

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y POTENCIAL ENERGÉTICO
DE RECURSOS RENOVABLES PARA EL DISEÑO DE MICRO-REDES EN
COMUNIDADES RURALES**

VÍCTOR ENRIQUE CAQUILPAN PARRA

Santiago, Chile.

2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y POTENCIAL ENERGÉTICO
DE RECURSOS RENOVABLES PARA EL DISEÑO DE MICRO-REDES EN
COMUNIDADES RURALES**

VÍCTOR ENRIQUE CAQUILPAN PARRA

Santiago, Chile.

2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y POTENCIAL ENERGÉTICO
DE RECURSOS RENOVABLES PARA EL DISEÑO DE MICRO-REDES EN
COMUNIDADES RURALES**

**ESTIMATION OF THE ELECTRICAL DEMAND AND ENERGY POTENTIAL
OF RENEWABLE RESOURCES FOR THE DESIGN OF MICROGRIDS IN
RURAL COMMUNITIES**

VÍCTOR ENRIQUE CAQUILPAN PARRA

Santiago, Chile.

2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

ESCUELA DE PREGRADO

**ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA Y POTENCIAL ENERGÉTICO
DE RECURSOS RENOVABLES PARA EL DISEÑO DE MICRO-REDES EN
COMUNIDADES RURALES**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

VÍCTOR ENRIQUE CAQUILPAN PARRA

Profesores Guías	Calificaciones
Doris Sáez H. Ingeniero Civil Industrial mención Electricidad, Dr.	7,0
Roberto Hernández A. Prof. de Estado en Historia, Geogr. y Educ. Cívica, Mg. Sc.	7,0
Profesores Evaluadores	
Rodrigo Fuster G. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr.	6,7
Alejandro León S. Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	5,8

Santiago, Chile.

2016

AGRADECIMIENTOS

El presente documento corresponde a sólo una finita parte de mi vida, sin embargo es el reflejo de un largo proceso dentro del cual han participado un sinnúmero de personas de diversas formas. Agradezco al equipo de la Universidad de Chile y la Universidad de La Frontera y a mis profesores guías, los que me confirieron importantes responsabilidades dentro del proyecto de micro-redes, al trabajar de forma directa con una gran cantidad de personas y equipamiento técnico de vanguardia.

Doy las gracias a las personas de la comunidad Huanaco Huenchun (Nueva Imperial) y José Painecura (Carahue), quienes nos han brindado una gran contribución a los estudios realizados y más que todo, un ambiente permanentemente grato, lleno de cariño y regocijo, comida, cada vez que estamos en terreno.

Desde ya hace un año, he estado de manera presencial en el Depto. de Ingeniería Eléctrica, en donde he conocido a grandes personas, ingenieros y estudiantes, lo que me han otorgado un gran apoyo, tanto técnica como emocionalmente, ya que son parte de las personas con las que actualmente más relaciono, comparto y procrastino dentro del día a día, lo cual es valorado con una inmensa gratitud.

Nunca lo dejaré de hacer, agradecer a mi alma mater, Antumapu, en donde he conocido a parte de mis mejores amigos, quienes me han acompañado por varios años a través de una estrecha amistad, viajes, salidas a terreno, vacaciones, mochileos, cerros, travesías, rocas, carretes, EGEA, trabajos comunitarios, e infinitas actividades extracurriculares, las que valoro más que todo el conocimiento teórico aprendido durante mi estadía, ya que son hechos que me han forjado como ser. También, agradezco a mis amigos de la vida, de la enseñanza media, con los que me contacto tarde, mal y nunca, pero que aun así, nunca dejamos de hacerlo, y siempre sale algún viaje o comilona.

Doy gracias por la posibilidad que se me dio para estudiar en la universidad, ya que antes de eso, no tenía mayores motivaciones por aprender o seguir un futuro académico. La inmensa cantidad de personas que conocí y las distintas temáticas que pude aprender, despertaron mi inquietud de ser curioso, de seguir aprendiendo, de experimentar, de ir más allá de lo que se me enseña dentro de un aula de clases. Si tuviera que mencionar los principales aprendizajes que me proporcionó mi estancia en la universidad, los resumiría en tres: 1) Mediante la oportunidad de participar en distintas agrupaciones y actividades, logré visualizar y valorar el trabajo práctico y aplicado, conociendo personas fervientemente motivadas en lo que realizan, ejecutando labores cooperativas, entregando ayuda a través de distintas disciplinas y conocimientos, proporcionando contribuciones y bienestar a la sociedad de forma desinteresada, sólo por el deseo de aportar. 2) Aprender a que la motivación es uno de los principales motores para el desarrollo de ideas, sueños, aprendizajes y proyectos de vida. Tal como su etimología lo indica, “Causa del movimiento”, es una virtud tan vital, que espero que me acompañe siempre a lo largo de mi vida y de mis propósitos, logrando esparcir esta chispa por donde vaya, donde sea y haciendo lo que sea y, 3) Una de las cosas que agradezco más, durante mi instancia

académica, fue el re-aprender a andar en bicicleta, ya que hasta el día de hoy trato de pedalear todo lo que puedo hasta que el cansancio y la pereza no me dé más.

Finalmente, con una gran alegría, agradezco a mi familia, que me ha apoyado en todas las instancias de mi vida (incluyo a mis perros, Apolo e Isidora, los cachorros de la casa), quienes a través de afecto y apoyo, se preocupan por mí y me entregan un gigante respaldo ante toda situación.

Gracias!

Adicionalmente, agradezco sinceramente a FONDEF IDeA - ID14I10063 “Diseño e Implementación de un Prototipo Experimental de Micro-redes para Comunidades Mapuche”, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería ICM: P-05-004-F y Solar Energy Research Center (SERC) CONICYT: FBO16, CONICYT/FONDAP/15110019 por el apoyo a la realización de este estudio.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. Objetivo general.....	15
1.2. Objetivos específicos	15
2. MARCO TEÓRICO.....	16
2.1. Micro-redes.....	16
2.1.1. Introducción	16
2.1.2. Planificación de micro-redes.....	21
2.2. Demanda eléctrica.....	22
2.2.1. Demanda residencial	25
2.2.2. Estimación demanda residencial	26
2.2.3. Casos de estudio. Estimación de demanda residencial.	27
2.3. Potencial energético	30
2.3.1. Energía solar y eólica en el abastecimiento de micro-redes.....	32
2.3.2. Estimación del potencial energético.....	34
2.4. Enfoque participativo	36
2.5. Discusión	38
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	40
3.1. Materiales	40
3.2. Lugar de estudio.....	40
3.3. Metodología para la estimación de la demanda eléctrica de la comunidad	42
3.3.1. Recolección de información primaria	42
3.3.2. Generación de la base de datos	43
3.3.3. Generación de perfiles de demanda	48
3.3.4. Validación del modelo	53
3.3.5. Estimación de la demanda total de la comunidad	54
3.3.6. Extrapolación de la demanda eléctrica.....	55
3.4. Metodología para la estimación del potencial de energía renovable.....	56
3.4.1. Estimación del potencial eólico y solar.....	56
3.4.2. Análisis de restricciones territoriales	63
3.5. Discusión	67

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
4.1. Demanda eléctrica.....	69
4.1.1. Recolección de información primaria	69
4.1.2. Generación de la base de datos	72
4.1.3. Generación de perfiles de demanda.....	77
4.1.4. Validación del modelo	81
4.1.5. Estimación de la demanda total de la comunidad	81
4.1.6. Extrapolación de la demanda eléctrica.....	84
4.1.7. Discusión.....	88
4.2. Potencial energético	89
4.2.1. Estimación del potencial eólico y solar.....	89
4.2.2. Análisis de variables territoriales	105
4.2.3. Discusión.....	112
5. CONCLUSIONES	114
6. BIBLIOGRAFÍA	116
7. APÉNDICES	124
Apéndice 1. Encuesta General de Localidad.....	124
Apéndice 2. Encuesta Particular – Proyecto Micro-red Región de La Araucanía. 127	
Apéndice 3. Resultados de la clasificación realizada mediante el algoritmo SOM. 132	
8. ANEXOS	133
Anexo 1. Asentimiento informado. Este documento es presentado a cada jefe de hogar encuestado para certificar que se encuentra informado del proyecto y aporta de manera voluntaria a este.	133

RESUMEN

Las micro-redes proporcionan abastecimiento energético a un sector determinado, integrando diferentes fuentes locales de generación de energía, con sistemas de respaldo y almacenamiento, buscando un desarrollo sustentable a lo largo del tiempo. Proyectos de esta naturaleza, son capaces de entregar energía a comunidades aisladas, así como también a zonas que poseen conexión con la red principal de distribución eléctrica, contribuyendo a una mejor calidad del servicio. Para llevar a cabo un adecuado diseño de un proyecto de micro-red es necesario realizar un riguroso estudio de las condiciones locales presentes en un territorio, incluyendo aspectos tanto técnicos, como sociales y ambientales.

En este estudio, se analizaron parte de los aspectos más relevantes para el diseño de una micro-red, correspondientes a la estimación de la demanda eléctrica y la cuantificación de los recursos renovables capaces de ser utilizados para la generación de energía. Dicho trabajo fue aplicado en la comunidad rural de Huanaco Huenchun, localizada en la comuna de Carahue, región de la Araucanía. En la primera parte de este estudio, se diseñó y aplicó una metodología para estimar los perfiles de demanda de las viviendas de la comunidad y sus principales consumos de energía eléctrica, utilizando datos sociodemográficos de los residentes de la comunidad, en conjunto con mediciones del consumo eléctrico y algoritmos de redes neuronales. Por otro lado, mediante el uso de datos provenientes de modelos de meso escala y estaciones meteorológicas, e información de distintos equipos de generación, se estimó el recurso eólico y solar disponible al interior de la comunidad, complementando este resultado, con un análisis preliminar del territorio utilizando información espacial del lugar y de los mismos residentes.

La integración de diferentes fuentes de información permitió generar perfiles de demanda para todas las viviendas de la comunidad con una alta resolución temporal, obteniendo un perfil de demanda de la comunidad completa para todo un año. Adicionalmente, en base al análisis del recurso eólico y solar, e información espacial, se logró determinar distintas configuraciones que satisfacen la demanda eléctrica estimada, generando un balance de energía, identificándose a su vez potenciales zonas que pueden ser utilizadas como lugares de implementación para las unidades de generación.

Palabras clave: micro-red, comunidad rural, demanda eléctrica, recursos renovables.

ABSTRACT

The microgrids provide energy supply to a particular sector, incorporating different local energy sources, with back-up and storage systems, seeking a sustainable development throughout the time. These projects are capable to provide energy to isolated communities as well as also zones that have connection with the main grid, providing to a better quality of service. For carrying out an appropriate design of a microgrid project is necessary to make a strict study of the local conditions present in a territory, integrating technical, social and environmental aspects.

In this study, parts of the most important aspects for the design of a microgrid were analyzed, which correspond to the estimation of the electrical demand and the quantification of the renewable resources able to be used for the generation of energy. This work was done in the rural community of Huanaco Huenchun, located in the commune of Carahue, region of the Araucanía. In the first part of this study, a methodology for estimating the of load profiles of dwellings and their main consumptions was designed and applied, using sociodemographic data of the residents of the community of study, together with consumption measurements and algorithms of neural networks. On the other hand, through the use of data provided by mesoscale models and meteorological stations, and information regarding different power generation equipment, the wind and solar resource inside of the community was estimated, complementing this result, with a preliminary analysis of the territory using spatial information and of the residents themselves.

The integration of different sources of information allows to generate load profiles for all the dwellings of the community with a high temporal resolution, obtaining a load profile of the whole community by a complete year. Additionally, based on the wind and solar sources data, and spatial information, different configurations that meet the electrical demand estimated were done, generating an energy balance. At last, the potential areas that can use for the implementation of generation units were identified.

KeyWords: microgrid, rural community, electrical demand, renewable resources.

1. INTRODUCCIÓN

En Chile existen variadas comunidades rurales¹ que poseen hace sólo algunos años acceso a la red eléctrica (10 a 20 años atrás), lo que ha permitido mejorar la calidad de vida de las personas de aquellas zonas. A pesar de esto, en ciertos sectores principalmente más aislados se presentan una serie de problemáticas relacionadas con el abastecimiento eléctrico, tales como altos precios ligados al consumo de energía, fallas en líneas de distribución (cortes de suministro) y largos tiempo de espera en el restablecimiento del servicio, debido en gran parte a la distancia de las viviendas rurales a los puntos de distribución, además de la presencia de eventos climáticos y fallas en las líneas de distribución, lo que puede conllevar al desabastecimiento de energía de un sector por varios días o incluso semanas (SAESA, 2014; Ministerio de Desarrollo Social, 2015). También se destaca que en términos generales, las zonas rurales se encuentran alejadas de la red de distribución, y en ocasiones poseen baja conectividad y accesibilidad al suministro (Alvial-Palavicino et al., 2011).

En base a lo anterior, en comunidades en las cuales se evidencia tal situación se presenta una oportunidad para la puesta en marcha de proyectos de energización sustentada a partir de fuentes de energía renovable (ER) logrando aprovechar la disponibilidad de recursos naturales presentes en un determinado territorio para generar energía (Strunz et al., 2014). Dentro de los mecanismos de inserción de fuentes de generación, se destaca el concepto de micro-red el cual corresponde a sistemas que integran medios de generación distribuida (GD²) que son capaces de operar a baja tensión y que son generados en el mismo lugar o cerca de los usuarios. Además, las micro-redes tienen la capacidad de operar conectadas a la red eléctrica (*on grid*) o desconectadas (*off grid*) permitiendo incluso proporcionar abastecimiento autónomo (parcial o total) de energía en áreas remotas que encuentren aisladas y distantes de la red, tales como villas, pueblos e islas (Banerji et al., 2012; Hartono et al., 2013; Zhu et al., 2014).

Para el diseño de este tipo de proyectos es necesario identificar la demanda eléctrica en cada sector y estimar el potencial de los recursos energéticos disponibles para satisfacer dicha demanda. La demanda eléctrica corresponde a uno de los aspectos más relevantes dentro del diseño de un sistema de generación. En base al comportamiento, peaks de demanda y su proyección en el tiempo se debe llevar a cabo el dimensionamiento de la generación necesaria para garantizar seguridad y un servicio ininterrumpido. La demanda eléctrica en comunidades rurales es un aspecto difícil de determinar debido a que es un elemento muy variable y poco controlable, presentando variaciones tanto a nivel diario como estacional, siendo ampliamente afectado por factores humanos, los cuales están asociados a aspectos sociales y culturales (Hatziargyriou, 2014; Su et al., 2010).

¹ Una comunidad rural se comprende como un asentamiento humano concentrado o disperso conformado por menos de 2000 habitantes, que principalmente se dedican a realizar actividades primarias (INE, 1992).

² La generación distribuida (GD) corresponde a la producción de energía a través de variados medios de generación (unidades fotovoltaicas, aerogeneradores, microturbinas, entre otras) localizadas cerca de los centros de consumo (Banerji et al., 2012).

Para poder determinar la demanda eléctrica, normalmente se requiere de un conocimiento detallado del consumo de los usuarios mediante la elaboración de perfiles de demanda, los cuales reflejan el comportamiento de la energía consumida en diversos instantes de un día, semana o dentro de un período mayor. Sin embargo, en general no existe información disponible, por lo que se utilizan modelos matemáticos para la generación de perfiles de demanda, los cuales se basan en información estadística y datos obtenidos en terreno que son utilizados para obtener patrones de perfiles de demanda, que corresponden a patrones que se logran asociar a un determinado perfil o valor de demanda. En diversos estudios se ha relacionado la demanda a aspectos socio-económicos, patrones de ocupación, uso de electrodomésticos, composición familiar, entre otras variables, utilizando a su vez algoritmos de agrupamiento y clasificación, u otros enfoques probabilísticos (Strbac, 2008; Kim et al., 2011; Asare-Bediako et al., 2014). Dichos métodos al necesitar datos de carácter socio-económico de una zona de estudio, previamente deben determinar criterios de selección para escoger a las personas y/u organismos claves que proporcionen dicha información. Esto es necesario debido a que cada comunidad puede contener factores propios (principalmente sociales y culturales) que establecen diferencias relevantes con otros territorios y que pueden afectar su demanda. Además, existen diversos métodos para obtener la información requerida, los cuales pueden incluir diferentes formatos tales como encuestas, entrevistas semi-estructuradas y actividades participativas (Kumar et al., 2009; Gruber y Prodanovic, 2012; Llanos et al., 2012; Zhu et al., 2014).

Por otro lado, es necesario estimar el potencial de los recursos energéticos capaces de ser obtenidos en base a distintas fuentes de generación dentro de una zona para abastecer parte o la totalidad de la potencia y energía requerida. La generación proveniente de las unidades de GD considera diversos medios de generación tales como energía geotérmica, biomasa, eólica, hidráulica y solar, las cuales pueden ser parte de un sistema de micro-red. Para aprovechar los recursos disponibles, es necesario cuantificar su potencial, con el fin de estimar la factibilidad de ser utilizada como fuente de generación, lo cual requiere a su vez determinar las restricciones del territorio que se desea abastecer. Existen diversos procedimientos que permiten entregar una estimación acerca del potencial energético de un determinado recurso, teniendo en cuenta distintos niveles de enfoque y precisión. En el trabajo realizado por el Ministerio de Energía - GIZ (2014) se realiza una clasificación de distintas categorías de potencial entre los cuales se destaca el potencial teórico y técnico, los cuales consideran distintos niveles de análisis, relación con el territorio y factores externos. Además, las micro-redes al utilizar fuentes renovables tienden a utilizar tecnologías que tienen bajas emisiones de contaminantes, siendo más amigables con el medio ambiente (Banerji et al., 2012).

El presente trabajo tiene por objetivo estimar la demanda y el potencial de recursos energéticos presentes dentro de una comunidad rural con el fin de generar información base para el diseño de una micro-red.

1.1. Objetivo general

Estimar la demanda eléctrica y el potencial energético de los recursos renovables para el diseño de una micro-red en una comunidad rural.

1.2. Objetivos específicos

- Estimar la demanda eléctrica residencial en una comunidad rural, mediante la estimación de perfiles de demanda, al combinar mediciones de consumo eléctrico e información socio-demográfica de una comunidad.
- Estimar el potencial eólico y solar en una comunidad rural incorporando registros meteorológicos e información territorial.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Micro-redes

2.1.1. Introducción

En Chile se presentan un gran número de comunidades rurales que debido a sus características geográficas y/o económicas han sido excluidas de los tradicionales programas de electrificación, por lo que nuevas estrategias son desarrolladas apuntan a abastecer de energía eléctrica zonas que presentan tales dificultades. Por otro lado, debido a los problemas identificados en los sistemas convencionales de generación de energía tales como el agotamiento de recursos fósiles, pobre eficiencia energética y contaminación del medio ambiente, se ha impulsado una tendencia a la implementación de sistemas de generación local en niveles de distribución de baja tensión utilizando sistemas de pequeña escala, bajo uso de carbón, fuentes de energía no convencionales y/o recursos renovables, tales como gas natural, energía eólica, solar, hidráulica, entre otros, integrándolos a un sistema de distribución. Este tipo de sistemas se denomina generación distribuida. En base a esta definición nace el concepto de micro-red el cual incorpora sistemas de control, los cuales permitan aprovechar fuentes de generación menos contaminantes (Chowdhury et al., 2009; Ubilla et al., 2014).

Debido al desarrollo y crecimiento de la sociedad, el abastecimiento de energía se ha convertido en una necesidad básica ante este escenario. Por otro lado, el crecimiento de la disponibilidad de energía primaria y el envejecimiento de las actuales infraestructuras de redes de transmisión y distribución dificultan cada vez más la entrega de suministro seguro, confiable y de calidad. Por otro lado, el desarrollo de sistemas más eficientes, capaces de integrar las demandas sociales y necesidades locales depende principalmente de la incorporación de soluciones innovadoras y nuevas tecnologías. Dichas tecnologías deben demostrar confiabilidad, sustentabilidad y bajos costos. Las redes inteligentes (*smart grids*) por su parte hacen referencia a la evolución de las redes eléctricas, definiéndose como una red eléctrica capaz de integrar de forma inteligente el accionar de todos los usuarios conectados a ella, tanto generadores, consumidores con el fin de entregar un suministro de forma segura, económica y sustentable. Más específicamente, las redes inteligentes apuntan a:

- Facilitar una alta penetración de generación distribuida en base a fuentes de energía renovables, ya sea en sistemas aislados o conectados a la red.
- Desarrollar una gestión de demanda local, interactuando con los usuarios finales a través de sistemas de medición inteligentes. Estos sistemas permiten recolectar información más específica a una escala temporal alta, logrando realizar análisis y/o tomar decisiones en función a los datos de entrada.

- Beneficiarse de las tecnologías ya aplicadas en redes de transmisión, tales como técnicas de control dinámico, con el fin de ofrecer altos niveles de seguridad y confiabilidad.

En la Figura 1 se presenta un esquema típico de una micro-red, en donde se puede apreciar sus componentes básicas tales como los consumidores o cargas (edificios, comunidades, entidades comerciales, zonas industriales), en conjunto con sus medios de generación distribuida (sistemas fotovoltaicos, aerogeneradores, generadores diésel, baterías) y la conexión a la red de distribución local. A partir de la definición de una micro-red se establecen tres aspectos claves que un sistema de micro-red debe poseer como tal (Chowdhury et al., 2009; Parhizi et al., 2015).

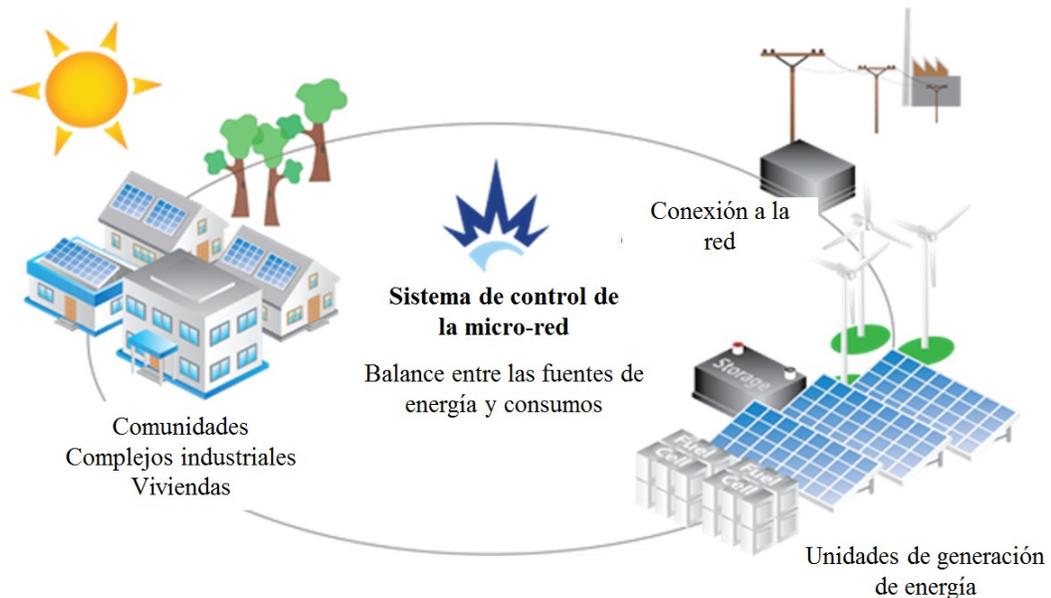


Figura 1. Esquema básico de una micro-red. Fuente: Microgrid Institute, 2015.

1. Una micro-red es una plataforma integrada por unidades de generación, unidades de almacenamiento y cargas controlables localizadas en una red de distribución para suplir una demanda local.
2. La micro-red debe ser capaz de operar de forma paralela a la red o en modo aislado. Una de las características más interesantes de este sistema es su capacidad de separarse y aislarse del sistema de distribución durante eventos adversos (fallas, *black-outs*, etc). También puede desconectarse de manera intencional durante las mantenciones de la red o en períodos de cortes programados.
3. La diferencia entre una micro-red y la inclusión de unidades de generación distribuida es que la micro-red se apoya en la gestión y coordinación de las fuentes disponibles. Una micro-red corresponde a más que un agregado de pequeños

generadores o una red de servicio, o un controlador de carga, o un regulador. Una micro-red como tal se compone del conjunto de estos elementos, que cumplen con múltiples objetivos económicos, técnicos, ambientales y sociales. Una de las mayores ventajas de una micro-red es su capacidad de manejar conflictos de interés de diferentes actores, apuntando a una operación óptima global para todos los usuarios involucrados (Fu, 2013; Hatziargyriou, 2014).

Sólo en determinados casos (según su factibilidad técnica y económica) es posible la conexión a la red de distribución principal, en el caso de que exista. Por otro lado, la estructura interna de una micro-red incluye la interfaz, sistema de control y protección para cada fuente de generación, control de tensión de la micro-red, control de flujo de potencia, y el sistema de distribución de las cargas. A continuación se describen las funciones principales que desarrolla una micro-red dentro de su etapa de operación:

- Control de las unidades de generación: Controla la potencia y tensión del sistema, en donde las unidades de generación deben proveer respuestas rápidas a las perturbaciones y variaciones de la carga.
- Administrar la energía: Proporciona control de las operaciones mediante el envío de señales hacia los controladores de cada unidad de generación, con el fin de que puedan operar en función del estado de las demás unidades y del comportamiento de la demanda.
- Protección del sistema: La micro-red debe asegurar el buen estado de las unidades de generación y de las cargas, mediante la implementación de sistemas de protecciones que se activen en caso de falla o alguna anomalía.

Los sistemas de generación distribuida integran unidades de generación que se conectan directamente a un sistema de distribución de baja tensión, como también en la red interna de una entidad (vivienda, edificio, etc.). El orden de potencia instalada de un generador distribuido es ampliamente discutido en la literatura, no definiéndose un valor como tal, sólo estableciéndose que corresponde a un rango menor al de los megawatts (Hatziargyriou, 2014). La Comisión Nacional de Energía en el 2009 (Palma et al., 2009) calificó como pequeños medios de generación distribuidos a unidades cuyos excedentes de potencia sean menores o iguales a 9000 (kW), conectados a instalaciones de alguna empresa concesionaria de distribución, o en instalaciones de un particular que cuente con líneas de distribución de energía eléctrica. Existen variadas unidades de generación que son capaces de abastecer a un sistema de micro-red. En el caso de las energías renovables, la mayoría se basa en fuentes intermitentes (radiación solar, velocidad de viento, olas, entre otras) por lo que en general es necesario disponer de sistemas de almacenamiento o generación de respaldo (flujos de agua, biomasa o generación diésel). Sin embargo, la combinación de diferentes fuentes de generación intermitente contribuye a mitigar la intermitencia del abastecimiento (Azurza et al., 2012). En el Cuadro 1 se presentan las tecnologías más utilizadas en la actualidad, distinguiéndose si proviene de una fuente renovable o no, si genera en corriente continua (DC) o corriente alterna (AC) y el nivel de emisiones.

Cuadro 1. Tecnologías de generación distribuida.

Tecnología	Fuente primaria	Renovable (Si/No) Continuo- Intermitente (C/I)	AC/DC	Emisiones [gCO ₂ eq kWh ⁻¹ ciclo medio de vida]
Combustión	Petróleo	No (C)	AC	780
	Gas	No (C)	AC	530
	Carbón	No (C)	AC	1000
	Biomasa	Si (C)	AC	70
Fotovoltaica	Sol	Si (I)	DC	56
Hidráulica	Energía mecánica: agua	Si (C)	AC	8
Eólica	Energía mecánica: viento	Si (I)	AC	14

Fuente: Azurza et al., 2012.

La incorporación de variadas unidades de generación distribuida en conjunto con unidades de almacenamiento de energía, requieren de una entidad capaz de gestionar la operación de toda la micro-red, de tal manera de lograr una operación adecuada y optimizada. Dependiendo las unidades de generación y el tipo de micro-red (conectada o desconectada a la red de distribución) se presentan diferentes topologías y tipos de control, siendo los más utilizados el control centralizado, control distribuido y control independiente o descentralizado. Las topologías se pueden definir como las configuraciones que puede tener una micro-red, al integrar diferentes unidades de generación. La entidad encargada de gestionar la micro-red es conocida como *energy management system* (EMS), la cual envía señales a las unidades de generación con el fin de que regulen sus niveles de potencia y tensión (Yang et al., 2011).

El hecho de operar con más de una fuente de energía, proporciona una complejidad al EMS, ya que cada unidad cuenta con diferentes capacidades de potencia y diferentes características. Cuando una micro-red está conectada a la red de distribución principal, ésta última provee consigo una fuente dominante de frecuencia, potencia y tensión, por lo que las demás unidades de generación sólo deben proporcionar energía, la cual se ajusta a los parámetros de la red. En cambio al operar una micro-red desconectada a la red (en modo isla), el EMS debe procurar obtener estos parámetros de la red a través de una de las unidades de generación, con el fin de que ésta entregue los valores de potencia, tensión y frecuencia del sistema. Otro punto importante a considerar, es que el EMS debe contemplar la velocidad de las respuestas proporcionadas por las unidades de generación ante las señales del EMS. Las unidades de generación distribuida renovable poseen intermitencia en su generación, debido a la naturalidad de la fuente renovable, lo que afecta de manera distinta el comportamiento del sistema. Más aún, se espera que este tipo de unidades pueda generar la mayor cantidad de energía dentro del sistema, debido a los altos costos de inversión involucrados (Hartono et al., 2013; Hatziargyriou, 2014).

Ventajas técnicas y económicas de una micro-red

A continuación se mencionan algunas ventajas en la implementación de este tipo de sistema en relación a la generación convencional. El desarrollo de micro-redes es muy prometedor para la industria de energía eléctrica debido a las siguientes ventajas:

1. Aspectos ambientales y sociales: Disminución del impacto ambiental asociado a la generación mediante fuentes renovables en relación a la generación convencional. Bajo este aspecto los beneficios se reflejan en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la aproximación física entre los consumidores y las unidades de generación puede contribuir a generar conciencia hacia un uso adecuado de la energía.
2. Aspectos de operación: La disminución de la distancia entre la generación y consumo ayuda a mejorar el soporte de potencia (suministro) del sistema completo, favoreciendo óptimos niveles de tensión.
3. Calidad de la energía: Mejora de la calidad y seguridad de la energía mediante la descentralización del suministro, y reduce el impacto de los cortes del sistema de distribución, disminuyendo las fallas.
4. Aspectos económicos: Las micro-redes pueden ser utilizadas para proveer servicios secundarios o complementarios, tales como la regulación de la tensión, potencia de reserva para arranque. Además, la amplia aplicación de unidades modulares *plug-and-play* pueden contribuir a la reducción en el precio de la energía, ya que permiten conectarse y desconectarse de fácil manera (Chowdhury et al., 2009; Hartono et al., 2013).

En la actualidad a pesar de las ventajas previamente mencionadas, las micro-redes se ven enfrentadas a algunas dificultades asociadas, tales como el alto costo de inversión debido a la tecnología que es necesaria implementar, inconvenientes técnicos con el sistema de distribución actual, debido a la falta de protecciones necesarias para soportar el flujo de energía dentro de una micro-red. Por otra parte también se destaca la falta de estándares y normativas relacionadas a este tipo de instalaciones. Cada uno de estos puntos, es importante considerarlo al momento de implementar este tipo de proyectos.

Micro-redes conectadas a la red de distribución

Una micro-red conectada puede operar en condiciones normales estando conectada a una red de corriente alterna (AC), proporcionando el exceso de energía que no sea utilizada por las cargas de la micro-red. Esto es posible gracias a estructuras de configuración flexibles y convenientes modos de operación (control) que permiten mejorar la seguridad y calidad del suministro, promoviendo la inclusión de sistemas de energías renovables y aplicaciones de generación distribuida (Zhichun et., 2011). La implementación de micro-redes conectadas en paralelo con la red proporciona efectos sobre la tensión, el flujo de la línea, corriente, calidad de la energía, sistemas de protección y seguridad del sistema en el punto de acople entre la micro-red y la red principal (PCC). En dichos casos, la energía proporcionada por las unidades de generación deben cubrir la demanda total de la micro-red, de lo contrario se deben desconectar algunas cargas de tal modo de que se conserve el equilibrio entre la

generación y la demanda. En este punto, resultan claves las estrategias de control de potencia, ya que ante la desconexión de la red principal, la micro-red debe minimizar los impactos derivados de la dinámica de los parámetros de la red. El objetivo de este control es evitar que el sistema en su conjunto sea dañino para las unidades y los usuarios, logrando una óptima operación cuando está conectada, como también en modo isla (Roman-Barri et al., 2010).

Al operar de esta manera, las unidades de generación distribuida deben ser equipadas con mecanismos de prevención y detección de aislamiento para realizar la desconexión de las unidades por unos segundos antes de que suceda el evento de desconexión. Son variadas las técnicas utilizadas para detectar la condición de aislamiento, las cuales utilizan mediciones de potencia del sistema local, permitiendo distinguir también condiciones de aislamiento con respecto a otro tipo de perturbaciones (Roman-Barri et al., 2010). Son variados, los trabajos que han abarcado este tema, al analizar los distintos escenarios que pueden ocurrir en proyectos conectados a la red.

2.1.2. Planificación de micro-redes

Actualmente, en base al creciente desarrollo de micro-redes e implementación de proyectos de generación distribuida, se ha vuelto cada vez más necesario el análisis en profundidad de este tipo de proyectos. La capacidad de generación de las unidades de generación, el estudio de la demanda, las políticas ambientales, las condiciones sociales-culturales, costos de inversión y operación, entre otras, son algunos de los principales factores a tener en cuenta en la etapa de planificación (Azurza et al., 2012).

En estos proyectos, resulta de gran relevancia, el estudio de la cuantificación de los recursos renovables que se puedan extraer en un determinado territorio. Como se menciona anteriormente, existen diversas fuentes de generación, las cuales dependen tanto de las condiciones locales, impacto al medio ambiente y el costo asociado a la tecnología economía de escala. Según Su et al. (2010) la cantidad extraíble de potencia en base a energía eólica es considerablemente más que la potencia utilizada por las demás fuentes renovables.

Una vez seleccionadas las cargas a alimentar (villa, comunidad, complejo industrial etc.), debe realizarse el análisis de la demanda eléctrica, estimando los niveles de potencia peak y la cantidad de energía necesaria dentro de un año. La demanda eléctrica es un factor que condiciona el dimensionamiento de las unidades de generación, por lo que es necesario un estudio exhaustivo de esta variable. Además, la micro-red diseñada tiene que prever el crecimiento potencial de la demanda y el comportamiento de ésta a lo largo del tiempo de operación del sistema. Por otro lado las unidades de generación provocan perturbaciones en el sistema. A pesar de traer consigo un gran número de beneficios, la implementación de unidades de generación distribuidas en general, poseen una baja competitividad frente a unidades convencionales, lo que hace difícil la integración de este tipo de fuentes al mercado. Es por esto, que para cada situación en particular es necesario analizar las

potencialidades de las distintas formas de generación, comparando escenarios de abastecimiento convencional (en general mediante unidades diésel o la red de distribución) (Su et al., 2010).

Posteriormente a la determinación de la demanda eléctrica y recursos disponibles, se debe desarrollar una estrategia de almacenamiento y control de energía. A pesar de las ventajas de las unidades de generación distribuida, se requieren complejos algoritmos de optimización de control para un idóneo funcionamiento del sistema. En este punto, el desarrollo de un gran número de investigaciones relacionadas a métodos de optimización ha ayudado a resolver los problemas derivados de los sistemas de energías renovables, principalmente relacionados con fuentes eólicas y solares (Azurza et al., 2012).

Se debe mencionar que desde el punto de vista económico, entre las desventajas que posee la integración de fuentes de ER, son usualmente los costos asociados a su instalación. Sin embargo, cabe señalar que la permanente evolución de la tecnología, y el costo de los combustibles fósiles va en paulatino aumento, el análisis económico debe ser hecho considerando el ciclo de vida completo del sistema. Cada tecnología presenta diferentes costos por kWh generado. Por otro lado, es necesario incorporar los impactos ambientales que se puedan generar a través de las distintas tecnologías, como también los impactos sociales. Entre los impactos sociales se menciona: mantenimiento de los trabajos locales, la generación de empleo local, efecto en el bienestar de la comunidad, entre otros (Azurza et al., 2012).

A continuación en la sección 2.2 y 2.3 se presentan las características más relevantes asociadas a la determinación de demanda eléctrica y potencial de energías renovables. Se describen sus definiciones, el estado del arte, metodologías y casos de estudio asociados.

2.2. Demanda eléctrica

En base al comportamiento de la demanda y su proyección en el tiempo es posible realizar el dimensionamiento de un sistema de distribución o de las unidades de generación necesarias para su abastecimiento. Es necesario conocer con la mayor precisión la demanda para las etapas de operación y planificación, gestión de la demanda y servicios de pago entre otras utilidades.

Se requiere conocer cómo un cliente o un grupo de clientes utilizan la energía eléctrica en diferentes horas durante el día, en diferentes días de la semana y temporadas del año, si utilizan cargas compartidas por otros clientes y cómo son las cargas agregadas de varios clientes en diferentes localizaciones dentro de la red de distribución. La demanda es necesaria para definir los requerimientos de la red, la planificación de nueva generación o los requerimientos de compra de energía en base a las variaciones de demanda de los clientes. Por esta razón, existe una continua necesidad de mejorar el conocimiento de la demanda en sistemas de potencia mediante la recolección y análisis de mayor información.

Por lo tanto, se han desarrollado mejores modelos y nuevas aplicaciones utilizando la mayor cantidad de información disponible (Seppala, 1996; Hatziargyriou, 2014).

La influencia de la demanda en el sistema de distribución causa pérdidas de potencia y caídas de tensión. En la Figura 2 se presentan perfiles del comportamiento de la demanda de distintos tipos de clientes. Se puede apreciar como cada cliente posee una curva característica y como cada uno presenta distintas magnitudes en relación a los demás.

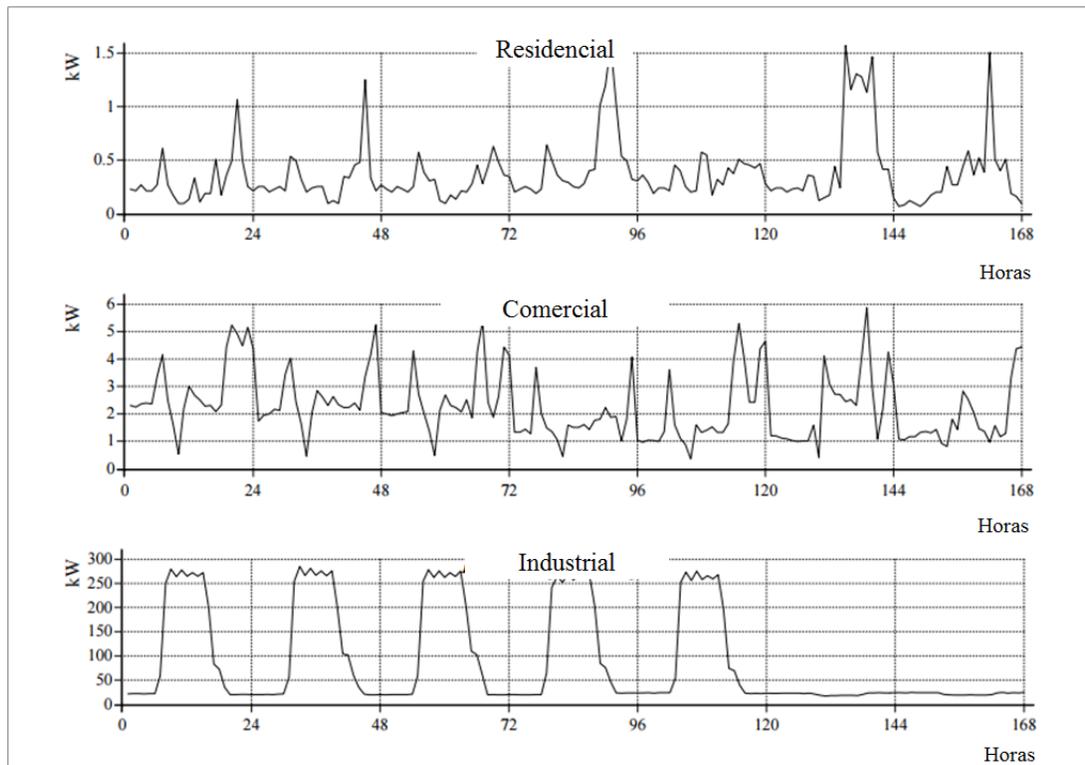


Figura 2. Ejemplo de perfiles de demanda de tres consumidores. De arriba hacia abajo se presenta una curva de un cliente residencial, comercial e industrial respectivamente. Fuente: Seppala, 1996.

En general, al existir una gran falencia en la disponibilidad de mediciones directas de demanda, es necesario estimar y generar pronósticos utilizando otro tipo de información disponible. El modelamiento de la demanda y su predicción es basado en el conocimiento de varios factores que influyen la demanda de los consumidores. Entre estos factores se mencionan:

- Consumidores: Tipo de consumos, tipo de calefacción, tamaño de infraestructura, uso de electrodomésticos, número de empleadores, etc. Aunque los equipos eléctricos e instalaciones varían de un consumidor a otro, es posible reconocer tipos de consumidores que poseen similares propiedades (residencial, calefacción eléctrica, agricultura, pequeña industria, transporte, etc.).
- Tiempo: Hora del día, día de la semana, días festivos, temporadas del año. Este factor está ampliamente ligado al comportamiento humano y actividades

económicas. Debido al comportamiento cíclico de estas actividades (por ejemplo día de trabajo, día no trabajado) se suele guiar el análisis de la demanda para un día base, día de la semana y a lo largo del año.

- Clima: Temperatura, humedad, radiación solar, etc. La temperatura ambiente es una de las principales características que influencia la demanda de los consumidores, debido al uso de equipos de calefacción. Dependiendo de las condiciones locales, la variación de la temperatura puede ser muy brusca (variaciones entre 15 a 20 °C) en unos meses, como también muy leve. También, por ejemplo la variación en la radiación solar condiciona también el uso de equipos de iluminación durante distintas temporadas del año.
- Otras cargas eléctricas asociadas a la demanda principal. Bajo este punto se menciona que el uso de algunas cargas pueden influenciar el encendido de otras. Por ejemplo, al estar dentro de una habitación, una persona que desea ver televisión, además de tener este equipo encendido, el individuo enciende algunas iluminarias de la habitación y el aire acondicionado.
- Valores históricos de carga y patrones de demanda. Son varios los patrones que se pueden detectar en el comportamiento de un determinado consumo. Al disponer de conocimiento de los valores de demanda previa (días u horas anteriores), se vuelve menos complicado predecir la demanda con una buena precisión. Dicha característica ha sido ampliamente utilizada en estudios de predicción, sin embargo en la mayoría de los casos es difícil contar con este tipo de información de un consumidor o grupo de consumidores (Seppala, 1996).

Cada uno de estos factores afecta en diferente medida al comportamiento de la demanda. Es por esta razón que se hace necesario el desarrollo de distintos modelos y técnicas que permitan estimar la demanda eléctrica para distintos casos. En general para el análisis de la demanda se recurre a generar perfiles de demanda (también conocidos como curvas de carga). Estos perfiles, básicamente contienen registro de potencia consumida, usualmente descritas mediante unidades de watts o kilowatts en un momento determinado. Cabe mencionar que la potencia eléctrica corresponde a la energía (consumida o generada) por unidad de tiempo, o sea básicamente la cantidad de energía que se consume en un instante determinado. En la Figura 3³ se presenta un perfil de demanda perteneciente a una vivienda dentro de un día promedio.

³ El gráfico es generado mediante los valores proporcionados por un medidor inteligente aplicado a una vivienda de la comunidad Huanaco Huenchun, Comuna de Nueva Imperial, Región de La Araucanía.

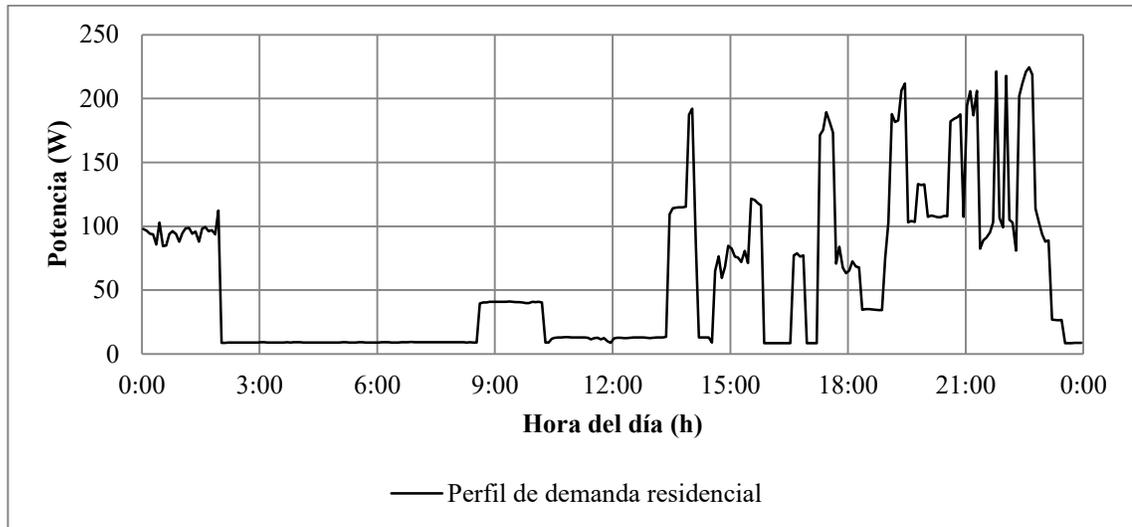


Figura 3. Ejemplo de un perfil de demanda residencial. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Existen tres principales tipos de clientes: industrial, comercial y residencial. A pesar de que los tres poseen grandes incidencias en la demanda de un grupo de consumidores, en comunidades rurales los clientes residenciales son los que poseen una mayor relevancia en la demanda total. A continuación se presenta en detalle lo que corresponde a la demanda residencial que es el tipo de consumidor que se abarcará en este estudio.

2.2.1. Demanda residencial

La demanda residencial, a pesar de presentar bajos niveles de demanda, en zonas rurales corresponde a la mayor demanda de la red. Por otro lado, en zonas urbanas al existir una gran cantidad de consumidores, su efecto en la demanda general resulta ser considerable. El dimensionamiento de la demanda ha tomado un papel relevante, principalmente en el diseño de sistemas de distribución de bajo voltaje (≤ 240 volts). Precisamente en el diseño de micro-redes, en las cuales se incorpora generación distribuida, y diversos consumidores (entre ellas clientes activos, los cuales además de consumir energía, pueden operar como generadores), los perfiles de demanda individual pueden generar cambios significativos. Además, las variaciones en el tiempo, o estacionales pueden generar implicancias en los sistemas de distribución, su planificación y operación (Kadurek et al., 2013).

El comportamiento de la demanda residencial posee es muy particular, siendo afectado fuertemente por aspectos socio-culturales, actividades económicas y en ciertos casos, influenciado notoriamente por los efectos de la estacionalidad, como también la variación en el precio de la energía. Asimismo, depende ampliamente de aspectos específicos relativos al comportamiento de los consumidores, su estilo de vida, como también de la amplia diversidad en el uso de electrodomésticos durante el día. La aleatoriedad de los

patrones de demanda depende altamente de la presencia en el hogar de los miembros de la familia, el tiempo de uso de algunos electrodomésticos de alto consumo en períodos cortos durante el día (Cagni et al., 2004). El uso de equipos eléctricos, iluminación, calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) en una infraestructura (casa, departamento) varía considerablemente con respecto al tiempo, relacionándose principalmente con las actividades que desempeñan los residentes de cada infraestructura. Richardson et al. (2008) destaca que en el sector doméstico, la demanda no sólo depende del número de integrantes de una propiedad, sino también de si los residentes están en la propiedad y si están activos (despiertos); también destaca estudios que relacionan perfiles de demanda (electricidad) al tamaño de la vivienda y los patrones de ocupación, definiéndose como ocupante activo a una persona que está en la vivienda y que no está durmiendo. Por otro lado, también indica la relevancia de contar con registros de equipos eléctricos, iluminación y sistemas de calefacción. En una vivienda típica la base de la demanda es dada por equipos básicos tales como refrigeradores, congeladores, como también microondas y hervidores de agua (Bucher and Andersson, 2012).

Sumado a lo anterior, existen amplias diferencias entre residentes urbanos y rurales. En el estudio de Cagni (2004) se menciona la necesidad de desarrollar estudios específicos para la población de consumidores residenciales que viven en área extra-urbanas, ya que tienden a presentar variaciones propias en sus patrones de demanda. En Yamaguchi et al. (2011) se señala la alta variabilidad presente en el consumo, ya que cada vivienda presenta un grupo de personas con comportamientos particulares. También existen eventos de por medio que tienen efectos directos en la demanda así como la realización de festividades, ceremonias religiosas e incluso períodos de vacaciones.

En base a lo planteado, se ha generado la necesidad de elaborar modelos e instrumentos de medición, que permitan obtener una aproximación al comportamiento de la demanda y su proyección en el tiempo.

2.2.2. Estimación demanda residencial

Los modelos de generación de demanda residencial comenzaron a ser empleados hace más de 30 años atrás. En Piller (1980) se presentó un detallado análisis y síntesis de perfiles de demanda residencial. La motivación de realizar este tipo de trabajos se basa en disponer de una mejor comprensión de los efectos coincidentes sobre cargas domésticas. Dentro de la literatura, existen variadas metodologías y herramientas que son utilizadas para generar estimaciones de demanda a nivel residencial, principalmente para zonas urbanas, siendo la principalmente vinculado al crecimiento poblacional de un sector determinado. De esta manera, a partir de datos censales e históricos se pueden obtener tasas de crecimiento de demanda por un tiempo definido (en general 1 año), relacionando la cantidad de habitantes a la información histórica de demanda mensual, dato en general proporcionado por las empresas distribuidoras de electricidad. Entre las metodologías elaboradas se destaca el enfoque *top-down*, el que es uno de los más utilizados en la literatura, en base al cual se permite generar patrones de demanda similares a partir de información general de un grupo

de consumidores (información agregada). La desventaja en cuanto a este enfoque radica en la dificultad de generar perfiles de demanda individuales (por vivienda) y sus variaciones particulares (Bucher y Andersson, 2012).

Un mecanismo para lograr estimar de manera más precisa la demanda eléctrica residencial, es posible construir perfiles de demanda con enfoques *bottom-up* en los cuales se evalúa la cantidad de electrodomésticos y su tiempo de uso (por ejemplo, a través de encuestas), consiguiendo construir perfiles de demanda de cada vivienda. Este enfoque requiere una gran demanda de datos y un buen conocimiento del comportamiento de los consumidores. A su vez, depende en gran manera de la confianza de los participantes y la precisión de sus declaraciones. Dicha información, usualmente sólo está disponible a gran escala y no para subconjuntos específicos de consumidores, lo que dificulta la aplicación de este tipo de metodologías (Cagni et al., 2004; Verdu et al., 2006; Llanos et al., 2012).

A continuación se presentan algunos casos de estudio en detalle en los cuales se aplican diversas metodologías para la estimación de la demanda, particularmente en lo que respecta a la estimación de perfiles de demanda.

2.2.3. Casos de estudio. Estimación de demanda residencial.

En el estudio de Cagni et al. (2004) se realiza un enfoque *bottom-up* basado en datos sociales y demográficos de los consumidores, el cual ha resultado ser muy efectivo para la síntesis de perfiles de demanda agregados (grupos de consumidores). Este trabajo ilustra los resultados de un enfoque para evaluar los perfiles de demanda de un conjunto de clientes individuales que residen en áreas rurales. Parte de este estudio nace a raíz de que datos demográficos disponibles a nivel nacional no pueden representar satisfactoriamente el comportamiento de un conjunto determinado de clientes, especialmente de clientes residenciales que viven en sectores extra-urbanos. La primera fase del trabajo consiste en una investigación directa hecha a los consumidores sobre el uso de la electricidad, en sectores extra-urbanos. Los resultados son asociados a la presencia de miembros de la familia en la vivienda y los períodos de uso de los electrodomésticos.

Por otra parte se menciona el estudio de Sanchez et al. (2009), el cual tiene por objetivo la gestión de demanda de los usuarios finales, para suavizar los episodios de punta de demanda. Uno de los objetivos dentro de este proyecto fue la clasificación de usuarios acorde a patrones identificados en sus perfiles de demanda diarios. Para esto se utilizó una técnica de clasificación no supervisada para clasificar perfiles de carga de usuarios residenciales. En este trabajo, la red neuronal permite el reconocimiento de patrones relacionados a la demanda, utilizando para su entrenamiento, datos de perfiles de consumo de energía diaria de un muestreo de clientes monitoreados de la red operadora española Iberdrola, a lo largo del año 2008. Como resultado de la clasificación se obtienen las características que condicionan los perfiles de demanda de viviendas residenciales. Entre estos parámetros, se distingue por ejemplo la variación acorde a la estacionalidad y el tipo de día (trabajado y no trabajado), la ubicación geográfica de los clientes, las características

internas de los usuarios. Además se identificaron otras variables puntuales de las viviendas, tales como el tipo de vivienda, número de residentes, electrodomésticos y hábitos de consumo.

En Irlanda, académicos del Instituto de Tecnología de Dublin (DIT) desarrollaron un método de clasificación de perfiles de demanda a partir del uso de un clasificador no supervisado. En este caso, se utilizó un algoritmo de red neuronal llamado SOM (*Self organizing maps*) debido a que permite agrupar una gran cantidad de datos en distintas clases, identificando a su vez características relevantes asociadas a cada clase. En este trabajo se identificaron características de las viviendas y de sus ocupantes, los cuales corresponden a factores significativos en la determinación de las distintas clases. Se utilizaron datos de consumo de electricidad agrupándolos en clases que representaban ciertas variables socio-económicas, distinguiéndose en total nueve clases. En su etapa de análisis, se realizaron relaciones entre los perfiles de demanda promedios de cada clase y las características de las viviendas, evidenciándose que es posible generar perfiles de demanda aproximados mediante las características propias de cada vivienda (número de integrantes de una vivienda, clase social, rango etario, entre otras variables) (McLoughlin et al., 2012).

Llanos et al. (2012) propone una metodología para generar perfiles de demanda residenciales en comunidades aisladas, las cuales presentan abastecimiento parcial o nulo de energía eléctrica. La principal característica de esta metodología es la capacidad de generar perfiles de demanda considerando sólo la información socio-económica obtenida mediante encuestas dirigidas a la comunidad, sin considerar registros de mediciones reales de demanda. Para esto, se realizaron encuestas en una comunidad rural ubicada al interior del desierto de Atacama, en el norte de Chile. A través de estas encuestas se consultaron aspectos de cada vivienda, tales como composición familiar, rango etario y actividades productivas de los miembros del hogar, ingresos económicos y nivel educacional. Por otra parte también se analizó la cantidad de electrodomésticos presentes en las viviendas. En base a esta información se utilizó SOM para clasificar a las viviendas en base a la similitud de las características internas de los datos. En la Figura 4 se presenta la metodología descrita. A través del clasificador SOM se obtiene un número de clases determinado, las características de cada clase, tipo de grupos familiares, y un número de elementos (viviendas) que corresponden a cada una de las clases.

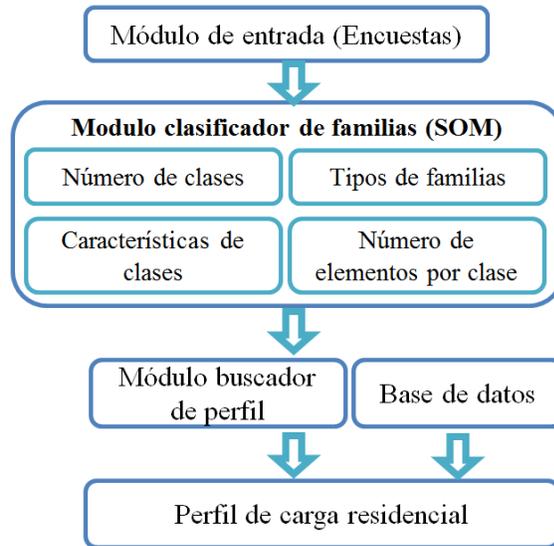


Figura 4. Metodología para la generación de perfiles de demanda basados en SOM. Fuente: Llanos et al., 2012.

Posteriormente realizada la clasificación, a cada una de las clases se le asocia un determinado perfil de demanda obtenido de otros consumidores de características similares que posean abastecimiento de energía las 24 horas del día. Para esto, un sistema de medidores inteligentes debe ser implementado en algunas de las viviendas de la comunidad abastecida para obtener perfiles de referencia. Una vez que se posean tales perfiles de referencia, estos son asociados a las viviendas de cada una de las clases señaladas. En este trabajo se identifican por cada clase distintas composiciones familiares, tales como: pareja de mayores de edad, individuo mayor de edad, individuo adulto, pareja de adultos, pareja de adultos con niños, pareja de adultos con más de tres niños, etc. Una vez hecha esta asignación y ya teniendo un perfil de demanda por cada vivienda, se permite estimar el perfil agregado de toda la comunidad.

Finalmente en el trabajo de Richardson et al. (2010) a través de un modelo de ocupación se relaciona el comportamiento de los residentes de una vivienda al uso de determinados equipos eléctricos. Para esto se utilizó un modelo de ocupación generado a partir de una encuesta que recopila información de cómo las personas utilizan su tiempo durante el día a una resolución de 10 minutos. A partir de esta encuesta primeramente se identificó en que momentos las personas son ocupantes activos, o sea, cuando están en la vivienda y son potenciales consumidores de energía (no durmiendo). Posteriormente en base a esta misma información se determinaron distintas actividades tales como lavar, cocinar, ver televisión, entre otras. A su vez, el modelo mediante un enfoque probabilístico determina el uso de determinados equipos asociados por actividad, con lo cual se generan los perfiles de demanda diarios para una vivienda. En la Figura 5 se presenta el esquema general del modelo utilizado.

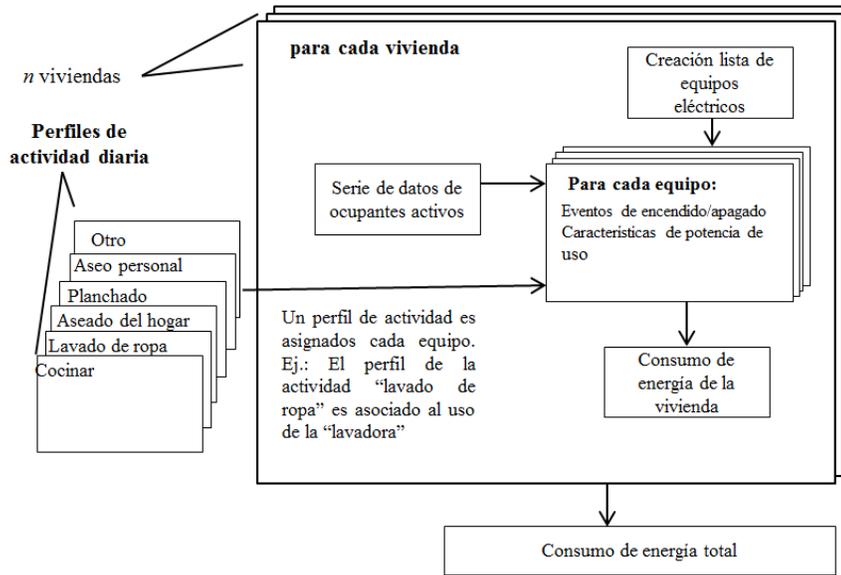


Figura 5. Arquitectura del modelo de demanda eléctrica. Fuente: Richardson et al., 2010.

Los casos de estudio mencionados, dan cuenta de la diversidad de metodologías y herramientas que se han desarrollado para estimar con precisión el comportamiento de la demanda para distintos contextos (clientes residenciales, zonas urbanas, zonas rurales, etc.). Cada una posee sus ventajas y desventajas, las cuales están asociadas a la precisión con la que se obtienen los resultados, la cantidad de información base necesaria, el trabajo requerido para obtener información complementaria (por ejemplo, la instalación de medidores inteligentes), entre otros factores.

En la siguiente sección se presenta una reseña de la cuantificación del potencial energético en términos generales, y seguido a esto, una descripción más detallada de las principales fuentes de generación renovables, tales como la energía eólica y solar, y su respectivo avance tecnológico, en el contexto de las micro-redes.

2.3. Potencial energético

La cuantificación y análisis de los distintos recursos energéticos renovables es otro de los aspectos fundamentales a considerar en el diseño y planificación de proyectos de energización, en los cuales se considere la implementación de fuentes renovables para generación. El desarrollo de las ERNC en el mercado ha repercutido en un mayor avance en cuanto al desarrollo de campañas de prospección, estudios y el perfeccionamiento de herramientas de modelación, las cuales permiten evaluar el comportamiento de los recursos energéticos renovables en diferentes partes del mundo.

A pesar del desarrollo tecnológico de las energías renovables, éstas aún presentan inconvenientes y dificultades en su implementación de forma masiva al mercado actual. En años anteriores las principales dificultades se han visto asociadas a los altos costos de

implementación en comparación a los sistemas convencionales, pero en la actualidad está diferencia ha disminuido y en determinados casos las ERNC han llegado a generar precios competitivos. En la Figura 6 se presenta de manera general los niveles de costos asociados a cada unidad de generación renovable para distintos niveles de generación actualizados al año 2015 (IRENA, 2015).

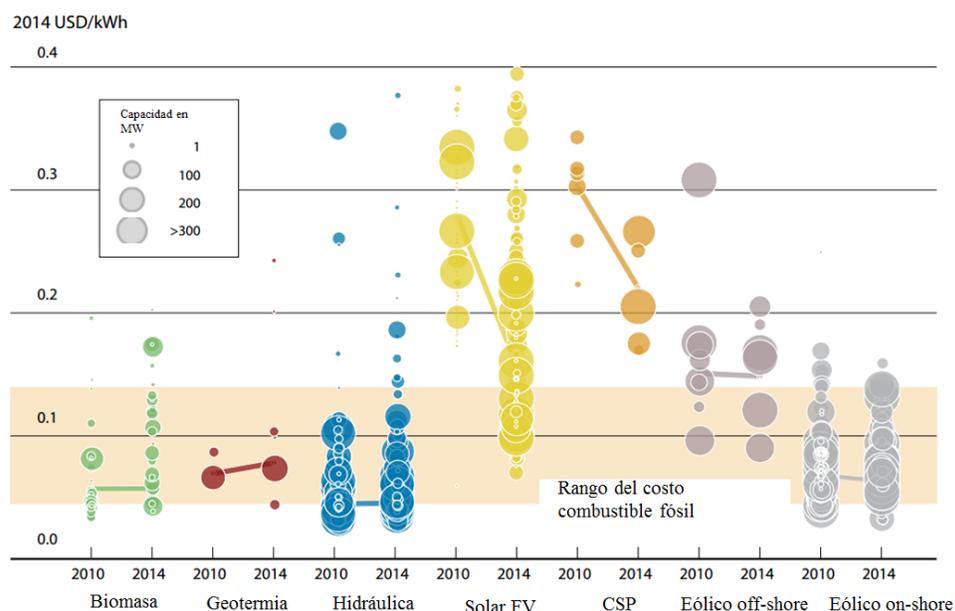


Figura 6. Costos de la energía eléctrica asociados a tecnologías renovables a diferentes escalas de generación (2010 – 2014). Fuente: IRENA, 2015.

Las fuentes de generación tales como biomasa, hidráulica, geotérmica y eólica on-shore ahora pueden proveer energía a un costo competitivo en relación a la generación mediante combustibles fósiles (franja anaranjada). La energía solar fotovoltaica por su lado ha demostrado una gran disminución en sus costos de implementación, llegando a casi la mitad de su costo en relación al año 2010. Las restantes tecnologías siguen manteniendo cierto margen de competencia en relación a sus costos de implementación. Cabe mencionar que el aspecto económico a pesar de ser uno de los factores de mayor relevancia al momento de decidir su implementación, no es el único que condiciona el desarrollo de este tipo de tecnologías. El incremento de la conciencia ambiental en los últimos años acerca del calentamiento global y los efectos nocivos de las emisiones de dióxido de carbono ha originado una demanda por generar energía con fuentes renovables (IRENA, 2015). Entre las fuentes de energías renovables, la energía solar y eólica ha experimentado un rápido crecimiento en los últimos 10 años. Además de generar una baja emisión de gases de efecto invernadero, ambas pueden producir energía cerca de los centros de consumo, evitando la necesidad de disponer de líneas de alta tensión a través de zonas urbanas y rurales. Hoy en día, en una gran cantidad de países a lo largo del mundo se han implementado proyectos solares (fotovoltaico principalmente) y eólicos a un ritmo acelerado, constituyéndose en una parte importante de la matriz energética (Patel 2006).

En general, a nivel de micro-redes las principales fuentes de abastecimiento renovable corresponden a energía solar y eólica, principalmente debido a que ambas poseen un amplio desarrollo tecnológico, son en general de fácil implementación, amigables con el medio ambiente y seguras. A continuación se presenta una descripción de estos dos principales recursos, incluyendo su comportamiento, la capacidad de ser aprovechada y su desarrollo actual. Además, cabe mencionar que el mismo desarrollo de estas tecnologías, ha llevado consigo al diseño e implementación de sistemas de control capaces de integrarlas de forma eficiente bajo diferentes condiciones climáticas, considerando su comportamiento intermitente (Shen y Izadian, 2014).

2.3.1. Energía solar y eólica en el abastecimiento de micro-redes

En este apartado, se describe el desarrollo de las unidades de generación eólica y solar en el contexto de micro-redes, su implementación y principales modos de operación. Se señalan proyectos implementados alrededor del mundo y algunos ya ejecutados en el país. Las unidades de generación distribuida comprenden un conjunto de tecnologías, las que deben estar sujetas a un sistema de control y operación coordinada con las cargas determinadas y sistemas de respaldo. En la actualidad, gran parte de los proyectos de micro-redes en el mundo, han integrado sistemas híbridos en base a unidades eólicas y fotovoltaicas en conjunto con generación diésel como respaldo. Se ha utilizado ampliamente esta configuración debido al avance tecnológico y bajos costos asociados a la generación de ambas tecnologías. Tal como señala Azurza et al. (2012), la combinación de varias fuentes de generación contribuyen a mitigar la intermitencia en el abastecimiento, ayudando a reducir la necesidad de almacenamiento de energía. Además, Se suelen utilizar unidades eólica y solar debido a que existe una mayor disponibilidad de datos del recurso en relación a las demás fuentes de generación renovable, su tecnología permite diseñar soluciones modulares y escalables, y al corresponder a un sistema híbrido se tiende a disminuir los requerimientos de almacenamiento de energía (Kumar et al., 2009; Su et al., 2010).

En base a la literatura especializada, a pesar de no ser existir un estándar en la potencia nominal de los aerogeneradores utilizados en diferentes proyectos de micro-redes, usualmente se implementan turbinas eólicas con potencias menores a 100 kW, debido a que en general se requiere alimentar un grupo menor de consumidores. En Buhler (2010) se describen varios proyectos de micro-red implementados en Europa entre los cuales se menciona una instalación en la isla de Citnos (Grecia) en donde se instaló un sistema fotovoltaico de 10 kW, un banco de baterías de 53 kWh y un generador diésel de 5 kVA. Tal sistema fue dimensionado para el abastecimiento eléctrico de doce viviendas de la isla. Otro caso que se describe, es el proyecto Aomori ubicado en Hachinohe (Japón) en el cual se instalaron 150 kW de unidades fotovoltaicas que en conjunto con motores a gas (510 kW) y un banco de baterías de 100 kW abastecen una demanda total de 610 kW.

Finalmente, se destacan algunos de los trabajos desarrollados en Chile, tales como el proyecto ESUSCON (2010), micro-red llevada a cabo por el Centro de Energía de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y otros proyectos de

micro-redes implementados por Wireless Energy para el abastecimiento de sectores aislados en diferentes sectores del país, tales como al interior del desierto de Atacama, como también en islas del Archipiélago de Chiloé. El proyecto ESUSCON por su parte corresponde a una micro-red implementada en la localidad de Huatacondo (Región de Tarapacá), la cual consiste en un sistema híbrido, abastecido por una planta fotovoltaica de 22 kW, dos aerogeneradores que en conjunto proporcionan 3 kW, un grupo diésel de 120 kVA y un sistema de almacenamiento de energía de 30 kVA. Dicha micro-red fue implementada para el abastecimiento del pueblo con el objetivo de proporcionar abastecimiento eléctrico las 24 horas del día (Palma-Behnke et al., 2013). Por otro lado, la Wireless ha implementado una serie de micro-redes a lo largo del país. En 1998 participó en la instalación de una micro-red en la isla Tac (Chiloé), la cual consta dos turbinas de 7,5 kW, un generador diésel de 20 kVA y un banco de baterías de 110 kWh, otorgando abastecimiento a 70 viviendas, escuelas y centros de salud. Mediante ésta micro-red el 50% de la demanda se logró alimentar en base a generación eólica (Figura 7). También se presenta la micro-red llevada a cabo por la misma empresa Wireless a la zona Desertores que corresponde a un conjunto de islas patagónicas en el sur del país. El equipamiento consistió en turbinas de 7,5 kW, un generador diésel de 25 kW y un banco de baterías de 220 kWh, los cuales entregaron energía a 210 familias, escuelas y centros de salud del lugar. Éste sistema consideraba un 70% de generación eólica y un 30% diésel. Se destaca que en estos últimos proyectos se requirió la construcción del sistema de distribución, el cual consideró estaciones de sub-transmisión, líneas de media y baja tensión y transformadores. Además se consideraron los aspectos operacionales, en los cuales se establecieron las normas y regulaciones de la red y el pago con los clientes (Nelson et al., 2002).



Figura 7. Sistema híbrido implementado en isla Tac, Chiloé. Fuente: Nelson et al. 2002.

Estos son algunos de los proyectos más emblemáticos que se han llevado a cabo en Chile y en otras partes del mundo. Según Parhizi et al. (2015) al año 2012 existía una capacidad instalada de 1,1 GW en proyectos de micro-redes en el mundo y se estima que al 2017 habrá una capacidad instalada de 4,7 GW.

A continuación, se presenta un contexto de los estudios de potencial y cuantificación del recurso, aspecto relevante a considerar para el desarrollo de proyectos de micro-redes.

2.3.2. Estimación del potencial energético

Son innumerables los estudios que se han realizado a la actualidad sobre estimación de potencial, utilizando diferentes tipos de metodologías, objetivos y supuestos, unidades, etc. Es por esto, que en ocasiones se suele generar incongruencias y confusiones entre un autor u otro. En el trabajo llevado a cabo en conjunto por el Ministerio de Energía y el Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH se destaca este hecho, entregándole énfasis a que en general la mayor diferencia radica en que no siempre se analiza el mismo tipo de potencial. El National Renewable Energy Laboratory (NREL) por su parte propone distintas definiciones de potencial, tales como el potencial disponible, técnico, económico y de mercado. Cada uno de estos tipos analiza la generación de energía alcanzable considerando la tecnología, topografía, limitaciones y restricciones ambientales y de uso de suelo, entre otros parámetros. (NREL, 2012). En la Figura 8 se presenta un desglose de los aspectos que engloban los distintos tipos de potencial.



Figura 8. Tipos de potencial de energías renovables. Fuente: NREL, 2012.

El primero de ellos, el recurso, contempla la evaluación de la disponibilidad total de energía de una fuente renovable mediante aproximaciones teóricas, no incorporando la viabilidad

técnica. El nivel técnico por su parte considera la disponibilidad del recurso, incorporando el desarrollo tecnológico de cada fuente de generación y las restricciones territoriales y/o legales vinculadas con el uso de suelo. De esta manera, se obtiene un potencial más realista, considerando las limitaciones locales. Por otra parte, se menciona el potencial económico el cual considera la competitividad de las energías renovables en relación a otras fuentes de abastecimiento (por ejemplo diésel), analizando principalmente sus costos de inversión y operación, la disponibilidad de infraestructura y la evolución de los precios de la energía y su proyección en el tiempo. Finalmente, el potencial de mercado incorpora el estado actual del mercado, grado de disposición de inversionista y financistas, su marco regulatorio y políticas de desarrollo en cuanto a las energías renovables. Cada uno de estos tipos de potencial es dinámico en el tiempo, ya que existe una gran cantidad de factores que generan alteraciones (Ministerio de Energía –GIZ, 2014).

El trabajo desarrollado por el Ministerio de Energía –GIZ (2014) realiza un análisis similar aplicado a las zonas cubiertas al 2012 por los sistemas interconectados del Norte Grande (SING) y Central (SIC), abarcando el territorial nacional desde la frontera norte con Perú hasta la Isla Grande de Chiloé. El objetivo de este estudio se centró en evaluar proyectos de energías renovables (eólico, solar e hidráulico) que fueran a incorporarse al mercado eléctrico nacional, por lo que se evaluaban centrales con una capacidad mínima instalada de 100 kW, no considerando el análisis de proyectos orientados al autoconsumo o el abastecimiento de zonas aisladas. La metodología implementada en la evaluación es una combinación de herramientas de modelación numérica del comportamiento del recurso con SIG. Para este trabajo, se cuenta con resultados de herramientas de modelación numérica que simulan el comportamiento del recurso solar, eólico e hidráulico en cauces naturales. En la Figura 9 se presenta el esquema de la metodología utilizada en este trabajo (Ministerio de Energía – GIZ, 2014).

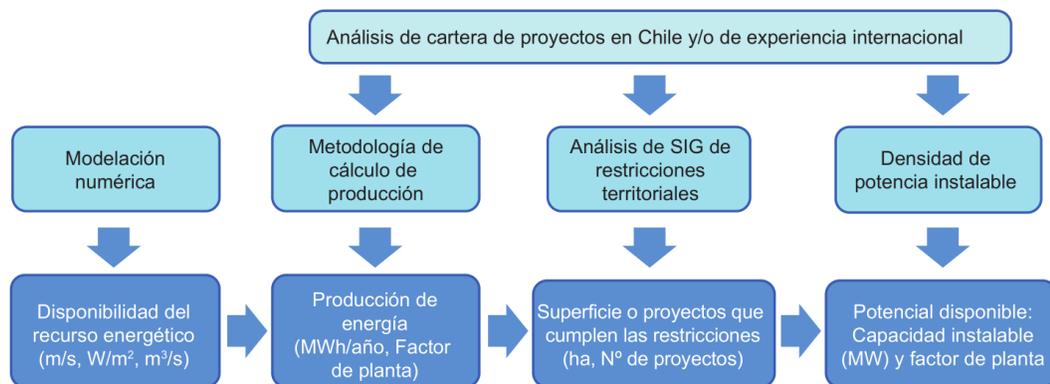


Figura 9. Esquema general de la evaluación del potencial energético. Fuente: Ministerio de Energía – GIZ, 2014.

El estudio consideró un análisis de los proyectos en ejecución y las consideraciones que se han realizado sobre el diseño de ellos. Posteriormente a la obtención del potencial disponible obtenido en base a las mediciones y fórmulas teóricas, se procedió a integrar

distintas tecnologías e identificar las principales restricciones que afectan a cada fuente de generación. Por ejemplo, para los proyectos eólicos se consideraron sectores que estuvieran a una distancia máxima de 1 km a centros urbanos, zonas con pendientes menores a 15° y que se encontraran a menos de 3000 metros de altitud. Cada uno de estos umbrales fue determinado en base a las condiciones de operación óptimas para el funcionamiento de las unidades de generación eólica.

En el trabajo de Abdullah y Kennedy (2015) se menciona que en general en los proyectos de diseño y planificación de micro-redes se otorga gran relevancia a los aspectos técnico-económicos dejando de lado las variables sociales y/o culturales que pueden incidir. Al integrar el punto de vista de las personas afectadas, se puede discriminar por tipo de tecnología según su impacto social/ambiental como también zonas potenciales o limitantes en las cuales se pueda implementar una determinada tecnología. Por ejemplo, al considerarse zonas que presenten algún grado de relevancia cultural o social (por ejemplo un lugar sagrado en el cual se lleven a cabo ceremonias de carácter religioso).

En el trabajo de Singh et al. (2009) se discuten algunos criterios a considerar en la implementación de unidades de generación distribuida. Este trabajo analiza por su parte criterios técnicos que optimizan el flujo de energía dentro de la red. Dentro de estos criterios se presenta la expansión de la red eléctrica, la concentración de la demanda, cambios regulatorios y estructurales de la red, entre otros factores. Este tipo de criterios son los más aplicados en general, dejando de lado los demás factores considerados.

En este tipo de estudios, se otorga una gran relevancia al uso de herramientas de análisis espacial, ya que permiten realizar evaluaciones más exhaustivas incorporando restricciones o limitaciones identificadas dentro del espacio geográfico. Además, permite relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, ayudando a discriminar zonas con mayor potencial. Una de las dificultades principales en el uso de sistemas de información geográfica (SIG) es la dificultad en ciertos casos de obtener información de carácter espacial.

2.4. Enfoque participativo

En el presente apartado se presenta y describen aspectos relevantes relacionados a las metodologías participativas, que son necesarias de considerar al momento de trabajar en un medio social.

Nuevos enfoques deben ser empleados para no sólo incorporar los impactos sociales significativos, sino también con el objetivo de priorizar el desarrollo humano, la participación y la capacidad de diseño de la micro-red, logrando incorporar estos aspectos en las diferentes etapas de un proyecto, instalación, operación y mantenimiento. Uno de los aspectos más relevantes al momento de aplicar metodologías que incorporen la recopilación de información derivada de un grupo de personas, es la forma mediante la cual se pretende obtener dicha información. Existen diversos métodos y técnicas que se pueden utilizar para

estos fines. Más aún, en proyectos de este tipo es imprescindible el trabajo cooperativo con los residentes o consumidores. Esto es determinado en base a que en general los proyectos de micro-red además de proveer de abastecimiento energético intentan generar impactos positivos en el desarrollo humano (Abdullah y Kennedy, 2015). Tal como se menciona previamente, el análisis de las necesidades energéticas para electrificación rural es comúnmente enfocado a utilizar métodos, técnicas y herramientas participativas tales como encuestas, entrevistas, cuestionarios, talleres participativos, grupos focales, entre otros.

La mayoría de las metodologías de diseño y planificación de proyectos de micro-redes, se enfocan en la parte técnica y análisis económico que en general no consideran una efectiva participación comunitaria. Así mismo, para el control y operación de la micro-red son generadas herramientas, que en ocasiones resultan limitadas debido a que los miembros de las comunidades rurales poseen escasos conocimientos o habilidades para comprender el funcionamiento de la micro-red, ya que tampoco se incluyen procesos de integración y participación comunitaria en la planificación de estos proyectos. De esta manera, sistemas que no incorporan las dinámicas y complejidades sociales pueden causar inesperados e involuntarios eventos que puedan dificultar y limitar el desarrollo de la micro-red. La aplicación de encuestas puede proveer información de forma directa y representativa, lo cual depende de la comprensión de los participantes en relación a las preguntas realizadas, lo que también depende de cómo el entrevistador diseñe las preguntas y la calidad de la relación entre el entrevistador y el participante. Adicionalmente, en circunstancias en las cuales comunidades no posean acceso a la energía (o tengan acceso limitado), se dificulta la estimación de su propio consumo. Cabe tener en consideración, que aún si se trabaja con una comunidad con acceso a la energía, el hecho de aplicar encuestas en ocasiones no necesariamente puede describir un comportamiento futuro de la demanda, por lo que se necesita de un análisis acabado. Es por esta razón que se requiere diseñar estrategias de trabajo que combinen métodos y técnicas de terreno adaptadas a un contexto local (Abdullah y Kennedy, 2015).

En cuanto a este punto, se menciona el modelo participativo para la innovación tecnológica desarrollado por Hernández y Vargas (2015). Este modelo abarca mecanismos para seleccionar comunidades prioritarias en base a criterios predeterminados. Además incorpora estrategias para incorporar a la comunidad de estudio dentro de cada una de las etapas del proyecto, enfocadas en desarrollar un trabajo participativo efectivo y vinculante con las visiones y opiniones de la comunidad. En la Figura 10 se presenta el modelo participativo elaborado.

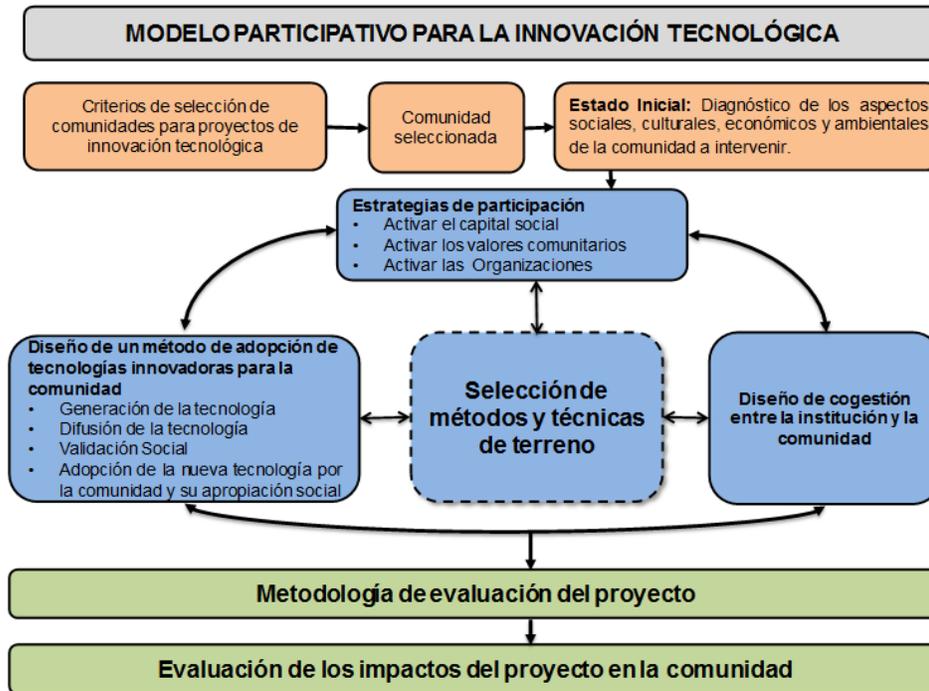


Figura 10. Modelo participativo para la innovación tecnológica. Fuente: Hernández y Vargas, 2015⁴.

La metodología integra distintas etapas, que contemplan la selección de una comunidad de estudio, la intervención participativa a lo largo del proyecto y la posterior evaluación del proyecto y sus respectivos impactos. Este tipo de metodologías permite asegurar la sustentabilidad del proyecto dentro de un contexto social. El proceso de participación apunta también a generar empoderamiento y capacidades para comprender de mejor manera los perfiles de demanda residenciales y del sistema completo, limitaciones técnicas de una micro-red, la importancia del sistema de recuperación de costos y la gestión de la micro-red como un recurso compartido, por lo que cobra vital relevancia aplicar metodologías de carácter participativo en proyectos en los cuales se afecta y/o depende de su contexto social.

2.5. Discusión

En base a la bibliografía revisada, se destaca la potencialidad de los sistemas de micro-redes para implementarlos bajo distintos escenarios locales (comunidades urbanas y/o rurales, campus universitarios, complejos industriales, etc.), considerando cada uno de los aspectos propios de un territorio (sociales, ambientales, económicos y técnicos). Cada uno

⁴ Modelo participativo de innovación tecnológica para el desarrollo local, en desarrollo. Roberto Hernández y Carolina Vargas, 2015

de estos aspectos puede ser incorporado al diseño de una micro-red logrando aumentar su factibilidad.

El desarrollo de trabajos ligados al estudio de la demanda eléctrica permite diseñar metodologías que se ajusten a la disponibilidad de información, obteniendo a su vez resultados de la demanda con una alta precisión. Además, la posibilidad de integrar información socioeconómica y prácticas culturales relativas a los residentes, permite generar estimaciones del perfil de demanda o del consumo de determinados consumidores utilizando técnicas de minería de datos. Para lograr una mayor precisión en la estimación de la demanda eléctrica mediante este tipo de metodologías se requiere profundizar en los patrones de conductas de los residentes de las viviendas con respecto a su permanencia en el hogar, uso de los artefactos eléctricos, variabilidad por género y edad, comportamiento en el ciclo anual, distribución del tiempo de actividades, entre otros factores que tienen estrecha relación a los patrones culturales y sociales.

Por otro lado, en cuanto a la cuantificación del potencial en base a energías renovables, se origina un caso similar al de la demanda, debido al amplio desarrollo de proyectos basados en energías renovables que se ha llevado a cabo en los últimos años. El avance tecnológico en los equipos de medición (estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, entre otros), la mayor cobertura de estos y el desarrollo de metodologías estandarizadas, han conllevado a generar bases de datos con una mayor resolución temporal y espacial, y de mayor confiabilidad, principalmente en cuanto al recurso eólico y solar.

Por último, se menciona que los proyectos de micro-redes al ser proyectos que integran las distintas variables de un territorio, es necesario implementar metodologías de participación, que incorporen a los consumidores al desarrollo del proyecto. Además, al ser necesario disponer de información directa de las personas, es requerido disponer de un formato y protocolo con el cual obtener determinada información de la mejor manera posible. También hay que considerar que hay aspectos que no han sido profundamente descritos en esta revisión, tales como las variables legales y/o económicas las cuáles pueden generar grandes variaciones al diseño de proyectos de esta envergadura.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

- Medidores de consumo. En este estudio se utilizaron medidores “Smart circuit20”, los que tienen la capacidad de medir y registrar datos de potencia instantánea a intervalos de tiempo de 1 segundo o más.
- Software “Watts up”: Utilizado para descargar datos de medidores de consumo.
- Estación meteorológica: Provista de anemómetro, veleta, piránometro, sensor de temperatura y humedad, y datalogger (en la sección 3.4.1.1. se describe en detalle los componentes de la estación meteorológica).
- Software “PC200” (Campbell): Para la descarga de datos de estación meteorológica.
- Notebook: para descarga y análisis de datos.

3.2. Lugar de estudio

La presente memoria tiene como lugar de estudio la comunidad de “Huanaco Huenchun” ubicada en los sectores de Imperialito y Puente Fierro, Comuna de Nueva Imperial, a 11 km hacia el oeste de la zona urbana de la Comuna. Dicho sector se caracteriza por corresponder a una zona rural indígena (Mapuche). Específicamente se ubica en las coordenadas 73,081° O y 38,727° S⁵ (centro de la localidad). En la Figura 11 se presenta una imagen en color real del lugar de estudio.

La comuna de Nueva Imperial pertenece a la región de La Araucanía y se encuentra dentro de la provincia de Cautín, denominada la zona costera de La Araucanía, en la ribera norte del río Chol Chol, al sur de la cordillera de Nahuelbuta, aproximadamente a 30 km al oeste de la ciudad de Temuco, capital regional. Además, se caracteriza por pertenecer a la macro zona agroclimática del secano interior, definiéndose el clima como templado húmedo, con variaciones determinadas por factores de latitud y disposición al sur oriente de la cordillera de Nabuelbuta (Emerge Consultores, 2014).

⁵ Sistema de Referencia: Datum WGS 84 Coordenadas Geográficas.

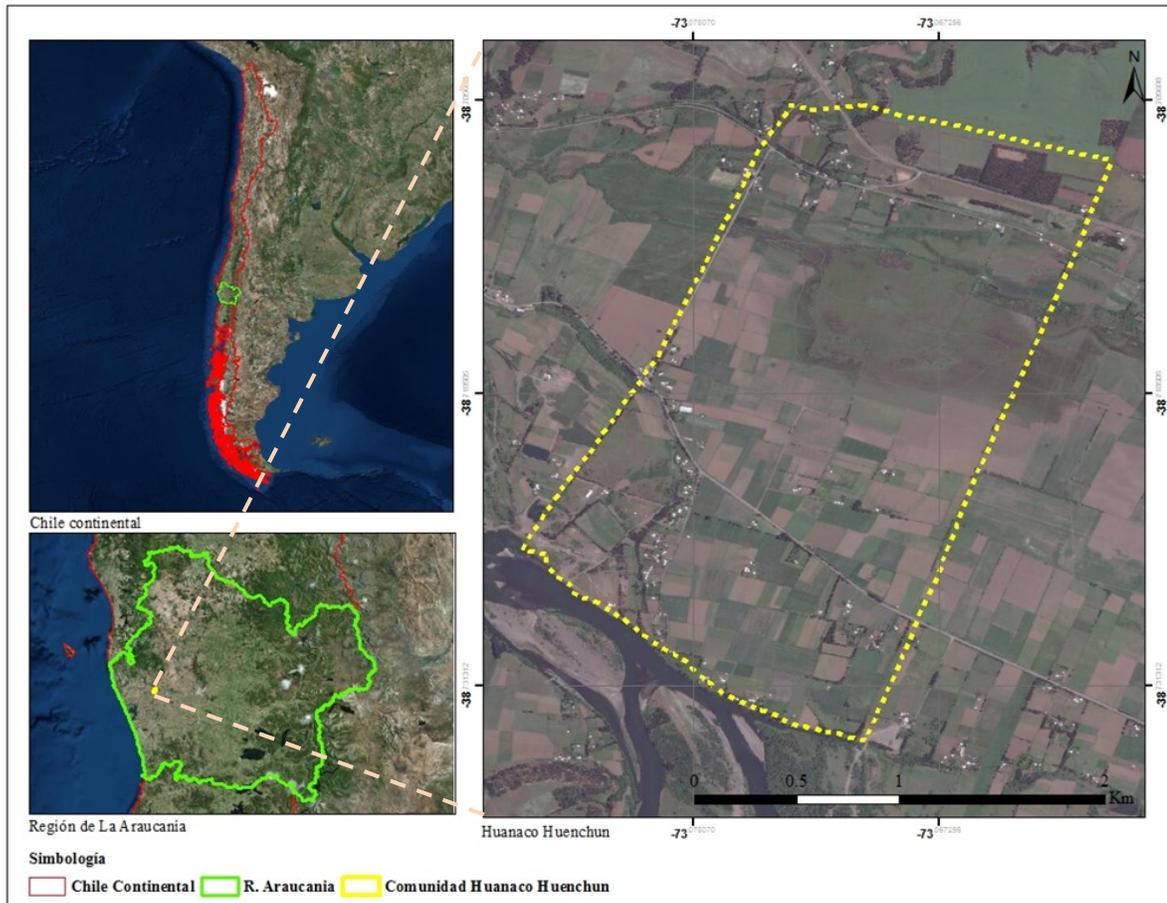


Figura 11. Cartografía de la comunidad de Huanaco Huenchun. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Cabe mencionar que la comunidad Huanaco Huenchun cuenta actualmente con abastecimiento eléctrico proveniente de la subestación Nueva Imperial, perteneciente a la empresa Frontel S.A., la cual provee de energía eléctrica a parte de las comunas de Nueva imperial, Carahue, y Puerto Saavedra. En el caso de esta comunidad, el precio a pagar por la energía (tarifa BT1) asciende en promedio 168 pesos por kWh⁶ (SAESA, 2014).

A continuación se describen las metodologías a utilizar dentro de este estudio. Se presentan en dos secciones.

⁶ La tarifa BT1 señala el precio asociado a la unidad de energía consumida para un cliente en baja tensión (típicamente un cliente residencial), la cual varía según distintos factores asociados a cada zona. A modo de referencia se menciona que para el mismo período el precio promedio de la energía en las comunas de Santiago es de \$102/kWh (Chilectra 2015).

3.3. Metodología para la estimación de la demanda eléctrica de la comunidad

Debido a la baja factibilidad de disponer de mediciones del consumo en todas las viviendas⁷ de una comunidad, se establece un modelo que incorpora información demográfica-social de los residentes de una comunidad en conjunto con muestreos de potencia consumida mediante el uso de medidores inteligentes. Se utilizó un algoritmo para generar clases (tipos) de viviendas dentro de la comunidad, base a las características intrínsecas de los residentes. Cabe mencionar que la presente metodología fue elaborada para ser aplicada en comunidades rurales que cuentan con abastecimiento eléctrico.

3.3.1. Recolección de información primaria

Primeramente, se recogió la información general de la comunidad mediante la realización de una “Encuesta general” (Apéndice 1) dirigida a personas específicas de la comunidad, las cuales se determinaron mediante distintos criterios de selección. Dentro de estos criterios se menciona el liderazgo (formal o informal), conocimiento del territorio, posesión de algún cargo o directiva y el nivel de participación en las actividades desarrolladas al interior de la comunidad. En base a las primeras visitas al lugar de estudio, se obtuvo un conocimiento preliminar de la comunidad, con el objetivo de lograr identificar a dichos representantes. Los criterios fueron seleccionados en base al “Modelo Participativo Para La Innovación Tecnológica” desarrollado por Hernández y Vargas (2015), del cual se desprende una selección de métodos y técnicas de terreno para el diagnóstico y evaluación social en relación a la integración de tecnologías en comunidades rurales (Kumar et al., 2009). La encuesta general recabó información genérica sobre la comunidad, residentes, actividades económicas, necesidades energéticas, actividades ligadas a sus aspectos culturales (étnicas) y otras variables de importancia que permitieran recoger información relevante sobre el comportamiento diario de las residentes (Camblong et al., 2009). Esta información permite proporcionar el contexto dentro del cual se desarrolla la comunidad e identificar aspectos relevantes que puedan ser de utilidad para el diseño de una micro-red. Se consideró realizar un aproximado de cinco encuestas generales, ya que éstas sólo proporcionan información referencial y depende del contexto de la comunidad.

Por otro lado, se realizaron “Encuestas individuales” (Apéndice 2) dirigidas a los jefes de hogar o dueños(as) de todas las viviendas de la comunidad, los cuales puedan proporcionar información lo más acorde posible a la realidad de cada una de las viviendas. Para esto, las preguntas de las encuestas fueron ejecutadas lo más veraz y confiable posible, tratando de no generar preferencias por una respuesta u otra, con el objetivo de lograr una calidad de datos aceptables para el estudio. Se procuró que los campos consultados fueran lo más claro y concisos posible para la mejor comprensión de los entrevistados. Debido a que por los

⁷En la presente metodología se utiliza el concepto de vivienda como unidad de análisis, considerando éste como un recinto que otorga refugio a una persona o un grupo de personas. El concepto resulta independiente del número de “familias” que puedan ser parte de cada vivienda.

motivos previamente mencionados, se pueden generar variaciones en cuanto a las respuestas recogidas, una vez ya realizadas la totalidad de las encuestas, se corroboró el 10% de las encuestas al azar, comunicándose nuevamente con los dueños de las viviendas. En base al trabajo realizado por Cagni et al. (2004), Richardson et al. (2010) y Llanos et al. (2012) se seleccionaron las temáticas de las encuestas individuales. Estas encuestas son de carácter individual (por vivienda) y fueron aplicadas a todas las familias de la comunidad, dirigiendo las preguntas a los jefes de hogar de cada una. Las encuestas abarcan diferentes puntos que se determinaron como relevantes para la identificación de patrones de los residentes de la comunidad que permitan entregar información relacionada al comportamiento actual y futuro de la demanda eléctrica (Camblong et al., 2009; Richardson et al., 2010; Llanos et al., 2012). Dentro de estos puntos se consideró:

- Composición familiar
- Actividades productivas
- Cantidad y uso horario de artefactos eléctricos
- Estado del suministro eléctrico/precios asociados

Sumado a la aplicación de encuestas, se obtuvieron datos en terreno de demanda eléctrica en base a mediciones de potencia instantánea, expresada en unidad de Watts. Además, cabe mencionar que este tipo de medidor puede obtener datos a una alta resolución temporal (1 hora, 15 minutos, 1 segundo). Entre las variables que son posibles percibir, la potencia es la que posee mayor relevancia indicando la cantidad de energía que se consume en un instante determinado. Las demás variables, tales como tensión, corriente pueden entregar información complementaria útil para evaluar la calidad de la energía, fallas en el sistema eléctrico actual y el diseño de la micro-red. Para el intervalo de medición se escogió a 5 minutos, con el objetivo de capturar las mínimas variaciones en el uso de los equipos eléctricos de la vivienda (por ejemplo el uso de hervidores eléctricos, los cuales consumen una gran cantidad de energía, pero en un tiempo muy acotado). La cantidad de medidores utilizados se especifica en la siguiente sección.

A continuación se presenta la metodología diseñada para la estimación de los perfiles de demanda residencial, basándose en la información obtenida.

3.3.2. Generación de la base de datos

La información general de la comunidad se utilizó principalmente para proporcionar un contexto de la comunidad, con el objetivo de evidenciar aspectos relevantes que puedan tener una relación o impacto con la demanda eléctrica de la comunidad y sus residentes (por ejemplo la realización de cultos religiosos, festividades u otras costumbres locales). Por otro lado, en base a la información bibliográfica recopilada se ordenó la información proveniente de las encuestas individuales según atributos que reflejan el comportamiento de la demanda eléctrica de una vivienda. Se escogieron tres aspectos característicos de las

viviendas, ligados a la cantidad de miembros de una vivienda, rango etario de los residentes y actividades desarrolladas por estos (Cuadro 2).

Cuadro 2. Atributos seleccionados para la clasificación.

Campo	Atributos	Descripción
Miembros	N° Integrantes	Total de residentes permanentes
	N° Jóvenes	Integrantes menores a 18 años
Rango etario	N° Adultos	Integrantes mayores a 18 años y menores a 60 años
	N° Mayores	Integrantes mayores a 60 años
	N° Agricultores	Integrantes que practican la agricultura familiar o de subsistencia
Actividades	N° Dueñas de casa	Dueñas de hogar y que practican la agricultura familiar
	N° Estudiantes	Asistentes de manera regular a un establecimiento educacional
	N° Establecidos	Integrantes con trabajo con horario de jornada completa o similar

Fuente: Elaboración propia, 2015.

A continuación se presenta la justificación elaborada para cada uno de estos aspectos.

Miembros: Richardson (2010) y Yamaguchi et al. (2011) mencionan la relevancia de esta componente en la estimación de demanda de tipo residencial. Por una parte, Yamaguchi plantean que existe una relación de crecimiento entre la demanda y el número de personas residentes de una vivienda, sin embargo, el incremento en la demanda de energía no sigue un comportamiento lineal en relación al número de ocupantes, debido a que por ejemplo hay una cantidad de equipos eléctricos que son de uso compartido entre los miembros de una vivienda y por otra parte los patrones de comportamiento no son iguales para todos los miembros de una vivienda.

Rango etario: En base al trabajo llevado a cabo por Llanos et al. (2012) se incorporó este componente debido a que como se señala en Yamaguchi et al. (2011) no todos los miembros de una vivienda poseen el mismo comportamiento diario. Por ejemplo, las personas de edad avanzada permanecen dentro de las viviendas por largos períodos durante el día en relación a otro tipo de miembro. En cuanto a este mismo punto, individuos jóvenes presentan comportamientos distintos en relación a sus mayores, lo que a su vez se ve condicionado por su entorno social. A modo de ejemplo, los jóvenes pueden interactuar

más con sus pares en actividades recreativas fuera de la vivienda, como también presentar tendencias más sedentarias al ocupar parte no menor de su tiempo en ver televisión o utilizar computadores para fines recreativos y/o sociales. Para poder categorizar distintos grupos etarios se seleccionaron tres rangos distintos que se adaptaron en base a Calvo et al. (2011).

Actividades: El comportamiento de las personas corresponde a uno de los principales factores que influyen en la demanda, ya que las distintas actividades que una personas desarrolla durante el día, como por ejemplo ir al colegio, trabajar, trasladarse a estos lugares, se relaciona directamente con el tiempo que los residentes pasan dentro de la vivienda de forma activa (despiertos), categorizándolos como potenciales consumidores de energía (Richardson et al., 2010). En base a lo anterior, se identificaron las principales actividades (ocupaciones) que desarrollan los residentes de la comunidad de Huanaco Huenchun.

A través de la Encuesta General, se corroboró la implementación de los atributos seleccionados en el Cuadro 2, otorgándose un margen para agregar o modificar los atributos en función de las condiciones locales. En base a estos atributos se procesó la información recopilada por las encuestas individuales. Posteriormente fue ingresada a una red neuronal para generar distintas clústeres (clases) en base a las similitudes de las características internas de cada vivienda. Se seleccionó una red neuronal con entrenamiento no supervisado, debido a que se desea identificar patrones asociados a los datos socio-económicos de entrada, y a causa de que estos últimos inicialmente son desconocidos, se puede proceder a aplicar un entrenamiento no supervisado, el cual genere las clases en función a solamente los datos de entrada (Sanchez et al., 2009).

Se utilizaron mapas auto-organizados de Kohonen (SOM) como mecanismo de clasificación. Se seleccionó este mecanismo debido a que en la literatura se ha utilizado ampliamente este clasificador para trabajos similares relacionados a la agrupación de características cualitativas, como también para la obtención de patrones de demanda. Básicamente, SOM es un mecanismo de clasificación no supervisada, correspondiente a una red neuronal, que permite determinar clases (o clústeres) según las características de los datos de entrada. La principal ventaja de SOM es la capacidad de representar la similitud de las características de los datos de entrada mediante una grilla de dos dimensiones. Al disponer de un entrenamiento no supervisado, los elementos de entrada son comparados con los pesos de todas las neuronas (una por cada variable o característica) para determinar la similitud entre los datos. Tal similitud puede ser evaluada de diferente formas siendo usualmente la más utilizada la distancia euclidiana (Sanchez et al., 2009; Llanos et al., 2012). En el trabajo de Verdu et al. (2006) se analiza la capacidad de determinados mecanismos de clasificación para agrupar, filtrar e identificar patrones de demanda asociados a distintos tipos de clientes, dentro de los cuales SOM otorga buenos resultados.

En la Figura 12 se presenta de manera gráfica la implementación de SOM. Se compone de dos capas, una de entrada y otra de salida. La capa de entrada (formada por n neuronas, una por cada variable de entrada) se encarga de recibir y transmitir a la capa de salida la

información del exterior. La capa de salida (formada por m neuronas, definidas según el usuario) tiene por objetivo procesar la información y generar el mapa de salida agrupando cada elemento (en este caso, cada vivienda) dentro de un grupo determinado. En general, las neuronas pertenecientes a la capa de salida se organizan en forma de un mapa bidimensional, como se muestra en el esquema. Por otro lado, el algoritmo básico de SOM presenta una fase de entrenamiento en donde se definen pesos (W) para cada una de las neuronas de entrada, eligiéndose en este caso el mismo peso para cada neurona (Llanos et al., 2012).

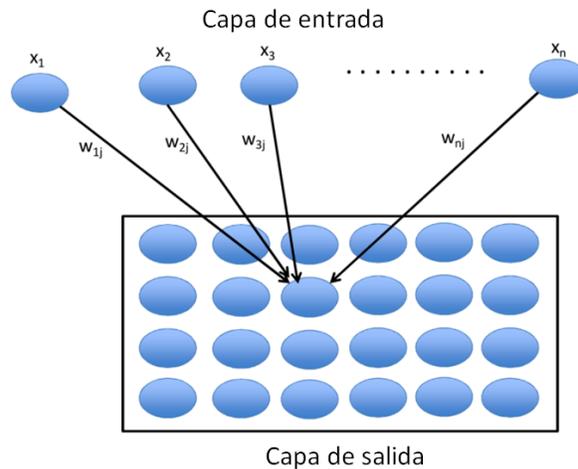


Figura 12. Esquema de red neuronal de Kohonen. Fuente: Llanos et al. 2012.

El entrenamiento de SOM consiste en un proceso competitivo en el que cada neurona es evaluada en un espacio vectorial (en general mediante su distancia euclidiana). Se identifica una neurona ganadora en la capa de salida, la cual es activada en cada iteración (una por cada variable) y de esta manera se van generando las agrupaciones. Cabe mencionar que a pesar de que las neuronas de la capa de salida se comportan de manera distintiva una de la otra, se presenta una función de vecindad, en donde la neurona ganadora afecta a determinadas neuronas que están a su alrededor.

En la Figura 13 se presenta el esquema de la metodología propuesta para la generación de perfiles de demanda. En a) se utiliza la información proveniente de las encuestas de las viviendas (n viviendas en total), y en conjunto con el análisis de información bibliográfica se analizan y determinan las características más importantes (de las viviendas) que estén asociadas al comportamiento de la demanda eléctrica.

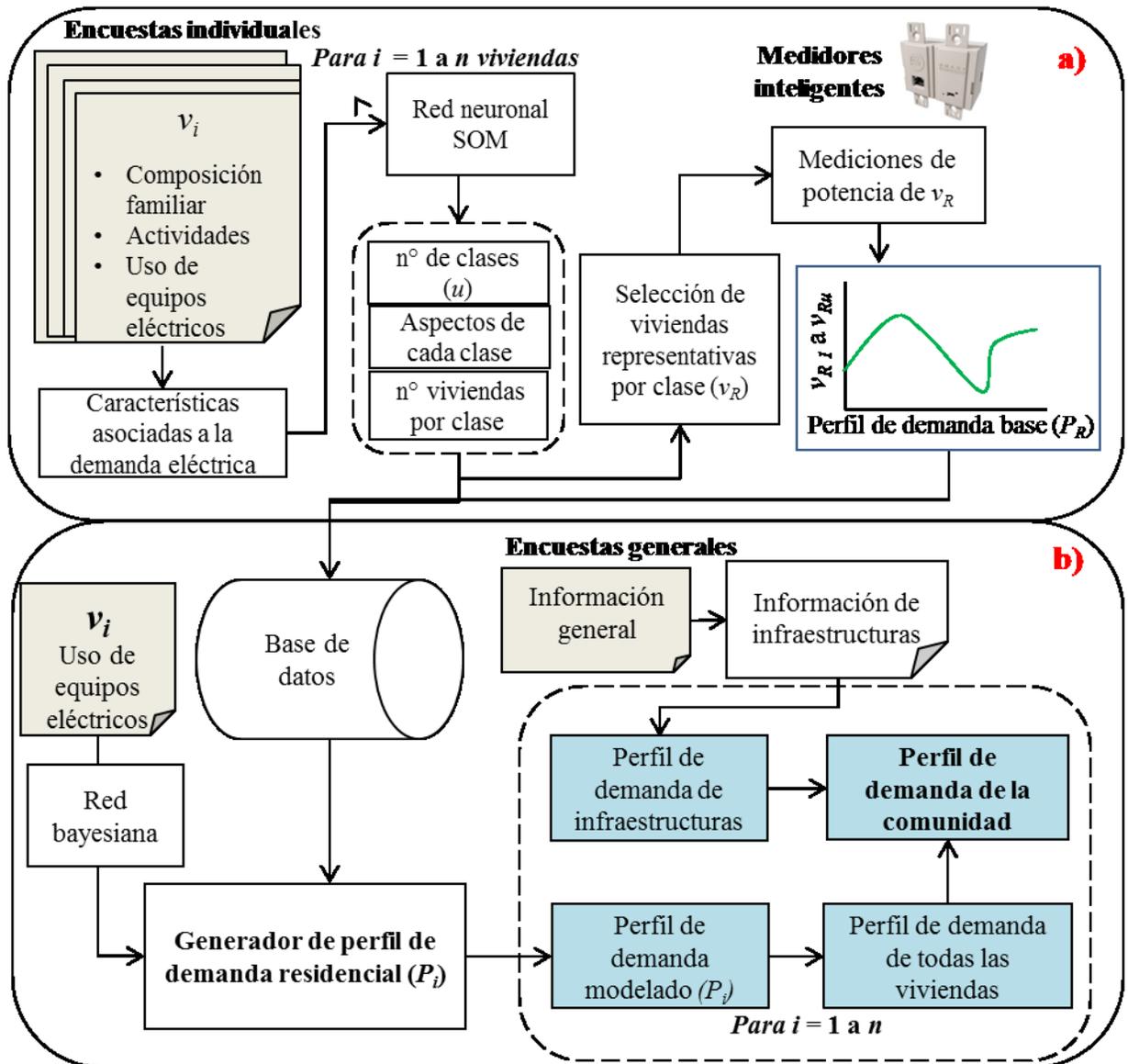


Figura 13. Diagrama de la metodología para la asignación de perfiles de demanda residenciales. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Cada una de las características identificadas fue ingresada como una variable de tipo ordinal a la red neuronal SOM por cada una de las encuestas realizadas. A través de esto, se permitió clasificar cada una de las viviendas encuestadas, determinando un número de clases (u clases), los aspectos principales de cada una de las clases descritas (las que se destacan) y el número de elementos (viviendas) asociadas a cada clase. Se determinó un máximo de siete clases, las que en sí dependen de la configuración de la red neuronal. La cantidad máxima de siete clases se derivó en función del trabajo elaborado por Llanos et al. (2012). Posteriormente se seleccionó una vivienda por cada clase (definidas estas como viviendas representativas (v_R)) en las cuales se implementó un medidor inteligente, con el objetivo de disponer de un medidor por cada clase. Como criterio para determinar las

viviendas representativas, se escogieron aquellas que presentaban valores promedios dentro de cada clase en base a las mismas características seleccionadas. En base a estos medidores se logró obtener información real de demanda de las viviendas determinadas con lo cual se generan los perfiles de demanda base de cada una de las viviendas representativas (P_R). El perfil de demanda diario promedio fue la unidad que se utilizó para determinar los perfiles de demanda base, los cuales en conjunto con la información derivada de la red neuronal SOM permitieron crear la base de datos necesaria para la generación de los perfiles de demanda residencial.

En la Figura 13 b) se presenta la base de datos a utilizar, la cual es alimentada a partir de la información de salida de la red SOM y los perfiles de demanda base. Para obtener el perfil de demanda de una vivienda determinada (v_i) se utilizó la información relacionada al uso diario de equipos eléctricos, declarada por los residentes. Dicha información fue ingresada a una red bayesiana con el objeto de generar probabilidades de variación de demanda eléctrica entre viviendas, las cuales representan las variaciones de demanda de v_i en relación a v_R . El resultado de este procedimiento es la creación de perfiles de variación de demanda (Pv_i). Este trabajo se realiza debido a que sólo se disponen de mediciones de viviendas específicas (v_R), por lo que para obtener el perfil de demanda modelado de v_i se realiza una superposición entre el perfil de demanda de la vivienda de referencia de cada clase (P_R) con el perfil de variación de propio de la v_i (Pv_i). Este proceso final es llevado a cabo internamente dentro del proceso de “Generador de perfil de demanda residencial (P_i)”. Realizando este proceso para cada una de las viviendas de la comunidad se obtiene el perfil de demanda agregado de la comunidad. Por otro lado, a través de la aplicación de las encuestas generales se obtuvo información acerca del tipo de infraestructuras de uso común, periodicidad de uso, la cantidad de equipos eléctricos que posee, entre otras características de cada espacio común. En base a esta información se logró generar los perfiles de demanda de las infraestructuras de uso común. Finalmente el agregado entre el perfil de demandas de las viviendas y las infraestructuras permitió generar el perfil de demanda de la comunidad completa.

Cabe mencionar que debido a que se dispone de un período acotado de registros de demanda, se utiliza la información de consumo histórico perteneciente a la empresa distribuidora para evaluar las variaciones estacionales de la demanda y escalar los perfiles de demanda generados a otros períodos del año. A continuación se describe con mayor detalle la generación de perfiles de demanda.

3.3.3. Generación de perfiles de demanda

Posteriormente a la generación de base de datos, con el objetivo de obtener una mayor aproximación en la estimación del perfil de demanda para cada una de las viviendas, se procedió a utilizar la información de tenencia (cantidad) y uso de equipos eléctricos derivada de las encuestas individuales. En el Cuadro 3 se presenta la tabla utilizada (reducida) para recabar esta información. Se preguntó por el estado de uso de 18 equipos

eléctricos dentro de la vivienda, y se agregó una columna “Otros” con el fin de registrar otros equipos que no estuviesen considerados. En el Apéndice 2 se presenta la tabla completa que fue utilizada.

Cuadro 3. Cantidad y uso horario de equipos eléctricos.

Hora (h)	Refrigerador	Horno Eléctrico	Hervidor	TV	...
Hr/ N° equipos (n)	2	0	0	2	.
1:00	1	0	0	0	.
2:00	1	0	0	0	.
3:00	1	0	0	0	.
4:00	1	0	0	0	.
...	1	0	0	0	.
23:00	1	0	0	1	.
0:00	1	0	1	1	.

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Para cada uno de los equipos eléctricos identificados dentro de una vivienda, se consultó por su uso horario durante un día promedio para un día de semana y fin de semana (ver Apéndice 2). Además, se registró la cantidad de equipos en la vivienda. Debido a que ésta, corresponde a información promedio sobre la tenencia y uso de estos equipos (día promedio) desconociéndose en detalle su variación diaria o mensual, se utilizó un enfoque probabilístico basado en redes bayesianas para considerar esta variabilidad entre las viviendas pertenecientes a cada clase. Los modelos de redes bayesianas modelan un fenómeno mediante un conjunto de variables y las relaciones de dependencia entre ellas, éstas permiten generar probabilidades de los distintos estados de una o más variables en base a dichas dependencias. En la Figura 14 se presenta un ejemplo de red bayesiana de tres nodos en donde una variable aleatoria (Z) es dependiente de otras dos variables ($F1$ y $F2$), lo que en términos prácticos permite estimar la probabilidad de estado de la variable dependiente (Z) en función a las variables conocidas.

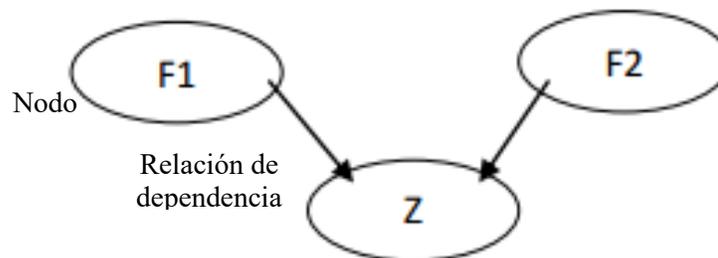


Figura 14. Representación de una red bayesiana. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los modelos de redes bayesianas pueden tener diversas aplicaciones, para clasificación, predicción, diagnóstico, entre otros fines. El proceso que utilizan las redes bayesianas se conoce como inferencia, en el cual la información de evidencia se propaga por la red y

actualiza el conocimiento acerca de las variables no observadas (Neapolitan, 2004).

En este caso, se utilizó un modelo de red bayesiana para estimar la probabilidad de estado (uso) de los equipos eléctricos de las viviendas de la comunidad. Debido a que se dispone de una base de datos de la totalidad de las viviendas sobre el tipo y uso de equipos eléctricos, el modelo de redes bayesianas se alimenta a partir de la misma información derivada de las encuestas para generar las probabilidades de que para una determinada hora del día, una casa tenga un equipo más o menos encendido, o la misma cantidad de equipos que la vivienda representativa de una determinada clase. Para ello, la información del Cuadro 3 de cada una de las viviendas fue ingresada a un modelo de red bayesiana de dos nodos. Este proceso se realizó de forma separada para cada una de las clases determinadas. El objetivo de esto, fue determinar de manera sistemática, diferencias del comportamiento de la demanda entre las viviendas dentro de una clase con la vivienda representativa de dicha clase.

En la Figura 15 se describe el diagrama de la topología de red bayesiana a utilizar, en el cual se logra apreciar que la variable de la cual se desea conocer su probabilidad es “Estado de equipo (EE)”, la cual es dependiente del uso de equipos eléctricos para cada hora (h) en relación a la vivienda representativa y posee tres estados posibles: “Aumenta (A)”, “Disminuye (D)” o “Mantiene (M)”, definiéndose sus probabilidades como:

Clase = 1 a u

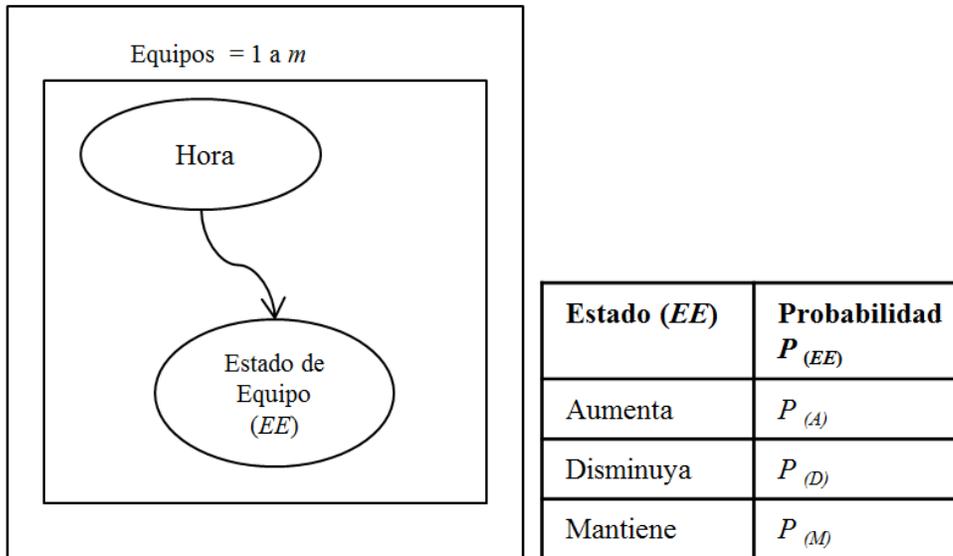


Figura 15. Diagrama de topología de red bayesiana utilizada para el modelo de asignación de perfiles de demanda. Fuente: Elaboración propia, 2015.

$P_{(A)}$: Probabilidad de que aumente en uno la cantidad de un determinado equipo (E) funcionando en una determinada hora del día (h) en relación a la vivienda representativa.

$P_{(D)}$: Probabilidad de que disminuya en uno la cantidad de un determinado equipo (E) funcionando en una determinada hora del día (h) en relación a la vivienda representativa.

$P_{(M)}$: Probabilidad de que sea igual la cantidad de un determinado equipo (E) funcionando en una determinada hora del día (h) en relación a la vivienda representativa.

Cabe señalar que este proceso se realizó para cada una de las clases y para cada uno de los equipos eléctricos identificados. El resultado fue la generación de una nueva matriz (hora del día / equipos) con probabilidades de ocurrencia de estos tres distintos estados ($P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$). De esta manera se generó el Cuadro 4.

Cuadro 4. Matriz de probabilidades.

m equipos

Hora (h)	Refrigerador	Horno Eléctrico	Hervidor	TV	...
1:00	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			
2:00	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			
3:00	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			
4:00	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			
...	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			
23:00	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			
0:00	$P_{(A)}$; $P_{(D)}$; $P_{(M)}$...			

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Una vez obtenida esta matriz, se generan realizaciones (eventos) para cada vivienda en base a las probabilidades determinadas. El producto de esta etapa es la generación de una nueva matriz, en la cual se indica la variación en el uso de equipos eléctricos de una vivienda cualquiera en relación a una vivienda representativa. En el Cuadro 5 se presenta un ejemplo de esta matriz de variación.

Cuadro 5. Matriz de variación del uso horario de equipos eléctricos.

Para una vivienda se tiene:

m equipos

Hora	Refrigerador	Horno Eléctrico	Hervidor	TV	...
1:00	1	1	0	0	0
2:00	1	1	0	0	0
3:00	1	0	0	0	0
4:00	1	0	0	-1	0
...	1	1	1	-1	0
23:00	1	0	-1	0	0
0:00	1	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Así por ejemplo en las celdas de la matriz se distinguen tres valores posibles, 1,-1 y 0. En este caso “1” indica que hay un equipo más funcionando a una determinada hora en relación a la vivienda representativa de tal clase. “-1”, establece que hay un equipo menos funcionando a tal hora. Por último, “0” indica que hay la misma cantidad de equipos

operando a dicho momento.

En la Figura 16 a) se presenta el esquema general de esta metodología, en donde para cada vivienda v_i se generó una matriz de variación. En base a esta matriz y valores de potencia nominal (P_n) y factor de uso (F_u) determinado para cada equipo eléctrico se elaboró el perfil de variación de demanda para cada una de las viviendas (Pv_i). Este perfil muestra la variación de demanda entre v_i con respecto a la vivienda representativa (en este caso v_{RI}). Para esto se utilizaron valores de P_n y F_u en base al trabajo de Widén et al. (2009), Richardson et al. (2010) y Chuan y Ukil (2015). La potencia nominal hace referencia a la potencia promedio que utiliza un determinado equipo u artefacto bajo operación normal. Este valor puede variar entre distintas marcas y modelos del mismo equipo, por lo que se utilizó un valor promedio de varios equipos para la realización de los cálculos. Por otra parte el factor de uso hace referencia al periodo dentro de un intervalo de tiempo en el cual realmente un equipo está en funcionamiento. Por ejemplo se establece un F_u bajo para equipos que son utilizados un período acotado de tiempo, así como un hervidor eléctrico ($F_u = 0,1$), el cual en promedio suele estar en funcionamiento 5 a 7 minutos (1/12 de una hora), siendo un caso contrario, las iluminarias internas de una vivienda ($F_u = 1$) las cuales suelen estar encendidas por largos períodos una vez que ya se comienzan a utilizar. Este perfil se generó a una resolución temporal de 5 minutos para que coincidiera con el perfil de demanda medido.

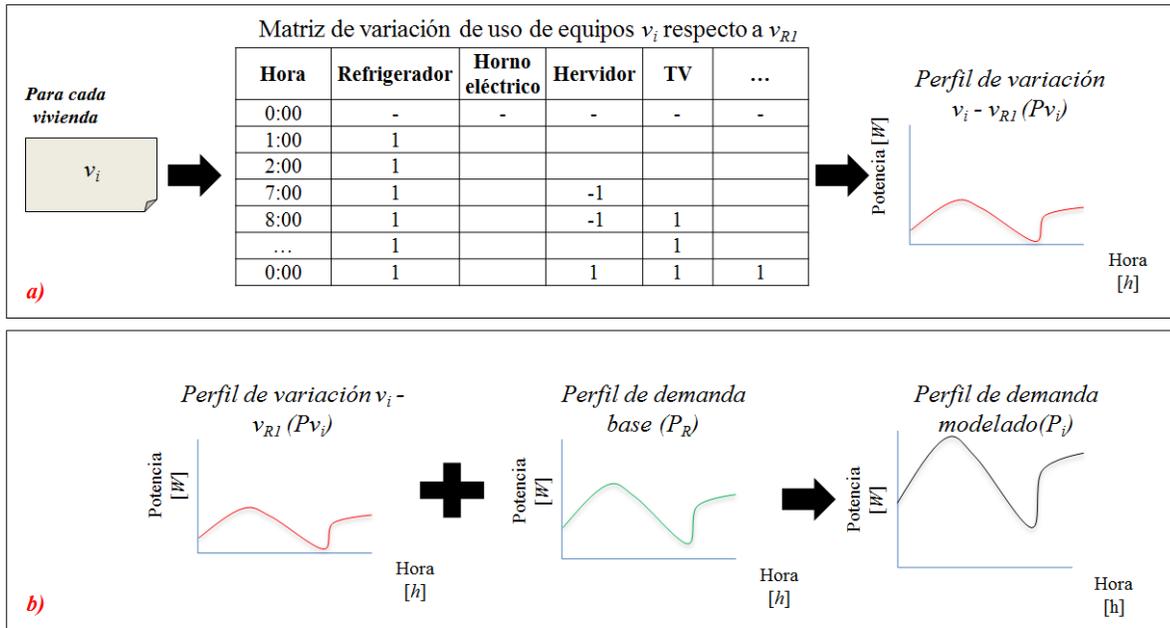


Figura 16. Esquema de la metodología de generación de perfiles de demanda. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Finalmente en la Figura 16 b) el perfil modelado de la vivienda i (P_i) es formado como el agregado en base al perfil de variación (Pv_i) y el perfil de demanda base (P_R) perteneciente a la vivienda representativa. Este procedimiento se realizó para cada una de las viviendas. En la Ecuación 1 se describe de forma detallada la fórmula que se utilizó para generar el

valor de potencia (p) para cada tiempo (t) para formar el perfil modelado de la vivienda i .

$$p_i(t) = p_{vR}(t) + \sum_{E=1}^m \left(R(P_{(EE)})_E \cdot P_{nE} \cdot F_{uE} \right) (t)$$

$$p_i(t) \geq 0$$

Ecuación 1.

En donde:

$p_i(t)$ corresponde a la potencia consumida a un periodo de tiempo (t) para una vivienda (i).
 $R(P_{(EE)})_E$ representa la respuesta en cada evento obtenida a partir de las realizaciones hechas en base a las probabilidades asociadas a EE (Aumente, Disminuye o Mantenga) para cada equipo eléctrico (E).

P_{nE} representa la potencia nominal de un determinado equipo eléctrico (E).

F_{uE} corresponde al factor de uso de un determinado equipo eléctrico (E).

$P_{vR}(t)$ representa el valor de potencia medido de la vivienda representativa (vR) en un período de tiempo (t).

Para cada período de tiempo (t) se realiza esta ecuación, con el objetivo de obtener el perfil modelado de la vivienda i para un día completo. La sumatoria de potencia va desde el primer equipo eléctrico (por ejemplo: refrigerador) al último equipo identificado (m). Por otra parte, se consideró que en el caso de que el valor de p_i resulte negativo, éste es ajustado a cero debido a que la demanda de una vivienda no puede poseer un valor negativo, sólo en el caso de que la misma vivienda esté generando energía, caso que ocurre cuando el perfil de variación de demanda entrega valores negativos. Por último, se menciona que en el caso de no contar con las encuestas de todas las viviendas, se realizó una simulación considerando un perfil de demanda base, como el perfil promedio de las viviendas representativas.

3.3.4. Validación del modelo

Para validar la metodología de generación de perfiles de demanda residencial, se utilizó la información de consumo mensual (en kWh) proporcionado por la empresa distribuidora. Dicha información de consumo corresponde a la energía total que es consumida de forma mensual o bimestral por un cliente en específico y es registrada por la empresa distribuidora principalmente para fines de tarificación. Para poder comparar los datos generados con la información de consumo, se generaron 60 simulaciones de todas las viviendas de la comunidad, y se comparó el agregado de los 60 días (energía⁸), con los registros de la

⁸ Cabe mencionar que la energía diaria se entiende como la potencia consumida durante el intervalo de tiempo de un día, por lo que se obtiene como la integral del perfil de demanda diario, sumando los valores de

empresa distribuidora, identificándose el error relativo, el cual es descrito en la Ecuación 2.

$$ER = \frac{|Consumo_M - Consumo_R|}{Consumo_R} \cdot 100$$

Ecuación 2.

En donde:

ER representa el error relativo en porcentaje,

$Consumo_M$ corresponde al consumo obtenido mediante el método propuesto para un período definido, y

$Consumo_R$ corresponde al consumo registrado para el mismo período.

Además, tomando en cuenta la diferencia entre ambos consumos y relacionando esta variación al consumo registrado, se obtiene el error en la estimación del consumo, el cual permite mostrar la variación relativa respecto al valor del consumo registrado.

3.3.5. Estimación de la demanda total de la comunidad

Para obtener la demanda total de la comunidad, se generaron los perfiles de demanda para todas las viviendas de la comunidad, incorporándose la demanda proporcionada por las infraestructuras de uso común mediante información obtenida en terreno (encuestas generales). Esto último, incluyó primeramente la identificación de dichos espacios, así como escuelas, iglesias, postas, averiguando a su vez su funcionamiento (semanal), cantidad de personas asociadas a su uso, equipos e iluminación considerada. Debido a que estos espacios presentan en general un consumo de electricidad estable, el perfil de demanda de las infraestructuras de uso común fue modelado en base a una matriz similar a la que se presenta en el Cuadro 3, aplicándose también los factores de potencia nominal y factor de uso para obtener el perfil de demanda diario para cada infraestructura. Dicha información fue obtenida mediante los informantes y organismos claves. De esta manera se obtuvo la Ecuación 3 en donde para un día promedio se tiene que:

$$P_{Com} = \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) + P_{Inf.UsoComún}$$

Ecuación 3.

En donde:

P_{com} corresponde al perfil de demanda de la comunidad completa para un día.

potencia instantánea (W), y ajustándolos a una unidad de energía (Wh día⁻¹). Para la validación del modelo se suma directamente el consumo diario por los días de facturación.

P_i representa al perfil de demanda diario de v_i .

$P_{inf.UsoComún}$ corresponde al perfil de demanda estimado para los lugares de uso común.

Para obtener el perfil de demanda de la comunidad completa para un día promedio, se generaron los perfiles de demanda para todas las viviendas (n viviendas) y para cada una de las infraestructuras de uso común.

3.3.6. Extrapolación de la demanda eléctrica

Considerando que los perfiles de demanda fueron generados en base a datos de un período definido y acotado del año, se utilizaron los registros de consumo histórico para determinar las variaciones entre los distintos meses del año. En base a esto, a través de una relación lineal se permitió escalar el perfil de demanda a otros períodos del año, como muestra la Ecuación 4.

$$P_i' = \frac{P_i}{C_i} \cdot C_i'$$

Ecuación 4.

Donde P_i corresponde al perfil de demanda modelado de v_i , C_i al consumo mensual/bimestral de v_i asociado al período de muestreo (registrado por la empresa distribuidora), C_i' es el consumo asociado al mes del cual se desea estimar su perfil de demanda y P_i' corresponde al perfil de demanda ajustado para dicho mes. El resultado de la Ecuación 4 se utiliza como referencia en función de las variaciones mensuales históricas identificadas, conservando el comportamiento diario de la demanda. Se realiza dicha acotación, debido a que durante el ciclo anual el comportamiento de la demanda no necesariamente se conserva, por lo tanto, esta es sólo una estimación referencial. Posteriormente, para realizar el balance de energía se elaboró un perfil de energía requerida por día, realizando la simulación de 365 eventos (año completo) para todas las viviendas e infraestructuras identificadas.

Además se realizó un análisis de los eventos (sociales/culturales), festividades y actividades similares descritas por los residentes en los cuales se declaró un aumento/disminución en el número de personas dentro de la comunidad y un comportamiento particular de las actividades sociales, afectando potencialmente de manera directa e indirecta la demanda eléctrica.

3.4. Metodología para la estimación del potencial de energía renovable

En base a un conjunto de métodos y herramientas descritas en la literatura (sección 2.3), a continuación se presenta un método para estimar el potencial de energía solar y eólica adecuado al contexto de comunidades rurales. Como se señala anteriormente, son variados los aspectos que se consideran en la estimación del potencial energético, dentro de los cuales se presentan aspectos asociados a los recursos de energía disponibles como otros ligados a ámbitos técnicos y sociales. Esta metodología se plantea dos etapas. Primero se realiza una aproximación al potencial teórico mediante el análisis del recurso eólico y solar, considerando la cuantificación del recurso disponible y la producción de energía por unidad de generación. Posteriormente se elaboran tres configuraciones de generación con distinto nivel de penetración de energía (al 30, 50 y 100 %). Dentro de la segunda etapa se destaca la realización de un análisis espacial que tiene por objetivo evaluar el espacio físico perteneciente a la comunidad, considerando aspectos relacionados al territorio. Para esto se utilizó información disponible en línea, tal como coberturas espaciales e información extraída directamente de la zona de estudio mediante el uso de estaciones meteorológicas, consultas en terreno y procesos de digitalización de coberturas. En base a esto, se realiza un análisis sobre las limitaciones del territorio en cuanto a la implementación y si las zonas seleccionadas para la implementación cumplen con el área mínima determinada para implementar las unidades de generación planteadas.

3.4.1. Estimación del potencial eólico y solar

3.4.1.1. Obtención de datos de variables meteorológicas

Para lograr una primera aproximación a la estimación del potencial eólico y solar se utilizaron datos meteorológicos provenientes de la plataforma “Explorador de Energía Solar (EES)” y “Explorador de Energía Eólica (EEE)” elaborados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Ambos corresponden a herramientas de análisis espacial que se sustentan en base a información satelital en conjunto con modelos de procesos atmosféricos y mediciones in-situ, proporcionando valores de radiación global horizontal ($W m^{-2}$) y velocidad del viento ($m s^{-1}$) con una alta resolución temporal y espacial. Una de las principales ventajas de estas plataformas es que presentan la posibilidad de descargar datos tabulados y coberturas espaciales para utilizarlas mediante softwares de SIG. En el Cuadro 6 se presentan los parámetros asociados a cada herramienta (Molina y Rondanelli, 2012; Departamento de Geofísica, 2012).

Cuadro 6. Parámetros del Explorador de energía solar y Explorador de energía eólica.

Variable	Explorador de energía solar (EES)		Explorador de energía eólica (EEE)		
	Radiación global horizontal (GHI)	Temperatura del aire	Velocidad de viento	Dirección de viento	Densidad del aire
Unidad	W m ₂	Grados °C	m s. ₁ a 12 niveles verticales	Grados	kg m. ₃
Resolución Espacial	1 km	1 km	1 km	1 km	1 km
Resolución Temporal	30 min	1 Hora	1 Hora	1 Hora	1 Hora
Período muestreo	Año Completo 2003 - 2012	Año Completo 2010	Año Completo 2010		
Cobertura	Chile continental (Arica a Chiloé)		Chile continental		

Elaboración propia en base a Molina y Rondanelli, 2012 y Departamento de Geofísica, 2012.

Cabe recalcar que los datos son derivados de modelos de mesoescala, por lo que proporcionan información de referencia solamente, utilizados principalmente para la identificación de zonas con potencial energético. Para el análisis espacial se utilizó el software ArcGis 10 para visualizar y seleccionar las áreas de mayor recurso (según niveles de radiación solar y velocidad de viento).

Debido a que los modelos proporcionan información de referencia, se dispuso de una estación meteorológica dentro de la localidad de estudio para validar los datos proporcionados por los modelos utilizados y obtener información con mayor precisión. Esta estación fue instalada y puesta en funcionamiento por un período de cuatro meses durante el año 2015 registrando las siguientes variables descritas en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Variables meteorológicas registradas por la estación meteorológica.

Estación meteorológica				
Variable	Dato	Unidad	Altura medición	Intervalo de muestreo
Temperatura del aire	Promedio	Grados °C		
Radiación global horizontal (GHI)	Promedio	W m ₂	2 metros	
Humedad relativa	Muestra	Porcentaje		5 min
Dirección de viento	Promedio	Grados		
Velocidad de viento	Promedio	m s. ₁	2.5 metros	

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la Figura 17 se presentan los equipos que componen la estación meteorológica utilizada. Se menciona que el equipo utilizado fue facilitado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.



Figura 17. Estación meteorológica facilitada por el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Fuente: Elaboración propia, 2015.

La estación fue calibrada y ajustada para proporcionar datos a intervalos de minutos por todo el período de muestreo. Posteriormente a la recolección de datos, estos fueron pre-procesados, y comparados con los datos proporcionados por los modelos, con el objetivo de validar el resultado de estos. A continuación se describe la metodología a utilizar en detalle para la estimación del potencial solar y eólico basándose en los datos del recurso previamente generados. Para comparar los datos del EEE y EES con los datos provenientes de la estación meteorológica se utilizó la siguiente ecuación:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N |x_i - x|}{N}$$

Ecuación 5.

En donde DM representa el error medio, que corresponde a la diferencia promedio entre los datos medidos en terreno (x) y los datos proporcionados por los modelos (x_i). Se considera un valor absoluto para el resultado de EM . N corresponde a la cantidad total de datos considerados dentro del análisis.

3.4.1.2. Estimación del potencial de energía solar

Debido a que los datos proporcionados por la estación meteorológica y el EES corresponden a radiación en plano horizontal, éste fue ajustado para obtener la radiación incidente considerando un ángulo de inclinación que permite optimizar la obtención de energía anual del sistema fotovoltaico. Según White y Lehman (2013), se recomienda

ampliamente que en el caso de módulos estacionarios o fijos, estos se instalen con un ángulo de inclinación igual o cercano a la latitud (φ) del lugar donde se esté trabajando. De esta manera el ángulo de inclinación se incorpora en la siguiente ecuación:

$$I_i = I(\theta_z) \cdot \cos(\theta)$$

Ecuación 6.

En donde $I(\theta_z)$ representa la radiación total cuando el ángulo cenital es 0° (perpendicular a la tierra) y (θ) corresponde al ángulo de inclinación al cual se desea conocer el valor de radiación. Por lo tanto, se utilizaron los datos recolectados del EES para obtener un año completo (8760 valores en total). Debido a que el EES cuenta con registros de 10 años de GHI se utilizó el promedio de los 10 años. Para lograr obtener una aproximación de la cuantificación de energía solar potencial a obtener se utilizó la ecuación descrita en Neamt y Chiver (2013) la cual se basa en las condiciones estándar de operación de los módulos fotovoltaicos (STC). Tal fórmula queda como:

$$P = P_m \cdot \frac{I_i}{I_{STC}} \cdot \left\{ 1 - \lambda \cdot \left[T_a + \frac{I_i}{0,8} \cdot (NOCT - 20) - T_{STC} \right] \right\}$$

Ecuación 7.

En donde P_m es la máxima potencia del módulo fotovoltaico, $NOCT$ es la temperatura nominal de operación del módulo fotovoltaico, la cual típicamente para un módulo cristalino presenta un valor cercano a $45 \pm 2,5$ °C, I_i corresponde a la radiación incidente en $W m^{-2}$, T_a corresponde a la temperatura ambiente en grados Celsius y λ es el coeficiente de variación del punto de máxima potencia con la temperatura, el cual varía entre $-0,4\%/^{\circ}C$ y $0,5\%/^{\circ}C$. La Ecuación 7 corresponde a un método simplificado para la estimación de potencia a generar que se basa en los parámetros internos de los módulos fotovoltaicos ($NOCT$, T_{STC} , P_m y λ) con los que se esté trabajando. Para esto, previamente se seleccionaron dos módulos fotovoltaicos planos que estuvieran disponibles en el mercado actual. Debido a que la ecuación depende de la radiación solar incidente y de la temperatura ambiente, puede ser aplicada para cada hora del año, variando estos dos parámetros. Por otro lado, se debe considerar que la potencia de salida obtenida es afectada por pérdidas provenientes del ángulo de reflectancia que afecta en alrededor de $2 - 3$ % y pérdidas asociadas al equipo eléctrico (cables, inversores) que en general afectan en un 15% (Neamt and Chiver, 2013).

Finalmente como indicador se obtuvo el factor de planta de las unidades de generación, el cual corresponde a la relación entre lo que se estima produciría una unidad de generación durante un periodo determinado (en este caso un año) y lo que sería capaz de producir bajo condiciones óptimas (potencia nominal). La ecuación para estimar el factor de planta queda como:

$$F_p = \frac{E_{\text{anual}}}{8760 (h) \cdot P_n}$$

Ecuación 8.

En donde F_p corresponde al factor de planta de las unidades de generación, E_{anual} corresponde a la energía que se estima producirá la/las unidades de generación durante un año (en Wh) y P_n corresponde a la potencia nominal del equipo.

3.4.1.3. Estimación del potencial de energía eólica

En base a los datos proporcionados por el EEE se analizó la cantidad de energía que se puede generar en base a este recurso. Para ello, se utilizó en primer lugar una expresión para estimar la densidad de potencia la cual se presenta en la Ecuación 9.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) dv$$

Ecuación 9.

En donde P corresponde a la potencia teórica que se puede aprovechar (W m^{-2}), v es la velocidad de viento en m s^{-1} , ρ es la densidad del aire expresada en kg m^{-3} y $f(v)$ es la función de distribución de probabilidad para una velocidad v (Akdag y Dinler, 2009). En la literatura variadas funciones de distribución han sido aplicadas para calcular la distribución de velocidad de viento, siendo en general la distribución de Weibull la que otorga mejores resultados, en comparación a otras funciones utilizadas tales como la distribución de Rayleigh y Lognormal (Idhumathy et al., 2014). La distribución de Weibull depende de los parámetros de forma (k) y escala (c) los cuales son obtenidos en base al comportamiento de los datos de entrada. En la Ecuación 10 se describe la función de distribución de Weibull a partir de la cual se puede conocer la probabilidad de ocurrencia de cada valor o intervalo de valores de velocidad (m s^{-1}) para un período determinado.

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

Ecuación 10.

En donde v corresponde a la velocidad de viento en m s^{-1} . En la Figura 18 se presenta la curva de distribución de probabilidad de Weibull asociada a distintos valores de los parámetros k y c .

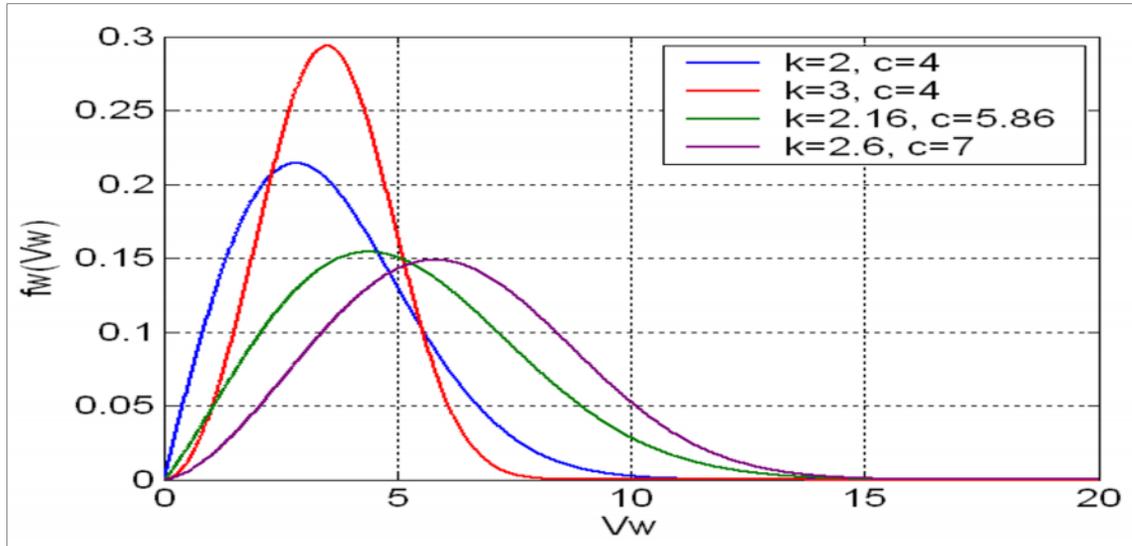


Figura 18. Función de distribución de probabilidad de Weibull con diferentes parámetros.
Fuente: Li and Haskew, 2009.

En base a las ecuaciones 9 y 10 se puede obtener una aproximación general del potencial de viento de un determinado lugar, solamente disponiendo de datos de velocidad de viento. Debido a que los datos son obtenidos a una determinada altura (en el caso de la estación meteorológica, ésta proporciona datos a 2,5 metros de altura), es necesario extrapolar los valores de viento a la altura a la cual se desea estimar el potencial eólico. Es recomendado que la altura utilizada sea a la cual va a estar ubicado el rotor. Para realizar dicha extrapolación se utilizó la Ley exponencial de Hellman que se presenta en la Ecuación 11 (Masri et al., 2012).

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha$$

Ecuación 11.

En donde v_2 corresponde a la velocidad de viento a una altura h_2 (que es a la cual se desea conocer su velocidad) en $m\ s^{-1}$, v_1 corresponde a la velocidad de viento a la altura h_1 que es a la cual se obtuvieron los datos (en el caso de la estación a 2,5 m) y α corresponde al coeficiente de fricción exponencial de Hellman, que depende del paisaje en el cual se desarrolle el trabajo. En el Cuadro 8 se presentan los valores de α para distintos tipos de paisajes.

Cuadro 8. Valores del coeficiente de fricción para una variedad de paisajes.

Tipo de paisaje	Coefficiente de fricción (α)
Lagos, océanos y terrenos suaves	0,10
Pastizales	0,15
Cultivos altos, y matorrales	0,20
Tierras forestadas	0,25

(continua)

Cuadro 8 (continuación)

Tipo de paisaje	Coefficiente de fricción (α)
pequeños pueblos con algunos árboles	0,30
Áreas urbanas con construcciones de altura	0,40

Fuente: Elaboración propia en base a Masri et al., 2012.

Al igual que en el caso de la estimación del potencial solar, se requiere trabajar con parámetros característicos de un aerogenerador. En este caso se utilizaron tres aerogeneradores de eje horizontal de distintos proveedores. Cada aerogenerador posee su propia curva de carga, la cual indica la potencia de salida del aerogenerador según distintos valores de viento. Esta curva de carga es posible superponerse a la curva de distribución de probabilidades de viento obteniendo una mejor estimación de la potencia aprovechable por unidad de generación (Figura 19). Obteniendo la integral que queda entre ambas curvas (zona achurada) se es posible obtener la generación total para el período de estudio de manera directa.

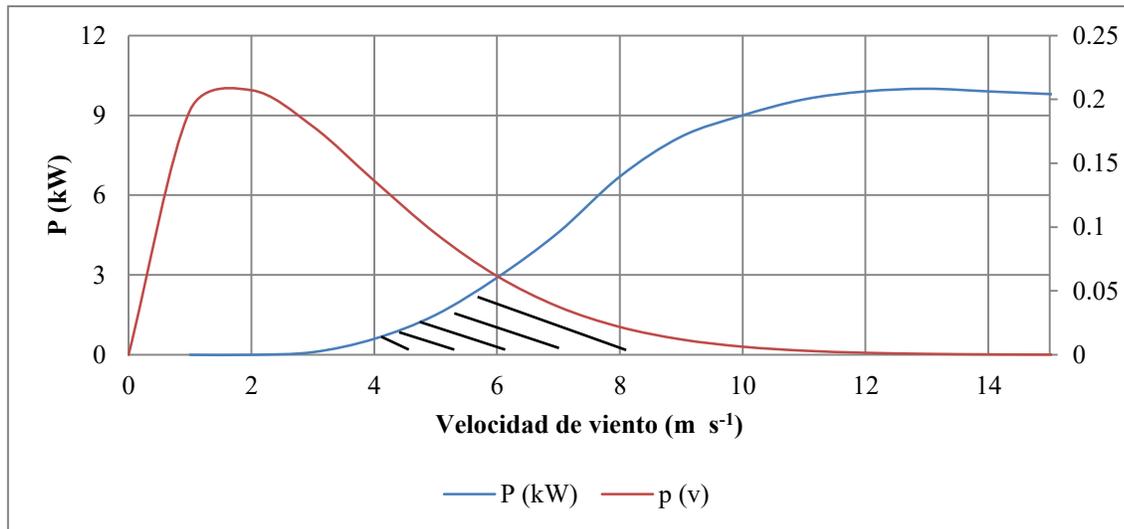


Figura 19. Ejemplo de superposición de la curva de distribución de probabilidad de viento y la curva de carga de un aerogenerador de 10 kW de potencia nominal.

Por otro lado, a partir de los datos horarios de viento y la curva de carga de los aerogeneradores, se simuló la potencia de salida para cada dato de viento para un año completo y su factor de planta. Se utilizó la misma fórmula planteada para el sistema fotovoltaico (Ecuación), utilizando la potencia nominal (P_n) de cada uno de los aerogeneradores propuestos. De manera complementaria se utilizaron los datos de dirección de viento con el fin de identificar la(s) direcciones predominantes y el comportamiento de estas durante el año. Para esto se diseñó una rosa de los vientos con los datos provenientes del EEE y la estación meteorológica. Cabe destacar que tal información se utilizó principalmente para conocer la posición en la cual se dispondrán las unidades de generación eólica.

3.4.1.4. Balance de energía

Al cuantificarse la producción de energía por unidad de generación y en base a la información de demanda eléctrica, se realizó un balance de energía con el objetivo de dimensionar la cantidad de unidades de generación fotovoltaica y eólica necesarios para satisfacer la demanda eléctrica. Debido a que en el presente estudio, se considera la posibilidad de diseñar una micro-red conectada a la red de distribución, ésta característica permite que se pueda considerar una alta penetración de energía proveniente de unidades de generación renovable (Zhichun et al., 2011) para el abastecimiento de la demanda eléctrica. Cabe mencionar que en ese análisis no se integraron las pérdidas asociadas a la eficiencia de los equipos de electrónica de potencia, tales como inversores y reguladores de voltaje, entre otros (las cuales según Neamt y Chiver (2013) son menos del 15% del sistema completo), debido a que esto conlleva a un análisis de estudio más acabado. Además, tampoco se consideraron las pérdidas asociadas a la distribución de la energía, ya que depende en gran parte de la ingeniería de diseño del sistema.

Se consideraron tres diferentes niveles de penetración (NP) de energía renovable (30,50 y 100 %). El NP de energía renovable tiene relación a la cantidad de energía requerida (demanda eléctrica) que es alimentada mediante fuentes de origen renovable, por lo que un 100 % señala que la totalidad del consumo es alimentado mediante las unidades de generación renovable. En los otros casos, se considera sistemas que operen con otras fuentes de generación tal como diésel, o apoyado por la energía proveniente de la red eléctrica. Además se estimó la cantidad de días que pueden ser abastecidos en su totalidad en relación a un año completo. Para cada uno de los NP se definieron tres diferentes configuraciones para para satisfacer la demanda señalada, los cuales corresponden a generación 100 % de abastecimiento solar en el primer caso, 100 % de abastecimiento eólico y 50 % de ambas tecnologías como última configuración.

Posteriormente en base a información técnica de los módulos considerados e información bibliográfica de respaldo, se determinó un área mínima a utilizar por módulo y capacidad instalada (W o kW). Después de esto, se dimensionó el área a utilizar por cada una de las configuraciones elegidas para satisfacer la demanda, con el objetivo de evaluar su impacto en el territorio y el espacio físico mínimo requerido.

3.4.2 Análisis de restricciones territoriales

Luego a la determinación del potencial capaz a ser generado, se analizaron las principales restricciones espaciales del entorno físico, incorporando principalmente aspectos técnicos y propios del territorio⁹ que tuvieran incidencia en la implementación de las unidades de generación. La finalidad de esta etapa fue la de determinar la existencia de una superficie mínima para la implementación de las unidades de generación, y las zonas tentativas en la

⁹ El territorio se define como una construcción social abordada en un espacio geográfico determinado, basada en diversos factores (económicos, sociales, culturales y geográficos) y sus interrelaciones. En este estudio se consideró una conceptualización más técnica ligada a la implementación de las unidades de generación.

cuales se podría implementar dicho sistema. Se identificaron los siguientes criterios relevantes:

- **Técnicos:** Dependientes de las características y restricciones de operación de las unidades de generación, tales como tipo de terreno adecuado, distancia máxima a infraestructuras, sectores restringidos, zonas con potencial disponible, distancia a caminos, entre otros.
- **Sociales:** Basados en las restricciones del uso de terrenos identificados o definidos por los residentes, cercanía a sectores culturales o sociales. Cabe destacar que se utilizó información proveniente de talleres participativos¹⁰ e información derivada de las mismas encuestas.

Tales variables fueron seleccionadas en base a la literatura revisada vinculada a la inserción de proyectos fotovoltaicos y eólicos, y la información capaz de obtener de manera pública a nivel nacional (Hott y Santini, 2012; NREL, 2012; Rikalovic et al., 2014). A continuación se describe en detalle cada uno de los criterios.

Criterios técnicos

- **Condiciones del terreno:** En base a Ministerio de Energía –GIZ (2014), se consideró el criterio de dejar fuera a los terrenos que presenten una pendiente sobre 15°, ya que dichas zonas dificultan la implementación de las unidades de generación y/o sus cimientos, afectando principalmente a las unidades de generación eólica. Este criterio se considera como condicionante.
- **Distancia a obstáculos presentes en el entorno natural:** Se estableció una distancia de 60 metros lineales de los objetos tal cómo árboles y/o matorrales que puedan causar turbulencia afectando el recurso eólico y/o efecto de sombra, afectando a los sistemas FV. Se estableció dicha distancia al considerar obstáculos de 15 metros de alto (árboles y/o estructuras), por lo que se estableció una distancia mínima de cuatro veces la altura de estos obstáculos para disminuir el efecto de turbulencia (Osiris Technologies, 2016). Los obstáculos fueron identificados mediante fotointerpretación (visualización de una imagen en color real) y previas evaluaciones en terreno. Este criterio se considera condicionante.
- **Distancia a caminos:** Se estableció una distancia de 20 metros lineales a los caminos o zonas transitadas, debido al impacto acústico generado por los equipos. Además, considerando principalmente el caso de los módulos fotovoltaicos, se tomó en cuenta dicha distancia debido a que los caminos interiores son de tierra y liberan una gran cantidad de polvo al momento de transitar vehículos. Este criterio se considera condicionante.
- **Sectores restringidos:** Se identifican como sectores restringidos zonas de vega, lechos de río, bordes costeros, sectores inundables, los que se consideran como

¹⁰ Se recogió información proveniente de talleres participativos ejecutados en la comunidad de estudio, generados dentro del marco del proyecto FONDEF IDeA “Diseño e Implementación de un prototipo experimental de Micro-redes para comunidades Mapuche”.

áreas en las que no pueden ser implementadas las tecnologías propuestas.. Este criterio se considera como condicionante.

- Potencial disponible de recurso renovable: Debido a que se dispone de la información espacial proveniente del EEE y el EES, se utilizaron estos mapas para discriminar las zonas con mayor potencial dentro del área de estudio. Se menciona que el recurso eólico es el que presenta mayor variabilidad dentro de una zona, por lo que es importante considerarlo. Este criterio permite evaluar la disponibilidad y variación del recurso en el espacio, determinando lugares en los cuales se puede obtener mayor energía.

Criterios sociales:

- Lugares de uso común: Se identificaron lugares en los cuales se practican de manera regular alguna actividad realizada por las personas de la comunidad, y en las cuales podría tener un uso incompatible la implementación de un sistema de generación de energía. Se identificaron las zonas donde realizan actividades recreativas, zona de pastoreo comunitario y la zona de recolección de camarones). Este criterio se considera condicionante en base a la información obtenida por los residentes de la comunidad.
- Lugares de interés cultural: Se identificaron zonas de interés cultural dentro de la comunidad, las que pueden estar vinculadas a cultos o actividades de carácter religioso o espiritual, caso mayormente presente en comunidades indígenas. Este criterio se considera condicionante.
- Zonas con otros usos: Se identificaron las áreas en las cuales se desempeña un uso productivo incompatible con la implementación de las unidades de generación. Este criterio se considera como criterio condicional.
- Distancia a infraestructuras: Se definió una distancia de 50 metros lineales desde la ubicación de las viviendas y otras infraestructuras que puedan causar efecto de turbulencia a los flujos de viento, o por otro lado verse afectadas por el ruido producto de la operación de los equipos (Osiris Technologies, 2016). Este criterio se considera condicional.

Dependiendo de las características locales del área de estudio, algunos criterios son considerados como condicionantes (determinación de zonas restringidas para la implementación de las unidades de generación), mientras que otros proporcionan información sobre zonas que pueden ser mejores que otras bajo ciertos parámetros, como por ejemplo la disponibilidad de recurso eólico, el cual varía de un lugar a otro, determinando lugares en los cuales se pueda generar mayor energía.

Cabe mencionar que la determinación de las variables que se incorporan es dependiente de las características de cada territorio en particular, por lo que los criterios anteriores son de carácter general que pueden ser aplicados a la mayoría de los casos en zonas rurales. Además, las restricciones técnicas dependen del tipo de tecnología que se utilice, en este caso se consideraron los criterios para la implementación de unidades de generación eólica y fotovoltaica. Este trabajo fue llevado a cabo mediante la ayuda del software ArcGIS

versión 10 (SIG) con el objetivo de realizar un análisis espacial para cada una de las variables identificadas.

Para el análisis espacial se utilizó la información indicada en el Cuadro, en el que se muestran distintos productos (vectoriales y rasters) con sus respectivas fuentes. Cabe mencionar que los productos raster corresponden a matrices compuestas por una grilla de píxeles (x, y) que poseen una resolución espacial determinada, y cada píxel un valor numérico. Por otro lado, los productos vectoriales corresponden a conjuntos de puntos, líneas o polígonos desplegados dentro de un plano vectorial. Todos los productos están georreferenciados en base al Datum WGS84.

Cuadro 9. Información espacial utilizada en la metodología.

Producto	Fuente	Resolución	Formato
Imagen color real	Google Earth (CNES / Astrium)	< 15 m	
Modelo digital de elevación (MDE)	ASTER GDEM	30 m	Raster
GHI	Explorador de Energía Solar	1 Km	
Velocidad de viento	Explorador de Energía Eólica	1 Km	
Masas de agua			
Red hidrográfica	Biblioteca del Congreso Nacional	-	Vectorial
Red vial			

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Con la ayuda de este tipo de cartografías e imágenes, el uso de herramientas de análisis espacial y la información recopilada en terreno se generaron nuevos mapas acorde a los criterios señalados. Las herramientas de análisis espacial por su parte permitieron realizar operaciones básicas tales como transposición entre capas, reclasificaciones, análisis de distancia, entre otros procesos. La metodología planteada se basa en lo que se conoce como análisis multicriterio el cual es utilizado principalmente para discriminar y/o determinar sitios de interés dentro de un espacio en base a un objetivo predeterminado (Hill et al., 2005). Este tipo de análisis puede incluir complejos arreglos de factores económicos, sociales, técnicos, políticos y ambientales dependiendo de la información espacial disponible (en capas) y los objetivos que se requieran cumplir. En este caso, la presente metodología se aplica para determinar zonas de más aptas para la implementación de las unidades de generación renovable considerando variables técnicas/sociales (Rikalovic et al., 2014). De esta manera, al aplicar los criterios que son de carácter condicionante se generó una capa señalada como área restringida. Posteriormente, con las capas de disponibilidad del recurso eólico y solar se permitió realizar una discriminación de las zonas que cumplen con los criterios que se establecieron. En la Figura 20 se presenta un esquema del análisis multicriterio a modo de referencia.

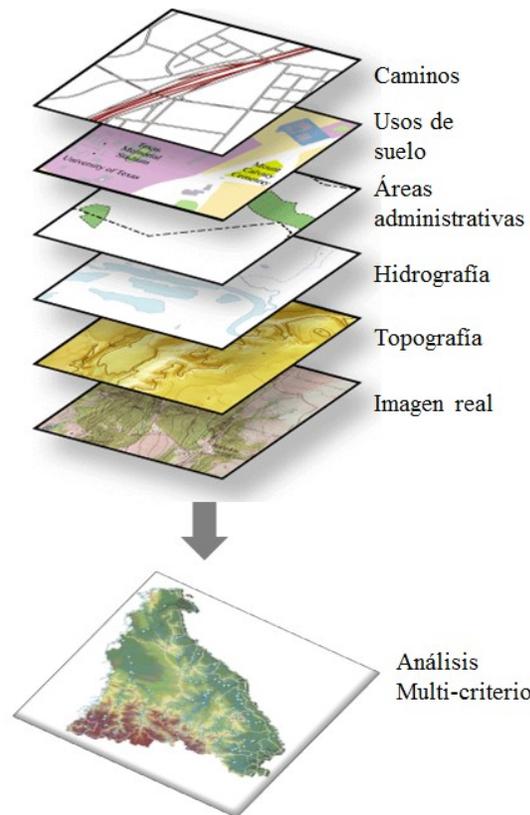


Figura 20. Esquema del análisis multicriterio. Fuente: Elaboración propia, 2015.

La información obtenida en terreno posee un papel fundamental, ya que permite discriminar aspectos que no están registrados en la literatura y que son propios de un área determinada (por ejemplo, la ubicación de las viviendas habitadas, la determinación de áreas inundables, áreas de interés cultural/social y/o zonas que puedan presentar algún conflicto. Como se menciona anteriormente, se utilizó información recopilada de talleres participativos con la comunidad para identificar las viviendas y predios que pertenecen a la comunidad, áreas de interés cultural/social, áreas que presentasen alguna situación física/ambiental especial (zonas inundables, de conservación, de pastoreo, etc.) y otros aspectos que los mismos residentes considerasen necesarios. Una vez identificadas las capas de entrada, éstas fueron sobrepuestas y analizadas en su conjunto, determinando zonas adecuadas y/o zonas de restricción. Una vez identificadas las zonas adecuadas para la implementación de las unidades de generación, se seleccionó la que presentase una mayor superficie y ésta fue analizada en función del área requerida por las configuraciones de las unidades de generación seleccionadas anteriormente.

3.5. Discusión

La presente metodología integra diferentes análisis para la obtención resultados más precisos de estimación del potencial, considerando la limitación en el acceso a la

información y la ambigüedad de ella, condición que es propia de las zonas rurales dentro de nuestro país.

En cuanto al dimensionamiento de la demanda eléctrica, el trabajo propuesto se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva de estudios similares que utilizan metodologías *bottom-up* para generar información relativa al comportamiento de la demanda de energía, el cual resulta adecuado para este tipo de trabajos, en los cuales se aborda una cantidad relativamente pequeña de cargas (viviendas). En relación a esto, el hecho de trabajar en base a modelos participativos permite obtener información de los miembros de un sector o comunidad, mediante mecanismos no invasivos y adecuados para recoger datos de terreno. Además, la posibilidad de trabajar en sistemas conectados a la red, permite disponer de información de respaldo sobre consumo mensual, la cual ayuda a validar el modelo generado.

Por otro lado, la disponibilidad de modelos tales como el EEE y EES permite obtener una aproximación a la cantidad de recurso disponible en una determinada zona. Sumado a esto, el disponer de una estación meteorológica permite validar la información proporcionada por el modelo. También, el uso de información espacial, permite entregar una aproximación que integre variables asociadas al contexto de cada territorio, considerando el hecho de las distintas realidades entre cada región o área. Se señala a su vez, que la información utilizada posee una resolución determinada y un error asociado a ella que hay tenerlo presente al momento de analizar los resultados generados. La estimación de potencial al no integrar pérdidas asociadas a otros aspectos más técnicos, se tendería a sobreestimar los resultados de potencia generados por lo que es necesario considerar este aspecto como un trabajo a futuro a considerar en la etapa de ingeniería de diseño.

Por último se destaca que al disponer de información de los residentes de una comunidad, esto permite utilizar información más precisa, integrando aspectos que no están registrados en la literatura. Este último aspecto posee una gran relevancia en el contexto de comunidades rurales, de las que en general se posee escasez de información, y en otros casos desactualizada, caso muy frecuente en las municipalidades de estas zonas, que no presentan los recursos humanos necesarios para levantar información de toda una población.

A continuación se presentan los resultados y análisis de la información generada en base a la metodología propuesta previamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Demanda eléctrica

4.1.1. Recolección de información primaria

Primeramente, se recopiló la información pública a través de la Municipalidad de Nueva Imperial y la Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI). A través de distintos informes proporcionados por ambas entidades, se logró identificar algunos aspectos generales de la comunidad, tales como el número de habitantes, cantidad de familias indígenas, principales actividades, delimitación administrativa de la comunidad entre otras características claves.

Posteriormente con ayuda de organismos municipales, se convocó una reunión para presentar el proyecto a implementar en la comunidad. A dicha reunión asistieron alrededor de 25 personas. Una vez, ejecutada la reunión se conversó con algunas de las personas, identificando a los actores relevantes. Dentro de estos se mencionan:

- Lonko de la comunidad de Huanaco Huenchun
- Presidente de la Junta de vecinos de Imperialito
- Presidente de la Junta de vecinos de Puente Fierro
- Dos personas más que a pesar de no disponer de un cargo, fueron considerados como líderes informales, debido a su participación en las actividades comunitarias y trabajo colectivo con las demás personas.

Se reconoció un total de 68 viviendas residenciales pertenecientes a la comunidad de Huanacho Huenchun, abarcando a un total de 198 personas aproximadamente. En este caso a cada una de las personas encuestadas se les hizo firmar un formulario en el cual se declara la participación voluntaria a este estudio (Anexo 1). A pesar de que en cinco viviendas no se logró obtener información directa de los residentes, se obtuvo información a partir de vecinos que en la mayoría de los casos correspondían a familiares directos. De estas viviendas, 40 pertenecen al sector de Imperialito y 28 a Puente Fierro. Por otro lado, se identificaron las principales actividades productivas que posee la comunidad. Se menciona la agricultura menor (pequeñas ventas de productos agrícolas), agricultura de subsistencia, crianza de animales (bovinos, ovinos y gallinas principalmente). Se destaca que en general, las personas de edad avanzada son las que desarrollan este tipo de actividades, mientras que la población más joven (menor a 30 años) posee trabajo fuera de la comunidad, ya sea en Carahue, Nueva Imperial o Temuco principalmente, en donde poseen trabajos con horario de jornada completa.

La mayoría de las viviendas (97 %) posee abastecimiento eléctrico proporcionado por la empresa distribuidora Frontel, pero sólo el 92 % posee acceso de forma regulada. Ocho

viviendas de la comunidad están “colgadas” al sistema eléctrico, producto del alto costo que significa para ellos contar con este recurso. Las viviendas que poseen suministro de manera regulada pagan alrededor de 30 mil pesos cada dos meses por la energía utilizada, lo que según los mismos residentes les es difícil costear y en reiteradas ocasiones se atrasan en el pago de la cuenta, por lo que la empresa distribuidora debe interrumpir el suministro hasta que se pague la deuda, y además cuando ocurre dicha situación, los residentes deben costear la reposición del servicio.

Por otra parte se analizó la tenencia y uso de equipos eléctricos, por lo que en base a la encuesta individual se identificaron los equipos que se utilizan dentro de las viviendas de la comunidad. En el Cuadro 10 se presenta el grupo de equipos eléctricos que fueron identificados.

Cuadro 10. Lista de equipos eléctricos identificados en la comunidad de Huanaco Huenchun.

Equipos eléctricos	
Iluminaria	Refrigerador
Secador Cabello	Horno eléctrico
Congelador	Hervidor
Computador	TV
Equipos de cocina	Plancha
DVD – TV Digital	Lavadora
Motobomba	Radio
Estufa eléctrica	Microondas
Ducha eléctrica	

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la Figura 21 se presenta la cantidad total de equipos eléctricos que existen en las casas encuestadas. La mayor cantidad de equipos corresponde a iluminaria (que incluye iluminación eficiente, halógena e incandescente), que depende directamente de las habitaciones o secciones de cada vivienda. En cada residencia se presenta un promedio de siete iluminarias. Por otro lado, el refrigerador, televisor (TV) y lavadora corresponden a los equipos básicos que poseen las viviendas.

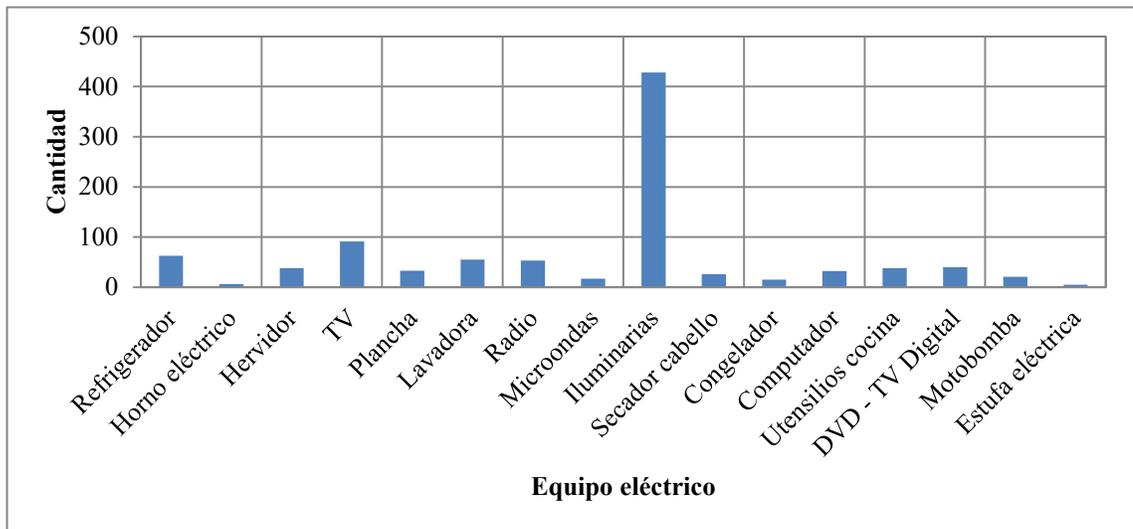


Figura 21. Tenencia de equipos eléctricos en la comunidad Huanaco Huenchun. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Finalmente, dentro de la información recogida a nivel de vivienda, se obtuvo que un 55,6 % de las personas posee entre 18 y 60 años (considerada en este estudio como mano de obra potencial), mientras que un 28,3 % corresponde a personas mayores de edad (≥ 60 años) y el resto (19,2 %) es compuesto por jóvenes (≤ 18 años). En cuanto a esto, se destaca la mayor presencia de adultos y adultos mayores en comparación a las demás clases etarias, lo que se condice con el proceso migratorio de personas jóvenes a núcleos urbanos enfatizadas en conseguir trabajo y mayores oportunidades de educación (Pezo, 2010). Por otro lado, se destaca el hecho que la mayor parte de las personas sobre 18 años trabaja en la agricultura familiar o a pequeña escala (31,9 %), siendo su principal sustento económico la venta de cosecha y animales.

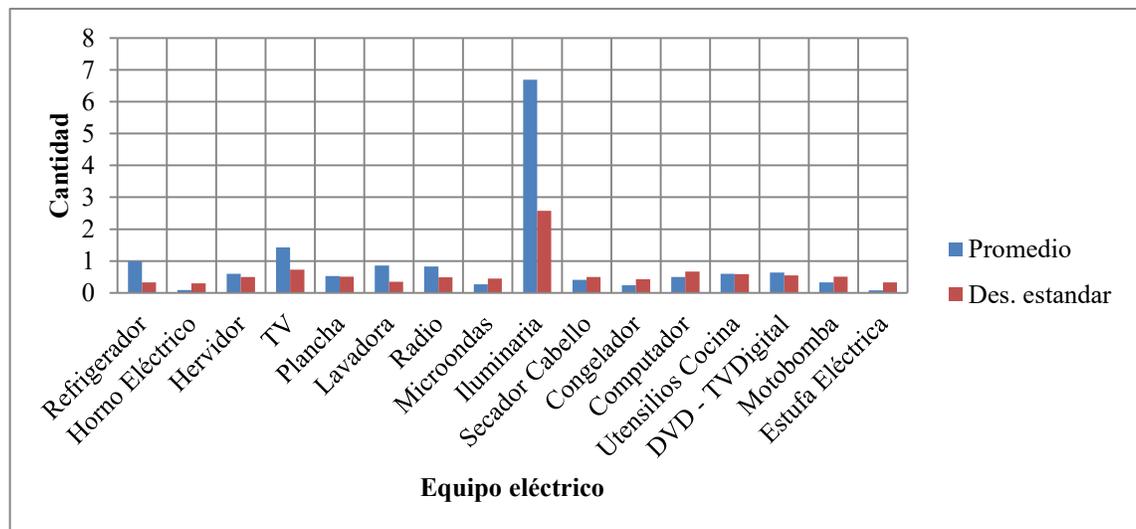


Figura 22. Cantidad de equipos eléctricos promedios por vivienda. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la Figura 22 se presenta la cantidad promedio de equipos eléctricos que existen por vivienda al interior de la comunidad Huanaco Huenchun. Además, se muestra la desviación estándar de la cantidad de cada equipo. Como se puede apreciar, la mayoría de las viviendas posee entre 0 – 1 de cada equipo, siendo el único caso excepcional las iluminarias, las cuales variaban en una gran cantidad (desviación estándar ≈ 3), además se destaca el hecho de que las iluminarias identificadas eran de varios tipos (de bajo consumo, fluorescentes e incandescentes), lo que afecta su consumo. Finalmente es necesario señalar que no se consideró la cuantificación de otros equipos eléctricos que presentasen un menor uso (no periódico o inconstante) como herramientas de trabajo, o equipos de poco consumo pequeño, así como linternas recargables.

4.1.2. Generación de la base de datos

4.1.2.1. Determinación de clases

Basándose en los atributos determinados en el Cuadro 2 se utilizó un método de mapas auto-organizados (SOM) para realizar la clasificación descrita en la sección 3.2.1. En total, 8 atributos que corresponden a las neuronas que utiliza el módulo. Se ingresó la información derivada de 64 viviendas de la comunidad, faltando la información de 4 residencias, a las cuales no se les pudo aplicar la encuesta individual debido a que no se logró comunicar con los jefes de hogar de dichas viviendas. La información fue ingresada mediante un archivo de extensión “.txt” al módulo elaborado en Matlab. Para reconocer a cada vivienda, se utilizó un nombre breve (8 caracteres) como identificador.

Para la visualización en SOM se utilizó una matriz U de dos dimensiones. Se generó una capa de salida provista de 9 neuronas a través de una grilla de 2 x 2. En el Cuadro 11 se presentan los parámetros que se utilizaron, los cuales son estándar. Una vez escogidos los parámetros (estándar) se realizó la simulación, originando como resultado la capa de salida presentada en la Figura 23.

Cuadro 11. Parámetros de SOM.

Inicialización	Linear
Tamaño del mapa	Matriz de 2 x 2
Función de vecindad	Función Gaussiana
Forma del mapa	Hexagonal

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se puede apreciar en la Figura 23, se formaron cuatro clases. En cada una de las esquinas de la capa se presenta los conjuntos de viviendas que corresponden a cada clase. Los colores de cada hexágono representa la similitud entre una clase y otra, siendo los colores más claros (celeste) los que presentan mayores distancias (disimilitud) entre una clase y otra. La escala representada en la paleta de colores, muestra distancias con valores adimensionales. En el Cuadro 25 (Apéndice) se muestra la clasificación realizada.

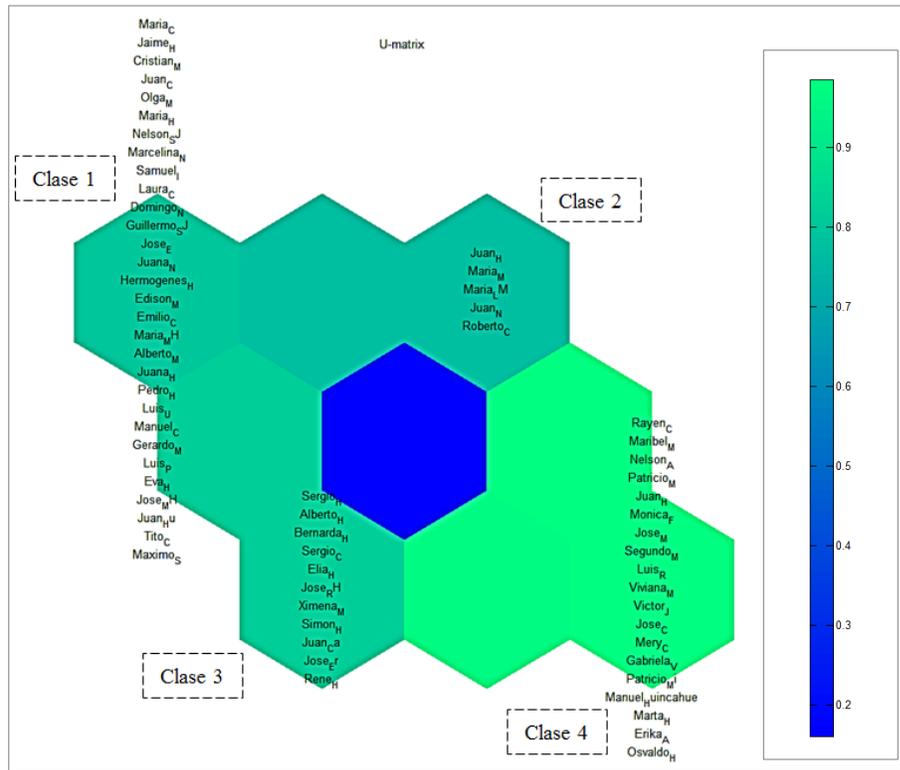


Figura 23. Capa de salida del módulo SOM. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Se clasificó la totalidad de las viviendas ingresadas (68). Posteriormente a esto, se procedió a analizar las clases originadas, los aspectos más característicos de cada una y la similitud de las viviendas clasificadas entre sí. En el Cuadro 12 se presentan los principales aspectos reconocidos por cada uno de los campos utilizados.

Cuadro 12. Aspectos relevantes identificados en base a la clasificación.

Clase	N° de viviendas clasificadas	Porcentaje relativo	Aspectos relevantes		
			Miembros	Rango etario	Actividades
1	33	48,5 %	1 a 2	Incorpora sólo adultos y personas mayores	Principalmente agricultura. No poseen trabajo de jornada completa.
2	11	16,1 %	3	Sólo adultos y personas mayores	En general parte de los miembros desarrollan la agricultura y otros poseen trabajo de jornada completa.

(continúa)

Cuadro 12 (continuación)

Clase	N° de viviendas clasificadas	Porcentaje relativo	Aspectos relevantes		
			Miembros	Rango etario	Actividades
3	5	7,3 %	2 a 3	Pareja de adultos	Ama de casa y agricultor. Tercera persona jubilada.
4	19	27,9 %	≥ 5	Familias numerosas. Jóvenes y adultos principalmente	Desarrollo de todas las actividades descritas

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se puede apreciar, la mayoría de las viviendas se clasifican dentro de la Clase 1 (48,5 %), la cual agrupa a las viviendas con sólo uno o dos miembros que corresponden a adultos y adultos mayores, mientras que la Clase 3 es la que presenta una menor cobertura (7,3 %), correspondiendo a viviendas compuestas por parejas de adultos. Se analizaron parte de las viviendas clasificadas, corroborando que sus características internas coincidieran con los aspectos relevantes identificados en cada clase. El resto de las viviendas se ubican en las clases 2 (16,1 %) y 4 (27,9 %), agrupando a familias simples de 3 personas que participan en actividades vinculadas a la agricultura de subsistencia y familias numerosas que desarrollan varias actividades. El algoritmo SOM determinó una mayor cercanía entre las clases 4 - 2 y 4 - 3, por la similitud entre los atributos internos de cada clase.

Posteriormente, por cada clase determinada, se seleccionó una vivienda representativa de clase. Para esto, por cada clase se agruparon las viviendas y sus respectivos atributos, eligiéndose una vivienda que presentase valores promedio de cada clase (v_{R1} , v_{R2} , v_{R3} y v_{R4}).

4.1.2.2. Obtención de datos de potencia

Se dispuso de tres medidores inteligentes “Smart circuit 20”, los cuales fueron instalados en las viviendas representativas elegidas (Figura 24). Los medidores fueron instalados de forma satisfactoria en las cuatro viviendas, comprobando los valores proporcionados por el medidor con ayuda de un computador portátil. Una vez instalados se dispusieron por un período de mínimo de dos meses con el objetivo de tener una muestra representativa de la demanda, incorporando sus variaciones periódicas. Cabe señalar, que debido a que sólo se contaba con tres medidores, no todas las viviendas presentan mediciones para el mismo período. Por tal razón se muestreo una gran cantidad de días (59 a 145 días) con el fin de evidenciar variaciones estacionales. En el Cuadro 13 se presenta el período de medición en cada una de las v_R .

Cuadro 13. Período de medición de viviendas.

Vivienda	Periodo de medición	Fecha de inicio	Fecha de término
v_{R1}	59 días	04-Mar 2015	02-May 2015
v_{R2}	136 días	02-May 2015	15-Sept 2015
v_{R3}	145 días	01-May 2015	23-Sept 2015
v_{R4}	40 días	04-Sep 2015	14-Oct 2015

Fuente: Elaboración propia, 2015.



Figura 24. Instalación de medidores inteligentes en la comunidad de Huanaco Huenchun.
Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los medidores tienen la capacidad de almacenar datos con una autonomía de un mes aproximadamente, por lo que se procuró realizar el retiro de datos cada tres semanas para no generar problema alguno. Los medidores además de proporcionar los datos descritos anteriormente, de manera indirecta fueron capaces de entregar información sobre las fallas en el suministro y la periodicidad de ello. A continuación se presenta parte de los resultados proporcionados por los medidores de consumo para el período de estudio.

En la Figura 25 se presenta el perfil de demanda de un día cualquiera para las cuatro viviendas representativas. Como se logra apreciar, el consumo de las viviendas es relativamente bajo, no superando en promedio los 400 watts de potencia, sólo en algunos momentos alrededor de las 20:00 a 22:00 hrs donde se incrementa el consumo debido al uso de equipos de cocina, tales como hervidores y micro-ondas. Las oscilaciones presentadas en los gráficos son producto del ciclo térmico que realizan los refrigeradores durante el día, los cuales en este tipo de viviendas proporcionan el mayor consumo.

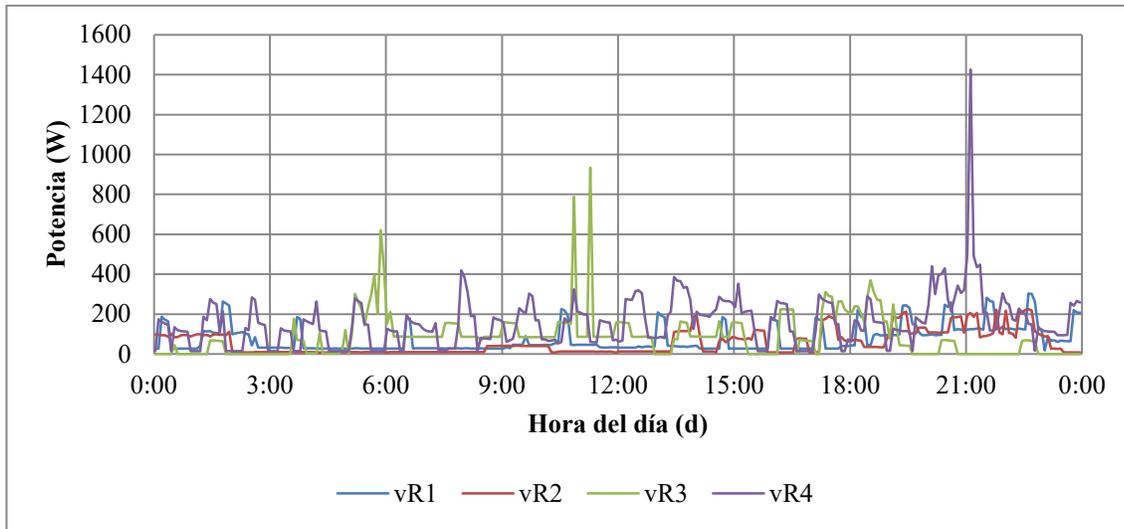


Figura 25. Perfiles de demanda de un día al azar de las viviendas representativas. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la Figura 26 se presentan los perfiles de demanda diarios promedios ajustados para días de semana y fin de semana. No se presentan grandes variaciones entre días de semana y fin de semana, salvo el caso de v_{R1} en donde se destaca un aumento del consumo en los días de semana. Lo anterior se condice con la información proporcionada por los residentes, en donde en aproximadamente un 80% de las viviendas se declaró un uso de equipos eléctricos similar entre días de semana y fin de semana. Debido a lo anterior, para los posteriores cálculos no se realizó una distinción entre días de semana y fin de semana.

En todos los casos se presenta el comportamiento típico de una vivienda residencial, en donde los máximos se concentran en horas de la tarde, cuando usualmente llegan las personas a sus viviendas posteriormente a la jornada de trabajo. En el caso de v_{R1} , se justifica la diferencia entre la demanda de un período y otro, debido a que gran parte de los miembros de la vivienda ejecuta actividades que se realizan sólo de lunes a viernes (o sábado), tal es el caso de los residentes que poseen un trabajo de jornada completa y jóvenes que asisten a un establecimiento educacional. En este caso, de los seis residentes de la vivienda, tres de ellos poseen un trabajo fuera de la comunidad que tiene una jornada similar a la descrita previamente, por lo que los días de fines de semana están más tiempo durante el día en la vivienda. Por otro lado, también se presenta un estudiante el cual permanece los días de fines de semana en la vivienda.

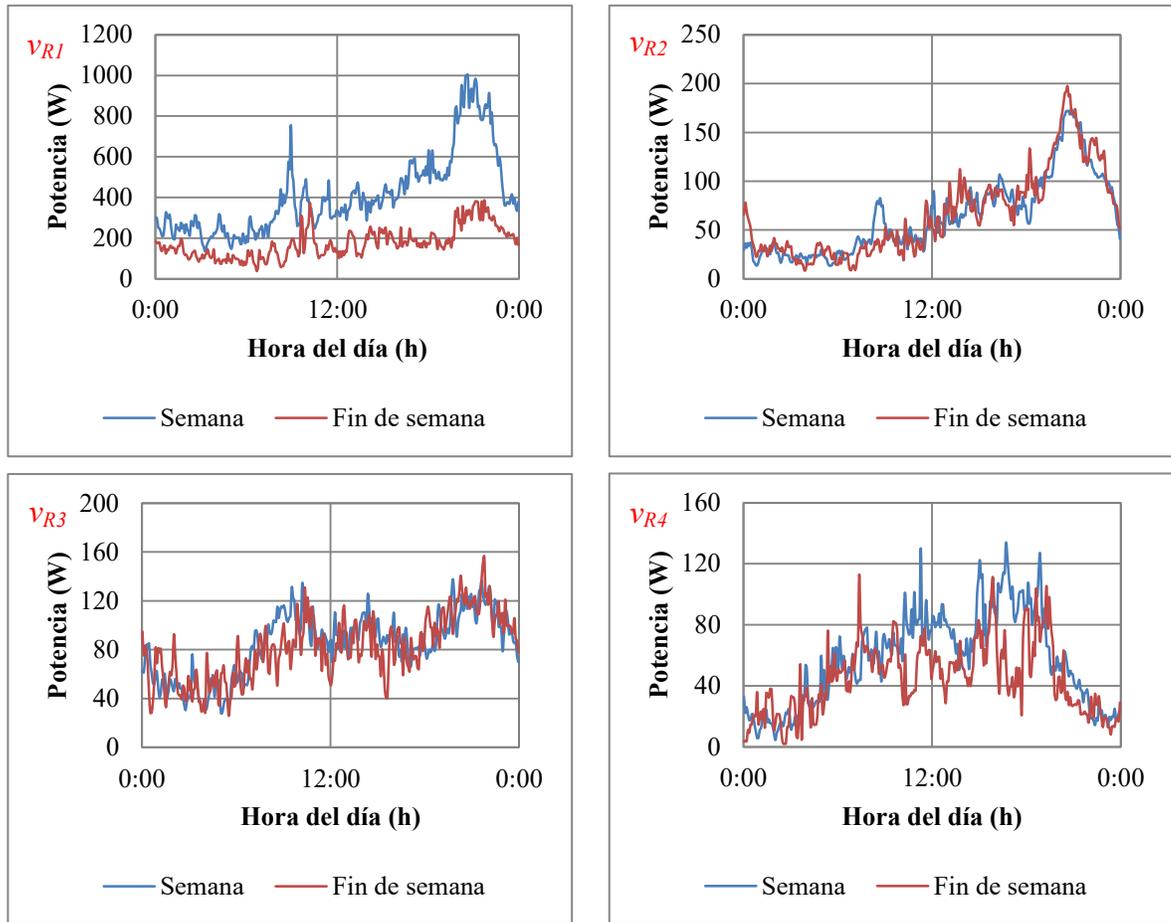


Figura 7. Perfiles de demanda de las cuatro viviendas representativas, diferenciando días de semana y fin de semana. Fuente: Elaboración propia, 2015.

4.1.3. Generación de perfiles de demanda

Para generar los perfiles de las demás viviendas, se creó el modelo de red bayesiana de dos nodos, obteniéndose para cada clase distintas probabilidades uso de equipos eléctricos. Una vez hecho esto, en base a tales probabilidades se hizo realizaciones (eventos) resultando diferentes configuraciones para cada vivienda y para cada día. Debido a que en promedio cada vivienda posee entre 0 y 1 equipos, el resultado de la red bayesiana es aplicado directamente a todos los equipos por igual, excepto para el caso de las iluminarias, en donde en promedio por cada vivienda se presentaban alrededor de 7 ampolletas. En este caso, el resultado otorgado por la red (-1,0, 1), fue ajustado de manera lineal a una escala de 1 a 7 (cantidad). En el Cuadro 14 se presentan las variables de potencia nominal y factor de uso, identificadas para cada uno de los equipos eléctricos. Para el caso de las iluminarias se utilizaron tres valores de potencia nominal distintos que corresponden al consumo promedio de ampolletas de bajo consumo, fluorescentes e incandescentes).

Cuadro 14. Variables de los equipos eléctricos identificados.

Equipo	Potencia (W)	Factor de uso (fu)	Equipo	Potencia (W)	Factor de uso (fu)
Refrigerador	195	1	Iluminarias	23	1
Horno eléctrico	1300	1	Secador de cabello	500	0.15
Hervidor	900	0.08	Congelador	180	1
TV	100	1	Computador	300	1
Plancha	1000	0.5	Utensilios de cocina	500	0.5
Lavadora	520	1	DVD - TV Digital	150	1
Radio	60	1	Motobomba	350	1
Microondas	800	0.25	Estufa eléctrica	350	1

Fuente: Elaboración propia en base a Richardson et al., 2010.

En la Figura 27 se presenta el perfil de demanda generado para una vivienda de la Clase 1. Como se puede apreciar la gráfica en color rojo corresponde al perfil de variación de demanda de la vivienda i en relación a la vivienda de referencia de la Clase 1 (v_{RI}). El perfil de demanda modelado para la vivienda i es generado como la suma del perfil de variación y el perfil de demanda base v_{RI} . Si en algún intervalo la suma directa da un valor negativo, se deja con valor 0. Esto último se refleja en la Figura 30 entre las 06:00 a 08:00 hrs, en donde el perfil de variación presenta valores negativos, lo que se debe a que el modelo estimó que dentro de ese período, en la vivienda de referencia se presenta una demanda bastante mayor que en la vivienda i . En el caso contrario, en donde el perfil de variación presenta valores altos, se debe a que la vivienda de referencia posee una demanda menor que la vivienda i .

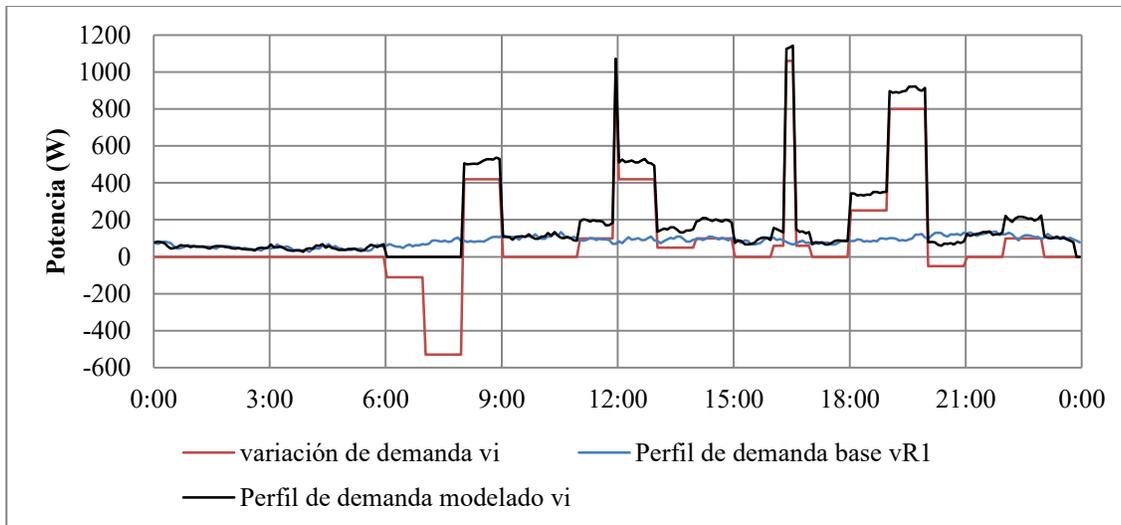


Figura 27. Perfil de demanda modelado para una vivienda de la Clase 1. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Posteriormente, al realizar este procedimiento con todas las viviendas de la comunidad, se obtuvo el perfil de demanda de la comunidad. Se menciona que para el caso de las viviendas que no pudieron ser clasificadas por falta de información, se asumió un perfil promedio (4 viviendas). En la Figura 28 se presentan tres simulaciones del perfil de la comunidad. Cada una de las simulaciones genera valores distintos, ya que para su generación se utilizan las probabilidades provenientes de la red bayesiana. El nivel de detalle que se puede apreciar, se debe a que se utilizó una alta escala temporal (5 minutos).

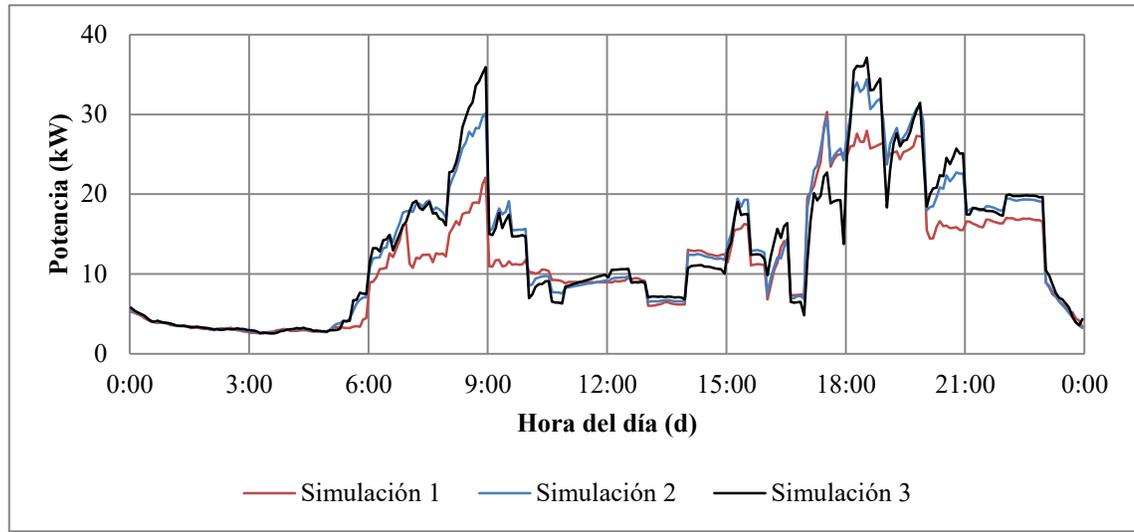


Figura 28. Perfil de las viviendas que integran la comunidad Huanaco Huenchun para un día de semana. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los perfiles simulados corresponden a la demanda de un día promedio. A pesar de que en las tres simulaciones se generaron curvas diferentes, éstas siguen un comportamiento similar, presentándose incrementos de demanda en las horas de madrugada (06:00 – 09:00 hrs) y posteriormente al atardecer (18:00 – 20:00 hrs) proporcionando una tendencia acorde a lo esperado por consumos de tipo residencial. La potencia máxima evidenciada en los periodos de peaks asciende en promedio a 35 kW y según la información de tenencia y uso de equipos eléctricos, esta alza es generada principalmente por el uso de equipos tales como hervidores de agua, radio y televisión e iluminación. Se destaca el uso del hervidor de agua, el cual es un equipo que requiere una gran cantidad de energía acotado a un breve período de tiempo. En el caso de la comunidad Huanaco Huenchun, una gran cantidad de viviendas poseen hervidores (47 % de las viviendas), por lo que el uso de estos genera un gran impacto en la demanda total, justificando las grandes alzas en los horarios peak. Por otra parte, el consumo mínimo registrado entre las 23:00 a 06:00 hrs es generado principalmente por el funcionamiento de equipos de refrigeración y sus ciclos de enfriamiento. En el Cuadro 15 se presentan algunas características del perfil de demanda modelado para la comunidad.

Cuadro 15. Características de la demanda eléctrica.

Variable	Valor
Máxima potencia (kW)	34,4
Mínima potencia (kW)	2,5
Potencia media (kW)	13,1
Factor de carga (%)	0,38
Energía (kWh)	315,6

Fuente: Elaboración propia, 2015.

La potencia media registrada es de 13,1 kW, valor muy lejano al valor de máxima y mínima potencia. El factor de carga por su parte, corresponde al cociente entre el valor de demanda media y máxima demanda en un lapso especificado. Este factor hace relación al período de tiempo que se presenta la máxima demanda en función de la demanda completa, y puede interpretarse como la cantidad promedio de electricidad demandada por una carga en 24 hrs. El valor de 38 % refleja claramente la utilización de diferentes equipos a lo largo del día, los cuales presentan consumos bastante distintos entre sí, principalmente causado por el uso de hervidores eléctricos y de otro tipo de equipos en las horas de reunión y comida (desayuno y cena principalmente).

En la Figura 29 se presenta una simulación realizada para una vivienda de la Clase 1, visualizando el perfil de demanda para un horizonte de siete días. Se aprecia una tendencia a lo largo de cada uno de los días, con una variación dada por el efecto de las probabilidades de estado de uso de los equipos eléctricos ($P_{(EE)}$).

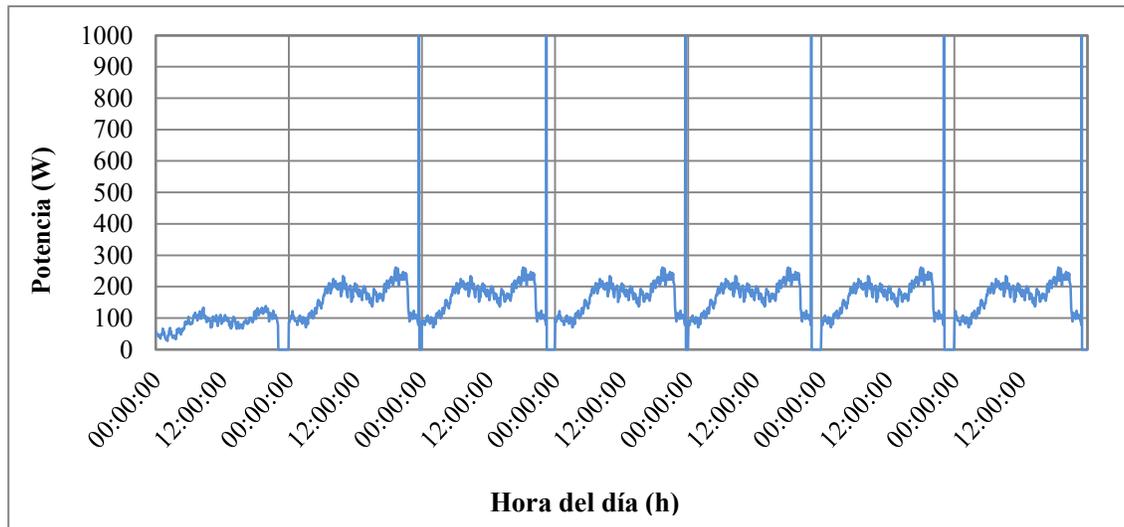


Figura 29. Simulación realizada para una vivienda de la Clase 1 considerando un horizonte de siete días. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En este caso no se destaca una diferencia mayor entre un día de semana y fin de semana, lo que se justifica en parte en la mínima variación del perfil de demanda reflejado entre unos días y otros, como también el hecho de que la mayor parte de los residentes declaro tal similitud en el uso de equipos eléctricos durante un día de fin de semana como en días de trabajo (lunes a viernes).

4.1.4. Validación del modelo

En base a la información bimestral perteneciente a la distribuidora Frontel en relación al consumo histórico de las viviendas de la comunidad. En cuanto a esta información se logró obtener de parte de la distribuidora el consumo histórico de 32 viviendas de la comunidad de Huanaco Huenchun, presentándose datos desde abril del 2009 a octubre del 2015. Debido a que no se dispone de la medición de la totalidad de las viviendas, se realizó la comparación con sólo las 32 viviendas de la comunidad. Para ello se consideró el consumo bimestral promedio (kWh) de los meses en los cuales se realizaron las mediciones (marzo a octubre del 2015) y se comparó con el consumo generado por la modelación propuesta de 32 viviendas para sesenta días. En el Cuadro 16 se presenta la comparación elaborada entre los registros medidos y modelados, y su respectivo error. Se realizó una comparación por el agregado de viviendas de cada clase.

Cuadro 16. Comparación consumo promedio para el período de Marzo a Octubre.

Consumo Promedio Marzo – Octubre				
Clase	Viviendas	Consumo registrado (kWh)	Consumo modelado (kWh)	Error (%)
Clase 1	17	2459,0	2703,4	10,0
Clase 2	4	677,0	725,3	7,1
Clase 3	3	517,0	342,1	33,8
Clase 4	8	1268,0	1645,8	29,7

Fuente: Elaboración propia, 2015.

A partir de los resultados proporcionados por el Cuadro 16, la diferencia entre los valores registrados y modelados es relativamente baja alcanzando 33,8 % de variación en el mayor de los casos. El resultado agregado de las 32 familias considera una variación baja (sólo 10 %) en cuanto a lo proporcionado por la empresa distribuidora. Cabe mencionar que el modelo al incorporar comportamientos promedios de demanda, no integra eventos puntuales que puedan poseer relación con algún aumento o disminución de la demanda.

4.1.5. Estimación de la demanda total de la comunidad

En base a la información recopilada por la encuesta general se identificaron las distintas infraestructuras de uso común pertenecientes a la comunidad de Huanaco Huenchun. Dentro de éstas se reconocieron:

- Iglesia evangélica: Localizada dentro de la zona de Imperialito, esta iglesia congrega a aproximadamente 15 personas de la comunidad. Se realizan reuniones periódicas cuatro veces al mes, las cuales son realizadas los días domingo entre 09:00 a 12:00 hrs. Dentro de los equipos eléctricos utilizados sólo se identificó la presencia de luminarias interiores, cuatro en total.
- Iglesia católica: Iglesia ubicada también al interior de la zona de Imperialito. En esta iglesia se realizan reuniones una vez al mes, a las cuales asisten alrededor de 15 – 20 personas. Las reuniones son realizadas los días domingo en la madrugada. Al igual que en la anterior iglesia, los equipos electrodomésticos identificados corresponden a luminarias interiores (3).
- Escuela San Miguel de Imperialito: Escuela de enseñanza básica ubicada en la zona de Imperialito, a la cual asisten entre 40 – 60 niños, los que son parte de la comunidad Huanaco Huenchun y comunidades cercanas. Dentro de las infraestructuras de uso común, es la que presenta un mayor consumo eléctrico. La escuela funciona desde marzo a diciembre, de lunes a viernes, desde las 08:30 a 16:00 hrs. Se utilizan variados equipos, entre los cuales se menciona hervidores eléctricos, microondas, computadores, luminarias, televisores, entre otros.
- Junta de vecinos, sede Imperialito: Sede comunitaria, ubicada en la zona de Imperialito, la cual es utilizada como lugar de reunión tanto de las personas de Imperialito como de Puente Fierro, en el caso de reuniones o asambleas que congreguen a toda la comunidad, asistiendo entre 20 a 40 personas. Las reuniones son realizadas en distintos días de la semana.
- Junta de vecinos, sede Puente Fierro: Corresponde a la sede comunitaria ubicada en la zona de Puente Fierro. La sede congrega a aproximadamente 20 – 30 personas en cada una de las reuniones llevadas a cabo. En el caso de ambas juntas de vecinos la hora a las cuales son hechas las reuniones es relativo, siendo frecuentemente planificadas entre 10:00 a 12:00 hrs o 14:00 a 16:00 hrs aproximadamente.

Se identificaron los equipos eléctricos presentes en cada una de estas infraestructuras, y los periodos en los cuales se encuentran activos. De esta manera aplicando la Ecuación 1 se obtuvieron los perfiles de cada infraestructura identificada. Para estos casos no se utilizó el modelo de red bayesiana para generar probabilidades, asumiéndose una demanda constante para cada periodo activo. En el Cuadro 17 se presenta de forma resumida la información de las infraestructuras de uso común identificadas.

Cuadro 17. Información general del uso de las infraestructuras de uso común proporcionada por las personas de la comunidad Huanaco Huenchun.

Infraestructura	Periodo activo			Duración	Personas asistentes
	Meses	Día de la semana	Hora del día		
Iglesia evangélica	Año completo	Domingo	09:00 a 12:00 hrs	3 horas	15
Iglesia católica	Año completo	Domingo	09:00 a 12:00 hrs	3 horas	15 a 20

(continúa)

Cuadro 17 (continuación)

Infraestructura	Periodo activo				Personas asistentes
	Meses	Día de la semana	Hora del día	Duración	
Escuela	Marzo a diciembre	Lunes a Viernes	08:30 a 16:00 hrs	8 horas	40 a 60
JJVV de Imperialito	Año completo	Entre lunes y sábado	Ocasional	Entre 2 a 3 horas	20 a 40
JJVV de Puente Fierro	Año completo	Entre lunes y sábado	Ocasional	Entre 2 a 3 horas	10 a 25

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En base a la información recabada se elaboró un perfil de demanda para cada infraestructura. Considerando los distintos equipos eléctricos presentes en cada lugar, su funcionamiento periódico y un valor de potencia nominal y factor de uso (Cuadro 14) se generaron los perfiles de demanda diarios. En la Figura 30 se presenta el perfil de demanda de cada una de las infraestructuras considerando un día en el que opere cada una de ellas. Como se puede apreciar, la escuela es la que presenta una mayor demanda eléctrica durante sus días activos, debido a que posee una mayor dinámica de actividades durante el día.

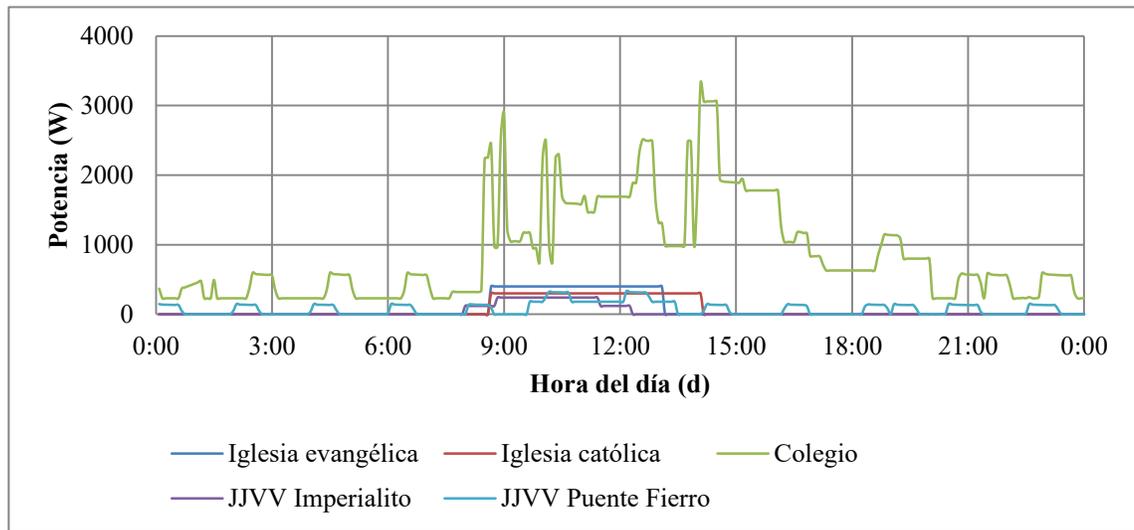


Figura 30. Perfil de demanda diario generado para las infraestructuras de uso común. Fuente: Elaboración propia, 2015.

La demanda eléctrica de las demás estructuras es mucho menor, ya que estos últimos solamente poseen iluminación y en el caso de la JJVV de Puente Fierro se visualiza un consumo condicionado principalmente por el funcionamiento de un equipo de refrigeración. Por otro lado, disponiendo de los perfiles de demanda de las infraestructuras de uso común, es posible incorporar la demanda de estas a la demanda general de las viviendas para obtener un perfil general de la comunidad. En la Figura 31 se presenta el

perfil de la comunidad de Huanaco Huenchun, como el agregado entre el perfil de demanda de las viviendas de la comunidad y el perfil generado por las infraestructuras de uso común.

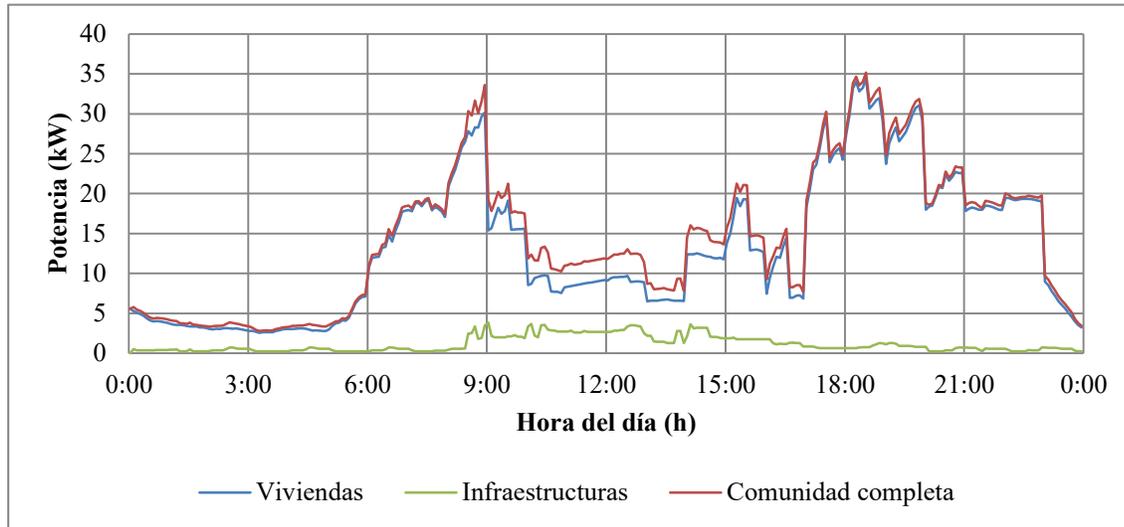


Figura 31. Perfil de demanda de la comunidad de Huanaco Huenchun. Fuente: Elaboración propia, 2015.

La principal demanda corresponde a las viviendas de la comunidad (95,7 %), mientras que sólo un 4,3 % corresponde a la demanda requerida por las infraestructuras de uso común. Cabe considerar que estas últimas otorgan un aumento de la demanda general principalmente durante las 09:00 a 16:00 hrs, en donde se encuentra en funcionamiento el colegio. Cabe tener en cuenta que se utilizó la simulación realizada para un día de semana promedio del año.

4.1.6. Extrapolación de la demanda eléctrica

Debido a que sólo se dispone de un período acotado de datos medidos de demanda eléctrica (período de marzo a septiembre principalmente), se utilizaron los datos históricos de consumo bimestral para realizar la extrapolación del perfil de demanda para otros meses del año. Primero se generó un promedio de consumo dentro del ciclo anual a través de los registros del mes de abril del 2009 a febrero del 2015. En la Figura 32 se presenta el consumo histórico promedio de la comunidad. La línea segmentada corresponde a la tendencia lineal de la curva de consumo la cual denota un incremento paulatino en la demanda eléctrica de los residentes de la comunidad.

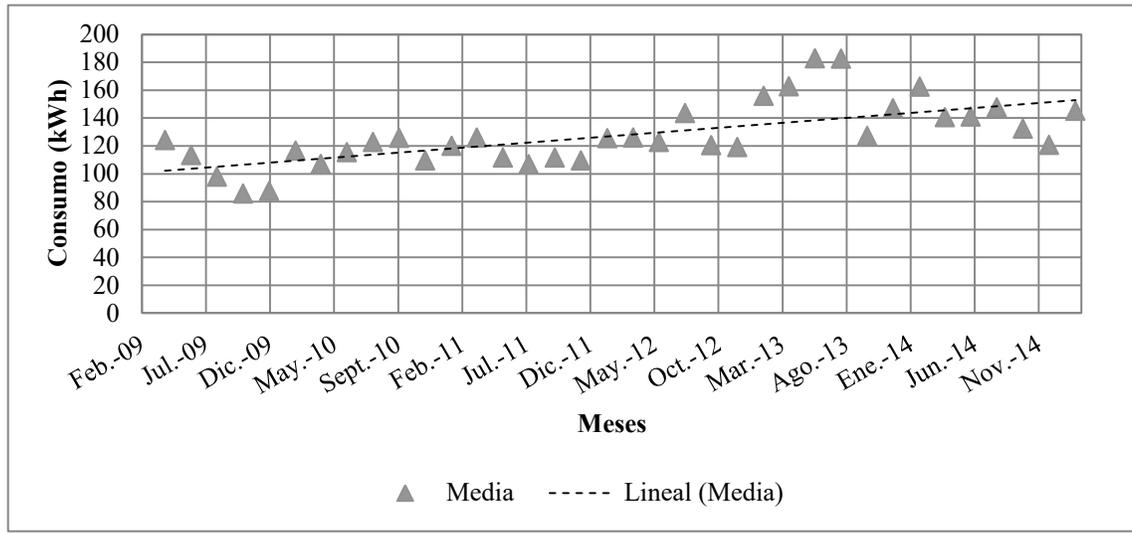


Figura 32. Consumo histórico promedio de las viviendas de la comunidad Huanaco Huenchun.

En el Cuadro 18 se presenta consumo promedio bimestral presente en la comunidad Huanaco Huenchun. Como se logra visualizar, el consumo promedio varía ligeramente entre un período y otro, siendo la máxima diferencia 22 kWh, presentándose el mayor consumo en la temporada de verano (enero-febrero).

Cuadro 18. Consumo promedio bimestral de la comunidad completa de Huanaco Huenchun.

Meses (2015)	Consumo (kWh)
Ene - Feb	137,4
Mar - Abr	130,9
May - Jun	131,0
Jul - Ago	133,4
Sep- Oct	117,1
Nov - Dic	115,4

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En base a estos datos y la relación descrita en la Ecuación 4 se realizó el ajuste de la curva de demanda para todo el año originándose la Figura 33. Para formar estos perfiles se utilizó de base el bimestre de julio-agosto.

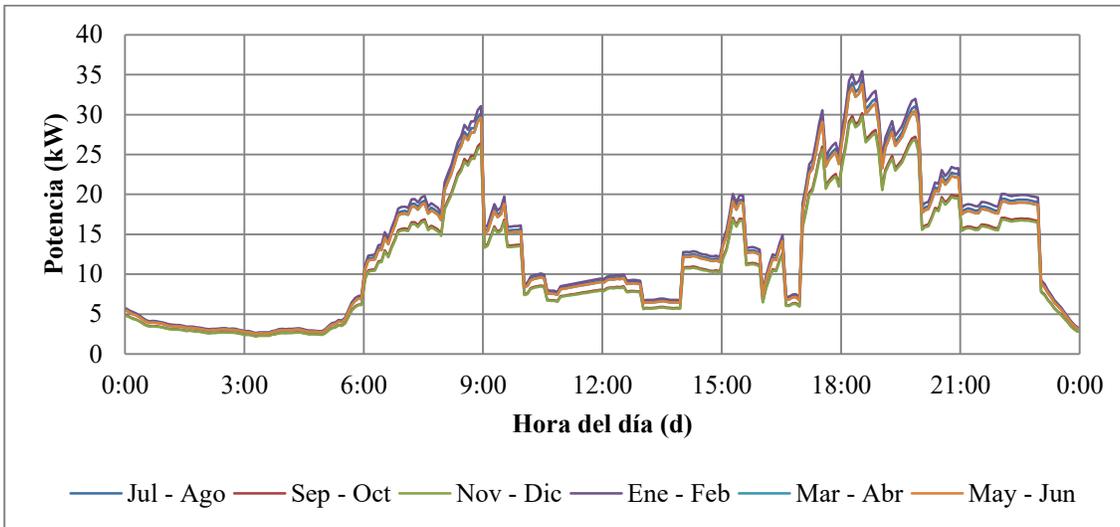


Figura 33. Perfil de demanda de la comunidad Huanaco Huenchun ajustado al consumo de los distintos meses del año. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Se visualiza un perfil de demanda de toda la comunidad ajustado a los meses del año. Se reitera que el resultado proporciona sólo una aproximación y que es utilizada de forma referencial, ya que el comportamiento de demanda puede ser afectado por diversos factores a lo largo del año, tales como la visita de personas producto del período de vacaciones, las distintas costumbres y realización de eventos y ceremonias. A continuación se presentan parte de las actividades o períodos que fueron identificados por los mismos residentes en las cuales se evidencia un incremento o disminución del número de personas:

- Vacaciones de verano: Principalmente en los meses de enero y febrero, en donde llega una gran cantidad de personas (principalmente familiares) a la mayoría de las viviendas de la comunidad (81 % del total de las viviendas). En promedio la cantidad de personas que visita la comunidad por vivienda es de cuatro, las cuales que permanecen por un par de semanas en la comunidad. En base a la información recopilada se estima que en total llegan a la comunidad entre 120 a 150 personas a lo largo de todo el período de verano.
- Torneos de Fútbol: Eventos desarrollados principalmente durante la época de primavera – verano y son realizados de forma periódica de forma semanal o cada dos semanas. A estos eventos asiste aproximadamente unas 30 a 50 personas que no son parte de la comunidad. En dicha actividad se aprovecha la cancha de fútbol, localizada en el sector de Imperialito.
- Fines de semana largos: En algunas de las viviendas se presenta dicha condición, en la cual familiares que residen fuera de la comunidad, en centros urbanos cercanos tales como Temuco, Imperial y Carahue.
- Festival de la voz: Evento que se realiza una vez al año en la comunidad de Huanaco Huenchun, a la cual asisten aproximadamente unas 500 personas externas a la comunidad. Este evento tiene la duración de un día. La actividad se realiza al aire libre a fines de febrero.

- Guillatún: Ceremonia Mapuche que funciona como una rogativa, la cual puede ser utilizada la finalidad de solicitar abundancia en la cosecha o para homenajear a algún ser viviente. Es un culto que puede durar varios días (2 – 3 días), y agrupa a varias comunidades Mapuche aledañas, estimándose un incremento de 100 personas al interior de la comunidad. Dicho evento se realiza una vez cada 4 años en la comunidad Huanaco Huenchun y es llevado a cabo entre octubre – noviembre principalmente.
- Wetripantu: Ceremonia Mapuche, la cual celebra el inicio del año. En esta ceremonia parte de la comunidad se reúne en un área que posee carácter religioso. La actividad dura una tarde y se realiza entre el 22 al 24 de junio.
- Feria del camarón: Evento organizado entre la comunidad y la municipalidad en la cual se venden productos de la zona y se realizan competencias. A esta actividad se estima una asistencia de 300 personas. Este evento tiene la duración de un día y se realiza al aire libre dentro del mes de agosto.

Cada una de estas actividades fue declarada por las personas de la comunidad a través de las encuestas individuales. Cada evento implica un alza en la cantidad de habitantes flotantes dentro de la comunidad, y que puede afectar en mayor o menor medida el comportamiento de la demanda. Por su parte, las visitas generadas en el período de vacaciones de verano es lo que más contribuye al aumento de las personas y de forma más permanente, ya que considera las ocho semanas de los meses de enero y febrero principalmente. Este incremento de personas tendería a traer consigo un aumento significativo de la demanda eléctrica para tal período (Seppala, 1996; Sotiropoulos, 2012). Debido a que los demás eventos corresponden a actividades acotadas, cuya duración es de un par de días y realizadas en zonas al aire libre, no se esperaría un aumento significativo en la demanda. Finalmente en la Figura 34 se muestra el consumo diario estimado por día en kWh para la comunidad completa, integrando la demanda residencial y la demanda proveniente de las infraestructuras de uso común.

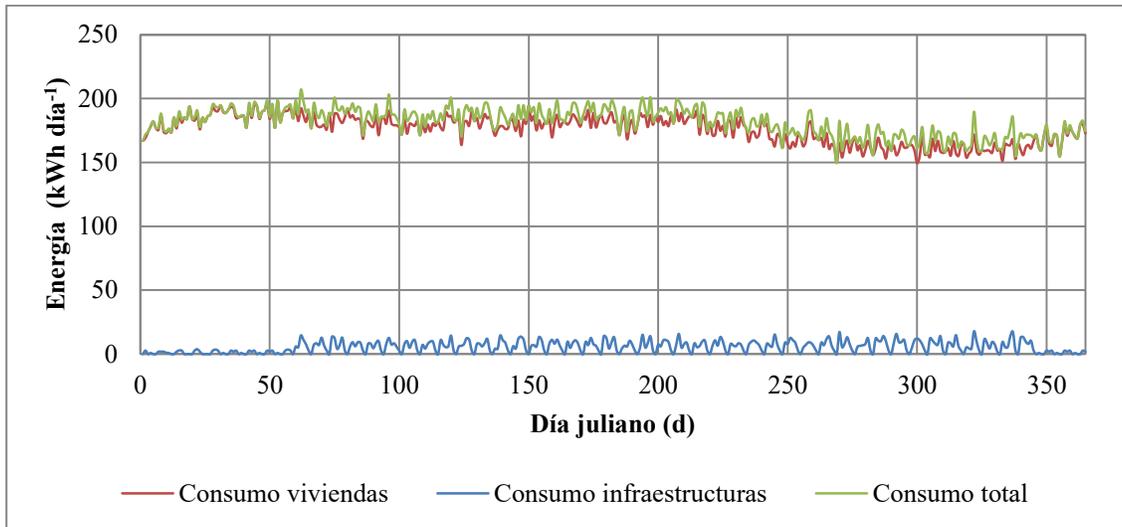


Figura 34. Consumo diario estimado para la comunidad de Huanaco Huenchun. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se logra apreciar, el consumo presenta las variaciones diarias generadas por el modelo y las diferencias bimestrales (hacia septiembre comienza a decaer el consumo en relación a los demás meses). Por otra parte se agrega el consumo de las infraestructuras de uso común identificadas, dentro de las cuales la escuela San Miguel es la que aporta mayoritariamente al consumo general de la comunidad. Se destaca que se utilizó la información rescatada por los miembros de la comunidad (Cuadro 17) para estimar los requerimientos de energía a lo largo del año por parte de estas cargas. Cabe recalcar que no se aprecian variaciones significativas a través del año, lo que ve justificado en que no se presenta un aumento/disminución considerable en el uso de equipos eléctricos durante el año. Una de las principales causas de este comportamiento se asocia a la falta de equipos de calefacción y otro tipo de equipamiento de alto consumo, por ejemplo sistemas de aire acondicionado, ventilación, calefactores, entre otros, los cuales corresponde a una parte importante del consumo residencial (Hobby et al., 2011). En estas zonas rurales, la presencia de cocinas y calderas a leña proporcionan las funciones de calefacción, disminuyendo la necesidad de adquirir otros equipos de calefacción (estufas eléctricas por ejemplo), los cuales se hacen mayormente necesarios en las épocas de invierno, debido a la disminución de la temperatura ambiente.

4.1.7. Discusión

La metodología utilizada permitió estimar la demanda eléctrica de las principales cargas de una comunidad rural, la cual corresponden principalmente a la demanda de tipo residencial. En base a la metodología *bottom-up* y la revisión bibliográfica realizada se identificaron distintos aspectos locales que inciden en la demanda eléctrica, que a través de otras metodologías no se hubieran considerado, cómo el uso de equipos eléctricos, actividades

que inciden en la permanencia en el hogar durante el día y la realización de otras actividades que posean repercusión en los requerimientos de energía de la comunidad.

Debido a que sólo se disponía de un número acotado de medidores de consumo y que sólo se dispuso de un período de medición limitado, no se logró incorporar en detalle las variaciones estacionales asociadas al comportamiento de la demanda eléctrica, para lo cual se requiere un trabajo a largo plazo en donde se posea mediciones de al menos un año de datos. A pesar de que se incluyó una etapa de validación obteniéndose a su vez buenos resultados, una de las principales falencias de la metodología planteada fue la escasez de datos utilizados para la validación. Se utilizaron datos de consumo bimestral, los cuales fueron comparados de manera agregada, impidiendo validar de forma más precisa el comportamiento de los perfiles diarios simulados. Se recalca que la estimación realizada refleja un estado actual de la demanda, la cual puede ser complementada con otras metodologías para lograr estimar su proyección en el tiempo a lo largo de varios años.

Sin percance de lo anterior, la metodología utilizada proporciona resultados acordes a lo esperado, proporcionando un mayor detalle del comportamiento de la demanda en relación a estudios similares. Se concluye que la estimación realizada entrega resultados atingentes para ser utilizados en el diseño de un sistema de abastecimiento de energía, tal como una micro-red.

4.2. Potencial energético

A continuación se presentan los resultados obtenidos para la estimación del recurso energético (eólico y solar) para la comunidad Huanaco Huenchun.

4.2.1. Estimación del potencial eólico y solar

4.2.1.1. Obtención de datos de variables meteorológicas

Para obtener una primera aproximación, se descargaron los datos del Explorador de Energía Solar (EES) y Energía Eólica (EEE). En la Figura 35 se presenta parte de los resultados generados por el EEE y EES que proporcionan mayor información sobre el recurso eólico y solar respectivamente.

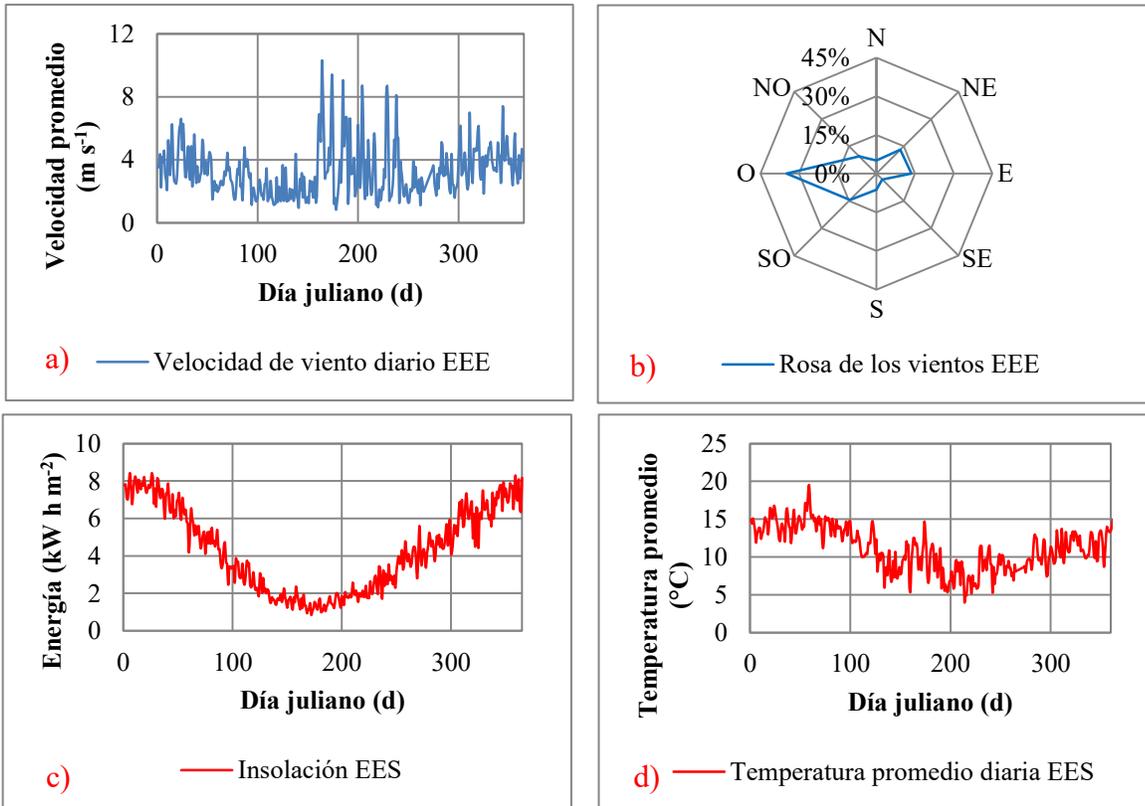


Figura 35. Resultados obtenidos en base al EEE y EES. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En a) y b) se presenta los resultados proporcionados por el EEE, respectivamente la velocidad de viento promedio diaria y la dirección promedio diaria de viento (el eje de abscisas corresponde al día juliano de 1 a 365). Para este último caso, se utilizó una rosa de los vientos para representar la frecuencia para cada dirección de viento, utilizándose una escala en porcentaje (de 0 a 100 %). De forma preliminar se puede determinar que la velocidad de viento (obtenida para una altura de 16 m) presenta una alta variabilidad, presentándose una velocidad promedio de $3,26 \text{ m s}^{-1}$, con una desviación estándar de $1,59 \text{ m s}^{-1}$. Se destaca el hecho de presentar valores más altos en la temporada de invierno alcanzando velocidades de hasta 18 m s^{-1} . En base a los registros de dirección de viento, se establece una notoria predominancia del viento oeste (35 % de los casos), viento proveniente del borde costero.

Por otro lado mediante el EES se generó un perfil de insolación total diaria (c), la cual corresponde a la energía disponible a lo largo de todo el día para cada día juliano, y finalmente en d) se presenta el valor de temperatura promedio diaria para cada día del año, la que es de $11,07 \text{ }^{\circ}\text{C}$. La irradiancia total diaria o insolación presenta valores esperados, concentrándose las mayores cantidades en la época estival y disminuyendo hacia los días de invierno. El zigzagueo de valores entre un día y otro es producido por el efecto de nubosidad presente en la zona, siendo el valor promedio de $4,29 \text{ kWh m}^{-2}$. En cuanto a la temperatura promedio registrada se visualiza un decaimiento de ésta en la época invernal alcanzando una temperatura promedio mínima de $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que en verano se pueden

alcanzar los 19 °C. De manera de complementar la información previamente obtenida, se utilizaron los mapas en formato raster disponibles en ambos exploradores para un análisis espacial del recurso.

En la Figura 36 se presenta el contorno de la comunidad Huanaco Huenchun y de manera sobrepuesta un mapa de insolación promedio diaria (a) y un mapa de velocidad de viento promedio diaria (b)). En ambos casos, los colores más oscuros indican una mayor cantidad del recurso, indicándose en letras blancas los valores de velocidad de viento (m s^{-1}) e insolación promedio diaria ($\text{kWh m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

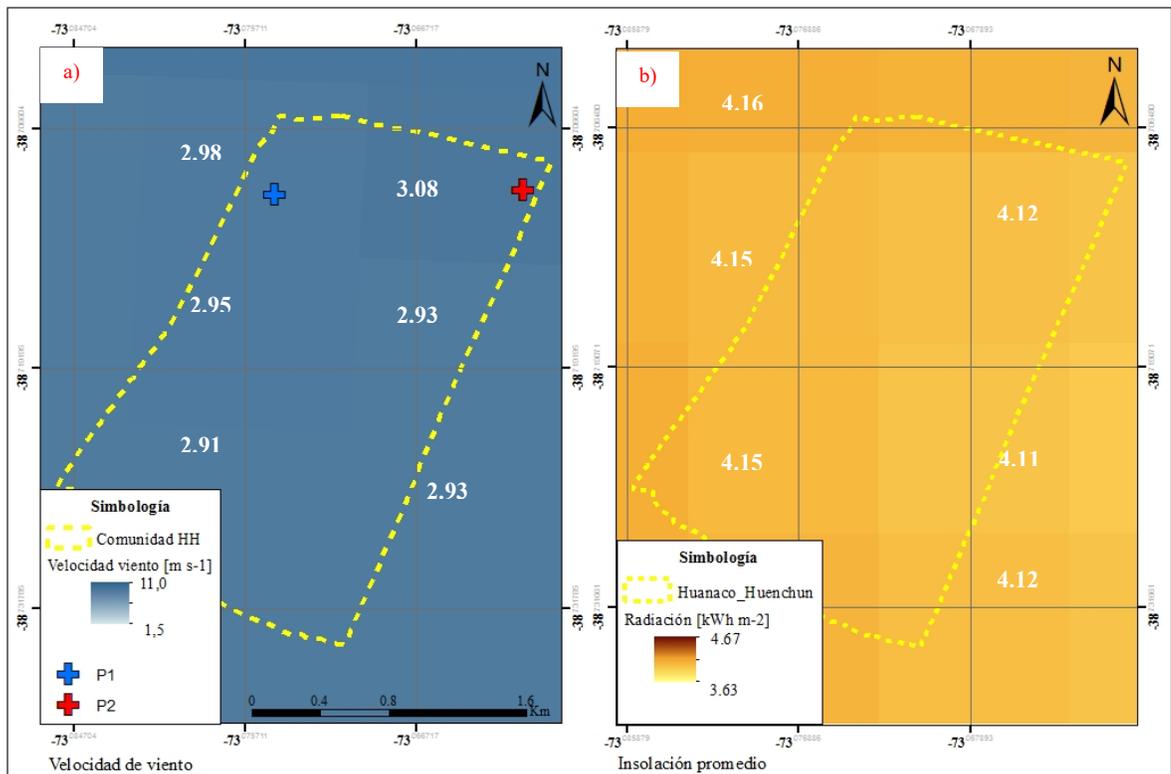


Figura 36. Mapa velocidad de viento e insolación promedio generado a través de los datos del EES y EEE respectivamente. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se puede apreciar en a) la variación en cuanto al recurso solar dentro de la comunidad es mínima, lo cual es producto de que se está trabajando con un área pequeña, no existiendo algún efecto puntual que afecté a sólo una parte de la comunidad (menor a 1 km).

El recurso eólico presenta una mayor variación dentro de la comunidad, lo que probablemente es generado por el desnivel del terreno y la presencia de objetos que afecten la rugosidad del suelo. Particularmente el área (píxel) que presenta un mayor valor de viento promedio, se localiza en una de las zonas más altas de la comunidad (60 metros de diferencia al sector de planicie, el cual corresponde al resto del área de la comunidad). Se recalca que los datos proporcionados por los exploradores corresponden a simulaciones

realizadas para años anteriores, por lo que en el caso de contar con anomalías o eventos puntuales (por ejemplo, efecto del niño), éstas no serían reflejadas en los datos de entrada. Por esta razón se instaló una estación meteorológica en la comunidad Huanaco Huenchun para validar los datos proporcionados por el modelo, antes de realizar un posterior análisis.

La estación fue instalada en dos periodos distintos dentro del área de la comunidad. En ambas ocasiones fueron instaladas en un área de la comunidad que cumplía con el estándar de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés), considerando un área despejada de árboles, construcciones y pendientes empinadas. También se tuvo en cuenta la lejanía a caminos transitables (WMO, 1983). La estación fue instalada en un predio residencial ubicado en las coordenadas $38,71013^{\circ}$ O – $73,07407^{\circ}$ S (en adelante, P_1). El período de recolección abarca entre el 13 de marzo al 12 de mayo de 2015 (P_1) y posteriormente del 18 de junio al 1 de septiembre del año 2015 (P_2). Ambas ubicaciones aparecen destacadas en la Figura 36 a) (P_1 corresponde a la cruz azul y P_2 a la cruz de color rojo). En la Figura 37 se muestran algunas fotografías del proceso de instalación de la estación meteorológica.



Figura 37. Fotografías de la instalación de la estación meteorológica localizada en la zona de Puente Fierro. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los datos fueron recopilados al final del muestreo, siendo pre-procesados y ordenados para su posterior análisis. A continuación se presenta la comparación entre los datos recopilados y los datos proporcionados por los exploradores. Para poder comparar los datos de velocidad de viento, estos se tuvieron que homologar a una altura determinada. Debido a que los datos proporcionados por el anemómetro fueron obtenidos a una altura de 2,5 m de altura sobre el nivel de suelo, estos datos fueron escalados a 15 m, altura a la cual se modelaron los datos del EEE. Para esto se utilizó la Ecuación 11 descrita en la metodología, utilizándose un coeficiente de fricción de 0,218 para el presente caso, el cual según el Cuadro 8 corresponde a una zona de cultivos y matorrales. Para la comparación, se utilizó el mismo período del año con el cual se midieron los datos. En la Figura 38 se presenta la comparación de datos de viento promedio obtenidos por el EEE y la estación meteorológica. En a) se presentan los valores para todo el año, mientras que en b) se acota al periodo de días que se lograron medir mediante la estación meteorológica.

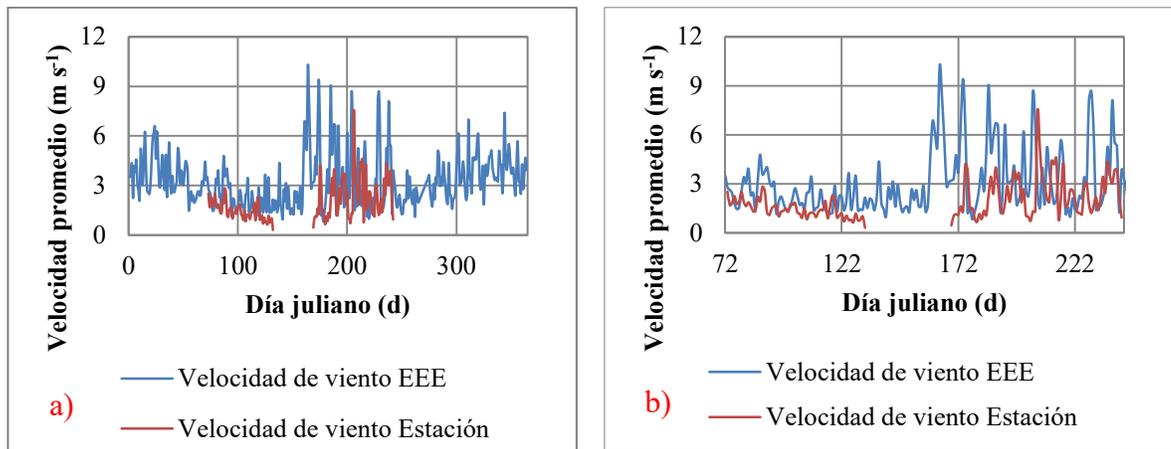


Figura 38. Comparación de datos de velocidad de viento promedio diaria. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se puede apreciar, los datos de velocidad proporcionados por la EEE siguen la tendencia de los datos registrados mediante la estación, presentándose un error promedio de $\pm 1,64 \text{ m s}^{-1}$. En la Figura 39 se presenta la comparación del perfil de viento diario para los dos periodos de muestreo.

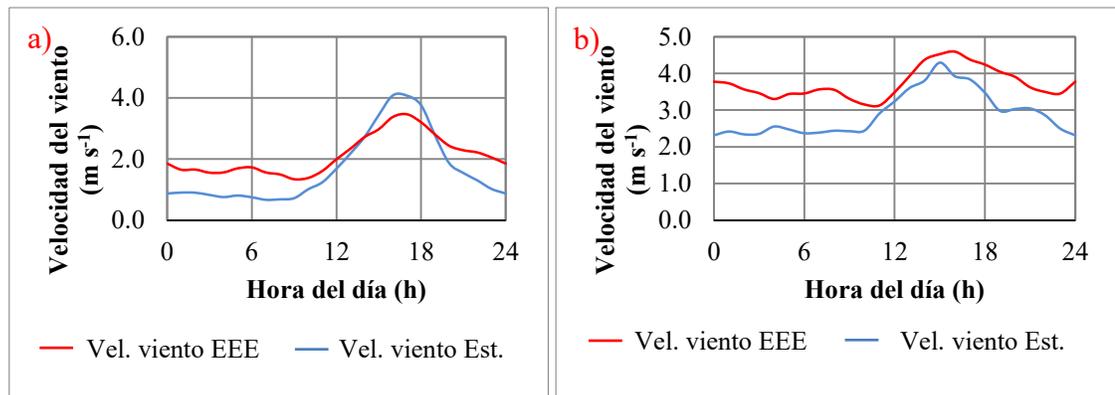


Figura 39. Comparación perfil de viento diario para los dos periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Se aprecia que los datos proporcionados por el EEE siguen el comportamiento del perfil diario de viento, el cual presenta mayores valores de viento entre las 14:00 y 20:00 hrs, alcanzando valores sobre 4 m s^{-1} en promedio. Se presenta un error de $\pm 1,07 \text{ m s}^{-1}$ entre los datos del EEE y la estación meteorológica. Como se puede apreciar en la Figura 40, en ambos períodos de muestreo los datos proporcionados por el EEE siguen la tendencia en la predominancia de dirección de viento para dichos períodos. Cabe considerar que la dirección de viento se utiliza dentro de este estudio principalmente para determinar la posición de las unidades de generación, la cual debe estar ligada a la dirección predominante.

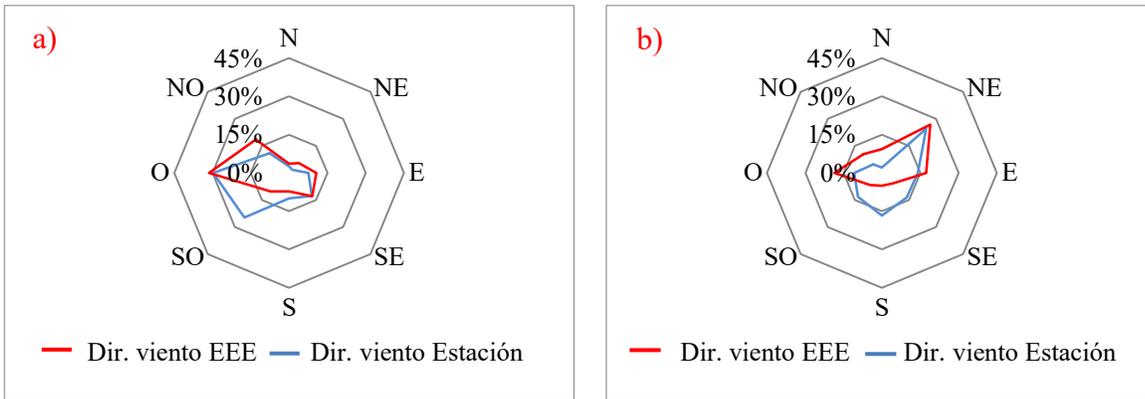


Figura 40. Comparación de rosa de los vientos para los dos periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En cuanto a la radiación solar, se realizó una comparación similar tomando en cuenta los dos periodos de muestreo. En la Figura 41 se presenta el perfil de insolación anual obtenido por el EES y la estación meteorológica. En a) se presenta el perfil de todo el año, mientras que en b) se visualiza el perfil acotado al periodo de muestreo.

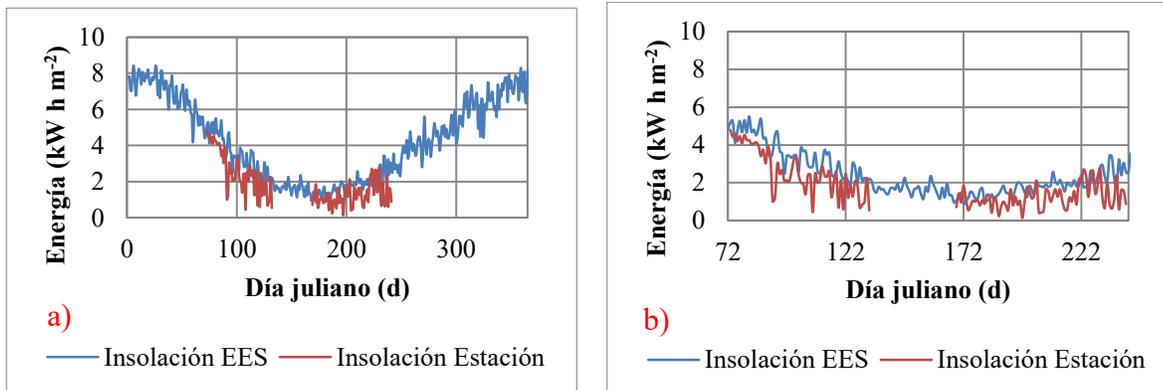


Figura 41. Comparación del perfil anual de insolación para los dos periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los valores de insolación siguen el comportamiento indicado por los datos de la estación meteorológica, presentando un error promedio de $\pm 0,85 \text{ kW h}^{-1}$ por día. En la Figura 42 se indica el perfil de radiación solar promedio diario para los dos periodos de muestreo. En ambos casos se visualiza una similitud entre los datos del EES y la estación.

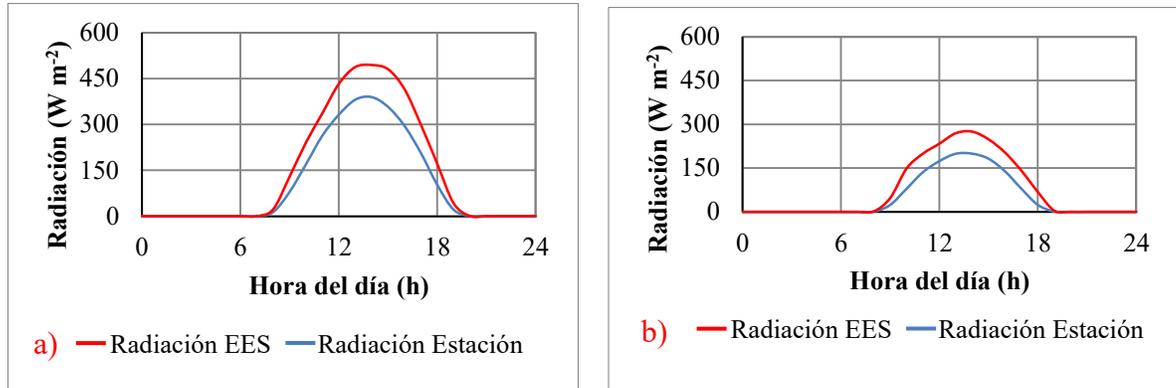


Figura 42. Comparación del perfil de radiación diaria para los dos periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En ambos casos el modelo proporciona una sobreestimación de los valores reales de radiación solar. Aun así, se mantiene el comportamiento horario de la radiación. Finalmente se analizaron los registros de temperatura ambiente, los cuales al igual que en los anteriores casos, mantienen la semejanza entre los datos del EES y los obtenidos en terreno (Figura 43). En este último caso, se presenta un error de $\pm 2,3$ °C en la temperatura promedio.

En base al análisis de los datos de entrada y la comparación con los datos obtenidos en terreno mediante la estación meteorológica provista por el DGF, se indica que los datos proporcionados por el EEE y el EES son un buen estimador de las variables meteorológicas mencionadas anteriormente, logrando considerar las variaciones y efectos locales presentes en la comunidad Huanaco Huenchun. En base a este resultado general, se procedió a utilizar los datos de EEE y EES para los posteriores análisis de la cuantificación del recurso renovable.

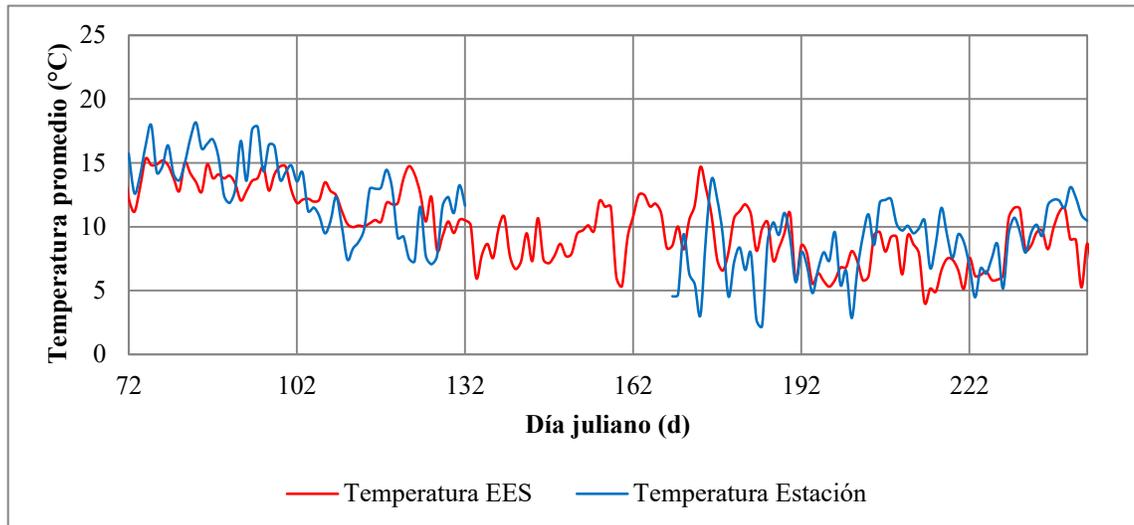


Figura 43. Comparación del perfil anual de la temperatura promedio diaria considerando ambos periodos de muestreo. Fuente: Elaboración propia, 2015.

4.2.1.2. Determinación de potencial de energía eólica y solar

Para la estimación del potencial de energía eólica y solar se utilizaron las ecuaciones previamente presentadas en la metodología de estudio. En cuanto al recurso solar, primero fueron ajustados los datos de radiación horizontal a un plano inclinado (Ecuación 6), considerando un ángulo de inclinación de 38° de acuerdo a la latitud del área de estudio. En la Figura 44 se presenta el ajuste realizado a los valores de radiación global horizontal a plano inclinado para un día promedio.

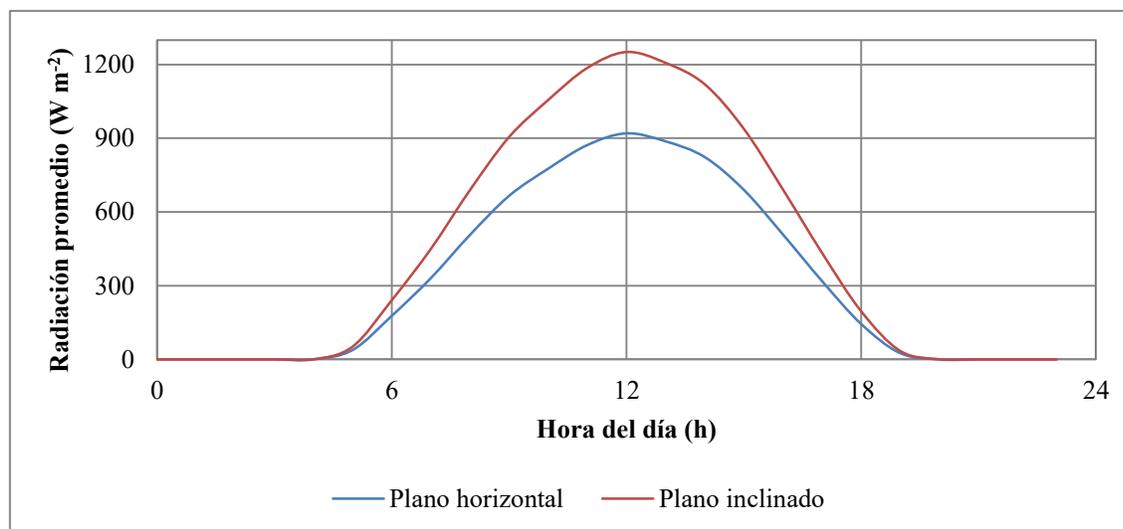


Figura 44. Ajuste de los valores de radiación de plano horizontal a plano inclinado.
Fuente: Elaboración propia, 2015.

A continuación se presentan las tecnologías de generación fotovoltaica empleadas para evaluar el potencial solar presente en la comunidad. En el Cuadro 19 se presentan las características de los dos módulos fotovoltaicos a emplear.

Cuadro 19. Principales características de los módulos fotovoltaicos seleccionados.

Características	Módulos FV	
Marca	Risen	Canadian Solar
Modelo	SYP250P	CS6P-250P
Potencia nominal (W)	250	250
Área del módulo (m ²)	1,46	1,46
Tipo de celda	Policristalino	Policristalino
NOCT (°C)	45 ± 2	45
T° _{STC} (°C)	25	25
I _{STC} (W m ⁻²)	1000	1000
λ (% °C ⁻¹)	-0,39	-0,43

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Con la información del perfil de radiación solar obtenida para la comunidad Huanaco Huenchun y los datos descritos en el Cuadro 19, fue posible estimar de manera la potencia de salida unitaria de los módulos aplicando la Ecuación 7. En la Figura 45 se visualiza el perfil de potencia de salida de los dos módulos para un día promedio, mostrando además a radiación global en plano inclinado utilizada para el cálculo se destaca que ambos módulos siguen el mismo patrón, generando mínimas diferencias en los valores de potencia de salida, logrando una eficiencia del 18 % (RISEN) y 18,1 (Canadian Solar) en la conversión de energía solar a eléctrica.

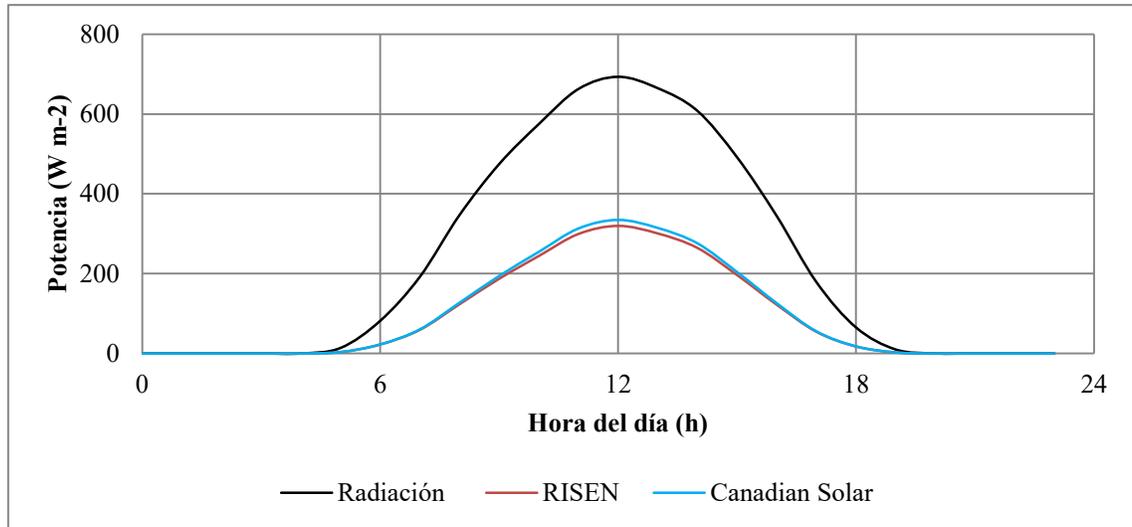


Figura 45. Perfil de potencia de salida de ambos módulos para un día promedio. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Para esta simulación se utilizaron los valores promedio horarios de radiación y temperatura ambiente. Al utilizarse los datos horarios para todo un año se logró obtener los valores de potencia de salida para cada intervalo de tiempo. En la Figura 46 se visualiza la cantidad de energía que es capaz de captar los módulos fotovoltaicos en función de la radiación incidente.

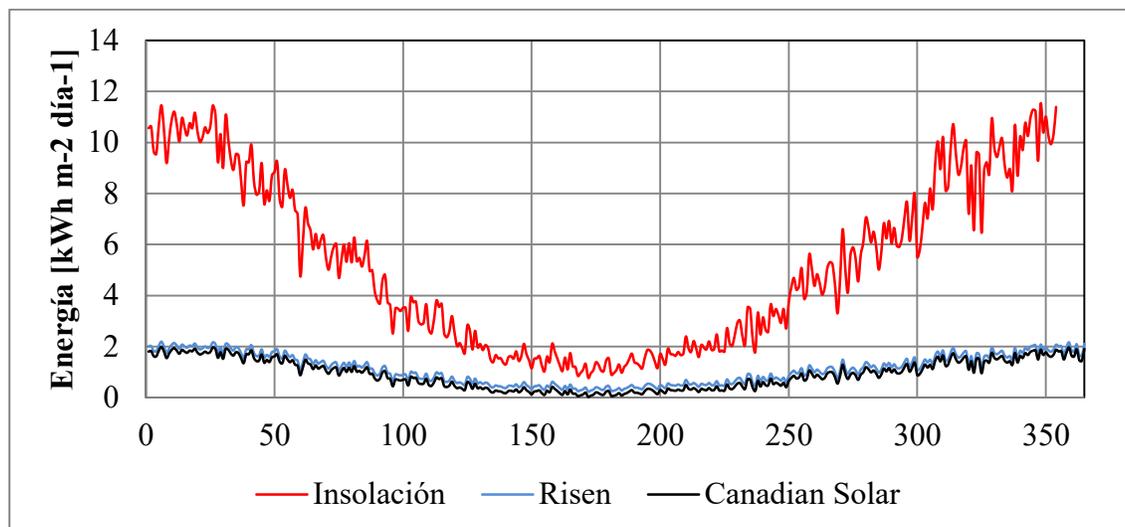


Figura 46. Energía diaria capaz de generar cada módulo de manera unitaria por m² considerando un horizonte de un año. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Los valores presentados están por unidad en m², por lo que para fines de dimensionamiento se requiere conocer una cantidad de módulos fotovoltaicos o un área determinada. Finalmente se utilizó la Ecuación 8 para determinar el factor de planta de ambos módulos, considerando la energía capaz de generar durante un año, dando como resultado un valor de 18 % para ambos módulos. En el Cuadro 20 se presentan algunos valores de salida de los módulos planteados.

Cuadro 20. Energía fotovoltaica generada en Huanaco Huenchun.

Módulo FV	RISEN	Canadian Solar
Energía total en el año (kWh año ⁻¹)	410,3	412,2
Energía promedio por día (kWh día ⁻¹)	1,12	1,12
Energía promedio por hora (kWh)	0,058	0,059
Factor de planta (%)	18,7	18,8

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En cuanto al recurso eólico, se realizó un análisis base de los valores de velocidad de viento presentes en la zona, aplicando una distribución de Weibull a los datos horarios. En la Figura 47 se presenta la distribución de probabilidades según una función de Weibull. En base a los datos de entrada se estimaron los parámetros de forma (3,56) y escala (1,51) necesarios para desarrollar la función.

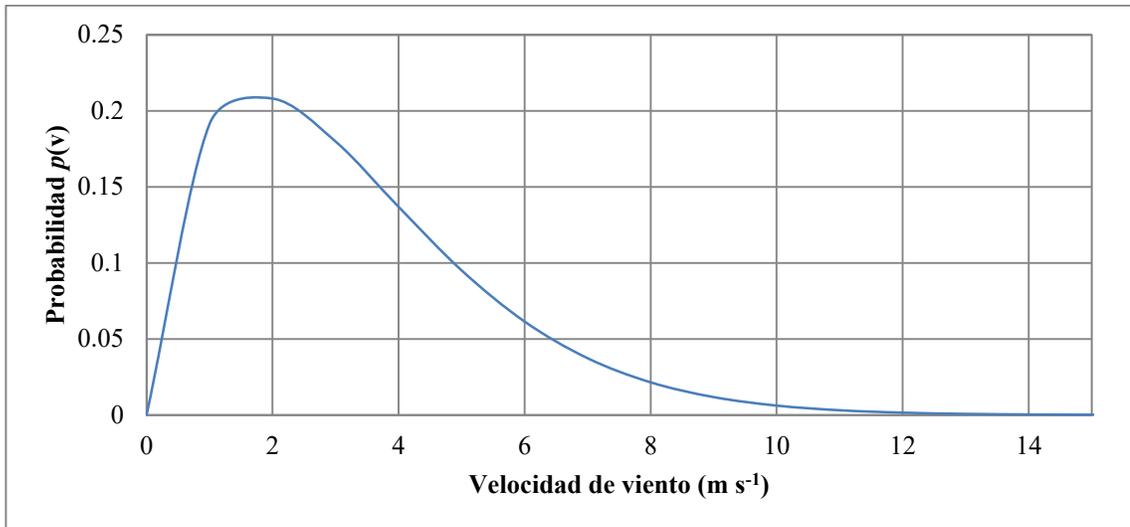


Figura 47. Distribución de probabilidades generada mediante una función de Weibull.
Fuente: Elaboración propia, 2015.

Como se logra apreciar en el gráfico, los valores que más frecuencia poseen se concentran alrededor de los 2 m s^{-1} , velocidad que es menor a la velocidad de arranque de varios aerogeneradores, la cual en general ronda entre los $2,5$ a 3 m s^{-1} . Por otra parte se puede señalar que un 55% del tiempo, se presentan velocidades sobre los 3 m s^{-1} . Se seleccionaron tres aerogeneradores distintos para realizar las simulaciones del potencial eólico. En el Cuadro 21 se muestran las características principales de los aerogeneradores a utilizar. En este caso, los tres aerogeneradores poseen distintos valores de potencia nominal.

Cuadro 21. Características de los aerogeneradores utilizados para el estudio.

Características	Módulos eólicos		
	Enair	Bergey Wind Power	Osiris Energy
Modelo	Enair 70	Excel 10	Osiris 10
Potencia nominal (kW)	3,5	8,9	10
Velocidad de arranque (m s^{-1})	2,5	2,5	2,5
Velocidad nominal (m s^{-1})	12	11	9,5
Altura de torre (m)	15	15	15
Número de aspas	3	3	3

Fuente: Elaboración propia, 2015.

Otro dato importante a considerar es que para los tres módulos, la altura de torre es de 15 metros de altura, por lo que se determina que no es necesario escalar los datos de velocidad de viento a una altura mayor mediante la ecuación de Hellman, ya que estos están a 16 metros de altura. Para los tres módulos se obtuvieron las curvas de potencia las cuales se muestran en la Figura 48.

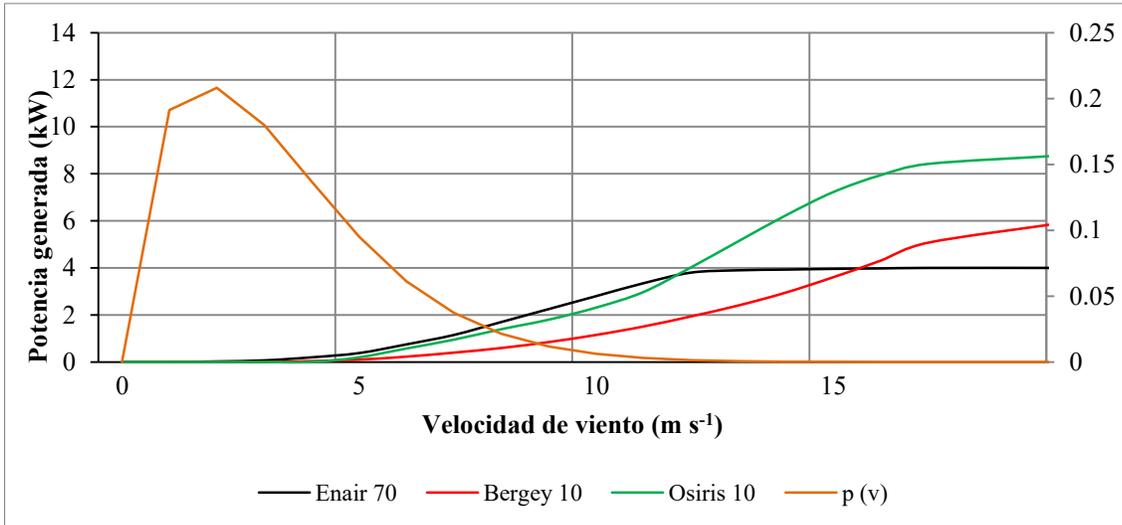


Figura 48. Curva de probabilidad de Weibull y curvas de potencia de los aerogeneradores evaluados. Fuente: Elaboración propia, 2015.

La curva de potencia corresponde a la potencia de salida que puede generar un aerogenerador a una velocidad de viento determinada (eje de las abscisas). Se visualiza que los tres módulos poseen distintas curvas, condicionadas por sus propias características. Aun así, los tres aerogeneradores cuentan con el mismo valor de velocidad de arranque, el cual corresponde a la velocidad mínima para generar energía. A través de esta curva que es directamente otorgada por el proveedor, se realizó una intersección con la curva de distribución de velocidades (eje secundario) estimando de manera preliminar la cantidad de energía que se puede generar en base a cada módulo. Como se visualiza, la intersección entre la curva de potencia y la curva de distribución sólo considera una pequeña porción de datos, los cuáles se concentran alrededor de los 8 m s^{-1} . A pesar de que los aerogeneradores son relativamente pequeños, requieren de velocidades de viento cercanas a los 9 m s^{-1} para alcanzar su potencia nominal de generación. Tomando en cuenta la distribución de las velocidades presentes al interior de la comunidad, éstas no son las más ideales para alcanzar de manera constante su potencia nominal (se concentran en los 2 m s^{-1}) lo que permite señalar de manera preliminar que las condiciones de viento son deficientes para la generación en base a esta fuente de energía. En la Figura 49 se muestra el perfil de energía estimado para cada día del año. Se visualiza que de los tres aerogeneradores evaluados, el modelo Osiris 10 es el que entrega mayores valores de energía a lo largo del año. Se denota a su vez que los tres módulos proporcionan una gran cantidad de energía principalmente en las épocas de invierno. En el Cuadro 22 se muestran los resultados obtenidos para cada módulo. Como se puede apreciar, el módulo Osiris 10 es el que alcanza a generar una

mayor cantidad de energía a lo largo del año, evidenciando a su vez un mejor factor de planta.

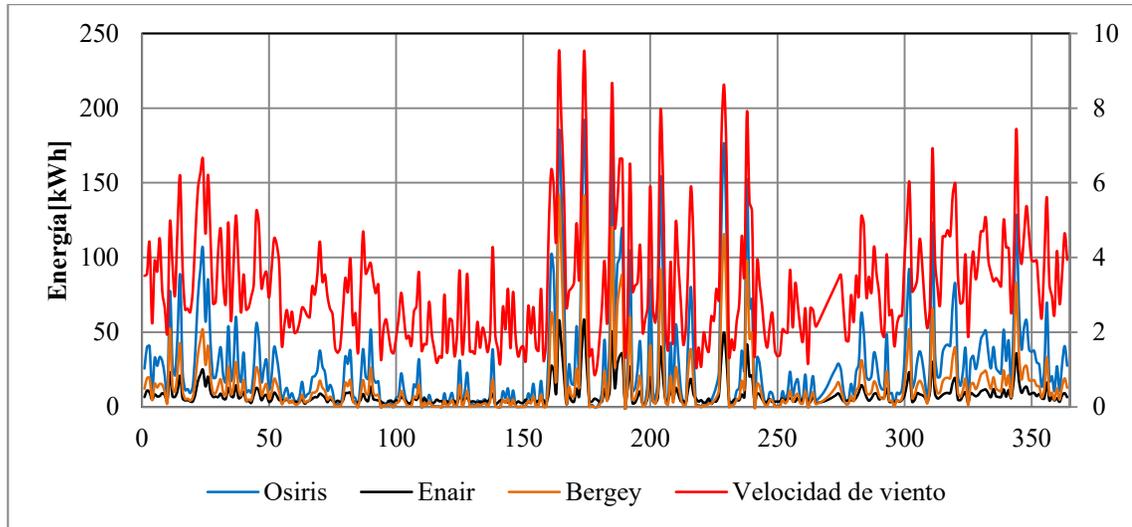


Figura 49. Energía diaria generada por los aerogeneradores considerados. En el eje secundario aparece la velocidad de viento promedio diaria en m s^{-1} . Fuente: Elaboración propia, 2015.

Cuadro 22. Energía eólica generada en Huanaco Huenchun.

Módulo eólico	Enair 70	Bergey 10	Osiris 10
Energía total en el año (MWh año^{-1})	3,02	5,27	9,92
Energía promedio por día (kWh día^{-1})	8,29	14,49	27,26
Energía promedio por hora (kWh)	0,35	0,60	1,14
Factor de planta (%)	9,83	6,76	11,3

Fuente: Elaboración propia, 2015.

4.2.1.3. Balance de energía

A través de los análisis previamente abordados, se obtuvo un resultado acerca de la potencia y energía capaz de generar cada módulo evaluado de manera unitaria, considerando el recurso solar y eólico que se tiene al interior de la comunidad Huanaco Huenchun. En base al modelo de demanda eléctrica, se realizó la simulación de demanda para un año completo, considerando las variaciones mensuales. A través de esta simulación se dimensionó la cantidad de equipos necesarios para satisfacer la demanda según los niveles de penetración de energía renovable. Para realizar el balance se evaluó la necesidad de energía por día (kWh día^{-1}) del total de la comunidad, no tomando en cuenta los peaks de potencia. Cabe mencionar que este balance es utilizado generalmente al considerar un sistema de apoyo de baterías (banco de baterías), con el objetivo de distribuir la energía de las unidades de generación durante los períodos de demanda.

Para el balance de energía, se realizaron simulaciones con los equipos que presentaron mayores factores de planta, los cuales corresponden al módulo fotovoltaico de Canadian Solar (250 W) y el aerogenerador Osiris 10 (10 kW). Para cada uno de los niveles de penetración (NP) de energía renovable, se dispusieron de tres configuraciones distintas: 100% de generación fotovoltaica, 50 % de energía fotovoltaica y 50 % de energía eólica, y 100% de generación eólica en el último caso. En el Cuadro 23 se presentan los resultados obtenidos. La columna “% abastecido” señala la proporción promedio del consumo durante un día que es capaz de ser abastecida mediante los equipos. En todos los casos se consideró un abastecimiento mínimo del 90 %, salvo en el caso de las configuraciones que implicaban solamente aporte eólico, ya que se presentan días en los cuales la generación eólica era casi nula, debido a que se presentaban días con niveles de viento que no alcanzaban la velocidad de arranque de las máquinas, por lo que es imposible abastecer el consumo de esta manera. En el caso de las demás configuraciones se estableció un margen de un 10 %, lo que señala que por lo menos, un 90 % del tiempo, la energía requerida es suplida a través de las configuraciones señaladas. Además, se logra apreciar que los casos en los cuales se considera un abastecimiento híbrido se alcanzan una mayor eficiencia al necesitar una menor cantidad de equipos de ambas fuentes.

Cuadro 23. Balance de energía.

NP de ER (%)	Configuración	Cantidad de equipos		Capacidad instalada (kW)		% abastecido	Días abastecidos
		FV	Eólico	FV	Eólico		
30	Solar	86	0	21,5	0	90,7	253
	Eólico	0	6	0	60	79,8	253
	Eólico - Solar	42	4	10,5	40	91,2	281
50	Solar	140	0	35	0	90,2	249
	Eólico	0	10	0	100	79,8	253
	Eólico - Solar	66	6	16,5	60	90,2	278
100	Solar	280	0	70	0	90,2	249
	Eólico	0	18	0	180	78,6	237
	Eólico - Solar	136	12	34	120	90,5	279

Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la Figura 50 se presenta un gráfico del balance de energía considerando un nivel de penetración de energía renovable de un 100 %. Se puede apreciar que las configuraciones determinadas pretenden alcanzar el abastecimiento de la totalidad de los días del año, lo que en días en los cuales existe una gran cantidad del recurso disponible, se generen enormes cantidades de energía que no sean requeridas por el sistema. En cuanto a la eficiencia de las configuraciones planteadas, se demuestra que la generación fotovoltaica es más eficiente que la eólica, ya que considerando un NP de 100 %, el caso en el cual se necesita implementar una menor capacidad instalada para satisfacer la demanda, es la configuración en base a 100 % energía fotovoltaica (70 kW), lo que es causado debido a los bajos valores de velocidad de viento presentes al interior de la comunidad Huanaco Huenchun (demostrado en la Figura).

Al considerar sólo una fuente de generación, al utilizar sólo unidades fotovoltaicas se presenta una sobre-generación de energía en los meses de verano (el doble), mientras que en cuanto al abastecimiento eólico se visualiza una alta sobre-generación en los meses de invierno, la cual llega a ser hasta 15 veces mayor que la demanda. Teniendo en cuenta lo anterior, se determina que la configuración más adecuada corresponde a un abastecimiento en base a sólo módulos fotovoltaicos, lo que permite disminuir el sobredimensionamiento de las unidades de generación.

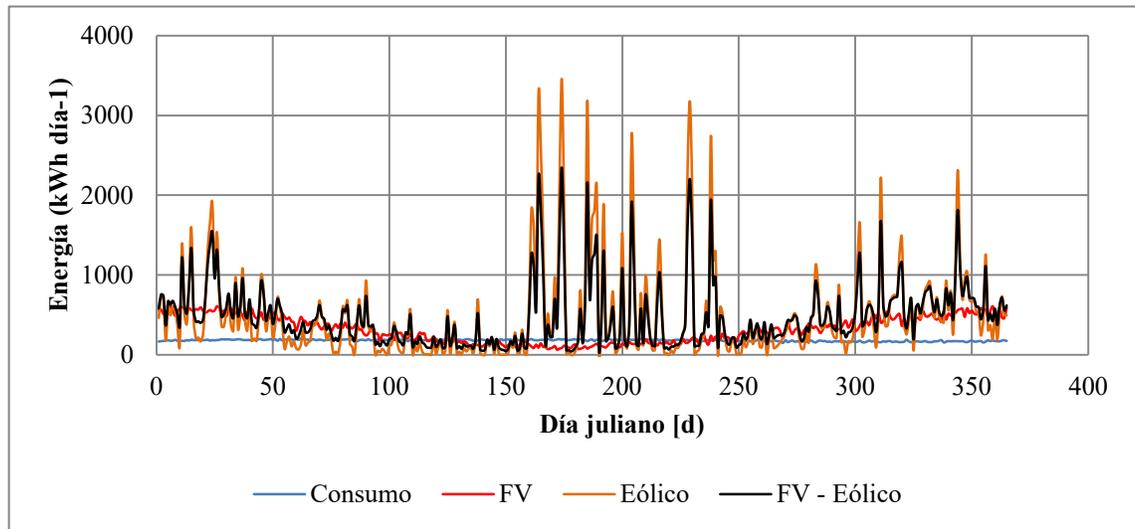


Figura 50. Balance de energía anual considerando un NP de 100%. Fuente: Elaboración propia, 2015.

En la Figura 51 se presenta el balance de energía considerando sólo abastecimiento fotovoltaico. Como se puede apreciar, la generación de energía llega a cubrir un 90 % de los días de un año normal, siendo solamente en los meses de invierno, en los cuales se requeriría otra fuente de generación complementaria para satisfacer la demanda estimada para ese período. Cabe mencionar que las configuraciones seleccionadas, consideran un abastecimiento casi netamente basado en fuentes de generación eólica y solar. En el caso de contar con sistemas de respaldo, o almacenamiento de energía por varios días dicha configuración puede variar de manera considerable, hasta encontrar una configuración más óptima, disminuyendo la capacidad de energía instalada en base a módulos fotovoltaicos (por ejemplo utilizando las configuraciones fotovoltaicas de 35 o 21 kW planteadas anteriormente). Es necesario señalar que la demanda eléctrica al ser pequeña, no se logra notar con claridad su variación a lo largo del año.

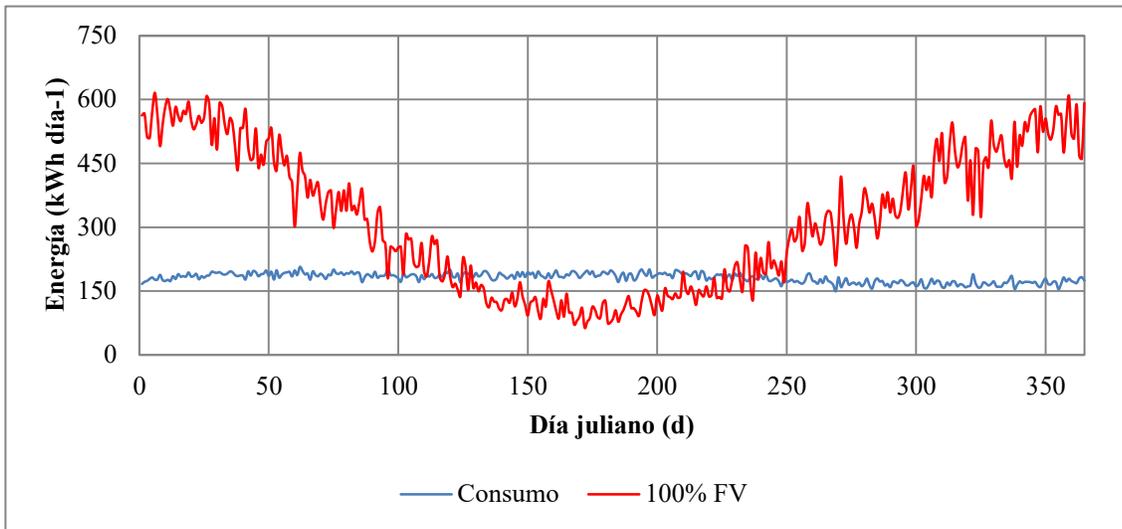


Figura 51. Balance de energía considerando sólo abastecimiento fotovoltaico. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Seguido a lo anterior, se definió un área mínima para la implementación de un sistema de módulos solares y aerogeneradores. Para esto, se basó en información técnica sobre la superficie abarcada por proyectos eólicos y fotovoltaicos. Debido a que el área utilizada por un tipo de tecnología puede variar considerablemente dependiendo de la topología y aspectos ligados a las especificaciones de instalación, se escogió un valor promedio de superficie requerida por kilowatt para estas dos tecnologías. En cuanto al sistema FV se definió un área mínima de 25 m^2 por kW instalado, considerando una instalación promedio en conjunto con sus equipos complementarios, distancia entre módulos, estructura y cercado. Por otra parte se definió una superficie mínima de 904 m^2 por 10 kW instalado, considerando una torre eólica de 5 a 10 kW. En el Cuadro 24 se muestra la superficie estimada para cada configuración, considerando un 100% de nivel de penetración por cada configuración. Se puede evidenciar que las unidades de generación fotovoltaica son las que requieren una menor área, mientras que el sólo incorporar unidades de generación eólica incrementa la superficie a utilizar.

Cuadro 24. Superficie utilizada por configuración de unidades de generación.

NP de ER (%)	Configuración	Superficie (m^2)			Total (ha)
		FV	Eólico	Total	
100	Solar	1680	0	1680	0,17
	Eólico	0	16200	16200	1,62
	Eólico - Solar	816	10800	11616	1,16

Fuente Elaboración propia, 2015.

Las superficies determinadas son utilizadas posteriormente para evaluar su impacto en el territorio y el espacio mínimo requerido. Como se menciona anteriormente, además de disponer del recurso (eólico o solar en el presente estudio), es necesario conseguir un balance contemplando un mínimo impacto en el entorno, a las personas y al medio

ambiente. Es por esta razón que se incorporaron otras variables propias del territorio para analizar la posibilidad de implementar las tecnologías evaluadas.

4.2.2. Análisis de variables territoriales

A continuación se presenta el análisis espacial de las variables del territorio que fueron incorporadas en el análisis del recurso energético, identificando las limitaciones e impactos de las unidades de generación en conjunto con las restricciones presentes en la misma comunidad. Por otro lado, se consideró la distancia a infraestructuras altas, árboles, y obstáculos topográficos que puedan originar turbulencias Stroup, 2005; Wizelius, 2006; Turney; Fthenakis, 2011 y Talinli et al., 2011). Cabe mencionar que estas variables fueron espacializadas dentro de la comunidad utilizando el software ArcGIS 10.

Criterios técnicos:

- Condiciones del terreno:

En la Figura 52 se presenta la condición del terreno utilizando el criterio de pendiente. En a) se muestra un modelo digital de elevación (MDE), a partir del cual se puede visualizar las variaciones en la altura del terreno en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

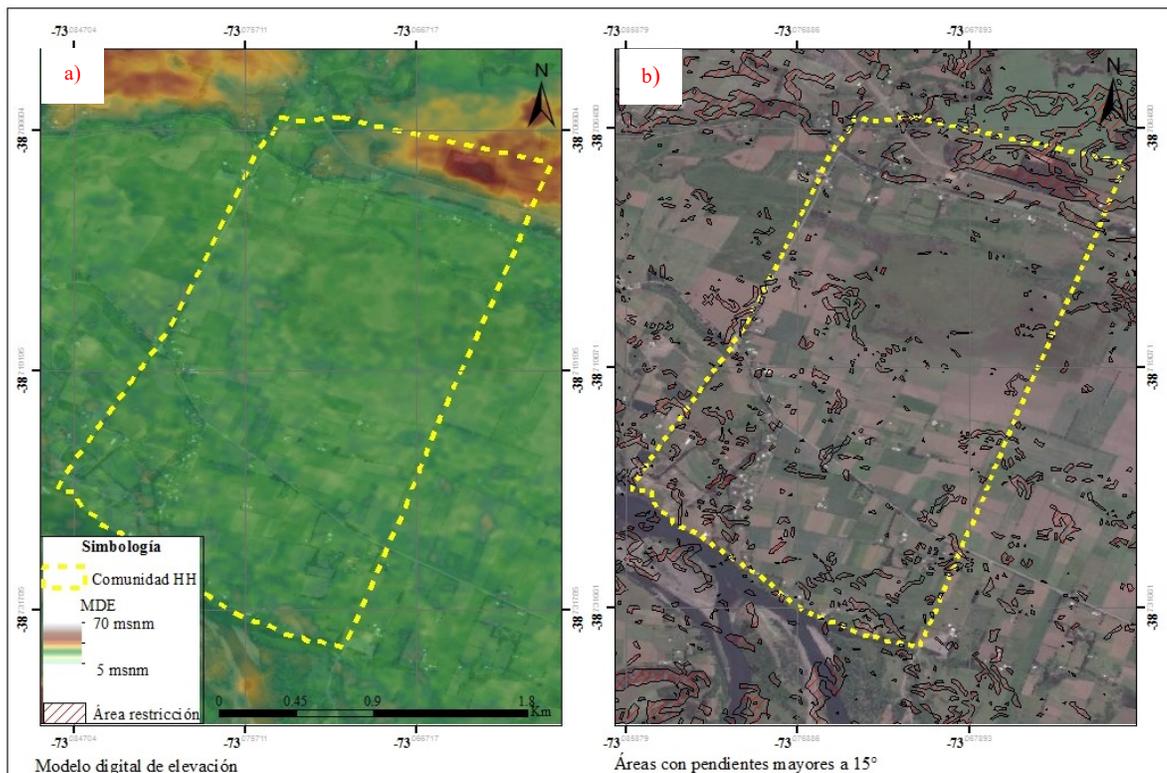


Figura 52. Condición del terreno según pendiente. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Las zonas más rojas representan zonas con una mayor altitud. Se puede apreciar que una gran parte de la comunidad se posiciona en un terreno relativamente plano (color verde), destacándose áreas con mayor altitud en la zona norte de la comunidad. En la Figura 52 b) por otra parte, se muestra en color rojo las zonas que poseen una pendiente mayor a 15° (áreas de restricción), limitando su uso por presentar peligro de erosión, e incremento de los costos de instalación de las unidades.

- Distancia a obstáculos presentes en el entorno natural:

Los obstáculos fueron identificados mediante fotointerpretación (visualización de una imagen en color real) y previas evaluaciones en terreno. Dentro del área de estudio se identificaron principalmente individuos de eucaliptus de aproximadamente 10 metros de altura y otras especies de menor altura (matorrales). En la Figura 53 a) se muestran los obstáculos identificados al interior de la comunidad, los cuales corresponden principalmente a grupos de árboles que poseen una altura mínima de dos metros de altura. En b) se muestra el área de influencia afectada por dichos obstáculos, basándose en un radio de influencia de 60 metros.

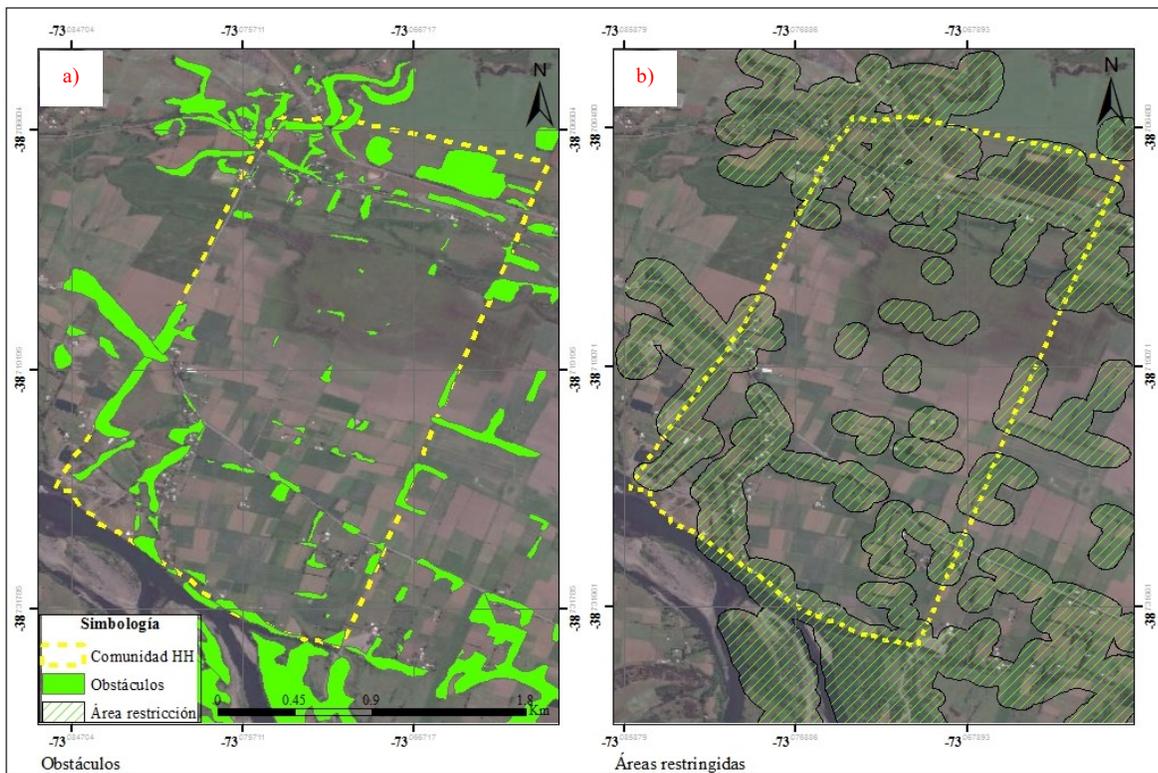


Figura 53. Distancia a obstáculos presentes en el entorno natural. Fuente: Elaboración propia, 2015.

- Distancia a caminos:

Se identificaron los caminos principales e interiores de la comunidad de estudio. Los caminos interiores son de tierra y liberan una gran cantidad de polvo al momento de transitar vehículos. En la Figura 54 a) se muestra una capa de los caminos rurales (en color amarillo) y urbanos (en azul) que se encuentran al interior de la comunidad. En b) se visualizan las áreas de influencia generadas por la existencia de los caminos, identificadas como zonas no aptas, debido al levantamiento de polvo por el transporte vehicular.

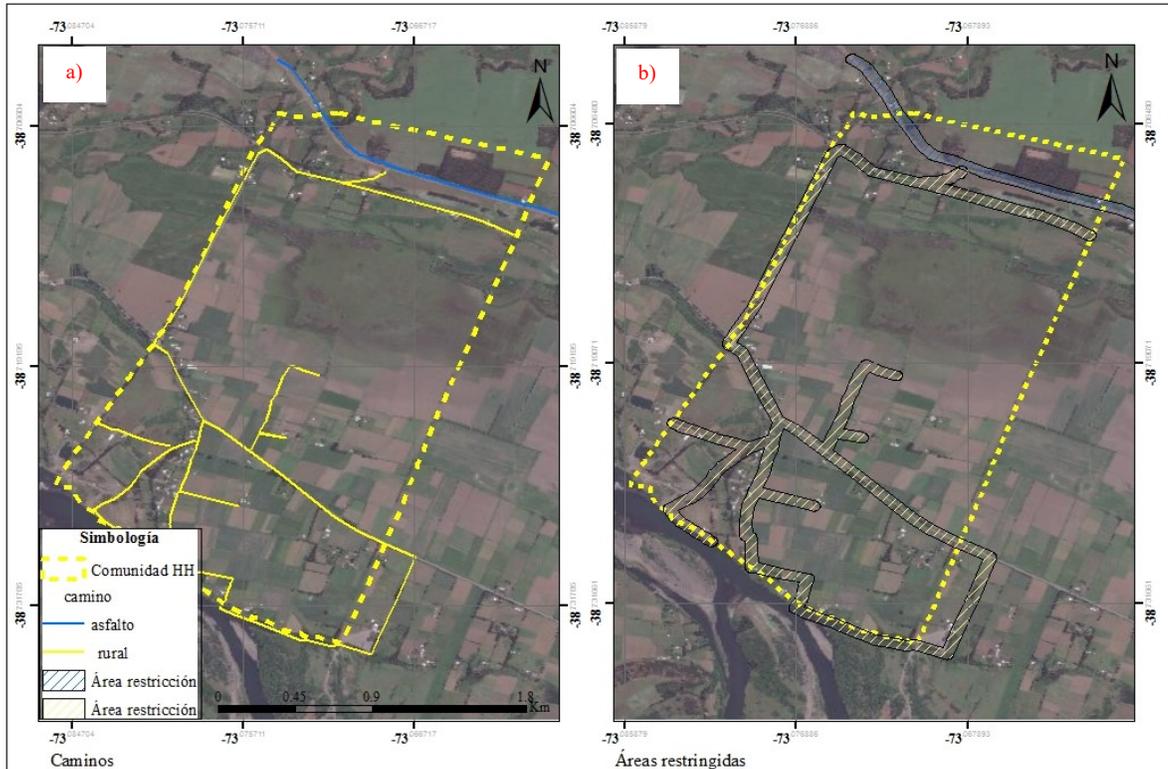


Figura 54. Distancia a caminos. Fuente: Elaboración propia, 2015.

- Sectores restringidos:

Se identificaron diferentes tipos de área al interior de la comunidad, definiéndose áreas de pradera (asociada a cultivo y/o pastoreo), zona de vega y borde de río. Dentro de estas áreas, las que corresponden a vega y borde de río fueron descartadas para la implementación de las unidades de generación por el presente peligro de inundación. En la Figura 55 b) se contemplan los sectores que presentan un carácter restrictivo, debido a que corresponden a la zona de vega (área achurada superior), y dos brazos de río en la zona.

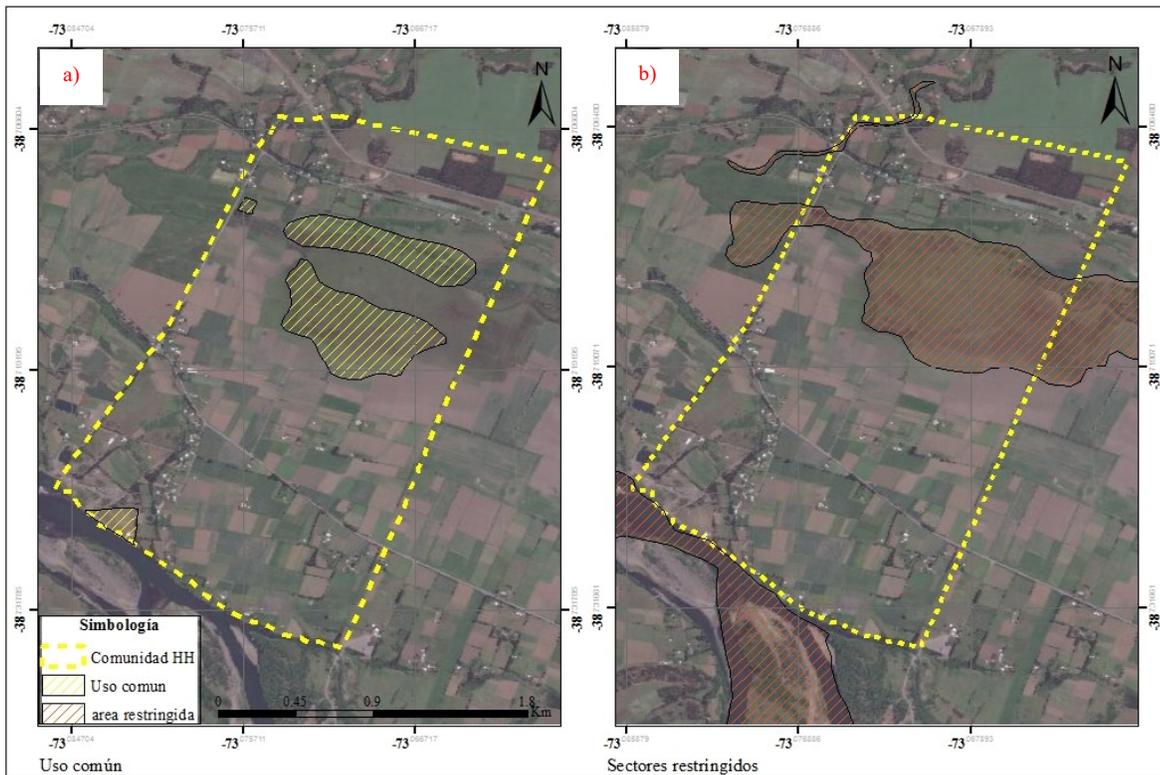


Figura 55. Zonas de uso común y sectores restringidos. Fuente: Elaboración propia, 2015.

- Potencial disponible de recurso renovable:

En la Figura 36 se muestra la información espacial del recurso eólico (m s^{-1}) y radiación global horizontal (kWh m^{-2}) presente al interior de la comunidad. Como se menciona anteriormente, al tratarse de una comunidad que abarca una superficie relativamente pequeña, no se ve afectada de forma significativa el recurso solar. Sin embargo, en cuanto al recurso eólico, como se logra apreciar en cuanto al recurso eólico, se presenta una mayor variabilidad al interior de la comunidad, por lo que podría incidir de manera directa la selección de un sector u otro para la implementación de las unidades de generación eólica. Se visualiza que hacia la zona noreste de la comunidad, es donde se presenta una mayor cantidad del recurso por lo que se privilegia instalar las unidades de generación eólica.

Criterios sociales:

- Lugares de uso común:

Se identificaron las zonas donde realizan actividades recreativas (cancha de fútbol de Puente Fierro, cancha de Fútbol de Imperialito), zona de pastoreo comunitario y la zona de recolección de camarones). En la Figura 55 a) se muestran las zonas de uso común, entre las que se destacan las áreas de canchas de fútbol (polígonos más pequeños), la zona de recolección de camarones (área achurada superior) y la zona de pastoreo, la cual se ubica en la zona de vega.

- Distancia a infraestructuras:

En la Figura 56 a) se muestran las viviendas e infraestructuras de uso común identificadas al interior de la comunidad. En verde se destacan las viviendas identificadas, mientras que en amarillo se encuentran las infraestructuras de uso común previamente mencionadas. En b) se presenta en polígonos achurados el área de influencia de las viviendas, la cual corresponde a las zonas en las cuales se limita la implementación de las unidades de generación.

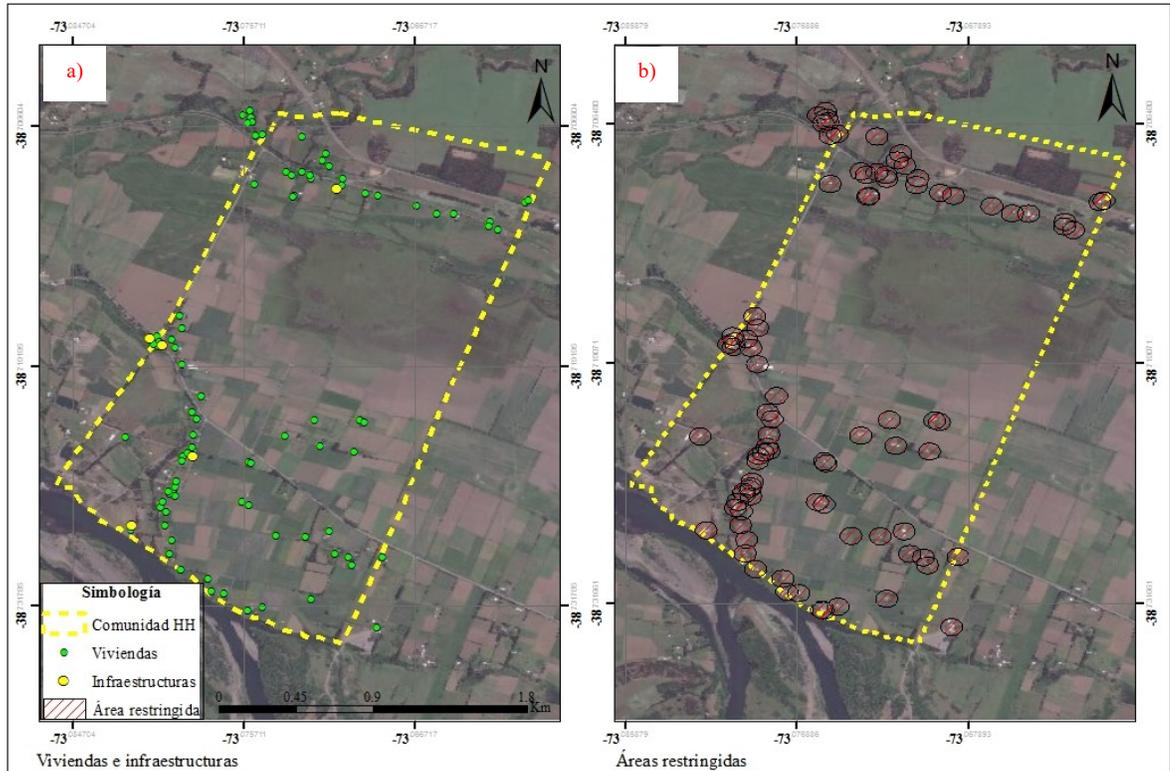


Figura 56. Distancia a viviendas y otras infraestructuras. Fuente: Elaboración propia, 2015.

- Zonas con otros usos:

Se reconocieron las áreas en las cuales se desempeña un uso productivo incompatible con la implementación de las unidades de generación. Se identificaron las áreas de extracción de áridos que existen actualmente dentro de la comunidad. En este criterio no se consideraron como áreas incompatibles, las zonas agrícolas y/o de uso ganadero, ya que éstas zonas se consideran como espacios de uso potencial para la implementación de proyectos de este tipo. En la Figura 57 a) se presentan las zonas con otros usos, identificadas como los lugares en los cuales se realizan actividades de extracción de áridos (dos superficies).



Figura 57. Zonas con otros usos y lugares de interés cultural. Fuente: Elaboración propia, 2015.

- Lugares de interés cultural:

Debido que la comunidad Huanaco Huenchun corresponde a una comunidad Mapuche, la cual mantiene aún tradiciones vinculadas a su etnia, se identificó la zona del Guillatue, lugar en el cual se realizan ceremonias Mapuche tales como los Guillatun. En la Figura 57 b) por otro lado se destaca la única área identificada de interés cultural, la que corresponde al Guillatue (zona achurada).

En la literatura existen otros factores y criterios que poseen repercusiones en la implementación de unidades de generación a mayor escala (Turney y Fthenakis, 2011), los cuales presentan un mayor trabajo de investigación en terreno e ingeniería de detalle dependientes de la topología del sistema eléctrico, por lo que son propios de una etapa más avanzadas de proyecto. Entre estos factores se encuentran los impactos en la avifauna, disminución de contaminación en los sectores aledaños, impactos visuales, cercanía a la red de distribución (punto de conexión), entre otros. En la Figura 58 a) se presenta la capa resultante de áreas restringidas, la cual corresponde a la superposición de capas generadas en base a los criterios condicionantes. Se puede apreciar que gran parte de la superficie que corresponde a la comunidad de Huanaco Huenchun se encuentra dentro de lo que se clasificó como área restringida (263,7 hectáreas), lo que corresponde a un 68 % de la superficie total perteneciente a la comunidad. En base a este procedimiento se generaron

varias zonas que cumplen con las condiciones propuestas, pero que a su vez presentan diferentes superficies, por lo que en la siguiente etapa se definieron las zonas que cumplen con un área mínima para la implementación de las unidades de generación.

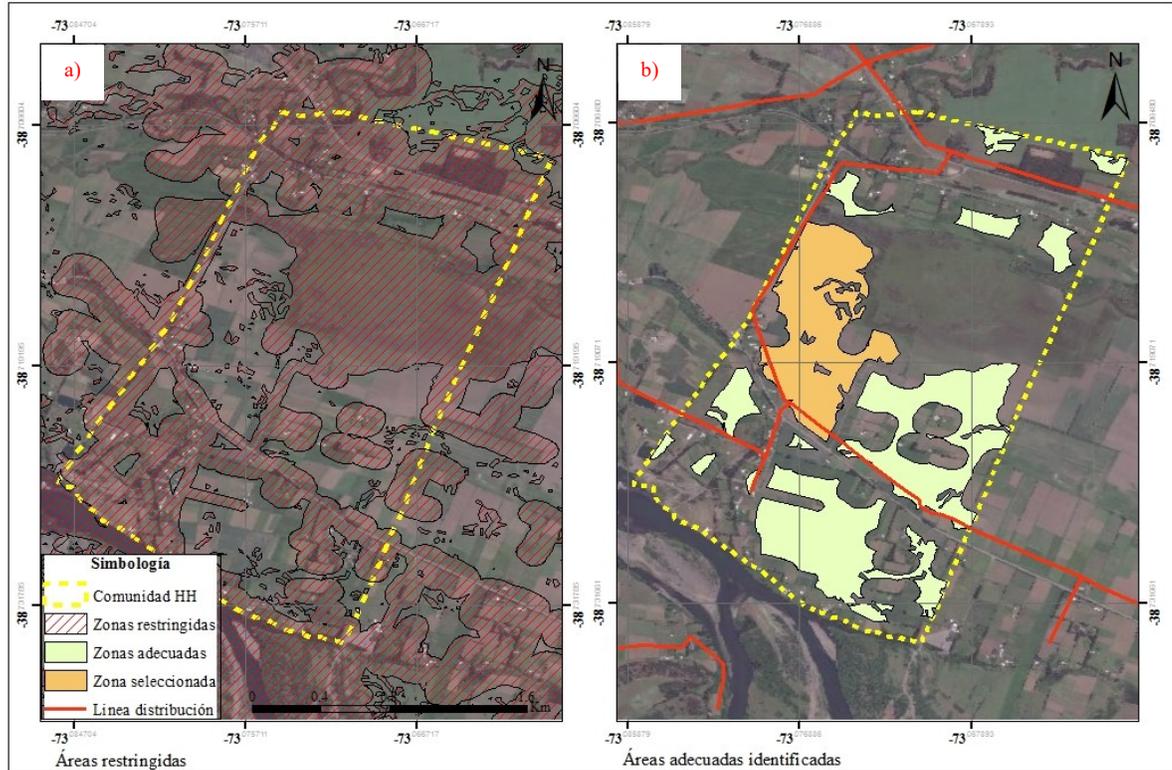


Figura 58. Áreas restringidas y áreas adecuadas identificadas. Fuente: Elaboración propia, 2015.

Por otro lado en la Figura 58 b) se identifican las zonas que cumplen con los criterios (color olivo), como también la zona seleccionada para evaluar las configuraciones de las unidades de generación propuestas (color naranja). Dicha zona posee un área de 39 hectáreas, la cual presenta condiciones medias de velocidad de viento y radiación solar en relación a toda la comunidad. Por otra parte, otra de las ventajas que presenta el lugar seleccionado es que se encuentra cerca del sistema de distribución actual (línea roja) y de los accesos (caminos) de la comunidad, lo que facilita la implementación de un proyecto energético e incurre en la disminución pérdidas de energía y costos asociados a la instalación (Zhichun, et al., 2011).

Considerando la superficie a utilizar por cada una de las configuraciones de las unidades de generación identificadas, el sistema que utiliza una mayor superficie basado en abastecimiento netamente eólico presenta una superficie de 1,16 ha, la cual corresponde a un área relativamente pequeña, por lo que de manera preliminar no existe una limitación de espacio para su implementación. Lo anterior, es debido a que la comunidad presenta una demanda baja de energía en comparación a sectores urbanos y otros rurales, lo que conlleva a requerir una menor superficie a utilizar. Por otro lado, el considerar un análisis espacial

de este tipo, proporciona referencias de los potenciales lugares a utilizar dentro de un área determinada a través de criterios de restricción, discriminando unas sobre otras.

4.2.3. Discusión

La posibilidad de evaluar distintos equipos permitió considerar las ventajas y falencias de cada uno y determinar cuáles son más adecuados para cada situación, evidenciado principalmente en el caso de los aerogeneradores, los cuales presentaban velocidades de arranque y factores de planta muy distintos, lo cual condicionaba su generación de energía eléctrica. Se destaca que a pesar de presentarse unos peaks muy altos de velocidad de viento (sobre 9 m s^{-1}), en general los valores de velocidad de viento son bajos lo que dificulta la factibilidad de disponer de unidades de generación eólica. En cuanto al recurso solar considerando su variabilidad dentro del año, se dificulta su implementación debido a que en los meses de invierno decae hasta tres veces los valores de radiación en relación a la temporada de verano.

La evaluación de las distintas configuraciones planteadas permitió vislumbrar de qué manera aportan energía las unidades de generación durante un año completo para satisfacer la demanda requerida. En base a esto, se identificó como solución más óptima la implementación de un sistema netamente fotovoltaico, ya que permite un abastecimiento más homogéneo a lo largo del año, no teniendo que sobredimensionar el sistema de manera considerable. En el presente estudio se consideraron las configuraciones de unidades de generación de forma predeterminada, lo que en general es determinado a través de un análisis económico, lo cual no fue tomado en cuenta dentro del estudio ya que esto corresponde a una evaluación más específica de un proyecto energético. También se debe mencionar que el análisis del potencial se realizó evaluando un abastecimiento de energía diario, lo que podría variar el resultado de la configuración obtenida si se realizará el balance de energía a través de otra topología, incluyendo sistemas de almacenamiento de energía o abastecimiento de la red eléctrica (*on-grid*) cuando los recursos renovables se ven mermados. El contar con un sistema de almacenamiento de energía permitiría aprovechar los eventos de sobre-generación que se presentan en ciertos días del año. Además, la integración de mecanismos de venta de energía (conocido actualmente como *Net billing*) posibilitaría la entrega de energía a la red principal.

El análisis de las variables territoriales permitió evaluar la capacidad del espacio físico perteneciente a la comunidad, para ser utilizado en la implementación de las unidades de generación. Debido a que el consumo es relativamente bajo, no se dimensionaron grandes sistemas de generación para proveer energía, por lo que la superficie requerida para las configuraciones seleccionadas era muy acotada, no presentándose como un problema mayor las restricciones territoriales identificadas. Aun así, el análisis permitió discriminar zonas en las cuales se cumplían los criterios establecidos, determinando de forma preliminar zonas adecuadas, utilizando información espacializada y de fácil acceso, ideal para su replicación en otros casos. Se debe señalar que existen otras variables que no pudieron ser incorporadas en el estudio, las cuales requieren un mayor trabajo en terreno

(situación legal de los terrenos, existencia de predios comunitarios o individuales, motivación de venta de un predio, entre otros), y son relevantes en una etapa de factibilidad de proyecto. En este análisis se asumieron restricciones generales para ambas fuentes de generación. Se vislumbró que la configuración 100 % fotovoltaica requiere una menor cantidad de espacio físico para su implementación, lo cual le proporciona otra ventaja, en comparación al uso sistemas híbridos o eólicos.

5. CONCLUSIONES

La metodología utilizada permitió realizar una estimación de la demanda eléctrica de una comunidad rural, utilizando mediciones de consumo eléctrico e información de las viviendas de una comunidad rural de la zona centro sur de Chile. Se considera que los resultados obtenidos corresponden a una adecuada aproximación de la demanda eléctrica de la comunidad, condiciéndose con los valores de consumo bimestral proporcionados por la empresa distribuidora.

La posibilidad de integrar información socio-demográfica, permitió considerar las variaciones en el uso de la energía por cada una de las viviendas analizadas, logrando simular perfiles de demanda para un año completo con una alta resolución temporal. Por otro lado, la aplicación de métodos cualitativos permitió recabar la información local necesaria para el desarrollo del estudio. El uso de enfoques probabilísticos ayudo a generar variaciones en los perfiles de demanda diarios, siguiendo el comportamiento estocástico de la demanda residencial, lográndose obtener perfiles de demanda diarios y así mismo, valores de energía y potencia máxima (alrededor de 30 kW) requeridos para satisfacer la comunidad completa, necesarios para el dimensionamiento de un sistema de micro-red. Sin embargo, la falencia de mediciones para un año completo de datos (mínimo), repercutieron en que no se logró realizar una estimación en detalle de las variaciones del comportamiento de la demanda por temporada y el efecto de eventos puntuales en la demanda.

En cuanto a la evaluación del recurso solar y eólico, la comparación de datos proporcionados por el EEE y el EES con datos de una estación meteorológica permitió validar la información proporcionada, la que en general es utilizada de referencia y puede presentar mayores errores en zonas irregulares, o afectadas por algún fenómeno local. Por otra parte, las configuraciones de las unidades de generación demostraron la ventaja de implementar un sistema de generación fotovoltaico, en relación a uno híbrido o eólico, lo que se debe a que las condiciones locales del recurso eólico son desfavorables para la generación de energía. Además, la gran variabilidad de las velocidades de viento, provoca una inestabilidad en la generación de energía a partir de este recurso. La configuración seleccionada de 70 kW de potencia fotovoltaica instalada permite abastecer a un 90 % de los días del año, lo cual con la ayuda de sistemas de almacenamiento o *back-up* se podría complementar sin mayores inconvenientes, llegando a alcanzar una configuración más óptima abasteciendo solamente una parte de la demanda (30 o 50 %) con energía fotovoltaica. Cabe recalcar que el análisis espacial en conjunto con la obtención de información en terreno, permitieron considerar las restricciones locales, asociadas a aspectos técnicos y sociales, discriminando sectores más adecuados para la implementación de los sistemas de energía dimensionados, utilizando información espacial y de fácil acceso, ideal para su replicación en otros territorios. En cuanto a este punto, en la comunidad se identificó una gran área a ser utilizada para la generación de energía renovable, suficiente para suplir las necesidades de energía eléctrica de la comunidad.

Se concluye que las estimaciones de demanda y potencial energético se obtuvieron con un gran nivel de detalle, lo que permite que estos datos sean utilizados como entrada para el dimensionamiento de un sistema de micro-red propiamente tal. Como trabajo futuro se considera la integración de aspectos económicos y legales, como también la inclusión de otras características sociales que se deben analizar en detalle en una etapa de factibilidad de un proyecto de micro-redes. De forma complementaria, se debe mencionar que la metodología utilizada al abarcar aspectos generales, es posible de ser replicada en otro tipo de comunidades rurales que no necesariamente cuenten con un contexto local similar

6. BIBLIOGRAFÍA

Abdullah M.A. and S. Kennedy. 2015. A Simulation gaming approach to micro-grid design and planning: participatory design and capacity building. (pp. 1-16). In: Symposium: innovating access for remote areas: discovering untapped resources (April 2014, Berkeley, United States). Minigrids – Participatory energy ecosystems (Conference). Berkeley, United States: UC Berkeley. 16p.

Akdag S. and A. Dinler. 2009, Jul. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications. *Energy Conversion and Management*. 50 (7): 1761 – 1766.

Alvial-Palavicino C.; N. Garrido; G. Jiménez; L. Reyes and R. Palma-Behnke. 2011, Sep. A methodology for community engagement in the introduction for renewable based smart microgrid. *Energy for Sustainable Development*, 15 (3): 314-323.

Asare-Bediako B.; W.L. Kling and P.F. Ribeiro. 2014, Jun. Future residential load profile: Scenario-based analysis of high penetration of heavy loads and distributed generation. *Energy and Buildings*, 75: 228-238.

Azurza O.; I. Arranbide and I. Zubia. 2012. Rural electrification based on renewable energies. A Review. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (March 2012, Santiago de Compostela, Spain). Conference. Santiago de Compostela, Spain. 1 - 6.

Banerji A.; D. Sen; A.K. Bera; D. Ray; D. Paul and A. Bhakat et al. 2012. Microgrid: A review. In: Global Humanitarian Technology Conference: South Asia Satellite. (GHTC-SAS) (August 2013, Trivandrum, India). IEEE Conference. 27 – 35.

Bucher C. and G. Andersson. 2012. Generation of domestic load profiles – an adaptative top-down approach. In: Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS). (June 2012, Istanbul, Turkey). Conference. 436 - 441.

Buhler R. 2010. Integration of renewable energy sources using microgrids, virtual power plants and the energy hub approach [online]. Semester thesis. Electrical engineering. Zurich. Suiza. Power Systems Laboratory. Swiss Federal Institute of Technology (ETH). 40p. Recovered in: <
https://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Raffael_B_hler_Semester_Thesis.pdf> Consulted: 5 December 2015.

Cagni A.; E. Carpaneto; G. Chicco and R. Napoli. 2004. Characterisation of the aggregated load patterns for extra-urban residential customer groups. In: Electrotechnical Conference MELECON 2004 (3°, May, 2004, Dubrovnik, Croatia). IEEE Conference. 951 – 954.

- Camblong H.; J. Sarr; A.T. Niang; O. Curea; J.A. Alzola and E.H. Sylla. 2009, October. Micro-grids project, part 1: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal. *Renewable energy*, 34(10): 2141 – 2150.
- Calvo A.; A. Tartakowsky y T. Maffei. 2011. Transformaciones en las Estructuras Familiares en Chile. (Est.), Ministerio de Planificación. Santiago, Chile. 30p.
- Chowdhury S.; S.P. Chowdhury and P. Crossley. 2009. Microgrids and Active Distribution Networks. 2° edition. London, United Kingdom. Institution of Engineering & Technology. 320p.
- Chow T.T. 2010, Jun. A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. *Applied Energy*, 87 (2): 365-379.
- Chuan L. and Ukil A. 2015, Jul. Modeling and validation of Electrical Load Profiling in Residential Buildings in Singapore. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30 (5): 2800 – 2809.
- Departamento de Geofísica, Universidad de Chile (DGF). 2012. El Explorador Eólico 2012. Descripción y manual de uso. [en línea]. Recuperado en: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/info/Documentacion_Explorador_Eolico_V2_Full.pdf> Consultado el: 4 de diciembre de 2014.
- Emerge Consultores, 2014. Plan de Desarrollo Comunal PLADECOCO 2015 – 2018. Comuna de Nueva Imperial. (Inf.). Nueva Imperial, Región de La Araucanía, Chile. 214p.
- Fu Q. 2013. Modeling, Analyses and Assessment of Microgrids Considering High Renewable Energy Penetration. [online]. Dissertation submitted Doctor of Philosophy in Engineering. Wisconsin, United States. University of Wisconsin-Milwaukee. 191p. Recovered: <<http://dc.uwm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1253&context=etd>> Consulted: 5 December 2015.
- Gruber J.K. and Prodanovic M. 2012. Residential energy load profile generation using probabilistic approach. In: Computer modeling and simulation (EMS), UKSim/ (6th, Nov 2012, Valetta, Malta). AMSS European symposium. 317 – 322.
- Hartono B.S.; Y. Budiyanto and R. Setiabudy. 2013. Review of Microgrid Technology. In: QiR (Quality in Research), 2013 International Conference (Jun 2013, Yogyakarta, Indonesia). 127-132.
- Hatziargyriou N. 2014. Microgrid: architectures and control. Chichester, West Sussex, United Kingdom. 340p.
- Hill M., R. Braaten, S.M. Veitch, B.G. Lees and S. Sharna. 2005, Jul. Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. *Environmental Modelling & Software*. 20 (7): 955-976.

Hobby J. D.; A. Shoshitaishvili and G.H. Tucci. 2011, Oct. Analysis and methodology to segregate residential electricity consumption in different taxonomies. *IEEE transactions on smart grid*, 3(1): 217 – 224.

Hott R. and R. Santini. 2012. GIS-based spatial analysis for large-scale solar power and transmission line issues: case study of Wyoming, U.S. In: Conference American solar energy society meeting (41st. May 2012, Denver, United States). Conference. 1 – 6.

Hunter R.S.; B. Maribo Pedersen; T.F. Pedersen; H. Klug; N. van der Borg; J.A. Dahlberg. 1999. 11. Wind speed measurement and use of cup anemometry. In: Recommended practices for wind turbine testing and evaluation. [online]. 1 edition. France, Paris. IEA. Recovered: https://www.ieawind.org/Task_11/recommended_pract/Recommended%20Practice%201%20Anemometry_secondPrint.pdf. Consulted: 10 December 2015.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE), Chile. 1992. Chile: Ciudades, pueblos y aldeas, Censo 1992. Santiago, Chile. 203p.

International Renewable Energy Agency (IRENA). 2015, Jan. Renewable power generation Costs in 2014. 164p.

Jakhrani A.Q.; A.K. Othman; A.R.H. Rigit and S.R. Samo. 2010. A simple method for the estimation of global solar radiation from sunshine hours and other meteorological parameters. In Sustainable Energy Technologies (ICSET), 2010 (Dec 2010, Kandy, Sri Lanka). IEEE International Conference. 1- 6.

Kadurek P.; W.L. Kling; P.F. Ribeiro and J.F.G. Cobben. 2013. Electricity demand characterization for analyzing residential LV distribution networks. In: PowerTech (POWERTECH) (Jun 2013, Grenoble, France) IEEE Conference. 1-5.

Kim Y-Il.; Ko J.-M. and S-H Choi. 2011. Methods for generating TLPs (typical Load profile) for smart grid based energy programs. In: Computational intelligence Applications in smart grid (CIASG) (Apr 2011, Paris, France). IEEE symposium. 1-6.

Kumar A.; P. Parimita; D. Palit. and A. Chaurey. 2009, Aug. Approach for standardization of off-grid electrification projects. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8): 1946 – 1956.

Leiva R.; C. Herrera y R. Bolocco. 2008. Estudio de Contribución de ERNC al SIC al 2025. ERNC-Energía Eólica en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María Valparaíso, Chile. 87p.

Li S. and T.A. Haskew. 2009. Energy Capture, Conversion, and Control Study of DFIG Wind Turbine under Weibull Wind Distribution. In: Power & Energy Society General Meeting (9^o, Jul 2009, Calgary, Canada). IEEE Conference. 1-9.

Llanos J.; D. Sáez; R. Palma-Behnke; A. Núñez and G. Jiménez-Estévez. 2012. Load Profile Generator and Load Forecasting for a Renewable Based Microgrid Using Self Organizing Maps and Neural Networks. In: Neural Networks (IJCNN) (Jun 2012, Brisbane, Australia). International Joint Conference. 1-8.

Masri S.; N. Mohamad; M.H. Mohamed Hariri. 2012. Wind Speed Analysis at Nibong Tebal. In: Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2012 (Jul 2012, Bali, Indonesia). International Conference. 1- 4.

McLoughlin F.; A. Duffy and M. Conlon. 2012. Analysing domestic electricity smart metering data using self organising maps. In: Integration of renewables into the distribution grid, CIRED 2012 (May 2012, Lisbon, Portugal). Workshop. 1 – 4.

Microgrid Institute, 2015. Resilience through Microgrids. Trends and opportunities for states and communities. In: NASEO 2015 Energy Policy Outlook Conference (Feb 2015, Washington D.C. United States). Presentation in conference. 18p.

Ministerio de Desarrollo Social. 2015. Metodología de formulación de proyectos de electrificación rural. Santiago, Chile. División de Evaluación Social de Inversiones. Santiago, Chile. 28p.

Ministerio de Energía - GIZ. 2014. Energías renovables en Chile. El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé. (inf.) [en línea]. Ministerio de Energía, Santiago, Chile. 145 p. Recuperado en: < http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/Estudios/Potencial_ER_en_Chile_AC.pdf> Consultado el: 20 de Agosto 2015.

Molina A. y R. Rondanelli. 2012. Explorador del recurso solar en Chile. (doc.) [en línea]. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 33p. Recuperado en: < http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/info/Documentacion_Explorador_Solar.pdf> Consultado el: 10 de Septiembre 2015.

National Renewable Energy Laboratory (NREL). 2012, Jul. U.S. Renewable energy technical potentials: A GIS-Based analysis. (tech. rep.) [online]. NREL. Colorado, United States. 40p. Recovered: < <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51946.pdf>> Consulted: 20 October 2015.

Neamt L. and O. Chiver. 2013. A Simple Method for Photovoltaic Energy Estimation. Environment and Electrical Engineering (EEEIC) 2013 (12th, May 2013, Wroclaw, Poland). IEEE International conference. 513 – 516.

Neapolitan R. 2004. Learning Bayesian networks. Illustrated. Chicago, United States. Prentice hall series in artificial intelligence. Northeastern Illinois University. 674p.

Nelson V.; K. L. Starcher; R. Foster; R.N. Clark and D. Raubenheimer. 2002, May. Wind hybrid systems technology characterization. (tech. rep.) [online]. West Texas, United States. 52p. Recovered: https://www.pdfFiller.com/en/project/57350733.htm?form_id=18877908. Consulted: 25 November 2015.

Osiris Technologies, 2016. Osiris 10 Manual. 10 kW Tie Wind Turbine User Manual version 1.1. (tech. doc.). [online]. Shanghai, China. 63p. Recovered: < http://www.osirisenergy.com/download/Osiris10/Osiris_10_users_Manual.pdf>. Consulted: 20 November 2015.

Palma R.; G Jiménez y I. Alarcón. 2009, Mar. Las Energías Renovables No Convencionales en el Mercado Eléctrico Chileno. (Inf.), Comisión Nacional de Energía (CNE). [en línea]. Santiago, Chile. 124p. Recuperado en: < http://antiguo.minenergia.cl/minwww/export/sites/default/05_Public_Estudios/descargas/E_RNC_mercado_electrico_chileno_baja_resolucion.pdf>. Consultado el 20 de Octubre 2015.

Palma-Behnke R.; C Benavides; F. Lanás; B. Severino; L. Reyes; J. Llanos et al. 2013, Jan. Microgrid Energy Management System Based on the Rolling Horizon Strategy. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4 (2): 996 – 1006.

Parhizi S.; H. Lofti; A. Khodai and S. Bahramirad. 2015, Jun. State of the art in research on microgrids: A review. *IEEE Access* 3: 890 – 925.

Patel. M.R. 2006. Wind and Solar Power Systems. Design, Analysis and Operation. Second Edition. New York, United States. 448p.

Pezo, L. 2010. Jóvenes rurales en Chile, aproximaciones a su realidad y problemáticas. (cap. 6, pp.179-201). En: Hernández, R y L. Pezo (eds.) 2010. La Ruralidad chilena actual: Aproximaciones desde la antropología. Santiago de Chile: Colibris, 2010. 388p.

Piller W. 1980. Lastgangsimulation und –synthese des Stromverbrauchs von Haushalten unter Berücksichtigung der Ausgleichsprobleme. Doktotitel. Lehrstuhl und Laboratorium für Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, Technische Universität München. 158p.

Richardson I.; M. Thomson and D. Infield. 2008, Feb. A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy and Buildings* 40(8): 1560 – 1566.

Richardson I.; M. Thomson; D. Infield and C. Clifford. 2010, Oct. Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model. *Energy and Buildings*. 42 (10): 1878 - 1887. Domestic electricity demand model – simulation example. 2010. [online]. CREST (Centre for Renewable Energy Systems Technology), Loughborough University, UK. Recovered: < <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/5786>>. Consulted: 20 August 2015.

Rikalovic A.; I. Cosic and D. Lazarevic. 2014. GIS based multi-criteria analysis for industrial site selection. In DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013 (24th, 2014, Zadar, Croatia). Symposium. 69: 1054 – 1063.

Roman-Barri M.; I. Cairo-Molins; A. Sumer; A. and Sudria-Andreu. 2010. Experience on the implementation of a microgrid project in Barcelona. In: Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe) (Oct 2010, Gothenburg, Sweden). IEEE Conference. 1 – 7.

Sanchez I.B; I.D Espinos; L. M. Sarrion; A. Q. López and I.N. Burgos. 2009. Clients segmentation according to their domestic energy consumption by the use of self-organizing maps. In: Energy Market. EEM 2009 (6th, May 2009, Leuven, Belgium). IEEE International Conference on the European. 1- 6.

Seppala A. 1996, Nov. Load research and load estimation in electricity distribution. (tech. doc.) Technical Research Center of Finland. [online]. Finland. 137p. Recovered: <<http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1996/P289.pdf>> Consulted: 20 August 2015.

Shen D.; A. Izadian. 2014. Modeling and control of a combined wind-solar microgrid. In: Industrial Electronics Society, IECON 2014 (40th, Nov 2014, Dallas, United States). IEEE Conference. 2173 – 2179.

Sociedad Austral de Electricidad S.A. (SAESA) 2014. Dic. Tarifas de suministro eléctrico – 01 de diciembre de 2014. (bol.). [en línea]. Sociedad Austral de Electricidad S.A. (SAESA), Chile. 2p. Recuperado en: <http://portal.saesa.cl:7778/pls/portal/docs/PAGE/PG_CALL_SAESA/SESP_CNS_TARIFAS_GRUPO_SAESA/SESP_CNS_TARIFAS_GRUPO_SAESA_SAESA_14/PUBLICACION_C3%93N%20SAESA%2001-12-2014%209T_15%20.PDF>. Consultado el: 20 de Agosto, 2015.

Sotiropoulos E. 2012. Modeling of German electricity load for pricing of forward contracts. Electrical engineering master thesis. Zurich, Germany. EEH – Power Systems Laboratory. Swiss Federal Institute of Technology (ETH). 78p.

Strbac G. 2008, Dec. Demand side management: Benefits and challenges. *Energy Policy*, 36(12): 4419-4426.

Stroup K.K. 2005, Feb. DOE/NREL inner Mongolia PV/wind hybrid systems pilot projects: a post-installation assessment. (tech. inf.). National Renewable Energy Laboratory (NREL). [online]. Colorado, United States. 125p. Recovered: <<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37678.pdf>>. Consulted: 20 August 2015.

Strunz K.; E. Abbasi and D. Nguyen. 2014, Mar. DC Microgrid for wind and solar power integration. *Emerging and selected topics in powers electronics*, 2(1): 115-126.

Su W.; Z Yuan and M-Y. Chow. 2010. Microgrid planning and operation: solar energy and wind energy. In: IEEE PES General Meeting (Jul 2010, Minneapolis, United States). IEEE Conference. 1 – 7.

Talinli I.; E.Topuz, E. Aydin and S.B. Kabakci. 2011. A Holistic approach for wind farm site selection by FAHP. (ch.10). In: Wind farm – technical regulations, potential and siting assessment. [online]. InTech. In: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/17126.pdf>> Consulted: 25 August 2015.

Ubilla K.; G. Jiménez-Estévez; R. Hernández; L. Reyes-Chamorro; C. Hernández; and B. Severino. 2014. Smart Microgrids as a Solution for Rural Electrification: Ensuring Long-Term Sustainability Through Cadastre and Business Models. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 5 (4): 1310-1318.

Turney D. and V. Fthenakis. 2011, Aug. Environmental Impacts from the Installation and Operation of Large-scale Solar Power Plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (6): 3261 – 3270.

Verdu S.; V., M.O. García; C. Senabre and A.G. Marin. 2006. Classification, filtering and identification of electrical customer load patterns through the use of self-organizing maps. *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4): 1672 – 1682.

Widén J.; M. Lundh; I. Vassileva; E. Dahlquist; K. Ellegard and E. Wackelgard. 2009. Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data-Modelling approach and validation. *Energy and Buildings*, 41(7): 753-768.

White S. and B. Lehman. 2013. A Simple formula for estimating the optimum tilt angles of photovoltaic panels. In: Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL 2013) (14th, June 2013, Salt Lake City, United States) IEEE Workshop. 1 – 8 p.

Wizelius T. 2006. Windpower project development. (tech. inf.), Gotland University. [online] Visby, Sweden. 15p. Recovered: <http://www.wwindea.org/technology/ch02/imgs/Tore_Projectdevelopment_overview02_EN.pdf> Consulted: 20 October 2015.

World Meteorological Organization (WMO), 1983. Guide meteorological instruments and methods of observation. (tech. inf., No. 8). World Meteorological Organization [online]. Geneva, Switzerland. 681p. Recovered: <https://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf> Consulted: 25 August 2015.

Yang W.; A. Xin and G. Yang. 2011. Microgrid's operation-management containing distributed generation system. In: Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2011) (4th, July 2011, Weihai, China). IEEE International Conference. 703- 707.

Yamaguchi Y.; T. Fujimoto and Y. Shimoda. 2011. Occupant behaviour model for households to estimate high-temporal resolution residential electricity demand profile. In: Conference of International Building Performance Simulation Association Sydney (12th, November 2011, Suita, Japan). Conference. 1548 - 1555.

Zhichun Y.; L. Jian, L. Kaipei and C. Wei. 2011. Preliminary study on the technical requirements of the grid-connected microgrid. In: Electric Utility, Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT 2011), (4th, July 2011, Weihai, Shandong, China) International Conference. 1656 – 1662.

Zhu X.; X. Han and P. Wang. 2014, Feb. Past, today and future development of micro-grids in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 42: 1453-1463.

7. APÉNDICES

Apéndice 1. Encuesta General de Localidad.

1. Número de viviendas y habitantes:

Tabla 1. Aspectos demográficos

N° de viviendas de la comunidad completa
Distancia promedio entre viviendas
N° de habitantes total

2. Tipo de demanda:

Es necesario identificar los tipos de demanda que se presentan en dicha localidad, ya sea residencial, industria, y/o comerciales. Es necesario identificar también zonas de uso común, instituciones educacionales, dispensarios médicos, etc., su tamaño y horarios de atención, lo que se sumará al consumo residencial para determinar el perfil de consumo total del poblado.

Tabla 2. Espacios comunes identificados.

Lugar ¹¹	Horario de funcionamiento	N° de asistentes	Observaciones generales
Escuela, colegio o guardería			
Posta rural (wune lawentuwe ruka)			
Almacén o Kiosko			
Microempresa			
Restaurant			
Hostal o alojamiento			
Iglesia o capilla			
Sede Comunitaria (Txawu peyem ruka)			
Otros. Definir.			

3. Festividades y/o eventos sociales de interés:

Se debe considerar eventos particulares en los cuales se incremente o disminuya el número de visitantes o residentes promedio en la localidad, o en su defecto los locatarios presenten mayores actividades sociales. Ejemplo: Ceremonias (Ngillatun, We tripantü).

¹¹ Agregar todos los lugares y zonas de uso común que puedan contribuir a la demanda de suministro eléctrico

Tabla 3. Días festivos o de mayor afluencia (o salida) de gente.

Evento	Fecha de Inicio	Fecha de Término	Observaciones – Cantidad de personas visitantes o que se retiran
--------	-----------------	------------------	--

Es necesario conocer los días festivos y si hay afluencia de gente, lo que se reflejará en un crecimiento de la demanda. En el caso particular de la cultura Mapuche, no existe días establecidos para realizar algunas ceremonias.

4. Alumbrado Público y abastecimiento:

Cuantificar la cantidad de luminarias existentes en la zona y el tipo de luminarias. Además es necesario conocer la calidad del servicio eléctrico actual presente en la zona.

Tabla 4. Aspectos relacionados al alumbrado público.

Pregunta	Sí / No	Cantidad	Horario de operación	Observaciones
¿La comunidad cuenta actualmente con luminaria pública?				

Tabla 5. Aspectos asociados a la calidad del servicio eléctrico.

Pregunta	Sí / No	Duración cortes o fallas	Periodicidad	Observaciones
¿Se presentan fallas (interrupciones) en el servicio eléctrico?				
¿La localidad completa es abastecida mediante la red?				

¿Han existido problemas para pagar la cuenta de la luz? ¿Cree que son muy altos estos precios?

5. **Caracterización de actividades productivas.** El caracterizar la actividad económica permite incluir en las encuestas individuales este aspecto.

Tabla 6. Actividades económicas desarrolladas en la comunidad

Actividades económicas y productivas	Observaciones
--------------------------------------	---------------

Apéndice 2. Encuesta Particular – Proyecto Micro-red Región de La Araucanía.

N° de encuesta :
 Encuestador :
 Persona encuestada :
 Jefe de hogar vivienda:
 Fecha :
 Hora :

1. Datos Generales:

Número de miembros que viven en el hogar

Número de miembros no permanentes¹²

Ingreso económico mensual de la familia*

2. Datos por miembros:

	Miembro 1	Miembro 2	Miembro 3	Miembro 4	Miembro 5	Miembro 6
Edad						
Género						
Nivel de Estudios						
Actividad. Si puede especifique Tipo de trabajo(**)						

¹² Integrantes que viajan regularmente (estudiantes, etc). Indicar lapso (un fin de semana al mes, etc.)

3. Información Complementaria:

Tipo de calefacción que utiliza (A leña, electricidad, etc.)

Con respecto al servicio eléctrico, ¿Se presentan fallas reiteradamente?

¿En el caso de haber fallas, cuánto tiempo quedan sin abastecimiento (en general)?

Aproximadamente, ¿cuánto paga por la cuenta de luz¹³? (valor aproximado)

¿Ha tenido inconvenientes en pagar su cuenta de luz (por el costo)?

¿En su vivienda se presenta una variación entre las personas que están en la semana con respecto al fin de semana?.

4. Festividades y eventos sociales

:

¿Qué eventos considera que son de mayor relevancia dentro de la localidad, considerando eventos tales como fiestas religiosas, festividades, actividades culturales, entre otras (con respecto al movimiento de personas) ¿En festividades y/o eventos sociales cuántas personas llegan o se retiran de su hogar?

Festivo o evento social	Fecha de Inicio	Fecha de Término	Cambio en el N° de personas ¹⁴
-------------------------	-----------------	------------------	---

#

#

#

#

5. Uso de equipos eléctricos

Es necesario identificar los artefactos eléctricos que existen en cada vivienda, además de su horario de uso durante un día promedio. En la siguiente tabla se debe completar con la cantidad de artefactos que se utilizan dentro de un día de semana (lunes a viernes) y en un día de fin de semana (sábado y domingo).

¹³ Si se puede hacer una diferenciación entre un valor de invierno y otro de verano sería ideal.

¹⁴ N° **positivo**: aumenta la cantidad de personas; N° **negativo**: disminuye la cantidad de personas

Anexos**Asignación de Números****(*) Ingreso económico por familia.**

Número Asignado	Ingreso
1	Menor a \$ 100.000
2	Entre \$100.000 y 200.000
3	Entre \$ 200.000 y \$ 300.000
4	Mayor \$ 300.000

() Tipo de trabajo**

Número Asignado	Ocupación
1	Jubilado
2	Dueño de casa
3	Estudiante
4	Trabajo jornada normal (horario de oficina)
5	Trabajo con sistema de turnos
6	Productores para autoconsumo (agropecuario)
7	Ninguno de los anteriores. Definir

Apéndice 3. Resultados de la clasificación realizada mediante el algoritmo SOM.

Cuadro 25. Resultado de la clasificación realizada a través del algoritmo SOM. Se utilizan nombres reducidos para cada vivienda.

Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Jaime_H	Sergio_H	Juan_H	Rayen_C
Cristian_M	Alberto_H	Maria_M	Maribel_M
Juan_C	Bernarda_H	Juan_N	Nelson_A
Olga_M	Sergio_C	Roberto_C	Patricio_M
Maria_H	Elia_H	Maria_LM	Juan_Hui
Nelson_SJ	Jose_RH		Monica_F
Marcelina_N	Ximena_M		Jose_M
Samuel_I	Simon_H		Segundo_M
Laura_C	Juan_Ca		Luis_R
Domingo_N	Jose_Er		Viviana_M
Guillermo_SJ	Rene_H		Victor_J
Jose_E			Jose_C
Juana_N			Mery_C
Hermogenes_H			Gabriela_V
Edison_M			Patricio_Mi
Emilio_C			Manuel_Huinchahue
Maria_MH			Marta_H
Alberto_M			Erika_A
Juana_H			Oswaldo_H
Pedro_H			
Luis_U			
Manuel_C			
Gerardo_M			
Luis_P			
Eva_H			
Jose_MH			
Juan_Hu			
Tito_C			
Maximo_S			

Fuente: Elaboración propia, 2015.

8. ANEXOS

Anexo 1. Asentimiento informado. Este documento es presentado a cada jefe de hogar encuestado para certificar que se encuentra informado del proyecto y aporta de manera voluntaria a este.

 Universidad de Chile	 Universidad de la Frontera
FORMULARIO DE ASENTIMIENTO INFORMADO	
Título del proyecto: Diseño e Implementación de un Prototipo Experimental de Micro-redes para Comunidades Mapuche, FONDEF IDeA - ID14110063	
(DESCRIBIR EL OBJETIVO DEL ESTUDIO Y LOS PROCEDIMIENTOS DE FORMA CLARA Y SENCILLA)	
<p>Hola, mi nombre es _____ y trabajo/estudio en el Departamento/Carrera de _____, de la Universidad de Chile/Universidad de La Frontera. Actualmente estoy realizando un estudio para conocer acerca de aspectos ambientales, sociales, culturales y económicos de esta comunidad que sirvan de base para el estudio del diseño de micro-redes adaptadas a las características de una comunidad Mapuche, y para ello queremos pedirte que nos apoyes.</p> <p>Tu participación en el estudio consistiría en entregar información básica de esta comunidad y sus familias, en los aspectos señalados en el párrafo anterior.</p> <p>Tu participación en el estudio es voluntaria, es decir, si tú no quieres hacerlo puedes decir que no. Es tu decisión si participas o no en el estudio. También es importante que sepas que si en un momento dado ya no quieres continuar en el estudio, no habrá ningún problema, o si no quieres responder a alguna pregunta en particular, tampoco habrá problema.</p> <p>Toda la información que nos proporciones y las mediciones que realicemos nos ayudarán a levantar una línea base para producir un modelo de micro-red.</p> <p>Esta información será confidencial. Esto quiere decir que no diremos a nadie tus respuestas (O RESULTADOS DE MEDICIONES), sólo lo sabrán las personas que forman parte del equipo de este estudio.</p> <p>Si aceptas participar, te pido que por favor pongas una (✓) en el cuadrado de abajo que dice "Sí quiero participar" y escribe tu nombre.</p> <p>Si no quieres participar, no pongas ninguna (✓), ni escribas tu nombre.</p> <p style="margin-left: 40px;"><input type="checkbox"/> Sí quiero participar</p> <p>Nombre: _____</p> <p>Nombre y firma de la persona que obtiene el asentimiento:</p> <p>_____</p> <p>Fecha: ____ de _____ de ____.</p> <p>_____</p>	