente distribución anual de consumo:

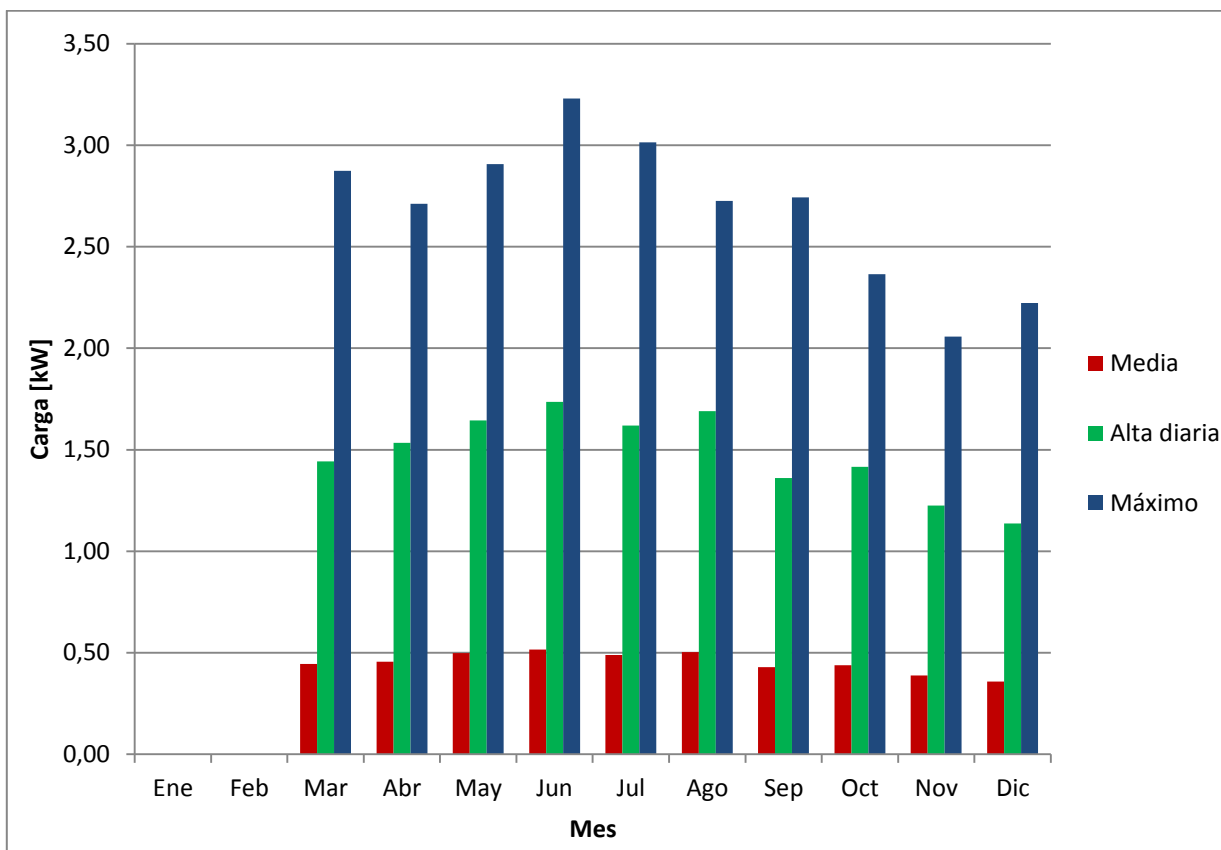


Figura 5.2 Distribución anual de cargas para escuelas pequeñas (Grupo A).

Donde se destacan los siguientes datos anuales:

- Energía media diaria: $9,10 \left[\frac{kWh}{d} \right]$
- Potencia media: $0,379 [kW]$
- Potencia máxima: $3,23 [kW]$

Se muestra en la Figura 5.3 el perfil diario de consumo eléctrico mensual para escuelas pequeñas de la comuna de Quinchao. El detalle de los datos horarios de carga ingresado al programa para realizar la simulación se puede ver en la Tabla 12.10, en la sección anexos. Cabe destacar que la información que se muestra corresponde a días de la semana, ya que en los fines de semana el consumo se considera nulo.

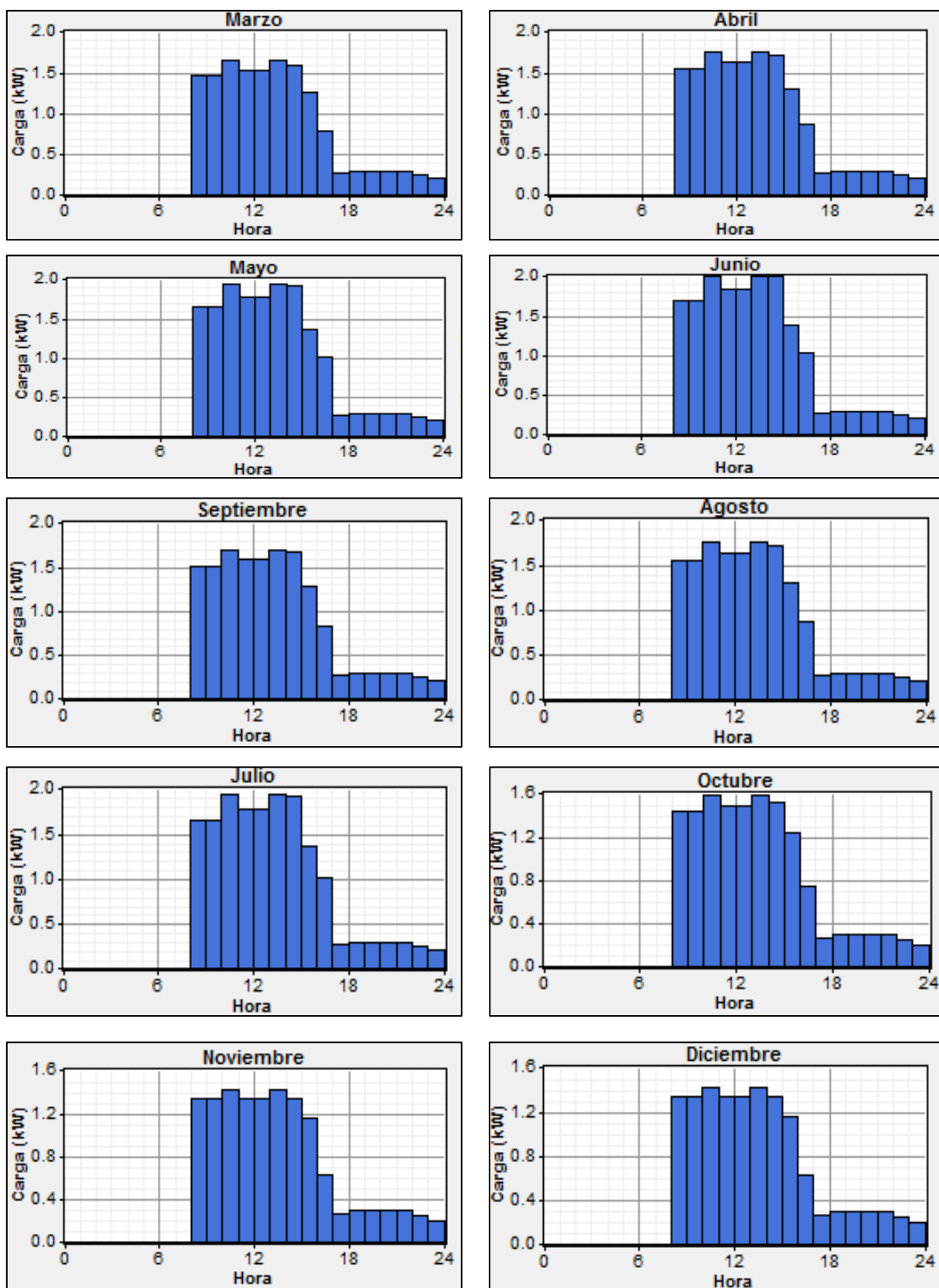


Figura 5.3 Perfil diario de consumo eléctrico mensual para escuelas del grupo A de la comuna de Quinchao.

5.3 Cargas eléctricas para las escuelas del grupo B

Como se mencionó anteriormente, para el grupo B de escuelas se utilizan las mediciones realizadas en la escuela rural Capilla Antigua, las cuales se detallan a continuación.

5.3.1 Escuela rural Ostricultura, Isla Apiao

5.3.1.1 Distribución y cargas presentes

Se realiza a continuación una descripción detallada de la distribución de las instalaciones presentes en la escuela Ostricultura de la isla Apiao.

El recinto alimentado por el generador diesel correspondiente comprende 5 dependencias: La escuela rural, un gimnasio techado y 3 casas que son utilizadas por profesionales del establecimiento durante la semana.

La escuela cuenta con un hall central desde el cual se distribuye el resto de las salas. Posee una sala de dirección, una sala de profesores, 6 salas de clases de similares características, una sala de computación y música, además de una cocina y un comedor para la alimentación de los alumnos.

Las 3 casas poseen características similares. Todas cuentan con un ambiente principal en el que se incluye cocina, comedor y living. Además, cada casa tiene 2 dormitorios y un baño principal.

Todos los equipos presentes en la escuela se pueden observar en el detalle en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Demanda agregada de equipos presentes en la escuela rural “Ostricultura”.

Ítem	Descripción	Demanda unitaria [W]	Demanda por ítem [W]	Demanda agregada [W]
Hall central	3 Fluorescentes simples	40	120	120
	1 Router	10	10	130
Sala 1	3 Fluorescentes simples	40	120	250
Sala 2	4 Fluorescentes simples	40	160	410
	1 Router	10	10	420
Salas 3,4, y 5	2 Fluorescentes simples	40	120	540
Sala exterior	4 Fluorescentes doble tubo	40	320	860
	2 Computadores	150	300	1160
	1 Proyector	240	240	1400
	1 Impresora Multifuncional	1000	1000	2400
Sala Profesores	2 Fluorescentes simples	40	80	2480
	1 Impresora Multifuncional	80	80	2560
	1 Impresora	40	40	2600
	1 Computador	150	150	2750
	1 Fotocopiadora Multifuncional	1000	1000	3750
Sala Dirección	2 Fluorescentes simples	40	80	3830
	1 Calefactor	1000	1000	4830
Comedor	6 Fluorescentes simples	40	240	5070
Cocina	1 Fluorescentes doble tubo	40	80	5150
	1 Despensa con ampolleta	60	60	5210
	1 Radio	5	5	5215
Sala Computación	2 Fluorescentes simples	40	80	5295
	1 Fluorescente doble tubo	40	80	5375
	9 Computadores	150	1350	6725
	1 Proyector	240	240	6965
	1 Modem	10	10	6975
3 Casas				
Cocina, Comedor	2 Ampolletas por casa	60	360	7335
	1 Televisor por casa	75	225	7560
Baño	1 Ampolleta por casa	60	180	7740
2 Dormitorios	1 Ampolleta c/u por casa	60	360	8100
			TOTAL	8100

5.3.1.2 Determinaciones en perfil de demanda

El uso real de cada uno de los componentes mencionados anteriormente depende directamente de la hora, día y época del año. Algunas de las consideraciones que se realizan al momento de construir el perfil de demanda son:

- Las clases en la escuela comienzan aproximadamente la segunda semana de marzo y terminan la segunda o tercera semana de diciembre. Con un periodo de vacaciones de 3 semanas entre la segunda y la última semana de julio. Por lo tanto el consumo eléctrico de los componentes mencionados anteriormente, tanto en la escuela misma como en las casas de los profesores, se concentra en este periodo. Durante el resto del año se considera que el consumo eléctrico es nulo.
- Las clases comienzan por reglamento a las 9:00 horas y terminan a las 16:00 horas, sin embargo, el uso de luminarias comienza alrededor de las 9:30 horas y termina alrededor de las 18:00 horas cuando termina el horario laboral de los profesores.
- Los alumnos solo asisten a clases de lunes a viernes y no se realizan actividades extra programáticas otros días de la semana.
- Los profesores que habitan las casas del terreno se retiran el viernes en la tarde una vez finalizado el horario de clases y vuelven el domingo en la tarde/noche. Por lo tanto, se considera el consumo eléctrico nulo durante ese periodo de la semana.

5.3.1.3 Perfil de demanda diaria para Ostricultura

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se construye una curva de demanda eléctrica estimada para dos épocas características del año. La Figura 5.4 muestra la muestra la curva mencionada, en la cual se consideran únicamente los equipos en los cuales su uso se pueda considerar de carácter continuado.

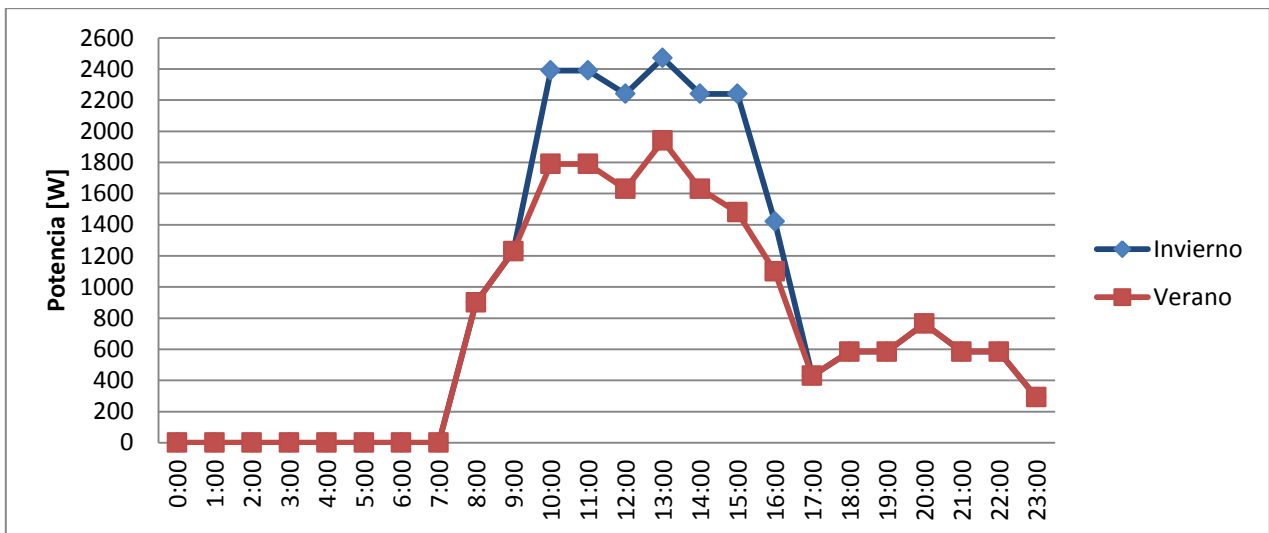


Figura 5.4 Perfil de demanda eléctrica diaria para la escuela Ostricultura, perteneciente a las escuelas del grupo B.

5.3.2 Escuela rural La Capilla, Isla Chaulinec

5.3.2.1 Distribución de instalaciones

Se realiza a continuación una descripción detallada de la distribución de las instalaciones presentes en la escuela La Capilla de la isla Chaulinec.

El recinto alimentado por el generador comprende seis dependencias: La escuela rural y cinco casas pequeñas que son utilizadas por profesionales del establecimiento.

La escuela está distribuida por salas entre las que se encuentra: Una sala de dirección, seis salas de clases de características similares, una sala de computación, una biblioteca y una pequeña sala de estar. La escuela posee además una cocina y un comedor, en los cuales se prepara y sirve desayuno y almuerzo a los alumnos.

De los 5 departamentos utilizados por los profesores, todos poseen un baño y un ambiente en el que se incluye la cocina, el comedor y el living. Tres de los departamentos poseen dos habitaciones y el resto solo posee una habitación.

Todos los equipos presentes en la escuela se pueden observar en el detalle en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Demanda agregada de equipos presentes en la escuela rural “La Capilla”.

Ítem	Descripción	Demanda unitaria [W]	Demanda por ítem [W]	Demanda agregada [W]
Escuela				
Pasillos/Hall	7 Fluorescentes simples	40	280	280
Sala dirección	2 Ampolletas de ahorro	36	72	352
	1 Impresora láser	640	640	992
	1 Multifuncional	1000	1000	1992
Sala de estar	1 Ampolleta de ahorro	36	36	2028
Sala 1	4 Ampolletas de ahorro	36	144	2172
Sala 2	4 Fluorescentes simples	40	160	2332
	1 Computador	150	150	2482
	1 Impresora	10	10	2492
Sala 3	4 Fluorescentes doble tubo	40	320	2812
	1 Televisor	53	53	2865
Sala 4	2 Fluorescentes simples	40	80	2945
	1 Impresora Multifuncional	80	80	3025
	1 Calefactor eléctrico	1000	1000	4025
Sala 5	4 Fluorescentes simples	40	160	4185
	1 Radio	12	12	4197
Sala 6	4 Fluorescentes simples	40	160	4357

Ítem	Descripción	Demanda unitaria [W]	Demanda por ítem [W]	Demanda agregada [W]
Biblioteca	2 Fluorescentes simples	40	80	4437
Sala Computación	2 Ampolletas de ahorro	36	72	4509
	11 Computadores de escritorio	150	1650	6159
	1 Router	10	10	6169
	1 Proyector	240	240	6409
Comedor	4 Fluorescentes simples	40	160	6569
Cocina	1 Fluorescente simple	40	40	6609
	1 Despensa con ampolleta	60	60	6669
5 Casas				
Cocina, Comedor	2 Ampolletas por casa	60	600	7269
	1 Televisor por casa	75	375	7644
	1 Refrigerador (3 de 5 casas)	180	540	8184
Baño	1 Ampolleta por casa	60	180	8364
	1 Lavadora (4 de 5 casas)			8364
2 Dormitorios	1 Ampolleta c/u por casa	60	600	8964
			TOTAL	8964

5.3.2.2 Determinaciones en perfil de demanda

El uso real de cada uno de los componentes mencionados anteriormente depende directamente de la hora, día y época del año. Algunas de las consideraciones que se realizan al momento de construir el perfil de demanda son:

- El año escolar comienza generalmente la segunda semana de marzo y termina la tercera semana de diciembre. Separando el primer y segundo semestre por un período de vacaciones de invierno en la tercera y cuarta semana de julio. Fuera de estas fechas, las dependencias de la escuela no se utilizan, y se considera por lo tanto que el consumo eléctrico en la escuela es nulo.
- Las clases comienzan a las 9:00 horas y terminan a las 16:30 horas. Sin embargo los profesores utilizan las instalaciones de la escuela desde las 8:30 horas hasta las 18:30 horas aproximadamente.
- Los alumnos solo asisten a clases de lunes a viernes y no se realizan actividades extra programáticas otros días de la semana.
- El consumo eléctrico en las casas del recinto comienza una vez terminada la jornada escolar hasta aproximadamente las 24:00 horas. Considerando además que en tres de las cinco casas hay refrigeradores los cuales funcionan durante todo el periodo en que el motor se encuentra encendido.

5.3.2.3 Perfil de demanda diaria para La Capilla

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones se construye una curva de demanda eléctrica estimada para dos épocas características del año. La Figura 5.5 muestra la muestra la curva mencionada, en la cual se consideran únicamente los equipos en los cuales su uso se pueda considerar de carácter continuado.

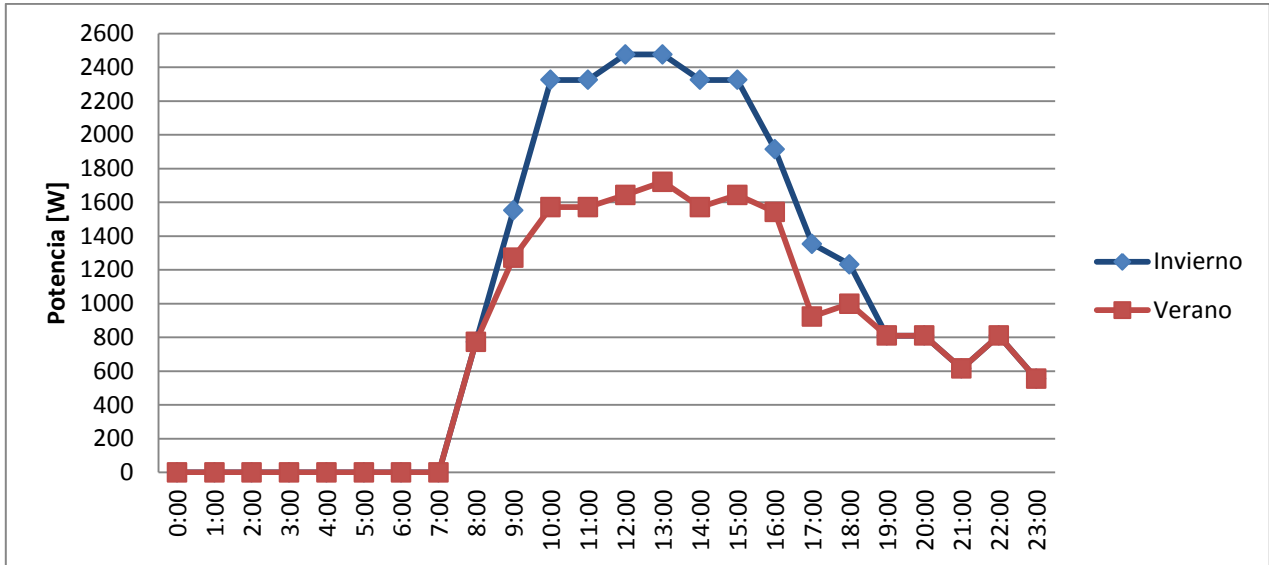


Figura 5.5 Perfil de demanda eléctrica diaria para la escuela La Capilla, perteneciente a las escuelas del grupo B.

Se muestra en la Figura 5.6 el perfil de consumo medido utilizando el registrador de datos “Whattson” en una de las fases del generador de la escuela “La Capilla” de la isla Chaulinec en un día estándar de clases.

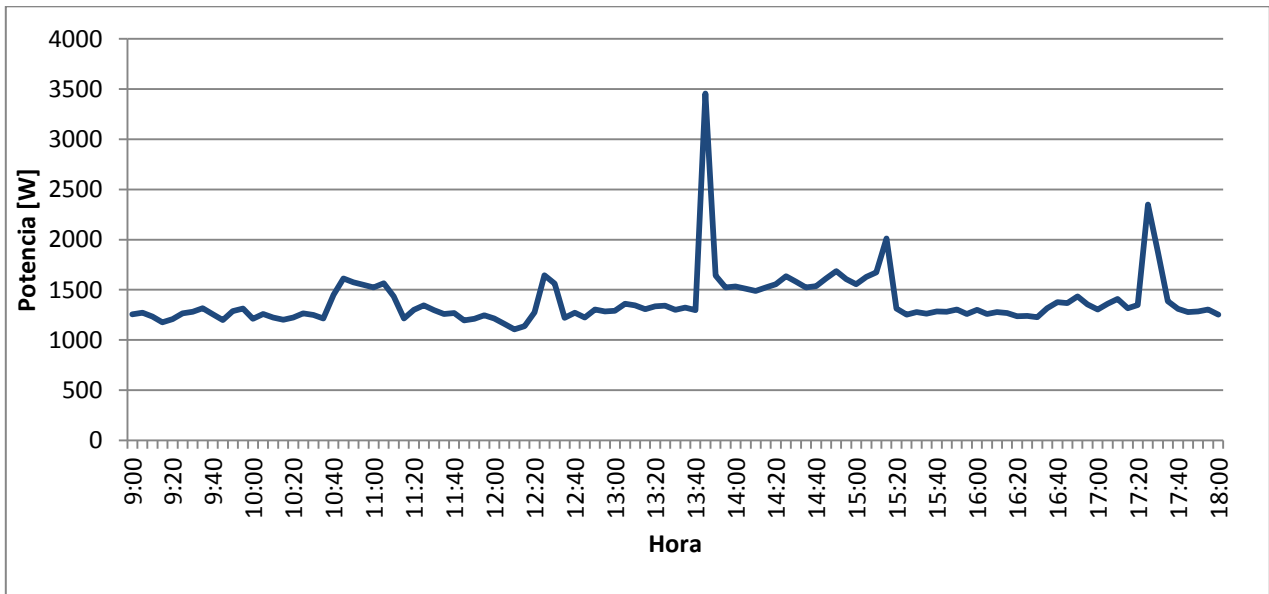


Figura 5.6 Demanda registrada en la escuela “La Capilla”, perteneciente al grupo B, en un día normal de clases.

5.3.3 Escuelas grandes: Tipo B

Considerando una desviación estándar de un 20% en la diferencia entre los datos horarios y el perfil medio diario, se obtiene la siguiente distribución anual de consumo:

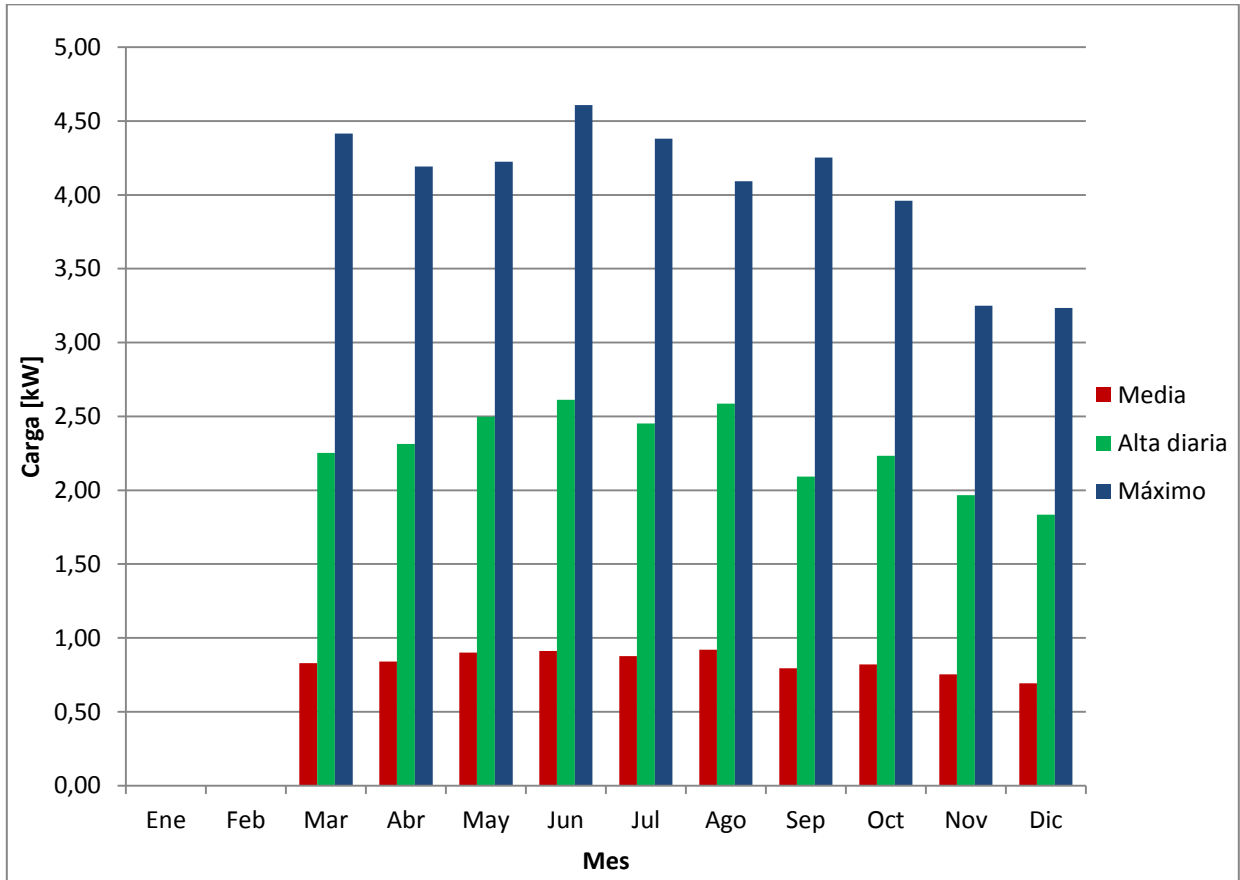


Figura 5.7 Distribución anual de cargas para escuelas grandes (Grupo B).

Donde se destacan los siguientes datos anuales:

- Energía media diaria: $18 \left[\frac{kWh}{d} \right]$
- Potencia media: $0,752 [kW]$
- Potencia máxima: $4,76 [kW]$

Se muestra en la Figura 5.8 el perfil diario de consumo eléctrico mensual para escuelas pequeñas de la comuna de Quinchao. El detalle de los datos horarios de carga ingresado al programa para realizar la simulación se puede ver en la Tabla 12.11, en la sección anexos. Cabe destacar que la información que se muestra corresponde a días de la semana, ya que en los fines de semana el consumo se considera nulo.

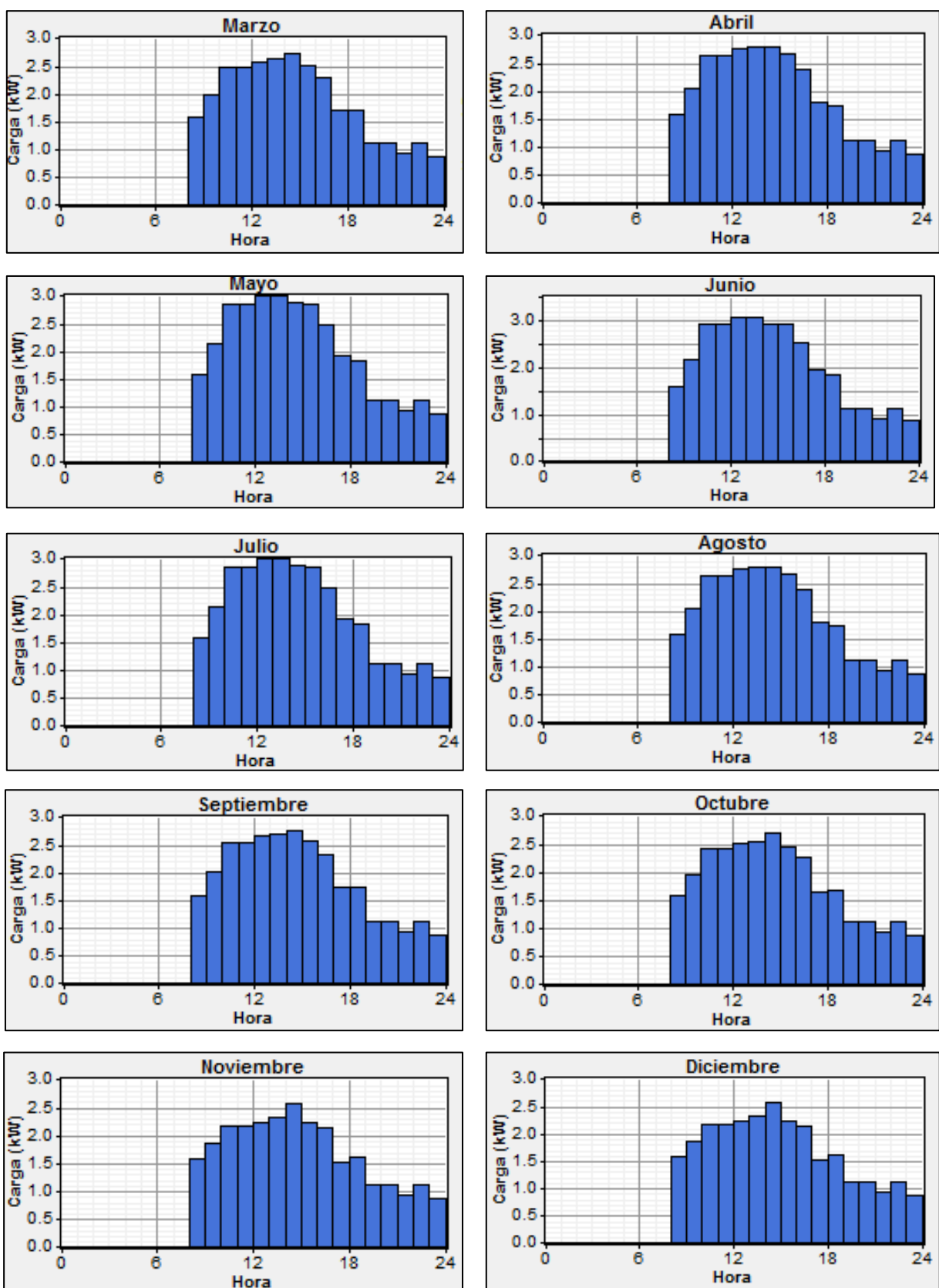


Figura 5.8 Perfil diario de consumo eléctrico mensual para escuelas del grupo B de la comuna de Quinchao

6. Selección de equipos del sistema

En el presente capítulo se muestra el proceso de selección de cada uno de los equipos en el sistema híbrido de generación eléctrica. La selección se realiza en base a equipos presentes en el mercado chileno.

Para cada uno de los equipos se muestran los costos directos de compra y mantenimiento (costos fijos y variables) los cuales son ingresados al programa HOMER para realizar posteriormente la simulación correspondiente.

6.1 Paneles fotovoltaicos en el mercado chileno

Existen grandes diferencias respecto al precio en paneles fotovoltaicos. Las variables más influyentes respecto a estas diferencias corresponden a: Eficiencia (entre 8 y 15%) y los años de garantía que ofrece el fabricante (10 ó 25 años).

A continuación se muestran dos tipos de paneles con gran presencia en el mercado chileno. Ambos modelos cuentan con una garantía de 25 años y aseguran una pérdida de eficiencia menor al 20% dentro de este mismo plazo.

En la Tabla 6.1 se detallan los módulos modelo “K” presentes en el mercado chileno. Las características se obtienen bajo condiciones estándar de funcionamiento ($1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, $25^\circ C$)

Tabla 6.1 Paneles fotovoltaicos modelo KM en el mercado chileno. (11)

Modelo	Potencia nominal	Corriente nominal	Tensión nominal	Isc	Voc	Dimensión $[m^2]$	Eficiencia	Precio [US\$]
K10	10	0,6	17,56	0,66	21,52	0,07	9,07	45,3
K20	20	1,14	17,5	1,23	21,5	0,18	10,39	72,9
K50	50	2,83	17,78	3,04	21,5	0,42	11,81	125,7
K100	100	5,63	17,79	6,09	21,56	0,80	12,15	226,3

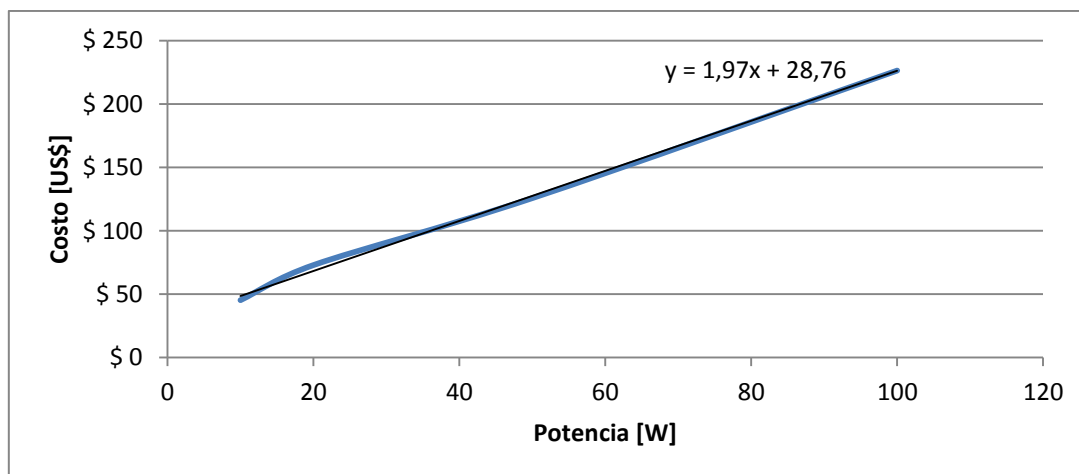


Figura 6.1 Costo directo de paneles fotovoltaicos modelo K.

En la Figura 6.1 se muestra la curva representativa del costo de los paneles. Se obtiene de esta manera una curva de tendencia que evidencia un costo aproximado de 1,97 [US\$/Watt]

En la Tabla 6.2 se detallan los módulos modelo “C” presentes en el mercado chileno. Las características se obtienen bajo condiciones estándar de funcionamiento ($1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, $25^\circ C$)

Tabla 6.2 Paneles fotovoltaicos modelo Cx en el mercado chileno. (12)

Módulo	Potencia nominal	Corriente nominal	Tensión nominal	Isc	Voc	Dimensión [m ²]	Eficiencia	Precio [US\$]	Precio total [US\$]
C100	100	5,6	17,8	6,1	21,5	0,80	12,45	112,1	220
C135	135	7,76	17,4	8,81	22,36	1,00	12,82	148,4	300
C185	185	5	37	5,39	44,50	1,27	14,5	201,4	400
C195	195	5,28	37	5,63	45,10	1,28	15,27	212,3	430
C250	250	8,36	29,9	8,81	37,3	1,62	15,4	243,1	500

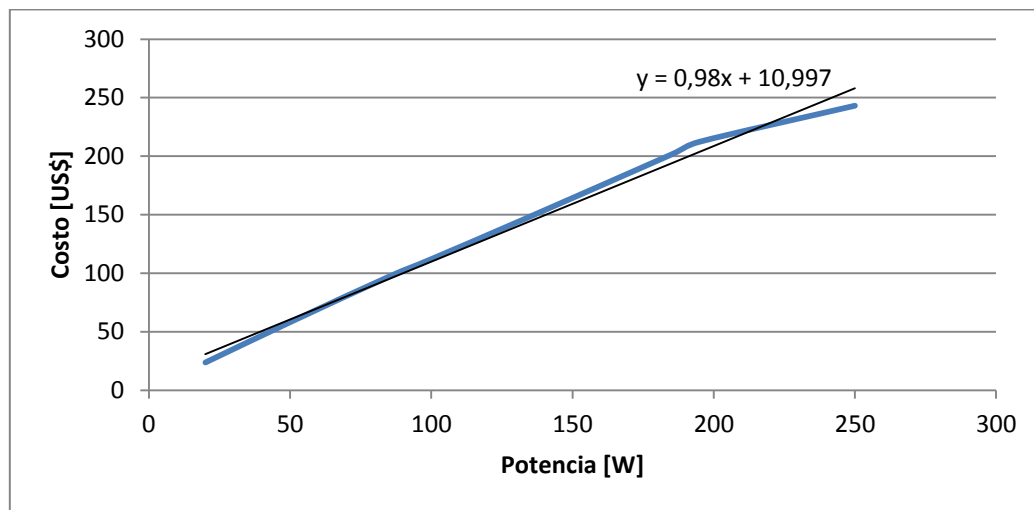


Figura 6.2 Costo directo de paneles fotovoltaicos modelo C.

En la Figura 6.2 se muestra la curva representativa del costo de los paneles. Se obtiene de esta manera una curva de tendencia que evidencia un costo aproximado de 1 [US\$/Watt], sin considerar el costo de instalación.

El costo total que se muestra en la Tabla 6.2 corresponde al costo de adquisición del panel más el costo respectivo de instalación. Dentro de los costos de instalación se consideran los siguientes ítems:

- Costo de torre de acero galvanizado de aproximadamente 2 metros de altura.
- Costo de obras civiles tales como excavación de terreno, instalación de anclajes, etc.

El costo de las obras eléctricas está considerado dentro de los costos fijos del proyecto, por lo tanto, no está incluido en esta sección.

6.1.1 Costos de operación y mantenimiento

Corresponden a los costos que se deben realizar durante la vida útil del equipo para garantizar su buen funcionamiento y su condición. En sistemas fotovoltaicos, el mantenimiento necesario no suele ser más complicado que la limpieza adecuada, por lo tanto, los costos en mantención son mínimos y se estiman entre un 3-5% del equipo en su vida útil.

6.1.2 Consideraciones para la simulación

Dado que ambos modelos cuentan con el respaldo de la garantía extendida, y certifican una pérdida de eficiencia a 25 años menos al 20%, se escoge la alternativa más económica con el fin de reducir los costos totales de inversión.

Se deja abierta la posibilidad de instalar paneles hasta una capacidad igual a los 3000 [W] de potencia, considerando todas las opciones intermedias existentes.

Con respecto a los costos de operación y mantenimiento, se considera un costo igual al 5% de la inversión inicial del sistema fotovoltaico, con el fin de mantener un criterio conservador.

Respecto a la inclinación de los paneles fotovoltaicos, el programa permite seleccionar si se incluyen sistemas de seguimiento o no. Los sistemas fotovoltaicos con seguimiento conllevan un aumento en la eficiencia, pero por otra parte, significan agregar un sistema mecánico de movimiento, que bajo las condiciones climáticas de las islas se transforma en una baja importante de la disponibilidad del equipo, y por lo tanto un aumento de los costos de mantenimiento. Se determina por ende utilizar paneles fotovoltaicos fijos, con un grado de inclinación igual a la latitud de la localidad seleccionada, es decir, 43° de inclinación respecto a la horizontal.

6.2 Aerogeneradores en el mercado chileno

El aerogenerador es uno de los equipos más complejos dentro del sistema y por lo tanto requiere contar con todas las especificaciones de calidad que el mercado exige. En la Tabla 6.3 se muestran los dos equipos escogidos para la simulación. Ambos equipos cuentan con una garantía de cinco años, con un periodo de vida útil mínimo de 20 años y con las certificaciones de calidad exigidas.

Tabla 6.3 Generadores eólicos en el mercado chileno. (13)

Modelo	Potencia nominal [W]	Tensión nominal [VDC]	Velocidad arranque [m/s]	Velocidad óptima [m/s]	Diámetro rotor [m]	Adquisición [US\$]	Costo total [US\$]
AG1500	1500	24-48	3	12	3,3	7315	15698
AG3500	1000	12-24-48	3	12	4,05	10188	18570

El costo total que se muestra en la tabla corresponde al costo de adquisición del aerogenerador más el costo respectivo de instalación. Dentro de los costos de instalación se consideran los siguientes ítems:

- Costo de torre mecánica auto-soportada de 12 metros de altura. Equivalente a 4.186 [US\$]
- Costo de obras civiles tales como excavación de terreno, instalación de anclajes, etc. Equivalente a 4.197 [US\$].

El costo de las obras eléctricas está considerado dentro de los costos fijos del proyecto, por lo tanto, no está incluido en esta sección.

Como se mencionó en capítulos anteriores, es necesario conocer las curvas de potencia de cada uno de los equipos para poder determinar su comportamiento dentro del sistema. En la Figura 6.3 y la Figura 6.4 se muestran las curvas características de potencia para los respectivos equipos aerogeneradores.

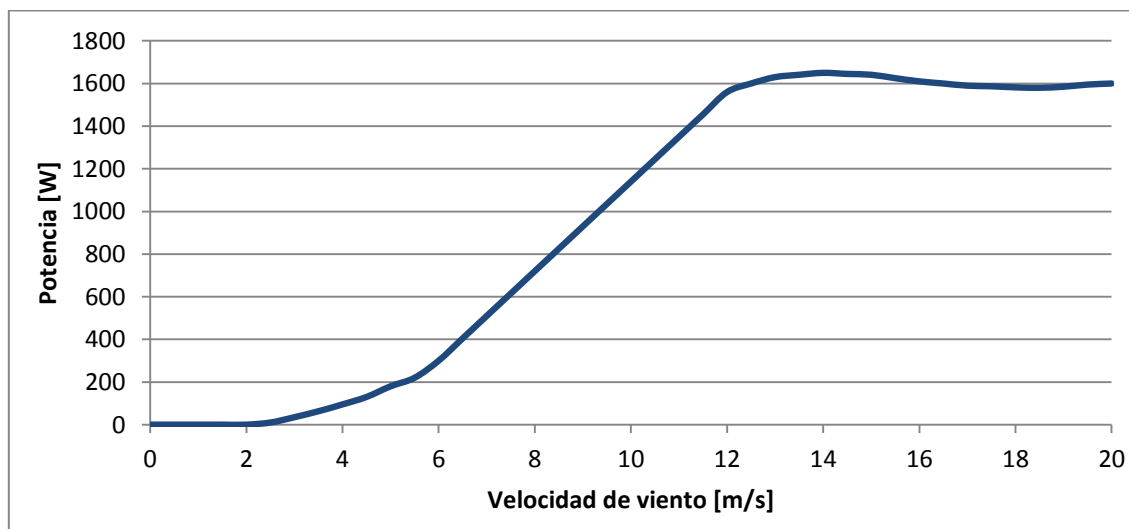


Figura 6.3 Curva de potencia característica para AG1500.

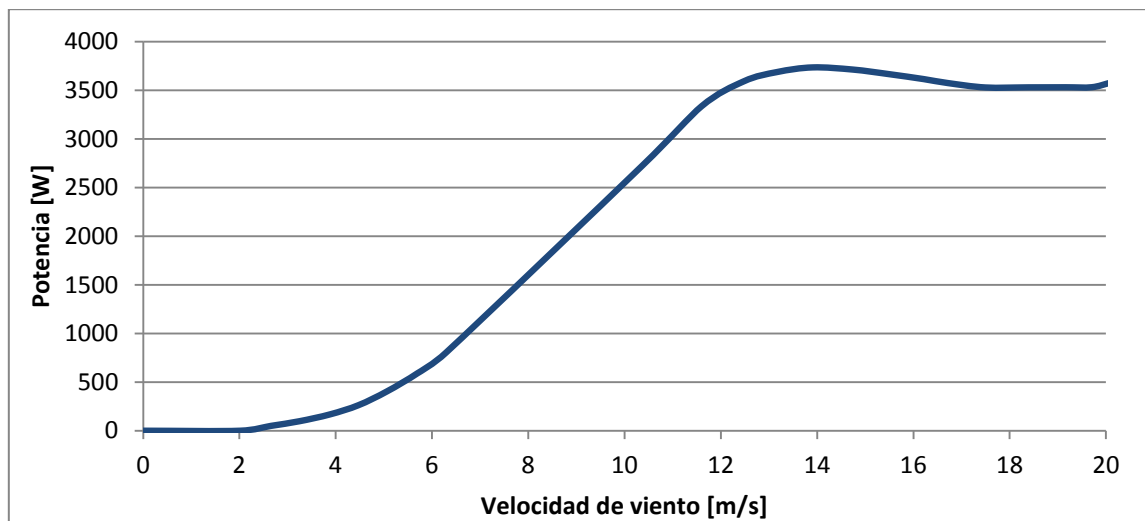


Figura 6.4 Curva de potencia característica para AG3500.

6.2.1 Costos de operación y mantenimiento

Se muestra a continuación en la Tabla 6.4 una referencia a los costos generales de los aerogeneradores, obtenida de una publicación internacional (14), de la cual se extraen los costos de operación y mantenimiento utilizados en la simulación.

Tabla 6.4 Costos de adquisición, operación y mantenimiento de aerogeneradores.

Potencia máxima de salida (W)	275	640	1760	3500	6500
Costos de O&M (US\$/año)	65	65	65	71,5	78
Costo de adquisición (US\$)	2954,9	3916,9	5348,2	8482,5	13023,4

6.2.2 Consideraciones para la simulación

El programa utilizado, HOMER, permite la inclusión de varios equipos aerogeneradores en el modelo inicial. Luego simula el funcionamiento del sistema con todas las disposiciones y alternativas posibles para entregar finalmente la cantidad del o los equipos óptimos para minimizar los costos totales asociados. En particular, se incluyen las dos alternativas presentadas anteriormente, con la posibilidad de utilizar 1, 2 o 3 de cada uno de los equipos en el sistema.

Dado que la altura de medición de los datos eólicos (altura del anemómetro = 10 [m]) es distinta a la altura del rotor del aerogenerador (altura de la torre = 12 [m]) es necesario recalcular los datos de velocidad de viento para esta nueva altura utilizando la ley logarítmica.

Para la utilización de la ley logarítmica, es necesario ingresar el valor de la rugosidad superficial, un parámetro que identifica la rugosidad del terreno próximo a la instalación del aerogenerador. En la Tabla 6.5 muestran algunos valores de rugosidad para distintos tipos de superficie.

Tabla 6.5 Valores característicos de rugosidad superficial.

Superficie	Rugosidad superficial [m]
Muy lisa, hielo o barro	0,00001
Mar en calma	0,0002
Mar en movimiento	0,0005
Nieve	0,003
Césped	0,008
Pasto rugoso	0,01
Campo en barbecho	0,03
Cultivos	0,05
Pocos árboles	0,1
Muchos árboles, algunos edificios	0,25
Bosques y tierras arboladas	0,5
Suburbios	1,5
Ciudad, edificios altos	3,0

Dadas las características geográficas de la zona donde se ubican las escuelas, es posible considerar valores de rugosidad superficial igual a 0,1 ó 0,25. Sin embargo se utiliza el segundo valor para mantener el criterio conservador utilizado durante toda la especificación de parámetros.

6.3 Generadores Diesel AC en el mercado chileno

El caso de los generadores AC se considera de forma particular debido a que todas las escuelas ya cuentan con un sistema un sistema de generación eléctrica en base a estos equipos.

Para efectos de la simulación, el generador diesel se considera como cualquier otro equipo con sus respectivos costos de adquisición, operación y mantenimiento. Sin embargo, en el caso particular de las escuelas de la comuna de Quinchao, el costo de adquisición no se debe considerar dentro del costo total de inversión del proyecto.

Se muestra a continuación en la Tabla 6.6 una referencia a los costos generales de los generadores diesel, obtenida de una publicación internacional (14), de la cual se extraen los costos de adquisición, operación y mantenimiento utilizados en la simulación.

Tabla 6.6 Costos de adquisición, operación y mantenimiento de generadores diesel.

Potencia nominal (kVA)	1,9	3	4	5,5	7
Costos de O&M (US\$/h)	0,195	0,221	0,234	0,286	0,312
Costo de adquisición (US\$)	1649,7	1968,2	2470	3008,2	3640

6.4 Baterías electroquímicas en el mercado chileno

Dentro de la categoría de baterías de Plomo-ácido se destacan 2 tipos con mayor variedad en el mercado: Las de Gel (ciclo profundo) y las AGM (Absorbed Glass Mat). Las baterías de Gel son selladas, donde el electrolito no es líquido, sino gelificado. Por lo tanto, hay menor evaporación y un aumento en la vida útil, otorgando un número mucho mayor de ciclos de cargas y descargas.

En la Tabla 6.7 y Tabla 6.8 se muestran los costos asociados a cada tipo de batería en el mercado.

Tabla 6.7 Baterías plomo-ácido AMG en el mercado chileno

Modelo	Tensión nominal [VDC]	Capacidad [Ah]	Precio [US\$]
BA2	12	2,3	51,6
BA7	12	7	32,4
BA12	12	12	62,2
BA18	12	18	79,7
BA26	12	26	99,1
BA55	12	55	185,6
BA100	12	100	298,7

Tabla 6.8 Baterías plomo-ácido Gel en el mercado chileno

Modelo	Tensión nominal [VDC]	Capacidad [Ah]	Precio [US\$]
BG100	12	100	382,9
BG200	12	200	801,7

6.4.1 Costos de operación y mantenimiento

Se muestra a continuación en la Tabla 6.6 una referencia a los costos generales de las baterías electroquímicas, obtenida de una publicación internacional (14), de la cual se extraen los costos de operación y mantenimiento utilizados en la simulación.

Tabla 6.9 Costos de adquisición, operación y mantenimiento del banco de baterías electroquímicas.

Capacidad nominal (Ah)	43	96	200	462	924	1848
Capacidad nominal (kWh)	2,06	4,61	9,6	22,18	44,35	88,7
Corriente máxima (A)	7	12	24	51	102	204
Costos de O&M (US\$/año)	104	117	132,6	162,5	195	247
Costo de adquisición (US\$)	806	1341,6	2938	5288,4	9880	18720

6.5 Inversores en el mercado chileno

El inversor a utilizar debe ser capaz de trabajar en forma paralela a una generador diesel alterno, ser capaz de trabajar en forma aislada y ser capaz de funcionar como rectificador si es que se desea habilitar la opción de cargar el banco de baterías con el generador Diesel.

Se muestra en la Tabla 6.10 los equipos inversores con rectificador presentes en el mercado chileno.

Tabla 6.10 Inversores con rectificador en el mercado chileno

Modelo	Tensión nominal [VCD]	Potencia nominal [VA]	Potencia máxima [VA]	Eficiencia máxima [%]	Corriente de carga [A]	Precio [US\$]
C 1200	12; 24	1200	2400	93-94	50-25	1110
C 1600	12; 24	1600	3000	93-94	70-40	2348
C 2000	12; 24	2000	4000	93-94	80-50	2727,3
C 3000	12; 24; 48	3000	6000	93-94-95	125-70-30	3196,6
C 5000	24; 48	5000	10000	94-95		5475,7

7. Alcances generales del método aplicado

7.1 Alcances de la simulación

A lo largo de los capítulos del presente informe se ha dejado en claro todas las fortalezas que presenta el programa HOMER a la hora de realizar simulaciones de sistemas híbridos de generación eléctrica, sin embargo, existen ciertas características en las cuales el programa presenta debilidades, como por ejemplo, en algunas propiedades que se consideran de manera aproximada o simplemente no se consideran para efectos de la simulación.

A continuación se describen algunos de los alcances más importantes que presenta el programa:

- La evaluación del sistema óptimo se realiza para un período de un año de funcionamiento, y luego, los resultados se extrapolan para el periodo de vida útil seleccionado, sin considerar los posibles cambios existentes en el tiempo.
- Las propiedades de los componentes, como por ejemplo su rendimiento, se consideran constantes a lo largo de la vida útil del proyecto, hasta que se alcanza su periodo de replazo.
- Para sistemas con generadores diesel se considera que el precio del combustible es único para todo el periodo de vida útil del proyecto, imposibilitando analizar situaciones donde existen grandes variabilidades de precio de combustible a lo largo de un año.

7.2 Consideraciones técnicas

A continuación se mencionan las consideraciones técnicas implementadas en la simulación del sistema.

- La simulación bajo el criterio económico del sistema híbrido se realiza para una vida útil de 10 años.
- Se considera para el sistema DC un voltaje de trabajo de **24 [V] nominales**.
- La tasa de interés anual utilizada para la simulación es del 6%.
- Dentro de los costos totales del sistema se considera un costo fijo, el cual es independiente de la composición del sistema híbrido, e incluye: Obras eléctricas y construcción de módulo para banco de baterías y estación de monitoreo.

7.2.1 Autonomía del sistema

Con el fin de aumentar la confiabilidad del sistema y evitar uno de los principales problemas que presentan actualmente las escuelas, que es la disponibilidad de la electricidad, se incluye dentro de los requisitos un período de autonomía al sistema, es decir, que aunque el sistema no se encuentre en funcionamiento (ya sea por carencia de recursos renovables/combustible diesel o por cualquier eventualidad), el abastecimiento de electricidad se mantenga hacia las escuelas.

Ventajas de contar con un sistema con autonomía:

- Permite realizar mantenimientos preventivos a los equipos críticos sin la necesidad de detener el funcionamiento de la escuela por falta de electricidad.
- Aumenta la confiabilidad del sistema, pues disminuye el riesgo de que las escuelas queden sin electricidad debido a alguna falla del generador diesel o alguna eventualidad, como por ejemplo la incapacidad o demora en abastecimiento de combustible hacia las escuelas más apartadas.

Se selecciona un periodo de autonomía total del sistema de tres días, combinado con un período de dos semanas donde el sistema sea capaz de abastecer electricidad sin el funcionamiento del generador diesel, calculado para el mes de diciembre, donde el consumo eléctrico es el menor.

7.3 Análisis de sensibilidad

Se considera en principio, para la realización de la simulación, costos directos de combustible y características conservadoras en la selección de recursos. Luego, en un análisis de sensibilidad se muestra cómo influyen las variaciones de estos datos en el resultado y en la configuración del sistema resultante.

Las variables analizadas corresponden a:

- Costos de combustible: Se analiza cómo influye el alza en el precio del combustible en la configuración final del sistema, considerando patrones históricos que indican este escenario como bastante probable.
- Potencial de recursos renovables: Se analiza cómo influye la disponibilidad de recursos naturales en la configuración final del sistema. Se varían los datos de radiación global horizontal [kWh/m^2] y de velocidad de viento [m/s] considerando las medias de todas las fuentes obtenidas para las localidades específicas. De esta manera se puede observar el escenario probable bajo un punto de vista más optimista de lo que se realiza en una primera instancia.

8. Resultados

Luego de aplicado el procedimiento explicado en los capítulos anteriores, se realiza la simulación del sistema en funcionamiento por un periodo de 10 años. Se muestra a continuación los resultados obtenidos para ambos grupos de escuelas, con sus respectivas consideraciones técnicas.

8.1 Resultados para escuelas del grupo A

Se muestra en la Tabla 8.1 el detalle de los resultados obtenidos, para todas las combinaciones de componentes posibles. Los sistemas se ordenan según NPC (VAN, valor actual neto) donde se destaca que la composición óptima desde el punto de vista económico para las escuelas pequeñas (grupo A) de la comuna de Quinchao corresponde a un sistema FV-Diesel con almacenamiento.

Tabla 8.1 Detalle de las configuraciones óptimas según criterio económico para escuelas del grupo A, ordenadas por el valor actual neto NPC.

Componentes	FV (kW)	AG 3500	GD (kW)	B 200	Conv. (kW)	Estrategia de control	Capital (US\$)	Variables (US\$/año)	NPC (US\$)	Costo energía (US\$/kWh)
FV-Diesel con almacenamiento	3	-	2,2	6	2	CC	19177	1698	31674	1,30
Diesel con Almacenamiento	-	-	2,2	6	2	CC	11677	3146	34832	1,43
FV-Eólico-Diesel c/ almacenamiento	2,5	1	2,2	6	3	LF	37137	220	38755	1,59
Eólico-Diesel con almacenamiento	-	1	2,2	6	2	LF	30246	1281	39671	1,586

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 8.1, se determina que la mejor solución para las necesidades existentes en las localidades, tanto bajo percepciones técnicas como económicas, corresponde a la implementación de un sistema híbrido fotovoltaico-diesel con almacenamiento.

Las ventajas económicas de esta configuración en comparación a las demás alternativas están a la vista, y lo más importante, desde el punto de vista técnico, con la implementación de este sistema se obtiene una disminución importante en el consumo de combustible y se entrega un período de autonomía de tres días al sistema, lo que aumenta considerablemente su confiabilidad, evitando la suspensión de las jornadas escolares por el concepto de falla del generador diesel y permitiendo realizar mantenimientos programados sin la necesidad de detener el funcionamiento de las escuelas.

La solución cumple además con los requisitos impuestos al inicio del proyecto que exigía una solución de tipo modular y replicable. Es decir, el sistema seleccionado es aplicable a cualquiera de las escuelas del grupo A, que se observan en la Tabla 1.1. Los componentes a su vez deben cumplir con el requisito de ser modulares y confiables, es decir, deben ser fáciles de instalar y montar y a la vez deben ser duraderos y capaces de resistir las condiciones climáticas de la isla de Chiloé.

8.1.1 Descripción general del sistema propuesto

El sistema de generación híbrida propuesto consta de los siguientes componentes:

- **Generación solar:** Arreglo fotovoltaico de 3 [kW] de capacidad, compuesto por 12 paneles de 250[W] de potencia nominal, 1,62 [m²] de superficie y 15,4% de eficiencia cada uno. El arreglo debe estar orientado en dirección norte y con una inclinación de 35° respecto de la horizontal. No se consideran sistemas de seguimiento. Los paneles cuentan con garantía extendida de 10 años y 25 años de vida útil. Además certifican que tendrán una pérdida de eficiencia menor al 20% a lo largo de su vida útil.
- **Generación diesel:** Generador alterno monofásico de 2,2 [kVA] de potencia nominal, frecuencia de 50 [Hz] y voltaje de 220 [V].
El generador funciona bajo una estrategia de ciclo de carga (CC), es decir, cada vez que la generación solar no sea suficiente para alimentar la demanda eléctrica, se hará funcionar el generador diesel a plena carga para por un lado suplir el déficit de generación y al mismo tiempo cargar las baterías electroquímicas. De esta manera se evitan los problemas característicos de los generadores alternos que funcionan por debajo del 40% de su capacidad nominal, traducido en una baja considerable en su período de vida útil y alzas en los costos de mantención asociados.
- **Almacenamiento:** Banco de baterías en un arreglo de 24 [Vdc] de tensión, compuesto por 6 baterías electroquímicas de ciclo profundo (Gel) de 200[Ah] y tensión nominal de 12 [Vdc] cada una. Cuenta con una vida útil cercana a los 500 ciclos para una profundidad de descarga del 100% y una vida útil cercana a los 3000 ciclos para una profundidad de descarga del 20%.
- **Inversor:** Equipo inversor con rectificador de 3 [kVA] de potencia nominal, 24[Vdc] de tensión nominal y eficiencia máxima del 94%. Rectificador integrado que permite al generador diesel cargar las baterías cuando el sistema lo requiera y sea considerado óptimo.
- **Módulo de instalación:** Se considera dentro de los costos de inversión del proyecto la construcción de un módulo para la instalación de equipos como: Banco de baterías, controladores, inversor, generador diesel y cajas de conexión.
Se considera un módulo con exterior metálico resistente a la intemperie y a la corrosión para evitar problemas provocados por las condiciones climáticas características de la zona. Debe tener aislación térmica y sistemas de ventilación. Se debe considerar una instalación para el escape adecuado de los gases de combustión del generador diesel hacia el exterior.

8.1.2 Esquema del sistema de generación para escuelas pequeñas

Se muestra en la Figura 8.1 el esquema representativo de los componentes del sistema de generación para las escuelas del grupo A de la comuna de Quinchao.

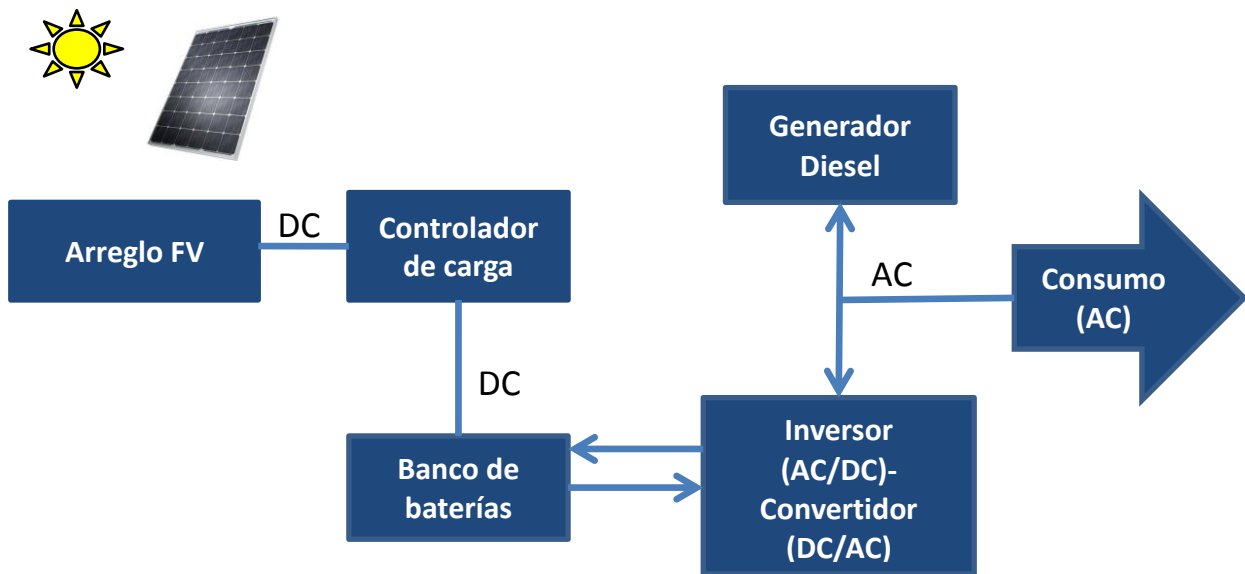


Figura 8.1 Esquema del sistema de generación FV-Diesel con almacenamiento para escuelas pequeñas.

8.1.3 Costos del sistema

La configuración óptima según el criterio económico implementado, como se mencionó anteriormente, corresponde a un arreglo fotovoltaico de 3 [kW], un generador diesel de 2,2 [kW], un arreglo de 6 baterías electroquímicas B200 y un inversor-rectificador C2000.

Los costos asociados a este sistema, tanto fijos (capital) como variables (reemplazo, operación y mantenimiento), se pueden observar en detalle en la Figura 8.2 y en la Tabla 8.2.

Los costos totales de inversión del sistema corresponden a 19.177 US\$, donde se destaca el costo del arreglo fotovoltaico como el más elevado. Dentro de los costos variables se destaca el costo asociado al consumo de combustible, que si bien es menor que en el escenario actual en las escuelas, no deja de ser un valor considerable. Se obtiene así un valor actual neto (VAN) de 31.674 US\$ para el proyecto evaluado en un periodo de funcionamiento a 10 años.

Tabla 8.2 Detalle de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento a 10 años.

Equipo	Capital (US\$)	Reemplazo (US\$)	O & M (US\$)	Combustible (US\$)	Recuperación (US\$)	Total (US\$)
FV	7500	0	1060	0	-2513	6047
Generador Diesel	1153	0	1696	8820	-154	11515
Banco Baterías	4800	2711	4416	0	-2627	9300
Inversor	2724	0	0	0	-913	1811
Costos fijos	3000	0	0	0	0	3000
Sistema	19177	2711	7172	8820	-6206	31674

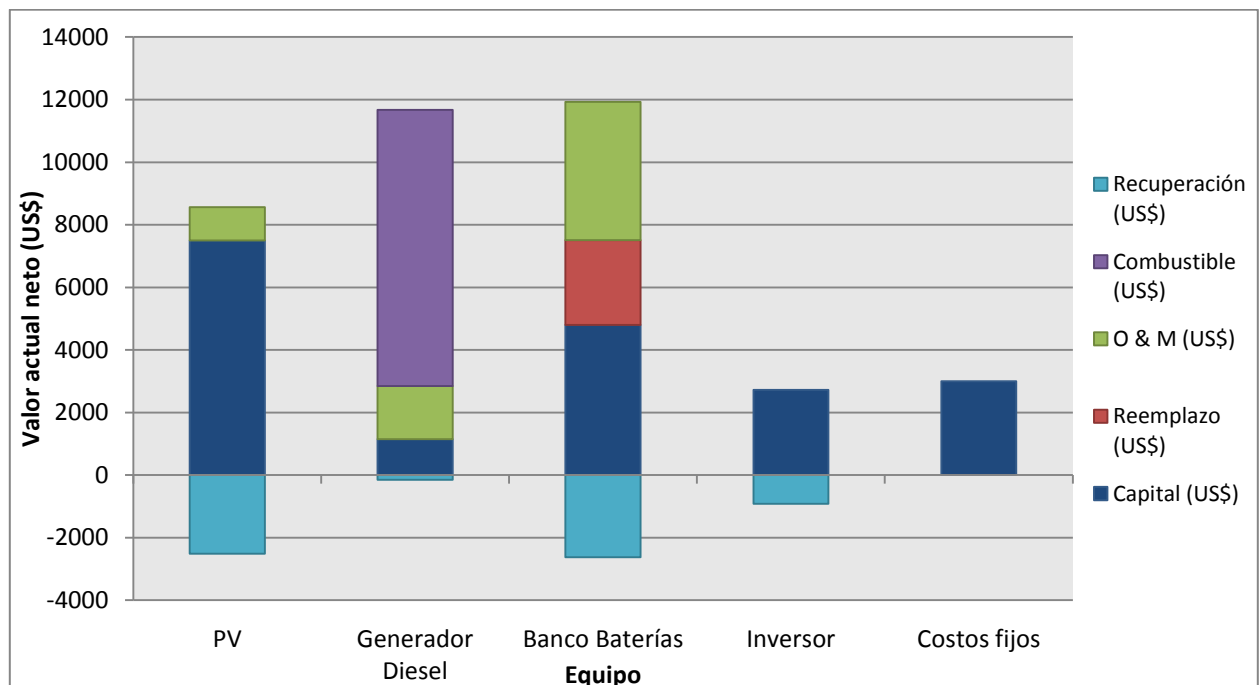


Figura 8.2 Gráfico de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.

8.1.4 Distribución de generación eléctrica

La distribución de la potencia media mensual de generación de energía, para cada uno de los componentes del sistema, se puede observar en detalle en la Figura 8.3.

Se aprecia claramente la estacionalidad característica del recurso solar descrito en secciones anteriores, donde la potencia media de la generación fotovoltaica disminuye considerable en meses de invierno, lo cual debe ser sustituido mediante la generación diesel.

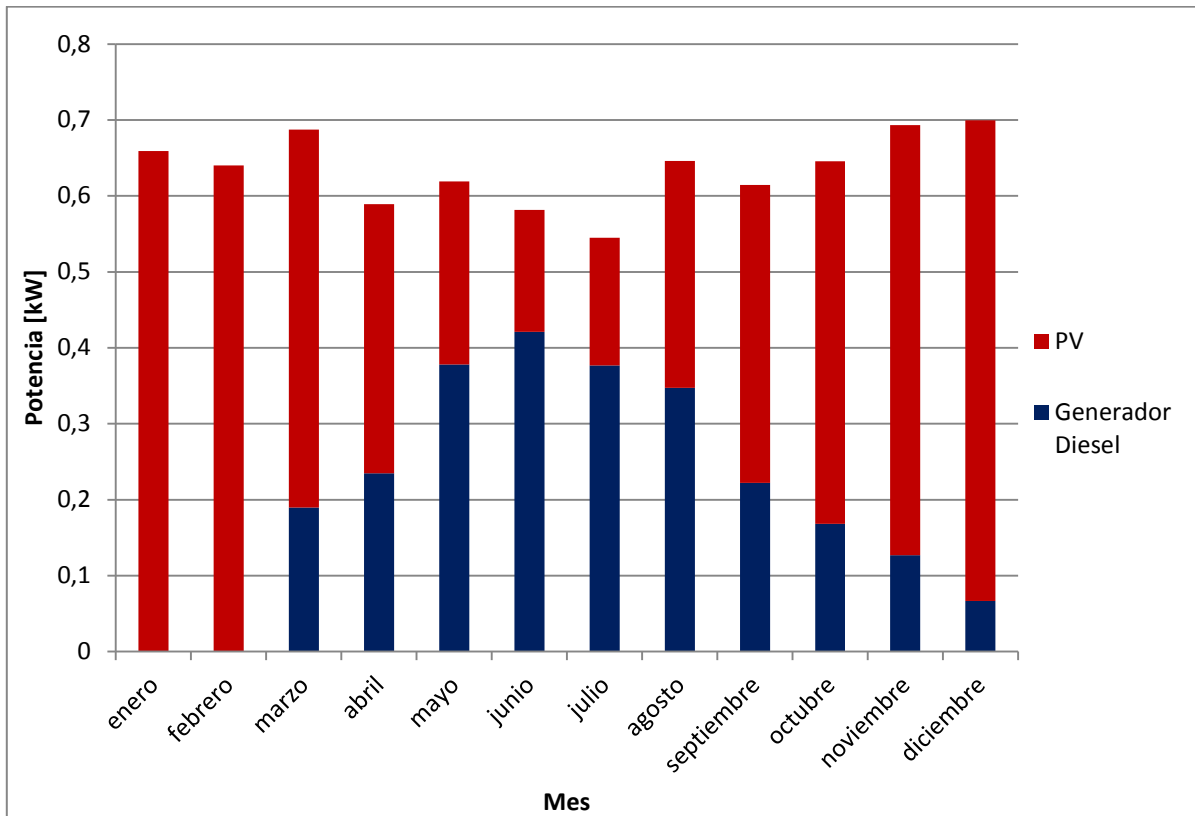


Figura 8.3 Potencia media mensual asociada a cada una de las tecnologías del sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.

La producción anual de energía se distribuye de la siguiente manera:

- Generación fotovoltaica: Con 3704 [kWh/año], lo que corresponde al 67% del total.
- Generación con diesel: Con 1860 [kWh/año], lo que corresponde al 33% del total.

8.1.5 Consideraciones para la implementación

1. Los costos descritos para el sistema propuesto corresponden a los costos totales de implementación, e incluyen:
 - Costos de adquisición de equipos.
 - Costos de traslado de equipos hasta las localidades descritas.
 - Costos de instalación para cada uno de los equipos del sistema (estructuras de soporte para paneles, torre y anclaje de aerogenerador, módulos interiores resistentes a intemperie para instalación de equipos de almacenamiento y control).
 - Costos de operación y mantenimiento para cada equipo (sólo si corresponde)
 - Costos de remplazo de equipos.

Sin embargo, los costos de instalación utilizados son aproximados y están sujetos a cambios dependientes del comportamiento del mercado local, al igual que todos los otros costos. Por lo tanto, estos valores solo deben ser considerados de manera referencial.

2. Debe existir un sistema de monitoreo que sea capaz al menos de: medir y registrar la energía entregada al banco de baterías por los paneles solares y la turbina eólica; controlar el nivel de carga de las baterías y medir y registrar la energía CA entregada por los inversores.

8.2 Resultados para las escuelas del grupo B

Se muestra en la Tabla 8.3 el detalle de los resultados obtenidos, para todas las combinaciones de componentes posibles. Los sistemas se ordenan según NPC (VAN, valor actual neto) donde se destaca que la composición óptima desde el punto de vista económico para las escuelas grandes (grupo B) de la comuna de Quinchao corresponde a un sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento.

Tabla 8.3 Detalle de las configuraciones óptimas según criterio económico, para escuelas del grupo B, ordenadas por el valor actual neto NPC.

Componentes	FV (kW)	AG 3500	GD (kW)	B 200	Conv. (kW)	Estrategia de control	Capital (US\$)	Variables (US\$/año)	NPC (US\$)	Costo energía (US\$/kWh)
FV-Diesel con almacenamiento	4	-	2,2	10	3	CC	25518	4348	57521	1,19
FV-Eólico-Diesel c/ almacenamiento	5	1	3,2	10	5	LF	48321	1648	60451	1,251
Diesel con Almacenamiento	-	-	3,2	10	2	CC	15329	6407	62488	1,292
Eólico-Diesel con almacenamiento	-	1	4,1	10	3	LF	34590	4053	64418	1,332

La segunda opción corresponde a un sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento. Si bien esta composición es más cara que la primera, representado principalmente en el costo de inversión de incluir una turbina eólica, se obtienen por otro lado costos variables anuales considerablemente menores y mejoras considerables desde el punto de vista técnico del sistema.

Uno de los impactos más importantes a la hora de incluir una turbina eólica en el sistema es la disminución del consumo directo de combustible para la generación eléctrica. En la Figura 8.4 se compara la potencia media de generación para el primer y segundo sistema según orden de NPC, donde para el segundo caso se evidencia una disminución importante de la generación mediante diesel, la cual es reemplazada por la generación eólica.

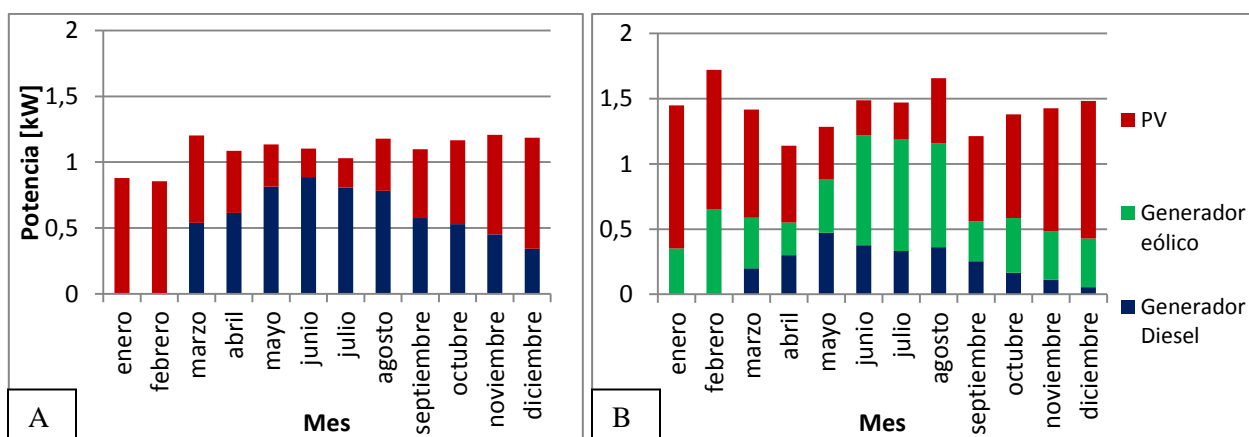


Figura 8.4 A: Potencias medias de generación para el sistema FV-Diesel con almacenamiento. B: Potencias medias de generación para el sistema FV-Eólico Diesel con almacenamiento.

La inclusión de una turbina eólica en el sistema disminuye de manera importante la dependencia respecto al abastecimiento de combustible diesel para la generación eléctrica, sobre todo para los meses de invierno, que es cuando la turbina eólica alcanza su peak de generación. De esta manera, al tener un sistema más robusto, se aumenta su confiabilidad y se disminuye el riesgo que existe actualmente en las escuelas de verse obligados a suspender o detener las jornadas escolares por problemas de distribución de combustible o fallas en los generadores diesel.

Por lo tanto, en base a los argumentos expuestos, se determina que la mejor solución para las necesidades existentes en las localidades, tanto bajo percepciones técnicas como económicas, corresponde a la implementación de un sistema híbrido fotovoltaico-eólico-diesel con almacenamiento. Se selecciona esta opción pues, además de lo mencionado recientemente, aprovecha la intermitencia y estacionalidad de los recursos solar y eólico, que al complementarse en un único sistema transforman esta debilidad en una fortaleza.

La solución cumple además con los requisitos impuestos al inicio del proyecto que exigía una solución de tipo modular y replicable. Es decir, el sistema seleccionado es aplicable a cualquiera de las escuelas del grupo B, que se observan en la Tabla 1.2. Los componentes a su vez deben cumplir con el requisito de ser modulares y confiables, es decir, deben ser fáciles de instalar y montar y a la vez deben ser duraderos y capaces de resistir las condiciones climáticas de la isla de Chiloé.

8.2.1 Descripción general del sistema propuesto

El sistema de generación híbrida propuesto consta de los siguientes componentes:

- **Generación solar:** Arreglo fotovoltaico de 5 [kW] de capacidad, compuesto por 20 paneles de 250[W] de potencia nominal, 1,62 [m²] de superficie y 15,4% de eficiencia cada uno. El arreglo debe estar orientado en dirección norte y con una inclinación de 35° respecto de la horizontal. No se consideran sistemas de seguimiento.
Los paneles cuentan con garantía extendida de 10 años y 25 años de vida útil. Además certifican que tendrán una pérdida de eficiencia menor al 20% a lo largo de su vida útil.
- **Generación eólica:** Turbina eólica de eje horizontal con generador sincrónico de imanes permanentes de 3,5 [kW] de potencia nominal, tensión nominal de 48 [Vdc] y velocidad de arranque de 3 [m/s]. Cuenta con un sistema pasivo de orientación y una torre tubular de 12[m] de altura (14 y 18 [m] dependiendo de requerimientos del lugar de ubicación como cantidad y altura de árboles presentes).
El diseño es totalmente sellado y cuenta con protección anticorrosión para resistir las condiciones climatológicas características de la isla de Chiloé. Además cuenta con una garantía de 5 años y se certifica una vida útil mayor a 20 años.
- **Generación diesel:** Generador alterno monofásico de 3,2 [kVA] de potencia nominal, frecuencia de 50 [Hz] y voltaje de 220 [V].
El generador funciona bajo una estrategia de seguimiento de demanda (LF), es decir, produce solo lo necesario para satisfacer la demanda cubriendo el déficit de las fuentes renovables.

- **Almacenamiento:** Banco de baterías en un arreglo de 24 [Vdc] de tensión, compuesto por 10 baterías electroquímicas de ciclo profundo (Gel) de 200[Ah] y tensión nominal de 12 [Vdc] cada una. Cuenta con una vida útil cercana a los 500 ciclos para una profundidad de descarga del 100% y una vida útil cercana a los 3000 ciclos para una profundidad de descarga del 20%.
- **Inversor:** Equipo inversor con rectificador de 5 [kVA] de potencia nominal, 24[Vdc] de tensión nominal y eficiencia máxima del 94%. Rectificador integrado que permite al generador diesel cargar las baterías cuando el sistema lo requiera y sea considerado óptimo.
- **Módulo de instalación:** Se considera dentro de los costos de inversión del proyecto la construcción de un módulo para la instalación de equipos como: Banco de baterías, controladores, inversor, generador diesel y cajas de conexión. Se considera un módulo con exterior metálico resistente a la intemperie y a la corrosión para evitar problemas provocados por las condiciones climáticas características de la zona. Debe tener aislación térmica y sistemas de ventilación. Se debe considerar una instalación para el escape adecuado de los gases de combustión del generador diesel hacia el exterior.

8.2.2 Esquema del sistema de generación para escuelas grandes

Se muestra en la Figura 8.5 el esquema representativo de los componentes del sistema de generación para las escuelas del grupo B de la comuna de Quinchao.

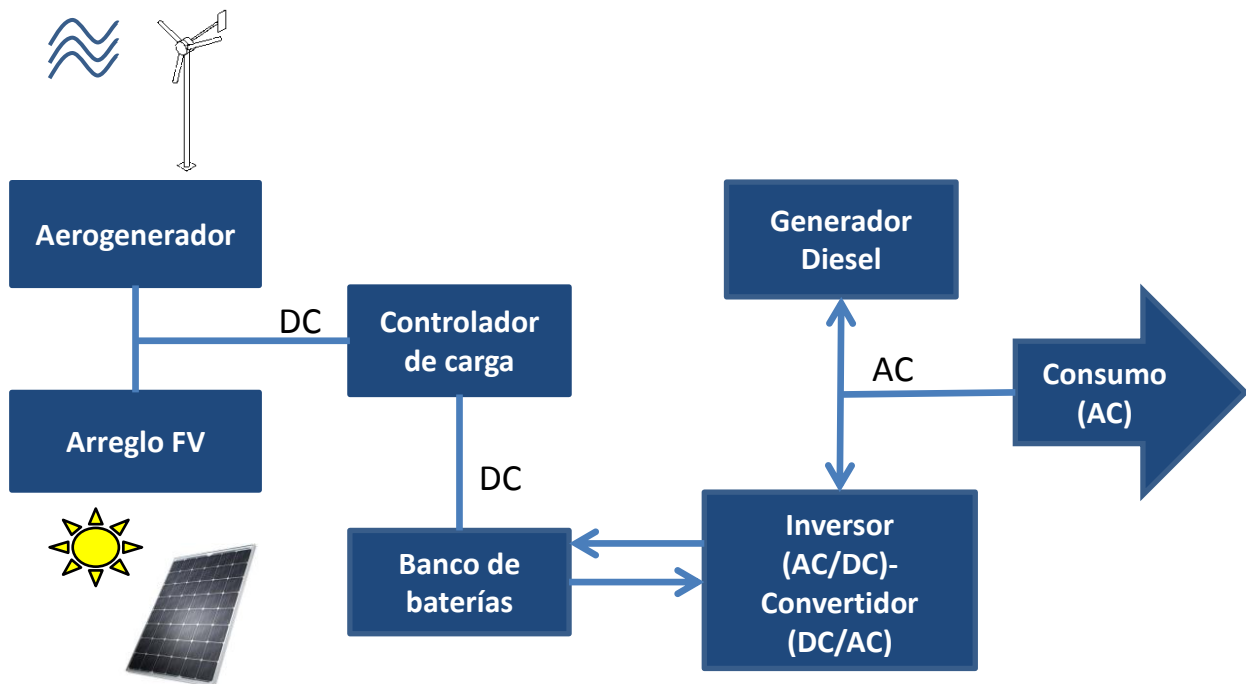


Figura 8.5 Esquema del sistema de generación FV-Eólico Diesel con almacenamiento para escuelas grandes.

8.2.3 Costos del sistema

La configuración óptima según los criterios técnicos y económicos implementados, corresponde a un arreglo fotovoltaico de 5 [kW], aerogenerador AG3500, un generador diesel de 3,2 [kW], un arreglo de 10 baterías electroquímicas B200 y un inversor-rectificador C3000.

Los costos asociados a este sistema, tanto fijos (capital) como variables (reemplazo, operación y mantenimiento), se pueden observar en detalle en la Tabla 8.4 y en la Figura 8.6.

Los costos totales de inversión del sistema corresponden a 48.321 US\$, donde se destaca el costo del aerogenerador como el más elevado. Dentro de los costos variables se destaca el costo asociado al consumo de combustible, que si bien es menor que en el escenario actual en las escuelas, no deja de ser un valor considerable. Se obtiene así un valor actual neto (VAN) de 60.451 US\$ para el proyecto evaluado en un periodo de funcionamiento a 10 años.

Tabla 8.4 Detalle de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento.

Equipo	Capital (US\$)	Reemplazo (US\$)	O & M (US\$)	Combustible (US\$)	Recuperación (US\$)	Total (US\$)
FV	12500	0	1766	0	-4188	10078
Aerogenerador	18569	0	552	0	-6221	12900
Generador AC	1605	0	1950	10244	-217	13582
Baterías	8000	5244	7360	0	-2773	17831
Inversor	4647	0	0	0	-1587	3060
Costos fijos	3000	0	0	0	0	3000
Sistema	48321	5244	11628	10244	-14986	60451

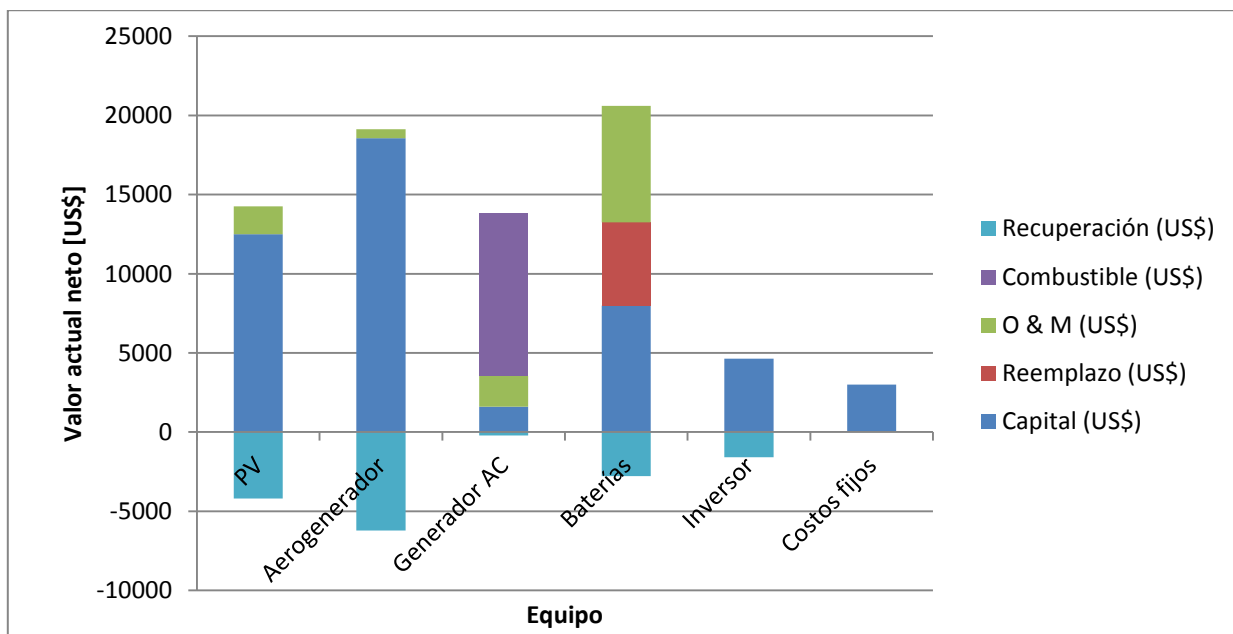


Figura 8.6 Gráfico de costos totales asociados al sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento.

8.2.4 Distribución de generación eléctrica

La distribución de la potencia media mensual de generación de energía, según el aporte de cada tecnología, se puede observar en detalle en la Figura 8.7.

Se aprecia claramente la estacionalidad característica de cada uno de los recursos renovables, donde para el periodo de invierno existe una mayor participación de la producción mediante aerogenerador, mientras que en el periodo de verano se observa una mayor participación de la producción mediante tecnología fotovoltaica.

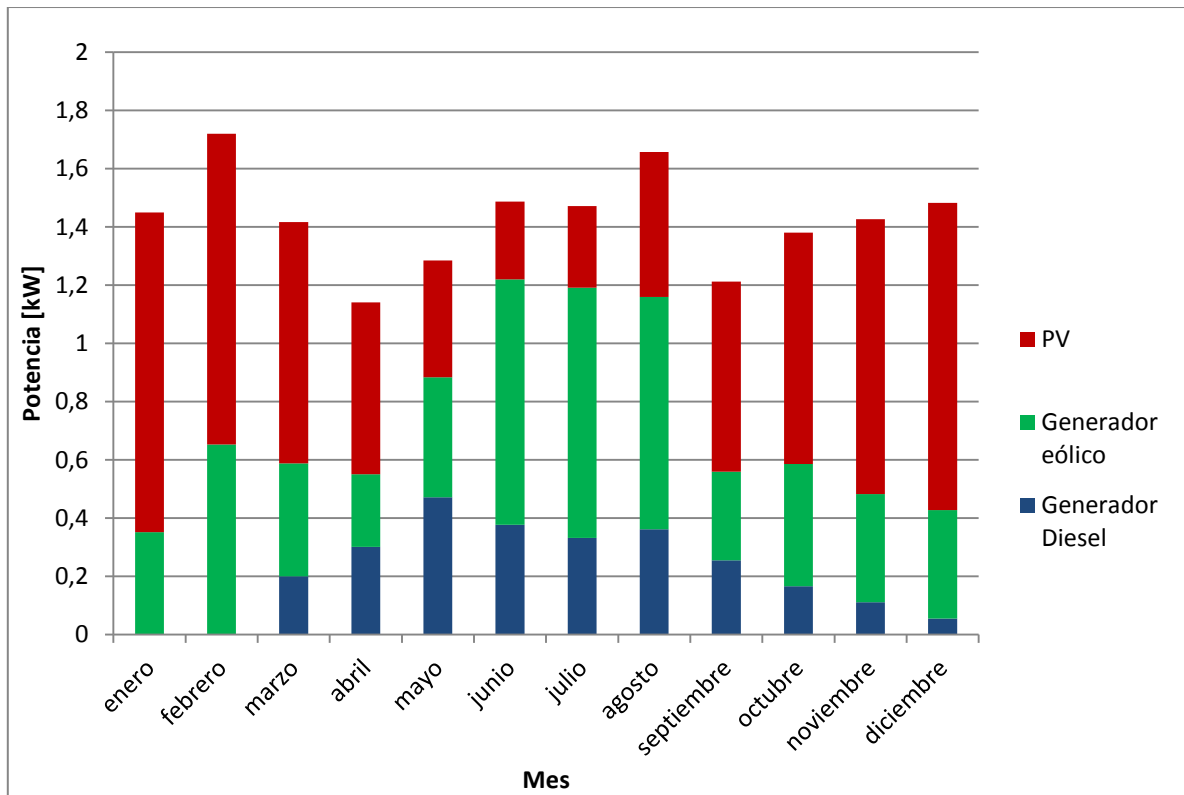


Figura 8.7 Potencia media mensual asociada a cada una de las tecnologías del sistema FV-Diesel con almacenamiento.

La producción anual de energía se distribuye de la siguiente manera:

- Generación solar: Con 6173 [kWh/año], lo que corresponde al 49,4% del total.
- Generación eólica: Con 4392 [kWh/año], lo que corresponde al 35,2% del total.
- Generación con diesel: Con 1929 [kWh/año], lo que corresponde al 15,4% del total.

8.2.5 Consideraciones para la implementación

1. En principio se maneja como opción poder utilizar los mismos generadores diesel existentes en las escuelas, sin embargo considera necesario cambiarlos por equipos de menor capacidad nominal (3,2 [kW] en base a los resultados obtenidos) debido a que se detectó, al menos en dos de las tres escuelas que fueron visitadas, que los equipos actuales están sobreestimados. Es decir, los equipos trabajan la mayor parte del tiempo bajo el 50% de su capacidad nominal de generación, condición que se verá aún más afectada con la inclusión de equipos generadores híbridos, y por lo tanto la eficiencia y vida útil de los generadores diesel se ven drásticamente afectados por problemas de funcionamiento en la cámara de combustión.
2. Los costos descritos para el sistema propuesto corresponden a los costos totales de implementación, e incluyen:
 - Costos de adquisición de equipos.
 - Costos de traslado de equipos hasta las localidades descritas.
 - Costos de instalación para cada uno de los equipos del sistema (estructuras de soporte para paneles, torre y anclaje de aerogenerador, módulos interiores resistentes a intemperie para instalación de equipos de almacenamiento y control).
 - Costos de operación y mantenimiento para cada equipo (sólo si corresponde)
 - Costos de replazo de equipos.

Sin embargo, los costos de instalación utilizados son aproximados y están sujetos a cambios dependientes del comportamiento del mercado local, al igual que todos los otros costos. Por lo tanto, estos valores solo deben ser considerados de manera referencial.

3. Se consideró durante la simulación que tanto el sistema fotovoltaico como el sistema aerogenerador funcionan en paralelo para cargar un único banco de baterías. Sin embargo para que esto sea posible se debe utilizar un controlador híbrido que sea capaz de manejar ambas variables a la hora de determinar una estrategia de carga para el banco de baterías. Se sugiere por lo tanto a la hora de considerar la implementación de los sistemas que estos sean independientes, es decir, que tanto el arreglo fotovoltaico como el aerogenerador cuenten con un regulador de carga y banco de baterías propios, y que la energía almacenada en estos bancos independientes sea utilizada para abastecer a distintas instalaciones dentro de la misma escuela.
4. Debe existir un sistema de monitoreo que sea capaz al menos de: medir y registrar la energía entregada al banco de baterías por los paneles solares y la turbina eólica; controlar el nivel de carga de las baterías y medir y registrar la energía CA entregada por los inversores.

8.3 Análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de identificar cómo influyen ciertos parámetros utilizados en los resultados expuestos. Este análisis se realiza principalmente porque existe gran incertidumbre respecto a cómo pueden evolucionar a futuro estos parámetros.

8.3.1 Precio del combustible

Para los resultados expuestos anteriormente se consideró el precio directo del diesel mostrado en la sección de antecedentes que corresponde a 1,8 [US\$/l]. Esta consideración corresponde a ser consecuente con el criterio conservador utilizado en durante todo el estudio, sin embargo, considerando las claras tendencias al alza que se han observado en los últimos años en el precio del combustible diesel, se deben analizar otros escenarios.

Se realizó la simulación conservando todas las otras características y variando el precio del diesel a 2 [US\$/l] y 2,2 [US\$/l], con lo cual se observó lo siguiente:

1. Para escuelas pequeñas:

En ambos casos las alternativas tecnológicas para el sistema escogido se mantienen. Es decir, la mejor configuración en base a los criterios económicos y técnicos implementados sigue siendo un sistema FV-Diesel con almacenamiento. Sin embargo, el costo de generación se ve afectado principalmente por el aumento en los costos de operación del generador diesel.

Al aumentar de 1,8 [US\$/kWh] a 2 [US\$/kWh] el costo del combustible diesel para el sistema de generación, el costo por unidad de energía aumenta de 1,296 [US\$/kWh] a 1,336 [US\$/kWh]. Mientras que el costo marginal de producción del generador diesel aumenta de 0,45 [US\$/kWh] a 0,5 [US\$/kWh], es decir, aproximadamente el 10% de aumento.

Al aumentar de 1,8 [US\$/kWh] a 2 [US\$/kWh] el costo del combustible diesel para el sistema de generación, el costo por unidad de energía aumenta de 1,296 [US\$/kWh] a 1,374 [US\$/kWh]. Mientras que el costo marginal de producción del generador diesel aumenta de 0,45 [US\$/kWh] a 0,55 [US\$/kWh].

2. Para escuelas grandes:

En ambos casos las alternativas tecnológicas para el sistema escogido se mantienen. Es decir, la mejor configuración en base a los criterios económicos y técnicos implementados sigue siendo un sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento. Sin embargo, el costo de generación se ve afectado principalmente por el aumento en los costos de operación del generador diesel. El impacto negativo es similar a lo observado en escuelas pequeñas, pero se ve atenuado gracias a la presencia de la generación eólica, que disminuye considerablemente el consumo total de combustible del sistema.

Al aumentar de 1,8 [US\$/kWh] a 2 [US\$/kWh] el costo del combustible diesel para el sistema de generación, el costo por unidad de energía para el sistema aumenta de 1,251 [US\$/kWh] a 1,31 [US\$/kWh]. Mientras que el costo marginal de producción del generador diesel aumenta de 0,45 [US\$/kWh] a 0,5 [US\$/kWh].

Al aumentar de 1,8 [US\$/kWh] a 2,2 [US\$/kWh] el costo del combustible diesel para el sistema de generación, el costo por unidad de energía para el sistema aumenta de 1,251 [US\$/kWh] a 1,336 [US\$/kWh]. Mientras que el costo marginal de producción del generador diesel aumenta de 0,45 [US\$/kWh] a 0,55 [US\$/kWh].

8.3.2 Variación de los recursos renovables

Para los resultados expuestos anteriormente se utilizó siempre los datos de recursos renovables menos favorables para un sistema híbrido de generación según las fuentes seleccionadas. Es decir, una velocidad de viento promedio anual escalada de 4,11 [m/s] y un promedio anual de radiación diaria de 3,45 [kWh/m²/d].

Se realizó la simulación conservando todas las otras características y utilizando los promedios de recursos renovables más optimistas entregados por las fuentes de datos utilizadas. Es decir, una velocidad de viento promedio anual escalada de 4,7 [m/s] y un promedio anual de radiación diaria de 3,7 [kWh/m²/d]. Se obtiene lo siguiente:

1. Para escuelas pequeñas:

La variabilidad de las fuentes utilizadas es mínima, y por lo tanto no altera la composición tecnológica del sistema escogido. Se mantiene el sistema FV-Diesel con almacenamiento como la mejor composición en base a los criterios impuestos.

Se observa que el costo total del proyecto disminuye, debido a la disminución en el consumo de combustible asociado a la mayor generación con fuentes renovables. El costo total del sistema disminuye de 31674 [US\$] a 31125 [US\$], mientras que el costo por unidad de energía disminuye de 1.296 [US\$/kWh] a 1,273 [US\$/kWh]

2. Para escuelas grandes:

La variabilidad de las fuentes utilizadas es mínima, y por lo tanto no altera la composición tecnológica del sistema escogido. Se mantiene el sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento como la mejor composición en base a los criterios impuestos.

Se observa que el costo total del proyecto disminuye, debido a la disminución en el consumo de combustible asociado a la mayor generación con fuentes renovables. El costo total del sistema disminuye de 60451 [US\$] a 58072 [US\$], mientras que el costo por unidad de energía disminuye de 1.251 [US\$/kWh] a 1,201 [US\$/kWh].

9. Análisis de resultados

Para escuelas del grupo A, correspondiente a las escuelas pequeñas de la comuna de Quinchao, se obtuvo que la mejor composición para el abastecimiento de electricidad corresponde a un sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento, con las siguientes características:

- **Generación solar:** Arreglo fotovoltaico de 3 [kW] de capacidad, compuesto por 12 paneles de 250[W] de potencia nominal, 1,62 [m²] de superficie y 15,4% de eficiencia cada uno.
- **Generación diesel:** Generador alterno monofásico de 2,2 [kVA] de potencia nominal, frecuencia de 50 [Hz] y voltaje de 220 [V].
- **Almacenamiento:** Banco de baterías en un arreglo de 24 [Vdc] de tensión, compuesto por 6 baterías electroquímicas de ciclo profundo (Gel) de 200[Ah] y tensión nominal de 12 [Vdc] cada una.
- **Inversor:** Equipo inversor con rectificador de 3 [kVA] de potencia nominal.

Con una inversión inicial de 19.177 US\$ y costos anuales de 1.698 US\$, esta composición se presenta como la mejor solución tanto desde la perspectiva económica como desde la perspectiva técnica.

La inclusión de un arreglo fotovoltaico de 3 [kW] de potencia nominal significan un aumento de 7500 US\$ en los costos de inversión, lo que representa cerca de un 40% del total. Sin embargo significan a su vez una disminución de más del 40% de la generación con combustible diesel, dado que de los 3320 [kWh/año] de energía consumidos anualmente, sólo 1860 [kWh/año] se generan mediante generador alterno. Por lo tanto, además de reducir los costos directos por consumo de combustible, se reducen también las horas de operación del generador, lo que disminuye de manera considerable sus costos de mantención y aumenta su período de vida útil.

El impacto de la generación solar se concentra en los meses de verano, pues como se describe en el capítulo 4 del presente informe, es en estos meses donde la radiación solar alcanza sus valores máximos. Si bien esto podría ser corregido mediante la inclusión de un aerogenerador al sistema para aprovechar el recurso eólico en los meses de invierno, esta opción se descarta por dos razones:

1. El impacto en el costo total del proyecto al agregar un aerogenerador de 3,5 [kW] de capacidad nominal es negativo. Con una diferencia de casi 18.000 US\$ entre el sistema sin aerogenerador y el sistema con aerogenerador que se muestra en la Tabla 8.1 de la sección resultados, se obtiene un aumento de aproximadamente un 20% en el costo de energía [US\$/kWh].
2. Para el caso de las escuelas pequeñas de la comuna, se privilegia el concepto de **simplicidad** por sobre los beneficios técnicos que ofrece la inclusión de un aerogenerador. Es decir, se busca obtener un sistema que sea fácil de instalar e implementar.

Para escuelas del grupo B, correspondiente a las escuelas grandes de la comuna de Quinchao, se obtuvo que la mejor composición para el abastecimiento de electricidad corresponde a un sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento, con las siguientes características:

- **Generación solar:** Arreglo fotovoltaico de 5 [kW] de capacidad, compuesto por 20 paneles de 250[W] de potencia nominal, 1,62 [m²] de superficie y 15,4% de eficiencia cada uno.
- **Generación eólica:** Turbina eólica de eje horizontal con generador sincrónico de imanes permanentes de 3,5 [kW] de potencia nominal, tensión nominal de 48 [Vdc] y velocidad de arranque de 3 [m/s].
- **Generación diesel:** Generador alterno monofásico de 3,2 [kVA] de potencia nominal, frecuencia de 50 [Hz] y voltaje de 220 [V].
- **Almacenamiento:** Banco de baterías en un arreglo de 24 [Vdc] de tensión, compuesto por 10 baterías electroquímicas de ciclo profundo (Gel) de 200[Ah] y tensión nominal de 12 [Vdc] cada una.
- **Inversor:** Equipo inversor con rectificador de 5 [kVA] de potencia nominal, 24[Vdc] de tensión nominal y eficiencia máxima del 94%.

Con una inversión inicial de 48.321 US\$ y costos anuales de 1.648 US\$, esta composición se presenta como la mejor solución tanto desde la perspectiva económica como desde la perspectiva técnica.

La inclusión de un aerogenerador de 3,5 [kW] de potencia nominal significa un aumento de 18.569 US\$ en el costo de inversión del proyecto, lo que representa cerca de un 40% del total. Sin embargo, significa a su vez una disminución de aproximadamente un 70% de la generación con combustible diesel, al ser utilizado en conjunto con tecnología fotovoltaica. Dado que de los 6570 [kWh/año] de energía consumidos anualmente, sólo 1930 [kWh/año] se generan mediante generador alterno. Por lo tanto, además de reducir los costos directos por consumo de combustible, se reducen también las horas de operación del generador, lo que disminuye de manera considerable sus costos de mantención y aumenta su período de vida útil.

Si bien esta composición no corresponde a la más económica, la diferencia con el sistema híbrido FV-Diesel con almacenamiento es de solo 2.930 US\$ representado en valor actual neto, que significan un aumento de sólo 5% en el costo de energía (1,19 [US\$/kWh] para el sistema FV-Diesel con almacenamiento versus 1,25 [US\$/kWh] para el sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento).

Por lo tanto, para las escuelas grandes de la comuna de Quinchao, se escoge la configuración de un sistema híbrido FV-Eólico-Diesel con almacenamiento, pues como se menciona en la sección resultados, se privilegia el concepto de **confiabilidad**, asociado a la disminución de la dependencia respecto a la utilización del generador diesel.

10. Conclusiones

10.1 Conclusiones generales del proyecto

En base a los resultados y consideraciones realizadas durante el proyecto, se puede concluir lo siguiente:

- Se determinaron las configuraciones de los sistemas híbridos que reducen los costos totales de generación para los dos grupos de escuelas considerados. Para escuelas pequeñas se determinó que la configuración óptima consiste en un sistema FV-Diesel con almacenamiento, mientras que para escuelas grandes, se determinó que la configuración óptima consiste en un sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.
- Se dimensionó el recurso eólico en base a registros horarios obtenidos de la herramienta “Explorador Eólico” y el recurso solar en base a registros horarios obtenidos de la herramienta “Explorador Solar”, ambas desarrolladas por el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Utilizando estos datos se determinaron perfiles anuales de velocidad de viento y radiación solar los cuales fueron utilizados para realizar simulaciones en HOMER.
- Se determinaron los consumos eléctricos en las escuelas construyendo perfiles diarios de carga complementados con mediciones realizadas utilizando un registrador de datos conectado directamente a los generadores eléctricos en cada una de las escuelas visitadas. Para ello, las trece escuelas existentes en la comuna se dividieron en dos grupos, escuelas pequeñas y escuelas grandes. Además, se seleccionaron tres escuelas, la escuela “Capilla Antigua” representativa del grupo de escuelas pequeñas, y las escuelas “Ostricultura” y “La Capilla” representativas del grupo de escuelas grandes.

10.2 Conclusiones respecto a las soluciones presentadas

De la evaluación realizada y los resultados expuestos se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Para las escuelas pequeñas (grupo A) de la comuna de Quinchao, bajo un período de 10 años de funcionamiento y los criterios económicos y técnicos implementados, el mejor sistema de generación eléctrica está compuesto por: Un arreglo fotovoltaico de 3 [kW], un generador diesel de 2,2 [kW], un arreglo de 6 baterías electroquímicas de 200 [Ah] y un inversor-rectificador de 3 [kVA].

Los costos totales de este sistema representados en el NPC (net present cost) alcanzan los 31674 [US\$], de los cuales 19177 [US\$] corresponden al capital inicial de inversión y 1698 [US\$/año] corresponden a los costos variables de operación del sistema, donde se incluyen los costos de mantenimiento y combustible.

2. Para las escuelas grandes (grupo B) de la comuna de Quinchao, bajo un período de 10 años de funcionamiento y los criterios económicos y técnicos implementados, el mejor sistema de generación eléctrica está compuesto por: Un arreglo fotovoltaico de 5 [kW], un aerogenerador de 3,5 [kW], un generador diesel de 3,2 [kW], un arreglo de 10 baterías electroquímicas de 200 [Ah] y un inversor-rectificador de 5 [kVA].

Los costos totales de este sistema representados en el NPC (net present cost) alcanzan los 60451 [US\$], de los cuales 48321 [US\$] corresponden al capital inicial de inversión y 1648 [US\$/año] corresponden a los costos variables de operación del sistema, donde se incluyen los costos de mantenimiento y combustible.

De los análisis de sensibilidad realizados se destaca el hecho de que uno de los factores más influyentes respecto a los costos totales de generación eléctrica en ambos sistemas corresponde al precio del combustible diesel. Esto se traduce en que a pesar de la inclusión de los sistemas fotovoltaico y eólico, el generador diesel sigue siendo una pieza importante en la generación eléctrica en las escuelas, con un gran porcentaje de participación en el sistema final.

Se destaca además el hecho de que una consideración de recursos renovables más optimista (dentro del rango aceptable para la zona) en la simulación no influya en el resultado en primera instancia. Esto se debe principalmente a que la calidad de los recursos naturales, principalmente a la radiación solar, deja bastante que desear al compararla con otras zonas de Chile.

De cualquier modo, resulta evidente que la aplicación de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para las escuelas de la comuna de Quinchao es técnicamente factible a largo plazo, considerando que existe una cantidad importante de externalidades positivas que a la hora de realizar un análisis económico se pasan por alto.

A eso se agrega que cualquiera de los escenarios presentados como posibles resulta más barato que la solución actual existente en las escuelas. Más aun cuando esto va de la mano con una inevitable alza en el precio de los combustibles, principal suministro utilizado hoy en día para el abastecimiento en las escuelas rurales de la comuna de Quinchao.

11. Bibliografía

1. **Guerra Baeza, Luis.** Estudio de factibilidad de un sistema híbrido de generación de energía eléctrica para escuelas de Quinchao. *Informe Final, preparado para Corporación Municipal de Quinchao.* Santiago de Chile : s.n., Febrero de 2013.
2. **Kreith, Frank y Goswami, Yogi.** *Handbook of energy efficiency and renewable energy.* 2007.
3. **PVEducation.** PVEducation. [En línea] <http://pveducation.org>.
4. **Markvart y Castañer.** *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications.* s.l. : Elsevier, 2003.
5. **Chiloeweb.** Chiloeweb. [En línea] www.chiloeweb.com.
6. **Nasa.** Surface meteorology and Solar Energy, A renewable energy resource web site (release 6.0). [En línea] <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
7. **Departamento de Geofísica, Universidad de Chile y Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.** Explorador de energía solar. [En línea] <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>.
8. **Departamento de Geofísica, Universidad de Chile y Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.** Explorador de energía eólica. [En línea] <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>.
9. **HOMER.** Homer energy. [En línea] <http://homerenergy.com/>.
10. **Duffie , JA y Beckman , WA.** *Solar Engineering of Thermal Processes 2nd edition.* New York : Wiley, 1991.
11. **Heliplast.** Heliplast Christof Horn y CIA Ltda. [En línea] www.heliplast.cl.
12. **Esol.** Esol Energía Solar. [En línea] www.esol.cl.
13. **Antusolar.** Antusolar Ltda. [En línea] <http://www.antusolar.cl/>.
14. **Dufo-López, Rodolfo y Bernal-Agustín, José L.** *Multi-objective design of PV– wind– diesel–hydrogen– battery systems.* 2008. págs. 2566-2567.
15. **Solener.** Solener Soluciones Energéticas. [En línea] www.solener.cl.

12. Anexos

Anexo 1: Detalle de los equipos del sistema para escuelas pequeñas

Se muestra a continuación el detalle de todos los equipos que componen el sistema de generación eléctrica FV-Diesel con almacenamiento más conveniente según los criterios técnicos y económicos implementados.

En la Tabla 12.1 se muestra el detalle de la generación solar resultante para el sistema.

Tabla 12.1 Resumen de la generación solar del sistema FV-Diesel con almacenamiento

Descripción	Cantidad
Capacidad Instalada (kW)	3
Potencia media de salida (kW)	0,42
Energía media de salida (kW/d)	10,1
Factor de capacidad (%)	14,1
Producción total (kWh/año)	3704
Penetración FV (%)	112
Horas de operación (h/año)	4383
Costo de energía (US\$/kWh)	0,222

En la Tabla 12.2 se muestra el detalle de la generación con combustible diesel resultante para el sistema.

Tabla 12.2 Resumen de la generación con combustible diesel del sistema FV-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Cantidad
Tiempo operación (h/año)	1141
N° de partidas (partidas/año)	331
Vida operacional (años)	13,1
Factor de capacidad (%)	9,65
Costo fijo de generación (US\$/h)	0,596
Costo marginal de generación (US\$/h)	0,45
Producción eléctrica (kWh/año)	1860
Potencia media de salida (kW)	1,63
Consumo de combustible (L/año)	666
Consumo específico de combustible (L/kWh)	0,358
Eficiencia eléctrica media (%)	28,4

En la Tabla 12.3 se muestra el detalle del banco de baterías de almacenamiento óptimo resultante para el sistema.

Tabla 12.3 Resumen del banco de baterías del sistema FV-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Cantidad
Baterías por arreglo	2
Arreglos en paralelo	3
Baterías en total	6
Voltaje del sistema (V)	24
Capacidad nominal (kWh)	14,4
Capacidad utilizable (kWh)	10,1
Autonomía (h)	26,6
Vida útil (kWh)	6175
Costo promedio de energía (US\$/kWh)	0,869
Energía entrante (kWh/año)	701
Energía saliente (kWh/año)	563
Pérdidas (kWh/año)	134
Esperanza de vida (años)	9,8

En la Tabla 12.4 se muestra el detalle del inversor-rectificador óptimo resultante para el sistema.

Tabla 12.4 Resumen del Inversor-Rectificador del sistema FV-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Inversor	Rectificador
Capacidad (kW)	2	2
Potencia media de salida (kW)	0,19	0,02
Máxima potencia de salida (kW)	2	1,52
Factor de capacidad (%)	9,5	1
Horas de operación (h/año)	3007	481
Energía entrante (kWh/año)	1848	201
Energía saliente (kWh/año)	1663	171
Pérdidas (kWh/año)	185	30

Anexo 2: Detalle de los equipos del sistema para escuelas grandes

Se muestra a continuación el detalle de todos los equipos que componen el sistema híbrido de generación eléctrica FV-Eólico-Diesel con almacenamiento, según los criterios técnicos y económicos implementados.

En la Tabla 12.5 se muestra el detalle de la generación solar resultante para el sistema.

Tabla 12.5 Resumen de la generación solar del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento

Descripción	Cantidad
Capacidad Instalada (kW)	5
Potencia media de salida (kW)	0,7
Energía media de salida (kW/d)	16,9
Factor de capacidad (%)	14,1
Producción total (kWh/año)	6173
Penetración FV (%)	94
Horas de operación (h/año)	4383
Costo de energía (US\$/kWh)	0,222

En la Tabla 12.6 se muestra el detalle de la generación eólica resultante para el sistema.

Tabla 12.6 Resumen de la generación Eólica del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Cantidad
Capacidad Instalada (kW)	3,5
Potencia media de salida (kW)	0,5
Factor de capacidad (%)	14,3
Producción total (kWh/año)	4392
Penetración (%)	66,8
Horas de operación (h/año)	7666
Costo de energía (US\$/kWh)	0,399

En la Tabla 12.7 se muestra el detalle de la generación con combustible diesel resultante para el sistema.

Tabla 12.7 Resumen de la generación con combustible diesel del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Cantidad
Tiempo operación (h/año)	1137
N° de partidas (partidas/año)	363
Vida operacional (años)	13,2
Factor de capacidad (%)	6,88
Costo fijo de generación (US\$/h)	0,801
Costo marginal de generación (US\$/h)	0,45
Producción eléctrica (kWh/año)	1929
Potencia media de salida (kW)	1,7
Consumo de combustible (L/año)	773
Consumo específico de combustible (L/kWh)	0,401
Eficiencia eléctrica media (%)	25,3

En la Tabla 12.8 se muestra el detalle del banco de baterías de almacenamiento óptimo resultante para el sistema.

Tabla 12.8 Resumen del banco de baterías del sistema FV-Eólico-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Cantidad
Baterías por arreglo	2
Arreglos en paralelo	5
Baterías en total	10
Voltaje del sistema (V)	24
Capacidad nominal (kWh)	24
Capacidad utilizable (kWh)	16,8
Autonomía (h)	22,4
Vida útil (kWh)	10291
Costo promedio de energía US\$/kWh)	0,869
Energía entrante (kWh/año)	1570
Energía saliente (kWh/año)	1270
Pérdidas (kWh/año)	284
Esperanza de vida (años)	7,25

En la Tabla 12.9 se muestra el detalle del inversor-rectificador óptimo resultante para el sistema.

Tabla 12.9 Resumen del Inversor-Rectificador del sistema Eólico-Diesel con almacenamiento.

Descripción	Inversor	Rectificador
Capacidad (kW)	5	5
Potencia media de salida (kW)	0,53	0
Máxima potencia de salida (kW)	4,42	0,51
Factor de capacidad (%)	10,6	0
Horas de operación (h/año)	3340	96
Energía entrante (kWh/año)	5170	15
Energía saliente (kWh/año)	4653	12
Pérdidas (kWh/año)	517	2

Anexo 3: Datos de cargas eléctricas utilizados para la simulación

Tabla 12.10 Potencias medias horarias correspondientes al perfil estándar de demanda utilizado para la simulación en escuelas pequeñas (Grupo A).

Hora	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0:00-1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:00-2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:00-3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:00-4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:00-5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00-6:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:00-7:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7:00-8:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8:00-9:00	1,47	1,54	1,65	1,69	1,65	1,54	1,51	1,43	1,33	1,33
9:00-10:00	1,47	1,54	1,65	1,69	1,65	1,54	1,51	1,43	1,33	1,33
10:00-11:00	1,64	1,76	1,93	1,99	1,93	1,76	1,70	1,59	1,42	1,42
11:00-12:00	1,53	1,63	1,78	1,83	1,78	1,63	1,58	1,48	1,33	1,33
12:00-13:00	1,53	1,63	1,78	1,83	1,78	1,63	1,58	1,48	1,33	1,33
13:00-14:00	1,64	1,76	1,93	1,99	1,93	1,76	1,70	1,59	1,42	1,42
14:00-15:00	1,59	1,72	1,92	1,99	1,92	1,72	1,66	1,52	1,33	1,33
15:00-16:00	1,25	1,30	1,37	1,39	1,37	1,30	1,28	1,23	1,16	1,16
16:00-17:00	0,79	0,87	1,00	1,04	1,00	0,87	0,83	0,75	0,62	0,62
17:00-18:00	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
18:00-19:00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
19:00-20:00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
20:00-21:00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
21:00-22:00	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
22:00-23:00	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
23:00-24:00	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Tabla 12.11 Potencias medias horarias correspondientes al perfil estándar de demanda utilizado para la simulación en escuelas grandes (Grupo B).

Hora	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
0:00-1:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:00-2:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:00-3:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:00-4:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:00-5:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:00-6:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:00-7:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7:00-8:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8:00-9:00	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
9:00-10:00	1,98	2,04	2,12	2,15	2,12	2,04	2,01	1,96	1,87	1,87
10:00-11:00	2,47	2,62	2,85	2,93	2,85	2,62	2,55	2,40	2,17	2,17
11:00-12:00	2,47	2,62	2,85	2,93	2,85	2,62	2,55	2,40	2,17	2,17
12:00-13:00	2,58	2,74	2,99	3,08	2,99	2,74	2,66	2,49	2,24	2,24
13:00-14:00	2,62	2,77	3,00	3,08	3,00	2,77	2,70	2,55	2,32	2,32
14:00-15:00	2,71	2,78	2,89	2,93	2,89	2,78	2,75	2,68	2,57	2,57
15:00-16:00	2,52	2,65	2,86	2,93	2,86	2,65	2,58	2,45	2,24	2,24
16:00-17:00	2,29	2,37	2,48	2,51	2,48	2,37	2,33	2,25	2,14	2,14
17:00-18:00	1,70	1,78	1,91	1,95	1,91	1,78	1,74	1,65	1,52	1,52
18:00-19:00	1,69	1,74	1,81	1,83	1,81	1,74	1,72	1,67	1,60	1,60
19:00-20:00	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
20:00-21:00	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
21:00-22:00	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
22:00-23:00	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
23:00-24:00	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86

Anexo 4: Códigos de equipos utilizados

Códigos de los equipos utilizados y sus respectivos modelos en el mercado.

1. Aerogeneradores

Tabla 12.12 Códigos utilizados para aerogeneradores.

Código	Equipo
AG1500	WindSpot 1,5 [kW]
AG3500	WindSpot 3,5 [kW]

2. Baterías electroquímicas de ciclo profundo (DCG)

Tabla 12.13 Códigos utilizados para baterías electroquímicas.

Código	Equipo
BA2	PowerSonic PS1223
BA7	PowerSonic PS1270
BA12	PowerSonic PS12120
BA18	PowerSonic PS12180
BA26	PowerSonic PS12260
BA55	PowerSonic PS12550
BA100	PowerSonic PS121000
BG100	PowerSonic DCG12-100
BG200	PowerSonic DCG12-200

3. Inversores-Convertidores

Tabla 12.14 Códigos utilizados para los inversores de voltaje.

Código	Equipo
C 1200	Victron Multiplus C 24/1200/25
C 1600	Victron Multiplus C 24/1600/40
C 2000	Victron Multiplus C 12/2000/80
C 3000	Victron Multiplus C 24/3000/70
C 5000	Victron Quattro C 48/5000/70

4. Paneles fotovoltaicos

Tabla 12.15 Códigos utilizados para paneles fotovoltaicos.

Código	Equipo
K10	Komaes KM10
K20	Komaes KM20
K50	Komaes KM50
K100	Komaes KM100
C20	JS Mono JS20M
C50	JS Mono JS50M
C85	JS Mono JS85M
C100	JS Mono JS100M
C135	JS Mono JS135M
C185	JSMono JS185M
C195	CSUN205-72M
C250	CSUN250-60P