



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

**ELECTRIFICACIÓN DEL USO DE CALOR RESIDENCIAL
PROYECCIONES EN CHILE Y SU ROL EN LA GESTIÓN DE DEMANDA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

MÁXIMO IGNACIO PÉREZ SEGUEL

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO MENDOZA ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
SANDRA CÉSPEDES UMAÑA
ANDRÉS CABA RUTTE

SANTIAGO DE CHILE
2021

ELECTRIFICACIÓN DEL USO DE CALOR RESIDENCIAL PROYECCIONES EN CHILE Y SU ROL EN LA GESTIÓN DE DEMANDA

El uso de la leña residencial es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica en la zona centro-sur de Chile, por ello el gobierno ha implementado una serie de políticas públicas para desincentivar su consumo. Las consecuencias de estas acciones son un aumento en el uso de gas y electricidad; desde el punto de vista de la gestión de demanda es útil cuantificar este aumento.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes: primero, se requiere reconocer las principales tendencias de la electrificación del uso de calor residencial y definir un modelo de proyección de demanda; segundo, se requiere proyectar la demanda eléctrica de calor considerando como horizonte el año 2039; y tercero, se requiere estudiar el rol de la electrificación del calor en la gestión de demanda.

La metodología empleada en el presente trabajo consiste en construir una base de datos con la información de los combustibles residenciales utilizados en el país, para luego proyectarlos utilizando los modelos autorregresivos integrados de media móvil y finalmente extraer el porcentaje que corresponde a la electrificación del calor.

De los resultados se obtiene que el consumo de gas licuado de petróleo y electricidad aumentará en todas las zonas geográficas del país, en promedio un 47% y un 60%. El uso de gas natural aumentará en todas las zonas geográficas a excepción de la zona centro-sur, en promedio este aumento será de un 60%. La leña es el único combustible que mantendrá constante su demanda por las restricciones impuestas por el gobierno.

Se observa que la demanda de calor residencial aumentará en todas las zonas geográficas del país en promedio un 12%: el uso de calefacción aumentará en todas las zonas a excepción del norte grande y norte chico, en promedio este aumento será de un 4%; el uso de agua caliente sanitaria aumentará en todas las zonas a excepción de la zona centro-sur y sur. Sin embargo, su uso disminuirá un 9% en promedio; el uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en todas las regiones de Chile, en promedio este aumento será de un 98%.

Por último, se observa que la electrificación del uso de calor residencial, en calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos aumentará en todas las zonas del país en promedio un 60%, 59%, 63% y 59% respectivamente. Del análisis se pudo inferir que la gestión de la demanda de calor, utilizando el control directo de cargas, es factible realizar a los calefactores eléctricos y termoeléctricos. Sin embargo, no es posible de realizar en los electrodomésticos de la cocina porque las necesidades de alimentación son de carácter impostergable.

Agradecimientos

A mis padres Máximo y Ximena por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, por brindarme todas las oportunidades y enseñarme a ser feliz. Agradezco a mis abuelos por brindarme sus palabras de sabiduría y apoyarme desde la distancia.

Agradezco a Vanessa por apoyarme moralmente durante la elaboración de este trabajo. Gracias por tu afecto, paciencia y comprensión. Agradezco a todas mis amigas y amigos de la universidad, por las miles aventuras y experiencias que hemos vivido.

Muchas gracias a mi profesor guía Patricio Mendoza, por brindarme la oportunidad de realizar la memoria en un tema de mi interés y por el apoyo y compromiso que me otorgó a lo largo del trabajo.

Agradezco a la profesora Sandra Céspedes y el profesor Andrés Caba por el tiempo dedicado a para resolver mis inquietudes. Gracias a Martín Vicencio por orientarme con el estudio de gestión de demanda eléctrica.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Específicos	2
1.4. Alcances	2
1.5. Estructura del Documento	2
2. Revisión Bibliográfica	3
2.1. Sistemas de Calefacción Residencial	3
2.1.1. Sistemas Solares en las Viviendas	3
2.1.2. Bombas de Calor	4
2.1.3. Calefacción Distrital	6
2.1.4. Cogeneración (CHP)	8
2.2. Aislación Residencial	9
2.3. Caracterización de la Leña	12
2.4. Pobreza Energética	14
2.5. Objetivos País	15
2.6. Políticas Públicas	15
2.6.1. Cronología de los Avances Realizados en Chile	16
2.7. Marco Regulatorio	19
2.8. Gestión de la Demanda	20
3. Marco Conceptual	22
3.1. Zonas Geográficas	22
3.2. Series de Tiempo	22
3.3. Modelos de Proyección	27
3.4. Metodología Box-Jenkins	28
3.4.1. Sin Variable Externa	28
3.4.2. Con Variable Externa	30
4. Metodología	32
4.1. Base de datos	34
4.1.1. Demanda Eléctrica	34
4.1.2. Consumo de Gas	36
4.1.3. Consumo de Leña	37
4.1.4. Variables Externas	38
4.2. Implementación en R	41
4.3. Ejemplo: Región de la Araucanía	42

4.3.1. Estacionariedad y Estacionalidad	42
4.3.2. Variables Externas en la Araucanía	45
4.3.3. Construcción del Modelo	46
4.3.4. Errores del Modelo	48
4.3.5. Proyección de los Combustibles	49
4.3.6. Ponderadores de Calor	50
4.3.7. Electrificación del Uso de Calor en la Araucanía	51
5. Resultados	52
5.1. País	52
5.2. Norte Grande	56
5.3. Norte Chico	59
5.4. Zona Centro	62
5.5. Zona Centro-Sur	65
5.6. Zona Sur	68
6. Análisis de los Resultados	71
6.1. Discusión	71
6.2. Observaciones	72
6.3. Gestión de la Demanda	73
6.3.1. Medidas de Eficiencia Energética	73
6.3.2. Control Directo de Carga	75
7. Conclusión	76
8. Trabajo Futuro	77
Bibliografía	78
Anexo A. Combustibles Residenciales	82
Anexo B. Demanda de Calor	88
Anexo C. Electrificación del Uso de Calor Residencial	94
Anexo D. Correlación de Pearson	100
Anexo E. Errores	101
Anexo F. Efecto de las Variables Externas	104
Anexo G. Ponderadores de Calor	105
Anexo H. Repositorio	111

Índice de Tablas

2.1.	Conductividad térmica de los materiales	10
2.2.	Uso de leña por región. Fuente: [28]	13
4.1.	Conversión eléctrica del gas licuado de petróleo. Fuente: [63]	36
4.2.	Conversión eléctrica del gas natural. Fuente: [63]	37
4.3.	Distribución del consumo de leña en el país. Fuente: [64]	37
4.4.	Equivalente eléctrico de la leña para diferentes niveles de humedad. Fuente: [65]	38
4.5.	Test ADF aplicado a la demanda eléctrica residencial	44
4.6.	Test KPSS aplicado a la demanda eléctrica residencial	44
4.7.	Coefficiente de correlación de Pearson entre la demanda eléctrica residencial de la Araucanía y las variables externas	45
4.8.	Test de Granger entre la demanda eléctrica y las variables externas	45
4.9.	Construcción de los modelos de proyección de demanda	46
4.10.	Test de Ljung Box en la Araucanía	48
4.11.	Errores en las proyecciones de demanda eléctrica de la Araucanía	48
4.12.	Demanda anual de calor por vivienda y ponderadores anuales a nivel nacional. Fuente: [2]	50
5.1.	Indicadores de los resultados a nivel nacional	55
5.2.	Indicadores de los resultados en el norte grande	58
5.3.	Indicadores de los resultados en el norte chico	61
5.4.	Indicadores de los resultados en la zona centro	64
5.5.	Indicadores de los resultados en la zona centro-sur	67
5.6.	Indicadores de los resultados en la zona sur	70
6.1.	Recambio de electrodomésticos en una cocina	74
6.2.	Recambio de un termo eléctrico	75
A.1.	Proyección de los principales combustibles utilizados hogares chilenos	82
A.2.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte grande	83
A.3.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte chico	84
A.4.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona central	85
A.5.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona centro-sur	86
A.6.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona sur	87
B.1.	Proyección de la demanda de calor residencial en Chile	88
B.2.	Proyección de la demanda de calor residencial en el norte grande	89
B.3.	Proyección de la demanda de calor residencial en el norte chico	90

B.4.	Proyección de la demanda de calor residencial en la zona central	91
B.5.	Proyección de la demanda de calor residencial en la zona centro-sur	92
B.6.	Proyección de la demanda de calor residencial en la zona sur	93
C.1.	Electrificación del uso de calor residencial en Chile	94
C.2.	Electrificación del uso de calor residencial en el norte grande	95
C.3.	Electrificación del uso de calor residencial en el norte chico	96
C.4.	Electrificación del uso de calor residencial en la zona central	97
C.5.	Electrificación del uso de calor residencial en la zona centro-sur	98
C.6.	Electrificación del uso de calor residencial en la zona sur	99
D.1.	Coefficiente de correlación de Pearson entre la demanda eléctrica residencial y las variables externas	100
E.1.	Error absoluto medio de las proyecciones	101
E.2.	Errores en las proyecciones del consumo de leña residencial	101
E.3.	Errores en las proyecciones de demanda eléctrica residencial	102
E.4.	Errores en las proyecciones del consumo de gas licuado de petróleo residencial	102
E.5.	Errores en las proyecciones del consumo de gas natural residencial	103
F.1.	Efecto de las variables externas en la proyección de la demanda eléctrica	104
G.1.	Ponderadores del Norte Grande, Norte Chico y la Región de Valparaíso. Fuente: [2]	105
G.2.	Ponderadores de la zona central, centro-sur y la región de Los Ríos. Fuente: [2]	106
G.3.	Ponderadores de la zona sur, sin considerar a la región de Los Ríos. Fuente: [2]	106
G.4.	Ponderadores de calor para las diferentes zonas geográficas	107
G.5.	Ponderadores de calefacción para las diferentes zonas geográficas	108
G.6.	Ponderadores de agua caliente sanitaria para las diferentes zonas geográficas	109
G.7.	Ponderadores en la cocción de alimentos sanitaria para las diferentes zonas geográficas	110
G.8.	Ponderadores para la electrificación del calor	110

Índice de Ilustraciones

2.1.	Bomba de calor aerotérmica. Fuente: [7]	5
2.2.	Calefacción distrital. Fuente: [14]	7
2.3.	Tipos de techo. Fuente: [20]	9
2.4.	Tipos de ventanas. Fuente: [21]	11
2.5.	Marcos de ventanas. Fuente: [21]	11
3.1.	Estacionariedad en series de tiempo	23
3.2.	Diagrama de flujo de los modelos de proyección: sin variable externa	29
3.3.	Diagrama de flujo de los modelos de proyección: con variable externa	31
4.1.	Diagrama de flujo de la metodología utilizada	33
4.2.	Presencia de un escalón en la demanda eléctrica residencial	35
4.3.	Caída en la demanda eléctrica residencial	35
4.4.	Caída en el consumo mensual de gas licuado de petróleo	36
4.5.	Electromovilidad y generación distribuida	39
4.6.	Eficiencia energética y población de Chile	39
4.7.	Producto interno bruto regional y precio del gas	40
4.8.	Proyección del precio del petróleo en Chile	40
4.9.	Demanda eléctrica residencial de la Araucanía	42
4.10.	Logaritmo natural de la demanda eléctrica en la Araucanía	43
4.11.	Primeras diferencias en la región de la Araucanía	43
4.12.	Estacionalidad de la demanda eléctrica en la Araucanía	44
4.13.	ACF de la región de la Araucanía	47
4.14.	PACF de la región de la Araucanía	47
4.15.	Residuos de la demanda eléctrica en la región de la Araucanía	48
4.16.	Proyección de la demanda eléctrica residencial en la Araucanía	49
4.17.	Proyección de los combustibles residenciales en la Araucanía	49
4.18.	Demanda de calor residencial de la Araucanía	51
4.19.	Electrificación del uso de calor residencial en la Araucanía	51
5.1.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares chilenos	53
5.2.	Proyección de la demanda de calor en Chile	54
5.3.	Proyección de la demanda eléctrica de calor en Chile	55
5.4.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte grande	56
5.5.	Proyección de la demanda de calor en el norte grande	57
5.6.	Proyección de la demanda eléctrica de calor en el norte grande	58
5.7.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte chico	59
5.8.	Proyección de la demanda de calor en el norte chico	60
5.9.	Proyección de la demanda eléctrica del calor en el norte chico	61

5.10.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona centro	62
5.11.	Proyección de la demanda de calor en la zona centro	63
5.12.	Proyección de la demanda eléctrica de calor en la zona centro	64
5.13.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona centro-sur	65
5.14.	Proyección de la demanda de calor en la zona centro-sur	66
5.15.	Proyección de la demanda eléctrica de calor en la zona centro-sur	67
5.16.	Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona sur	68
5.17.	Proyección de la demanda de calor en la zona sur	69
5.18.	Proyección de la demanda eléctrica de calor en la zona sur	70

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El uso de la leña residencial es una de las principales fuentes de contaminación atmosférica en la zona centro-sur de Chile. De tal magnitud es el problema que varios medios de comunicación del mundo han tildado a las ciudades de la zona como las más contaminadas de latinoamérica [1]. El gobierno ha tomado cartas en el asunto y ha implementado una serie de políticas públicas para desincentivar el consumo de leña, como el programa de recambio de calefactores y el mejoramiento de la aislación residencial y además se han impuesto varias restricciones al uso de leña residencial.

La importancia de la leña radica en que representa aproximadamente dos quintos de la demanda energética de los hogares y se utiliza principalmente para calefaccionar las viviendas, calentar el agua y cocinar los alimentos [2]; las restricciones impuestas provocarán una disminución de su consumo y aumentarán la demanda de otros combustibles como el gas y la electricidad. Desde el punto de vista de la gestión de demanda es importante conocer en cuanto aumentará el uso eléctrico del calor porque no se sabe si la infraestructura eléctrica es la adecuada para enfrentar en conjunto este aumento y la penetración de las energías renovables no convencionales.

El presente trabajo tiene como finalidad responder las interrogantes anteriores. Para ello se realizará una revisión bibliográfica de los temas más relevantes en la electrificación del uso de calor residencial con el fin de definir una metodología y un modelo para proyectar la demanda eléctrica residencial de calor. Los principales desafíos a superar son la falta de documentación con respecto al calor residencial, la obtención de datos a nivel regional, la caracterización de la leña y la definición de un modelo que permita realizar proyecciones adecuadas.

La metodología que se utilizará para realizar las proyecciones consta de las siguientes etapas: primero, se construirá una base de datos con la información histórica de la demanda de gas, electricidad y leña. Luego, utilizando la información de la revisión bibliográfica y los modelos de series de tiempo se proyectará la demanda anual de los combustibles. Por último, utilizando ponderadores se extraerá de las proyecciones la demanda de calor y la electrificación del uso de calor residencial.

1.2. Objetivo General

El objetivo general de la presente memoria es proyectar la electrificación del uso de calor residencial y su rol en la gestión de demanda eléctrica chilena.

1.3. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de la presente memoria son:

- Reconocer el estado actual y tendencias en la electrificación del uso de calor residencial.
- Desarrollar una proyección de la demanda eléctrica que permita cuantificar el uso de calor residencial.
- Evaluar el impacto de la electrificación de calor residencial y su rol en el agregador de demanda.

1.4. Alcances

- Las proyecciones de la electrificación del uso de calor residencial se presentarán para 5 zonas geográficas: norte grande, norte chico, centro, centro-sur y sur.
- En el desarrollo del trabajo no se consideró el uso de kerosene ni de pellet debido a que la penetración conjunta de estos combustibles es de aproximadamente un 3% a nivel residencial [2].
- Se consideró como horizonte de tiempo el año 2039 debido a que la información disponible de las variables externas se encontraba proyectada para ese año.

1.5. Estructura del Documento

Esta memoria se encuentra dividida en 8 capítulos. En el capítulo 2 se realiza una revisión bibliográfica sobre sistemas de calefacción residencial, aislamiento térmica, el mercado de la leña, la pobreza energética, el marco regulatorio, políticas públicas y gestión de demanda.

En el capítulo 3 se realiza un marco conceptual sobre los modelos de series de tiempo y se definen las zonas geográficas en las cuales se realizarán las proyecciones.

En el capítulo 4 se establece la metodología a seguir en el desarrollo del trabajo, se menciona el software utilizado y se ilustra el método con un ejemplo a nivel regional.

En el capítulo 5 se presentan los resultados de las proyecciones del eléctrico del calor residencial para las cinco zonas geográficas del país.

En el capítulo 6 se presenta un análisis de los resultados, las principales observaciones externas y el rol de la electrificación del calor en la gestión de demanda.

En los capítulos 7 y 8 se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

El objetivo de este capítulo es abordar los principales temas relacionados con la electrificación del uso de calor residencial, se estudian los sistemas de calefacción residencial, aislación residencial, se caracteriza el mercado de la leña, se menciona el concepto de pobreza energética, se estudian los principales usos de la energía en Chile, se establece un marco regulatorio, se investigan las políticas públicas implementadas en el país que guarden alguna relación con el uso de calor residencial y se menciona el rol de la gestión de demanda.

2.1. Sistemas de Calefacción Residencial

Los sistemas de calefacción residencial pueden tener diversas aplicaciones, se pueden utilizar para la climatización del hogar, la cocción de alimentos, el agua caliente sanitaria, etc. En esta sección se introducirán las principales tecnologías de calefacción que podrían tener un mayor impacto en la lucha contra la contaminación atmosférica, la pobreza energética y el uso de leña en la comunas del centro-sur del país.

2.1.1. Sistemas Solares en las Viviendas

El objetivo de esta subsección es explicar en que consisten las instalaciones de sistemas solares en las viviendas, determinar cuales son sus beneficios, su normativa e indicar la bibliografía utilizada.

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del sol, su aprovechamiento se basa en el principio de que la energía contenida en las partículas de luz (los fotones) puede ser convertida en electricidad, debido al efecto fotoeléctrico. Gracias a la utilización de las celdas fotovoltaicas, láminas metálicas semiconductoras, se puede obtener energía a bajas tensiones y en corriente continua, es importante mencionar que para transformar esta corriente DC en corriente AC se utiliza un inversor. Los aparatos donde se encuentran estas celdas fotovoltaicas se denominan paneles solares, que pueden ser usados para uso personal y/o familiar [3].

Mediante la instalación de un sistema solar un hogar podría ser capaz de autoabastecer su consumo eléctrico, térmico e incluso inyectar los excedentes a la red eléctrica, es importante considerar que los costos de inversión de un sistema solar podrían ser considerables para

una familia chilena si la instalación incluye los paneles solares, los soportes, los inversores DC/DC, los inversores AC/AC, los sistemas de almacenamiento, entre otros. La tecnología solar puede ser empleada de dos formas:

- Una instalación aislada: En este tipo de instalación la electricidad generada por los paneles solares se destina únicamente al autoconsumo, debido a que estas viviendas no tiene acceso a la red eléctrica.
- Conectada a la red: En este tipo de instalaciones la corriente eléctrica producida por los paneles solares puede ser inyectada a la red eléctrica, se puede destinar la energía producida para el consumo propio y el excedente inyectarlo a la red a través de un agregador de demanda.

A continuación se mencionarán las principales normativas asociadas a la instalación de los sistemas solares térmicos.

- NCh-IEC 61215-1, NCh-IEC 61215-2: Se definen y detallan los procedimientos y ensayos mínimos exigidos por la SEC para que los módulos fotovoltaicos inyecten energía a la red.
- NCh-IEC 62446-1, NCh 3650: Contienen las especificaciones de los ensayos mínimos para poner en marcha, operar y mantener una planta fotovoltaica.
- NCh-IEC/TS 62548: Se enfoca en describir los requisitos de diseño para sistemas fotovoltaicos, incluyendo el cableado de los arreglos de corriente continua, dispositivos de protección eléctrica, disposiciones entre conmutación y puesta a tierra.
- NCh-IEC 61829: Incluye una descripción de los procedimientos para las mediciones in situ de las características de los arreglos fotovoltaicos, de las mediciones meteorológicas presentes y el uso de estas para sus condiciones de potencia nominal u otras condiciones a definir.
- NCh-IEC 61701: Describe las secuencias de ensayos útiles para determinar la resistencia de diferentes módulos fotovoltaicos a la corrosión producida por niebla salina.
- NCh-IEC 62093: Determina las características de desempeño de cada uno de los componentes de los paneles fotovoltaicos luego de exponerse a las condiciones ambientales naturales de servicio simuladas para las cuales se prevé su aplicación.

Para una investigación más profunda en sistemas solares térmicos se puede consultar [3], [4] y [5].

2.1.2. Bombas de Calor

El objetivo de esta subsección es explicar brevemente que son las bombas de calor, determinar cuales son sus beneficios, las principales tecnologías utilizadas, su normativa, reglamentación e indicar la bibliografía utilizada.

Las bombas de calor son máquinas térmicas que pueden calefaccionar o refrigerar un recinto [7]. Su funcionamiento está basado en el ciclo termodinámico de Carnot, se busca aprovechar la energía de los cambios de estado de un fluido para refrigerar o calefaccionar, si el fluido

se evapora este extrae calor del entorno y refrigera, si el fluido se condensa entrega calor al entorno y se calienta el recinto.

La instalación de una bomba de calor consta de un circuito cerrado en la cual un fluido gaseoso pasa a través de un compresor para aumentar su temperatura, luego este fluido entra en contacto con otro que se encuentra a una temperatura menor, dentro de una estructura denominada condensador. El calor se transfiere de temperaturas mayores a menores hasta que el fluido inicial se condensa liberando energía para calentar el medio. Por otro lado, para refrigerar un recinto el fluido resultante, en estado líquido, atraviesa una válvula que reduce la sección transversal del tubo, cuya finalidad es reducir la presión para luego aumentar el área del tubo y provocar una caída de presión muy rápida que lleve al líquido al estado gaseoso, para que el líquido se evapore se requiere de una cantidad extra de energía, que toma del entorno más cercano, y esto se aprovechará para refrigerar el recinto [6]. El proceso descrito se muestra en la Figura 2.1.

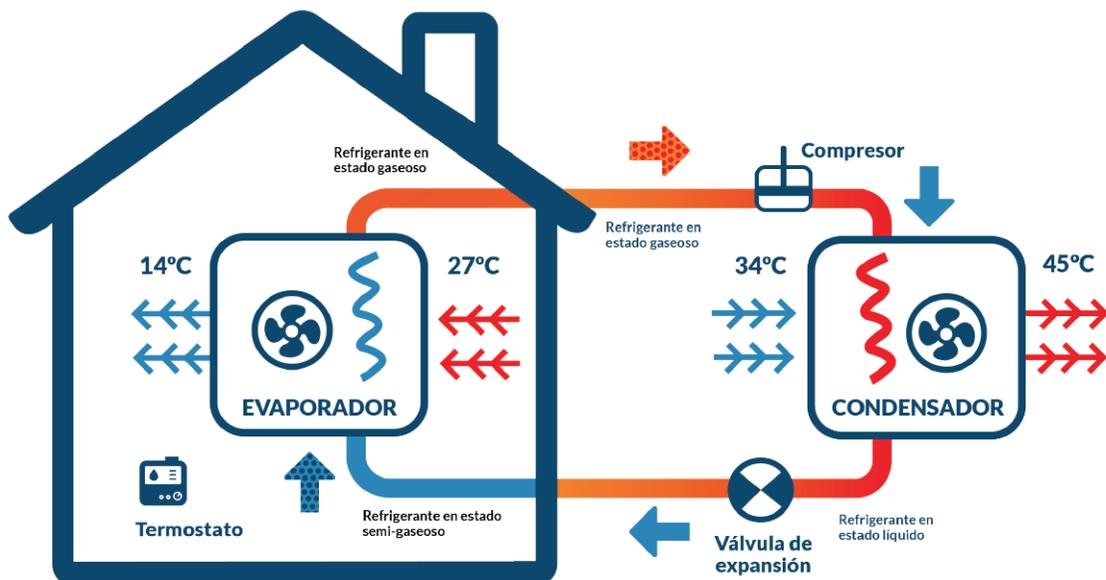


Figura 2.1: Bomba de calor aerotérmica. Fuente: [7]

La implementación de esta tecnología podría reducir el uso de combustibles fósiles y evitar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Es relevante mencionar que para calentar adecuadamente una vivienda se conecta la bomba de calor a un sistema de distribución térmico, que puede ser de calefacción distrital, y se distribuye el calor a través de emisores. Los más utilizados son los siguientes [8]:

- **Suelo radiante:** El suelo radiante es un sistema eficiente para calentar hogares y la razón consiste en que al estar las tuberías por debajo del suelo se obtiene una alta superficie para la transferencia térmica.
- **Fan Coil o Venticonvector:** El ventiloconvector es una unidad que contiene una batería térmica y un ventilador para realizar una convección forzada aplicado a la batería, que puede enfriar o calentar un ambiente sin dificultades. Esta unidad, para instalación

en viviendas, debe ser idealmente compacta, por lo que disminuye la superficie de intercambio térmico en relación al suelo radiante. Tiene la ventaja de tener buena respuesta para calefacción y refrigeración, además de poder implementarse en cualquier tipo de vivienda, sea nueva o construida.

- **Radiador:** Un radiador es similar a un ventilconvector, pero no contiene el ventilador para realizar convección forzada. También son unidades compactas que al no tener radiación forzada, la temperatura de operación para calefacción es mayor que en el ventilconvector, operando usualmente a 70[°C]. Además, al no contar con convección forzada, la transferencia de calor entre la unidad y la vivienda es más lenta.

Las bombas de calor pueden ser empleadas en sistemas de calefacción distrital, tema abordado en la siguiente subsección, y de energía geotérmica. La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor natural de la tierra, se pueden aprovechar anomalías termales, lugares donde el magma está cerca de la superficie, y se puede aprovechar la inercia térmica de la tierra [13]. Las bombas de calor geotérmicas representan el 70 % de la capacidad de usos directos de la geotermia a nivel mundial, de ahí la importancia de la siguiente ley:

- Ley N°19.657: Ley sobre las concesiones de energía geotérmica promulgada en enero del año 2000, en donde se definió la energía geotérmica como un bien del estado. Se estableció un sistema concesional para la exploración y explotación del recurso geotérmico para fines eléctricos o térmicos, excluyendo fuentes termales de uso turístico, sanitario o de esparcimiento. El 11 de abril del 2019 se ingresó un proyecto de ley que buscaba modificar esta ley, para excluir proyectos de baja entalpía del sistema concesional, crear nuevos estándares de seguridad, una nueva entidad de fiscalización, entre otros puntos administrativos.

Para una investigación más profunda de las bombas de calor se puede consultar [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12] y [13].

2.1.3. Calefacción Distrital

El objetivo de esta subsección es explicar brevemente en que consiste la calefacción distrital, determinar cuales son sus principales beneficios, su normativa, reglamentación e indicar la bibliografía utilizada.

La calefacción distrital es un sistema que permite abastecer simultáneamente a distintas edificaciones con energía térmica para sus necesidades de calefacción, climatización, agua caliente sanitaria u otros procesos. Este sistema consiste en una red de tuberías subterráneas aisladas, que conducen agua fría o caliente para abastecer a múltiples edificaciones en un distrito, un vecindario o una ciudad. Algunos sistemas conectan pocos edificios, mientras que otros conectan a miles de edificios y viviendas a lo largo de una ciudad [14].

La energía distrital presenta una gran flexibilidad en su diseño, permite incorporar tecnologías de cogeneración o trigeneración, almacenamiento térmico y la utilización de más de un tipo de combustible en la central térmica para hacer frente a las horas de punta. En la Figura 2.2, se observa como una central térmica puede incorporar residuos, biomasa, bombas de calor

y gas para la generación eléctrica y como el calor residual se distribuye a un vecindario en donde los hogares pueden contar con sistemas solares e intercambiadores de calor.

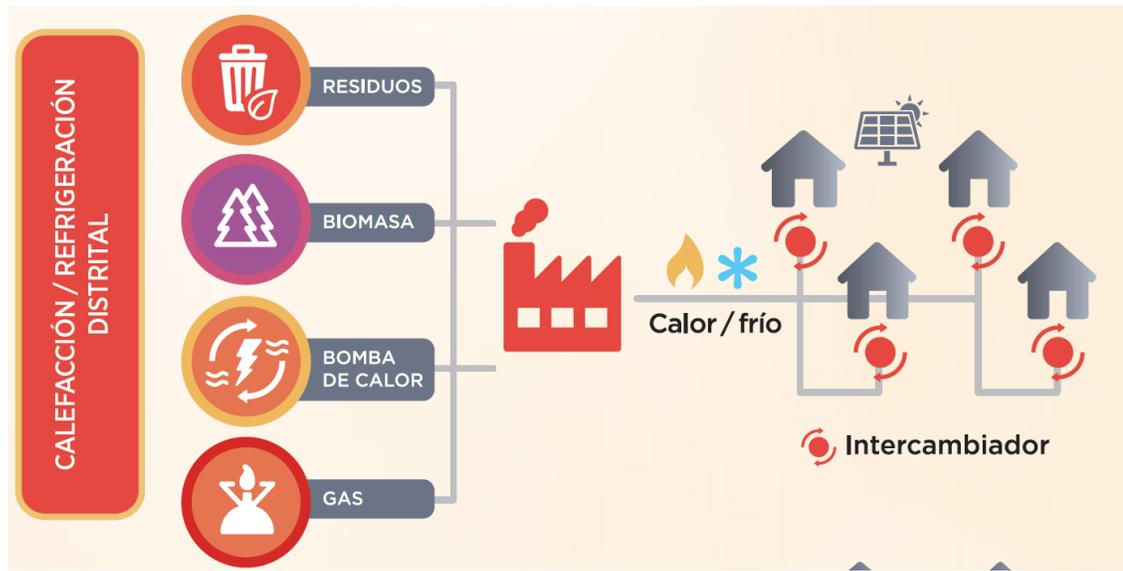


Figura 2.2: Calefacción distrital. Fuente: [14]

Los principales beneficios de esta tecnología para Chile son:

- **El uso de recursos renovables:** Mediante esta tecnología se pueden utilizar eficientemente energías renovables como biomasa y energía geotérmica.
- **Calor residual:** La calefacción distrital presenta gran flexibilidad en su diseño y permite incorporar tecnologías de cogeneración o trigeneración para la generar simultáneamente energía eléctrica y térmica.
- **Mejoramiento de la calidad del aire:** En esta tecnología la generación de energía térmica es centralizada y se reparte a través de un sistema de cañerías subterráneas, esto permite mejorar la eficiencia de los procesos, lo que sumado a la utilización de energías renovables puede reducir en más de un 99 % el nivel de emisiones de material particulado en relación a un calefactor individual.
- **Bajos costos de la energía térmica:** El precio de la energía térmica generada por calefacción distrital es competitivo frente a otras fuentes convencionales de calefacción, especialmente cuando la energía se obtiene utilizando calor residual o sistemas de bajas temperaturas como bombas de calor.
- **Oportunidades de mercado:** La energía distrital genera nuevas oportunidades de inversión, permite utilizar eficientemente los recursos renovables existentes y potencia a las economías locales creando nuevos empleos e ingresos a nivel local.

En Chile no existe una regulación jurídica expresa y específica en materia de energía distrital, pero esto no limita ni prohíbe la existencia de esta tecnología en el país. Para una investigación más profunda en calefacción distrital se puede consultar [14], [15], [16] y [17].

2.1.4. Cogeneración (CHP)

El objetivo de esta subsección es explicar brevemente en que consiste el concepto de cogeneración, sus principales beneficios, su normativa, reglamentación e indicar la bibliografía utilizada en este tema.

La cogeneración consiste en la producción de energía eléctrica y térmica en forma simultánea utilizando un solo equipo para producir energía térmica útil que puede ser aprovechada para la calefacción de los hogares, cocina o agua caliente sanitaria [18]. Las principales ventajas de la cogeneración son las siguientes:

- **Eficiencia energética:** Las centrales eléctricas convencionales tienen eficiencias entre el 40 % y 55 %, disipando al ambiente entre el 45 % y el 60 % de la energía del combustible, mientras la cogeneración alcanza eficiencias entre el 75 % y 80 %, disipando al medio ambiente entre un 20 % y 30 % de la energía del combustible.
- **Mejoramiento de la calidad del aire:** El mejoramiento en la eficiencia de los procesos de generación eléctrica y el aprovechamiento de la energía térmica residual desincentiva el uso de leña a nivel residencial pues gran parte de la demanda calorífica ya estaría cubierta.
- **Económicas:** La cogeneración reduce las compras de energía en horarios de punta, constituye una respuesta rápida al aumento de la demanda de energía y representaría en Chile el desarrollo de una nueva industria con la capacidad de generar varios puestos de trabajo para las comunidades.

Es interesante mencionar que cuando un sistema de generación eléctrico puede aprovechar su calor residual para calefacción, agua caliente sanitaria y cocina se denomina un sistema de cogeneración, si este sistema además tiene la posibilidad de generar frío para refrigeración se habla de un sistema de trigeneración.

Dentro de las normativas y reglamentos relacionados con cogeneración se consideran los siguientes:

- DFL4/2006: El artículo N°225, letra aa, define los medios de generación no convencionales dentro de los cuales se incluye la cogeneración eléctrica. En el mismo artículo, letra ac, se define el concepto de cogeneración eficiente como aquella central en la que se genera energía eléctrica y calor en un sólo proceso de elevado rendimiento energético cuya potencia máxima suministrada al sistema sea inferior a 20 [MW].
- Decreto N°6: Aprueba reglamento que establece los requisitos que deben cumplir las instalaciones de cogeneración eficiente. Este decreto fue promulgado el 29 de enero del 2015 y publicado el 25 de mayo del mismo año.
- Decreto N°10: Reglamento de calderas, autoclaves y equipos que utilizan vapor de agua.

Para una investigación más profunda en cogeneración se puede consultar [18] y [19].

2.2. Aislación Residencial

El objetivo de esta sección es explicar que factores son relevantes para aislar térmicamente una vivienda, indicar cual es el beneficio que obtendrían los hogares al realizar esta inversión, mencionar las principales normas, reglamentos e indicar la bibliografía utilizada.

La aislación residencial tiene como finalidad mejorar el confort térmico y la eficiencia energética de las viviendas. Una buena aislación térmica reduciría el consumo energético de aire acondicionado y calefacción en los meses de verano e invierno.

Esto último podría ser relevante en aquellas comunas del país donde se utilice leña como fuente calórica, su uso podría verse disminuido lo que indirectamente mejoraría la calidad de aire. El mejoramiento de la aislación térmica de una vivienda consta de los siguientes puntos:

Techo: La aislación de la techumbre comprende desde el cielo interior hasta la cubierta y busca situar la aislación dentro de la superficie más próxima al espacio habitado. Para un techo se pueden considerar dos tipos de techumbre, una techumbre caliente y una fría.

En la Figura 2.3 se observa que en un techo frío la aislación térmica se encuentra por sobre el cielorraso y el entretecho está desconectado de la vivienda, esta desconexión permite la ventilación de la casa. Por otro lado, en el techo caliente, la aislación térmica se encuentra por debajo de la cubierta, por cada una de las aguas del techo. el espacio ventilado se encuentra entre la aislación térmica y la cubierta. El beneficio de una vivienda de techo caliente a diferencia de uno frío es que se puede aprovechar habitar el ático, el contra es que implicaría un mayor costo en material aislante.

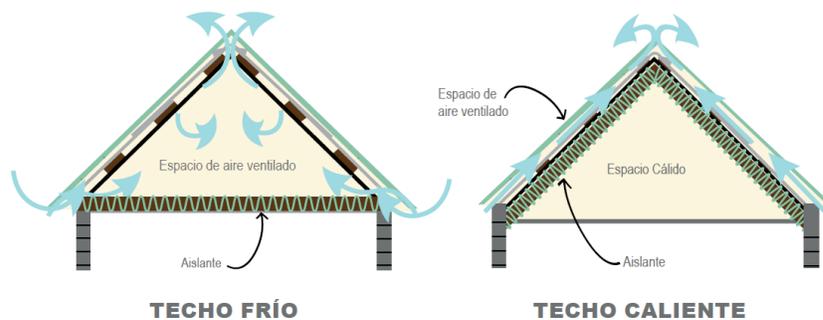


Figura 2.3: Tipos de techo. Fuente: [20]

Para una correcta elección del aislante se debe escoger aquel o aquellos que presenten una menor conductividad térmica. En la Tabla 2.1 se observa que los mejores aislantes para una techumbre son el poliuretano expandido, el poliestireno expandido y la lana mineral. El grosor del material a comprar estará determinado por una resistencia térmica normalizada y el criterio del menor costo.

Tabla 2.1: Conductividad térmica de los materiales

Material	Conductividad Térmica [W/m*K]
Poliuretano expandido	0,025 - 0,027
Poliestireno expandido	0,036 - 0,043
Lana mineral	0,037 - 0,042
Hormigón celular sin áridos	0,09
Madera	0,091 - 0,28
Ladrillo a máquina	0,46 - 1,0
Adobe	0,9
Vidrio	1,2
Hormigón armado(normal)	1,63
PVC	0,17
Aluminio	210

Pisos: Los pisos separan a la vivienda del terreno natural y una correcta elección de ellos puede mejorar considerablemente la aislación térmica de una vivienda. Para un aislamiento de los pisos es importante determinar si el piso se encuentra ventilado o en contacto con el suelo, se dice que un piso es ventilado si no está en contacto con el terreno, por ejemplo, los pisos de casas con pilotes o departamentos que se encuentren encima de un estacionamiento, su aislación será diferente por la gran cantidad de energía que pierden. Por otro lado, los pisos en contacto con el terreno se puede considerar una aislación con losa de cara interior o exterior. Es importante mencionar que se deben aislar térmicamente los pisos en la etapa de construcción de una vivienda debido al elevado costo que conllevaría remover el piso ya finaliza la construcción.

Muros: Los muros tienen la función de aislar la vivienda del exterior o de una edificación vecina, pudiendo además cumplir funciones estructurales, pueden estar contruidos de diferentes materiales y su aislación dependerá de esto. La aislación térmica puede ser por el exterior o interior de un muro, los beneficios de una aislación exterior es que permite conservar el espacio útil de la vivienda y se puede instalar en viviendas ocupadas sin alterar el funcionamiento interior de ellas mientras que una aislación de tipo interior es más económica y se ocupa cuando no se puede modificar la fachada exterior.

Puertas: El material con el cual se construye una puerta influye sobre el nivel de aislación de una vivienda, en adición a la elección de este material se puede considerar construir un doble entrada tipo zaguán o chiflonera, esto mejoraría considerablemente la protección térmica de la puerta y crearía un pequeño hall por el interior, en este caso es importante asegurar suficiente espacio para abrir las puertas de forma cómoda y segura. Otro factor a considerar es que si no se construye una doble entrada la puerta se encontraría expuesta a la acción del viento y la lluvia y esto podría deteriorar el material reduciendo su eficiencia térmica, la solución de esto último radica en instalar un alero y protecciones laterales.

Ventanas: En las ventanas el calor se pierde por el cristal, por el marco y por las infiltraciones de aire en las rendijas. Para la instalación de las ventanas en una vivienda se puede considerar una ventana simple que consiste en un cristal monolítico convencional, una doble ventana convencional o un cristal termopanel también llamado doble vidriado hermético. En la Figura

2.4 se muestran las distintas alternativas de vidriado con su valor de transmitancia térmica. Es interesante mencionar que una mejora de las ventanas no sólo conlleva una mejora en la aislación térmica sino en aislación acústica.

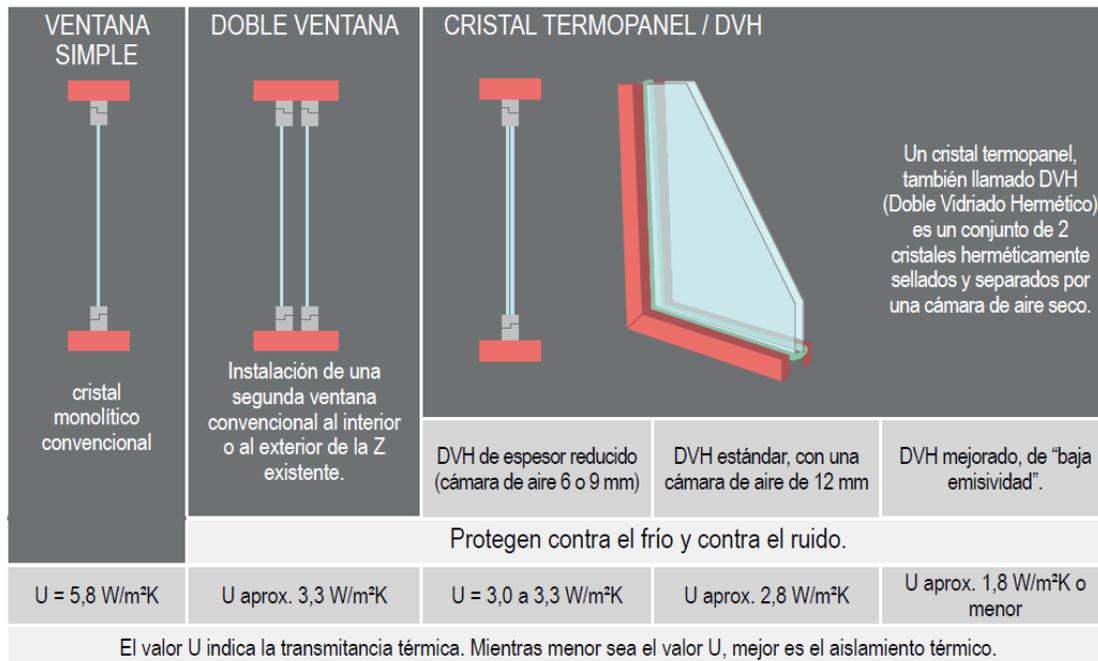


Figura 2.4: Tipos de ventanas. Fuente: [21]

Por otro lado, el mejoramiento del marco de la ventana también puede mejorar el aislamiento térmico de una vivienda, en la Figura 2.5 se puede observar la eficiencia térmica de los materiales con los cuales se pueden construir los marcos de las ventanas.

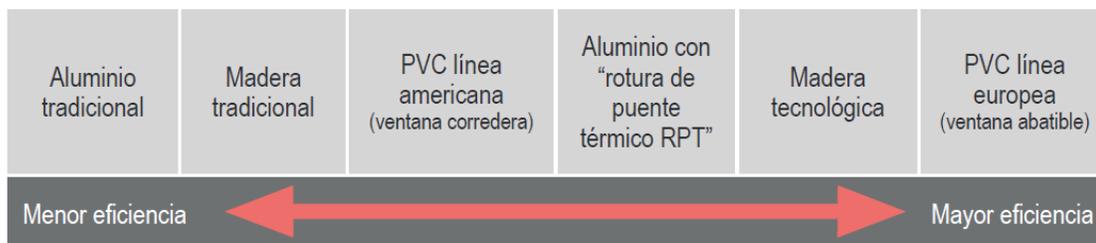


Figura 2.5: Marcos de ventanas. Fuente: [21]

A la hora de instalar una ventana es importante considerar el dimensionamiento y el diseño de la ventana a instalar, dentro del diseño se pueden considerar las ventanas correderas, de abatir y proyectantes, cada una de ellas tiene una eficiencia térmica y diseño distinto que se debe considerar en su instalación. Además, es relevante considerar el dimensionamiento y tipo de ventana a instalar, por ejemplo, se puede considerar la opción de instalar contraventanas o cortinas tanto en la parte externa como interna del hogar para mejorar la aislación térmica.

Infiltraciones de Aire: Es importante mencionar que la cantidad de aire que pasa a través de las infiltraciones puede llegar a representar el 50% en el caso de las construcciones más herméticas. Las principales filtraciones de aire ocurren en las puertas y ventanas. Para me-

jorar la hermeticidad de ellas se deben considerar soluciones de sellado como silicona, sellos de espuma, caucho o burletes de espuma o felpa para aberturas en la parte inferior de las puertas y los marcos de las ventanas.

El beneficio que percibirían los hogares correspondería a un 60% en ahorro energético con respecto a la cuenta de electricidad, para realizar estas estimaciones se consideró un vivienda de 50[m²] emplazada en Concepción a la cual se aplicaron las mejoras de aislación de techumbre, piso, muro exterior, muro interior y ventanas de termopanel [22].

A continuación se mencionarán las principales normativas y reglamentos de aislación residencial en Chile.

- Manual de aplicación. Reglamentación Térmica, Ordenanza general de urbanismo y construcciones. Artículo 4.1.10: En el año 1994, el ministerio de vivienda y urbanismo incorpora la reglamentación térmica en su programa de acción. Esta reglamentación térmica entra en vigencia en el año 2000 con requisitos de aislación térmica para la techumbre y en el año 2007 se amplió la aplicación para muros exteriores, pisos ventilados y ventanas. La reglamentación busca mejorar la calidad de vida de la población mediante una mejora en el confort térmico y busca optimizar y reducir el uso de combustibles destinados a calefaccionar viviendas.
- Norma Chilena NCh 853-2007: Esta norma establece los procedimientos de cálculo para determinar las resistencias y transmitancias térmicas de los elementos constructivos de una obra, en particular los de la envolvente térmica, tales como muros perimetrales, complejos de techumbres y pisos, y en general, cualquier otro elemento que separe ambientes de distintas temperaturas. La importancia de esta norma es que su cumplimiento garantiza una correcta aplicación del manual de aplicación térmica definido en el punto anterior.
- NCh849, NCh850 y NCh 851: Normas chilenas indispensables para la aplicación de la norma NCh853.

Para una investigación más profunda en aislación residencial se puede consultar [20], [21], [22], [23], [24], [25] y [26].

2.3. Caracterización de la Leña

El objetivo de esta sección es caracterizar el uso de la leña Chile, investigando sobre su impacto en el medio ambiente, sus principales actores y su mercado.

En el país más de la mitad de la población está expuesta a la concentración de material particulado fino ($MP_{2,5}$) por sobre los límites recomendados por la organización mundial de la salud y nueve de las quince ciudades más contaminadas de latinoamérica se encuentran entre la zona centro y sur de Chile; el principal agente contaminante: el uso de la leña a nivel residencial [27]; aproximadamente un 87% de las emisiones de $MP_{2,5}$ son producto del uso de leña y esto provoca anualmente la muerte de dos mil personas. El costo social es muy elevado se estima un valor entorno a los mil millones de dólares y de ahí la necesidad de regular y fiscalizar este mercado.

Los consumidores prefieren el uso de la leña principalmente porque tiene un menor costo comparado con los otros combustibles residenciales y también se utiliza en aquellas localidades aisladas en las cuales existe pobreza energética, es decir en donde no existe suministro eléctrico y el precio de los insumos sustitutos es muy elevado, el concepto de pobreza energética se abordará en detalle en la próxima sección. Si el mercado de la leña estuviese regulado el precio de la leña sería más caro porque incluiría las externalidades negativas que causa al medioambiente y a la salud de las personas.

La leña es un combustible utilizado por hogares pertenecientes a distintos sectores socioeconómicos, sin embargo, en su mayoría es utilizada por sectores de ingresos medios y bajos, y es este segmento quien presenta los mayores niveles de desconfianza con respecto a la calidad de la leña adquirida.

La leña es utilizada a lo largo de todo el país, pero su consumo se concentra principalmente en la zona centro, centro-sur y sur. En la Tabla 2.2 se muestran los principales usos de la leña a nivel regional.

Tabla 2.2: Uso de leña por región. Fuente: [28]

Región	Calefacción [%]	Cocina [%]	Agua Caliente Sanitaria [%]
O'Higgins	46,93	2,28	1,09
Maule	61,43	4,92	2,13
BioBío	67,19	7,31	1,78
Araucanía	87,07	34,47	17,77
Los Ríos	90,28	36,52	13,62
Los Lagos	88,81	36,05	14,18
Aysén	87,40	30,63	14,39

El mercado de la leña se caracteriza por la presencia de tres actores principales: los productores, comercializadores y consumidores.

- **Productores:** Corresponden a los trabajadores y propietarios asociados a predios que se dedican a la producción de leña, indirectamente se pueden considerar como productor a la industria maderera que generan residuos que son vendidos o regalados.
- **Comercializadores:** Corresponden a intermediarios responsables de que la leña se distribuya desde los productores a los consumidores, participan los transportistas minoristas que abastecen directamente a los consumidores desde la producción y los transportistas mayoristas que abastecen consumidores, hogares u otro tipo de intermediarios como las leñerías.
- **Consumidores:** Son los actores que consumen la leña, los cuales pertenecen en su mayoría al sector residencial.

El mercado de la leña genera entre 108.000 y 165.000 empleos, de los cuales aproximadamente el 60% se originan en la producción del bien. Sin embargo, debido a su informalidad, los puestos de trabajos creados son generalmente precarios y estacionales. Las pérdidas que sufre el estado por recaudaciones tributarias se estiman entre 24 y 69 mil millones de pesos,

de un mercado que mueve anualmente alrededor de 200 millones de dólares [29].

En Chile el 44 % de los hogares adquiere la leña en los meses de enero-abril y un 41 % entre mayo-agosto, y la almacenan principalmente bajo techo, la estacionalidad con respecto a la adquisición de la leña es relevante porque influye directamente en los niveles de humedad que tiene al ser combustionada, por ejemplo, si la leña se compra en los meses de verano o principios de primavera, época en la cual la calefacción es prescindible, la madera tendrá un mayor tiempo de secado y por ende, una eficiencia térmica mayor.

2.4. Pobreza Energética

La pobreza energética se encuentra presente en aquellos hogares que no disponen de energía suficiente para cubrir sus necesidades fundamentales y básicas que sostengan el desarrollo humano y económico de sus miembros, las necesidades fundamentales son aquellas que tienen un impacto directo en la salud humana, e incluyen la cocción y conservación de alimentos, el acceso al agua, la disponibilidad de electricidad para electrodependientes entre otras [30].

Las necesidades básicas corresponden a requerimientos cuya pertinencia depende de las características socioecológicas, sociotécnicas y socioculturales de un territorio, se incluye el confort térmico, agua caliente sanitaria, iluminación, electrodomésticos, etc; la pobreza energética incluye las dimensiones de acceso, calidad y equidad.

El acceso a la energía se refiere a los umbrales físicos que constituyen barreras de acceso a la energía, considerando limitantes geográficas, de infraestructuras y tecnológicas, aproximadamente 35.900 chilenos se encuentran en una situación de pobreza energética por no tener acceso a la electricidad, de ellos el mayor porcentaje se encuentra en comunas de las regiones metropolitana, del Bío-Bío y la Araucanía, por otro lado, un 11,6 % de los hogares chilenos no tiene acceso a agua caliente sanitaria [30].

La calidad de energía se refiere a los umbrales de tolerancia que permiten evaluar las condiciones de acceso a las que se accede considerando la adecuación, confiabilidad, seguridad y contaminación intradomiciliaria. La adecuación se refiere a la satisfacción de las necesidades energéticas, la confiabilidad está asociada con la frecuencia y duración de cortes en el servicio, la seguridad está relacionada con el riesgo de accidentes causados por su uso y la contaminación intradomiciliaria se refiere al grado en que se emiten compuestos dañinos para la salud humana al interior de la vivienda. En general, el uso de leña se concentra en la zona sur del país donde la contaminación alcanza los niveles más altos en invierno [30].

La equidad energética se refiere a los umbrales económicos asociados al gasto energético de los hogares en relación a su presupuesto total, para su estudio se considera la dificultad de acceder a las fuentes de energía, los bienes adecuados y un confort térmico-lumínico; para satisfacer estas necesidades los hogares destinan una porción de su ingreso que si es muy elevada se supone que el hogar está sacrificando otras necesidades básicas. Un 34 % de las familias que pasan frío en invierno pertenecen al segmento más pobre, un 27 % pertenece al segmento vulnerable y un 21 % a la clase media baja, en promedio, el gasto mensual en calefacción de los hogares chilenos es de 40 mil pesos chilenos [30].

2.5. Objetivos País

El objetivo de esta sección es mencionar los principales objetivos energéticos del gobierno de Chile para el año 2050, estos se listan a continuación [31]:

- **Confiabilidad del suministro eléctrico:** La indisponibilidad del suministro eléctrico no superará una hora por año en cualquier localidad del país.
- **Emisiones de gases de efecto invernadero:** Las emisiones son coherentes con los límites definidos por la ciencia a nivel global y con la correspondiente meta nacional de reducción.
- **Equidad energética:** Se asegura un acceso universal y equitativo a servicios energéticos modernos, confiables y asequibles a toda la población.
- **Instrumentos de planificación:** Los instrumentos de planificación y ordenamiento territorial regional incorporan los lineamientos de la política energética chilena.
- **Precio de la electricidad:** Chile se encuentra entre los 3 países OCDE con menores precios promedio de suministro eléctrico a nivel residencial e industrial.
- **Energías renovables:** Al menos el 70% de la generación eléctrica nacional proviene de energías renovables.
- **Crecimiento energético:** El crecimiento energético está desacoplado del crecimiento del producto interno bruto.
- **Edificaciones:** La totalidad de las edificaciones nuevas cuentan con estándares OCDE de construcción eficiente y cuentan con sistemas de control y gestión inteligente de la energía.
- **Artefactos:** La totalidad de las principales categorías de artefactos y equipos que se venden en el mercado corresponden a equipos energéticamente eficientes.
- **Cultura:** La cultura energética está instalada en todos los niveles de la sociedad, incluyendo los productores, comercializadores, consumidores y usuarios energéticos.

2.6. Políticas Públicas

El objetivo de esta sección es mencionar las principales políticas públicas implementadas en Chile que guarden relación con el uso de la leña, electricidad, calor y pobreza energética. Para llevar esto a cabo se listarán los tipos de políticas en 10 categorías y se mencionarán más relevantes, esto se muestra a continuación [32]:

- **Suministro de energía eléctrica:** Se incluyen la electrificación de hogares en zonas aisladas, el mejoramiento del suministro en islas y el programa de fomento a las mini centrales hidráulicas.
- **Suministro de energía térmica:** Se incluyen subsidios para sistemas solares térmicos en los programas de reconstrucción de viviendas, los subsidios del programa de protección del patrimonio familiar para sistemas solares térmicos en viviendas sociales existentes

- Suministro de energía general: Se incluyen la energización de comunidades indígenas, el fondo de acceso a la energía y energías renovables en localidades aisladas y vulnerables.
- Suministro de energía en servicios públicos: Se incluyen la electrificación de escuelas y postas rurales, techos solares públicos, programa de recambio masivo de luminarias de alumbrado público, sistema de certificación ambiental municipal.
- Equidad en gastos energéticos: Se incluyen el subsidio a la calefacción, al gas natural y a la leña.
- Eficiencia energética en el hogar: Se incluyen el programa "Mi Hogar Eficiente", el etiquetado de artefactos y MEPS para artefactos.
- Cambio en sistemas de calefacción: Se incluyen el fondo "Más Leña Seca" el programa de calefacción sustentable, recambio de calefactores por parte de los planes de descontaminación atmosférica (PDA).
- Reducción de necesidades de calefacción: Se incluyen los programas de protección del patrimonio familiar, el subsidio de habitabilidad y mantención de la vivienda, acondicionamiento térmico de las viviendas y la calefacción energética de las viviendas.
- Mitigación de impactos: Se incluyen las campañas de inviernos realizadas por el ministerio de salud.
- Desarrollo energético local: Se incluyen los programas de comuna energética, infraestructura rural para el desarrollo territorial y el fondo de protección ambiental para la gestión local e indígena.

2.6.1. Cronología de los Avances Realizados en Chile

El objetivo de esta subsección es listar todos los programas y políticas públicas impulsadas por el gobierno de Chile entre los años 2016-2020 [33], [34] y [35] ¹:

- 23/02/2016: Primer concentrador solar térmico en Valparaíso.
- 18/03/2016: Lanzamiento de la nueva política de leña.
- 01/04/2016: Autoridades oficializan el inicio del Plan de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Talca y del Maule.
- 06/04/2016: Aysén lanza el programa Más Leña Seca.
- 03/06/2016: Subsecretario del Ministerio del Medio Ambiente da inicio a la campaña de invierno "Por una Calefacción sustentable y limpia".
- 12/08/2016: Gobierno lanza la campaña "Descontaminar es tarea de todos" para generar conciencia sobre la calefacción sustentable.
- 07/10/2016: Estudiantes de Andacollo aprenden sobre el Plan de Descontaminación Atmosférico.

¹ Se puede ingresar la fecha y titular de la noticia en el buscador de Google y esto mostrará el artículo completo en alguno de los tres sitios web citados anteriormente.

- 28/11/2016: "Todos descontaminemos Coyhaique", corrida familiar que organizó la Seremi del Medio Ambiente para informar y educar a la población sobre los grandes problemas de contaminación atmosférica durante los meses de otoño en invierno.
- 21/02/2017: Gobierno lanza programa para extraer y comercializar leña afectada por los incendios forestales, región de O'Higgins.
- 03/05/2017: Instalación de 40 semáforos para medir la calidad del aire en establecimientos de Temuco y Padre de las Casas.
- 09/05/2017: Gobierno entregará más de \$600 millones a leñeros afectados por incendios forestales.
- 11/05/2017: Ministerio del Medio Ambiente lanza campaña "Por un calor limpio y sustentable". La finalidad es educar a la ciudadanía con respecto al tipo de calefacción residencial menos contaminante y tecnologías sostenibles en el tiempo.
- 26/05/2017: Ministerio del Medio Ambiente lanza el programa de recambio de calefactores en las comunas de Curicó, Teno, Rauco, Romeral, Sagrada Familia y Molina.
- 30/05/2017: Ministerio del Medio Ambiente lanza el programa de recambio de calefactores para la comuna de Linares.
- 12/06/2017: Inauguración de galpón de acopio, que seca la leña en tres meses, Aysén.
- 20/06/2017: Gobierno, anuncia uso de drones para la fiscalización de calefactores a leña en Santiago.
- 27/06/2017: Gobierno lanza Plan de Descontaminación Atmosférica para la ciudad de Valdivia. Para ello se realizarán 26.000 recambios de sistemas de calefacción domiciliarios, 18.000 mejoramientos técnicos con nuevos estándares de aislación y una formalización del mercado de la leña.
- 29/06/2017: Cambia el Foco: Nueva iniciativa de iluminación eficiente impulsada por el gobierno.
- 12/12/2017: Capacitan en secado de leña y gestión empresarial a 17 beneficiarios del programa Más Leña Seca, en Los Lagos.
- 19/12/2017: Escuela Baquedano, en Aysén, inaugura moderno sistema solar térmico de agua caliente.
- 25/01/2018: Inauguran el primer techo solar público con modelo ECSO.
- 23/02/2018: Inauguraron el primer condominio social en altura que incorpora sistemas solares térmicos.
- 10/04/2018: Ministra de Energía lanza plataforma con información energética de cada región del país.
- 13/04/2018: Ministerio de Medio Ambiente ingresó plan de descontaminación de la ciudad de Los Ángeles a la Contraloría General de la República. El plan incluye un aumento en el número de recambio de calefactores, normas para los nuevos proyectos inmobiliarios y meta para reducir el material particulado.

- 13/07/2018: Ministerio de Medio Ambiente y Vivienda trabajarán en forma conjunta para mejorar los estándares de aislación térmica de viviendas en zonas con planes de descontaminación atmosférica, producto a la calefacción por combustión de leña.
- 07/08/2018: Subsecretario del Ministerio de Medio Ambiente lanza programa de recambio de calefactores en Osorno.
- 31/12/2018: Inauguran la primera planta de generación de energía en base a gasificación de biomasa en Chile.
- 21/03/2019: El Seremi de energía de Atacama capacitó a las familias de Copiapó en el uso y mantención de sistemas solares térmicos para agua caliente.
- 03/05/2019: La Seremi de Medio Ambiente, en coordinación con la Corporación Nacional Forestal, el Servicio de Impuestos Internos y Carabineros de Chile elaboraron y dieron inicio al programa de fiscalización de leña 2019 en la ciudad de Valdivia de acuerdo al plan de descontaminación atmosférica de Valdivia (PDA).
- 12/06/2019: Seremi lanza el programa Leña Más Seca en la región del Bio-Bío.
- 27/06/2019: Inauguran centro de acopio que aumentará la oferta en la comuna de Palena.
- 12/07/2019: Contraloría General de la República aprueba ambicioso plan de descontaminación para Coyhaique. El plan permitirá aumentar en un 50 % el recambio de calefactores y remplazará la alerta sanitaria por una que permita identificar el uso de leña húmeda.
- 07/08/2019: Inauguran centro de acopio de leña y maquinaria en la comuna de Quemchi.
- 05/12/2019: Seremi de Energía capacitó a leñeros de la región que postularon al Fondo Leñas Más Seca de la región de O'Higgins.
- 17/01/2020: Ministerio de Energía presenta el primer estudio de precios de bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas.
- 21/01/2020: Capacitación a los leñeros de Malleco y Cautín.
- 19/02/2020: Capacitan en secado de leña y desarrollo empresarial a comerciantes y productores de leña de la provincia de Palena.
- 19/03/2020: Se inauguró centro de acopio y secado de leña ,en las proximidades de Coyhaique, que permitirá contar con más de 1000 [m^3] anuales de leña seca.
- 29/05/2020: El ministerio de energía presenta el primer índice de precios para calefactores y calderas de biomasa en Chile.
- 17/06/2020: El Ministerio de Energía lanzó una página web para orientar a la ciudadanía sobre los distintos tipos de calefacción disponibles en el país, ver cuál de ellos se adecúa mejor a las necesidades y características de cada hogar y cada ciudad según su latitud.

- 10/08/2020: El gobierno lanzó un descuento en la tarifa eléctrica en las 10 comunas con mayor concentración de MP 2.5 (material particulado fino). El objetivo es combatir la contaminación en la zona centro-sur del país, permitiendo a las familias migrar de una fuente de calefacción en base a leña a una de tipo eléctrico. El descuento en la tarifa estará disponible en las comunas de Coyhaique, Puerto Aysén, Osorno, Temuco, Padre de las Casas, Los Ángeles, Chillán, Chillán Viejo, Rancagua y Machalí, beneficiando a 87.000 hogares.
- 31/08/2020: El ministerio de energía realizó el lanzamiento del sello de calidad de leña que destaca a los comerciantes que cumplen con el estándar de calidad definido por este sello.
- 11/09/2020: El Seremi de Energía de Magallanes celebró el lanzamiento del programa GEF, Global Environment Facility, para impulsar el desarrollo de la calefacción distrital en el centro sur del país.
- 24/09/2020: El Ministerio de Energía Publica el Reglamento de Generación Distribuida para el Autoconsumo.
- 05/10/2020: El Gobierno lanzó un programa de recambio de calefactores para Aysén y Cochrane. La iniciativa contempla 1800 recambios enfrentar la contaminación regional, para postular las familias se deben inscribir en la página web del ministerio del medio ambiente.
- 07/10/2020: Programa Casa Solar, El objetivo es fomentar el uso de sistemas solares fotovoltaicos para que las personas o familias generen la electricidad que consumen en sus casas.

2.7. Marco Regulatorio

El objetivo de esta sección es listar las principales leyes relacionadas con los temas de electrificación del calor residencial.

- DFL 4/2014: Es conocido como la ley general de servicios eléctricos, regula la producción, el transporte, distribución, concesiones y tarifas de energía eléctrica. Incluye el régimen de concesiones, servidumbres, precios, calidad y seguridad de las instalaciones, maquinarias e instrumentos y las relaciones de las empresas con el estado y particulares.
- Ley N°19.940/2004: Es conocida como la ley Corta I, regula los sistemas de transporte de energía eléctrica, establece un régimen de tarifa para sistemas eléctricos medianos e introduce las adecuaciones que indica la ley general de servicios eléctricos. Con su artículo 7-17, establece que los propietarios de medios de generación no convencionales cuyos excedentes de potencia sean menores a 9 [MW] estarán exentos del pago total de peaje, además la ley introduce una modificación al DFL1 y asegura el acceso al mercado spot a los PMG y PMGD.
- Ley N°20.018/2005: Es conocida como la ley corta II, modifica el marco normativo para el sector eléctrico, le otorga a los medios de generación no convencional el derecho a suministrar a los concesionarios de distribución.

- Ley N°20.220/2007: Modifica la ley general de servicios eléctricos para resguardar la seguridad de suministro de los clientes regulados y la suficiencia de los sistemas eléctricos.
- Ley N°20.257/2008: Es conocida como la ley de energías renovables no convencionales, establece una obligación para las empresas eléctricas en que un porcentaje de la energía comercializada provenga de fuentes ERNC, estas incluyen la cogeneración eficiente.
- Ley N°20.365: Otorga franquicia tributaria a las constructoras que instalen sistemas solares térmicos de agua potable en viviendas. La ley establece que las empresas constructoras tendrán derecho a deducir del monto de sus pagos provisionales obligatorios de la ley sobre el impuesto a la renta, un crédito equivalente a todo o parte del valor de los sistemas solares térmicos y de su instalación en inmuebles destinados a la habitación.
- Ley N°20.571: Es conocida como la ley de Net Metering, regula el pago de tarifas eléctricas de las generadoras residenciales. De acuerdo con la norma aquellos usuarios finales que dispongan para su propio consumo de equipamiento de generación eléctrica por medios renovables no convencionales o de instalaciones de cogeneración eficiente, tendrán el derecho a inyectar la energía que generen a la red de distribución. El aporte valorizado se descuenta de la cuenta del mes en que se realizan dichas inyecciones, si existe un remanente a favor del cliente se descontará de las facturas subsiguientes.
- Ley N°20.928: Es conocida como la ley de equidad tarifaria, el objetivo de esta ley es disminuir las tarifas de los clientes regulados en aquellas comunas que posean centrales de generación de energía eléctrica y acotar las diferencias de tarifas eléctricas residenciales entre las distintas zonas del país.

2.8. Gestión de la Demanda

El objetivo de esta sección es introducir el concepto de gestión de demanda, definirlo y ver cuales son las principales medidas que se pueden realizar para aplicarlo en el país.

En general, la demanda eléctrica de un país se encuentra estrechamente relacionada con su crecimiento económico y tiende a aumentar a lo largo del tiempo porque sólo así se pueden mantener las actividades socioeconómicas y el desarrollo de la nación [36]. Para enfrentar este problema la solución pareciera ser simple: construir nuevas centrales de generación a medida que la demanda aumente, pero como se explicará a continuación esto no es del todo correcto.

La electricidad no se puede almacenar a gran escala, es por esto que la generación eléctrica es igual al consumo en cada instante (considerando las pérdidas). Es por ello que se dice que la demanda eléctrica varía en función de los hábitos de los consumidores, la estructura productiva de la economía, el clima, estación del año, etc. En consecuencia, la demanda presenta fluctuaciones a lo largo del día y para asegurar una calidad y seguridad del suministro se necesita mantener un margen entre la potencia instalada y la demanda máxima prevista.

Este es el punto central, las instalaciones en los sistemas eléctricos de potencia, las centrales de generación, redes de transporte y distribución, están diseñadas para cubrir la demanda máxima y cuando esta disminuye parte de la infraestructura ya no se utiliza. El problema de la idea propuesta en el segundo párrafo, es que la construcción de nuevas centrales conlleva

considerables costos de inversión, de operación y mantenimiento, y la utilización de gran parte de esta nueva capacidad estará destinada a satisfacer la demanda de punta, por lo que su tiempo de utilización será bajo. De ahí la necesidad de gestionar la demanda eléctrica.

Se define la gestión de la demanda eléctrica como el conjunto de medidas que buscan influir en el consumidor para que modifique su patrón de consumo (reducir fluctuaciones en hora punta) con el fin de lograr no sólo un ahorro neto de energía, sino un uso más eficiente de la misma. Los beneficios de la gestión de demanda son principalmente los ahorros en el coste de transporte y distribución de la energía, un incremento de la eficiencia del mercado, reducción de la volatilidad de los precios, un mejoramiento de la calidad y seguridad de servicio y un aprovechamiento de las energías renovables no convencionales.

Las medidas que se pueden aplicar para gestionar la demanda son las siguientes [37]:

- Iniciativas que fomenten la eficiencia energética: El objetivo de esta técnica es reducir la demanda eléctrica de los electrodomésticos y ahorrar energía. Es importante mencionar que esta medida tiene un efecto indirecto, porque no busca modificar el patrón de consumo del cliente.
- Control indirecto de cargas eléctricas mediante la tarificación: El objetivo de esta técnica es enviar señales del precio a los consumidores eléctricos para que utilicen la energía en aquellos horarios donde el costo sea menor. Esto reduciría la demanda en horas punta pero la magnitud de esta medida depende de la sensibilidad de los clientes con respecto al precio de la electricidad.
- Control indirecto de cargas eléctricas mediante contratos: El objetivo de esta técnica es que el cliente se comprometa a reducir su consumo cuando el operador de red se lo pida, esto reducirá la demanda y brindará un beneficio económico para el cliente porque verá disminuido el costo de su cuenta de luz.
- Control directo de cargas eléctricas: El objetivo de esta técnica es que el cliente acceda mediante un contrato a que el operador del sistema desconecte directamente parte de sus equipos. Es importante mencionar que aquellos electrodomésticos susceptibles de ser gestionados son aquellos que posean una inercia térmica como calentadores de agua, calefactores y equipos de aire acondicionado.

Para la implementación de la gestión de la demanda en el mercado eléctrico chileno se pueden considerar los siguientes escenarios [38]:

- Gestión de demanda como servicio complementario: Se presta el servicio de inyección o absorción de potencia activa al operador del sistema incluido dentro de la venta de servicios complementarios, quien realice este servicio será denominado el articulador de demanda.
- Gestión de demanda en distribución: Las distribuidoras podrían prestar el servicio de inyección o absorción de potencia activa, los beneficios que podrían obtener las distribuidoras sería prescindir del pago asociado a potencia de punta e inversiones infraestructura para aumentar la capacidad de la distribución.
- Gestión de demanda en generación: Los clientes libres o centrales generadoras podrían gestionar su demanda.

Capítulo 3

Marco Conceptual

El objetivo de este capítulo es describir las zonas geográficas del país y definir los modelos de proyección de demanda.

3.1. Zonas Geográficas

En el desarrollo del trabajo se consideraron cinco zonas geográficas para realizar las proyecciones de la electrificación del calor residencial [39], estas se describen a continuación:

- **Norte Grande:** Se refiere a la zona conformada por las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. El clima de estas localidades es de tipo desértico.
- **Norte Chico:** Se refiere a la zona conformada por las regiones de Atacama y Coquimbo. El clima de estas localidades es de tipo semi-árido.
- **Zona Central:** Se refiere a la zona conformada por las regiones de Valparaíso, Metropolitana y de O'Higgins. El clima de estas localidades es de tipo mediterráneo. Isla de Pascua se considera como parte de la región de Valparaíso.
- **Zona Centro-Sur:** Se refiere a la zona conformada por las regiones del Maule, Ñuble, Bio-Bio y La Araucanía. El clima de estas localidades suele ser templado lluvioso.
- **Zona Sur:** Se refiere a la zona conformada por las regiones de Los Ríos, Los Lagos, Aysén, Magallanes y la Antártica. El clima de las localidades en el continente es estepárico-frío caracterizado por bajas temperaturas y precipitaciones durante gran parte del año, por otro lado, en el territorio antártico el clima es de tipo polar.

3.2. Series de Tiempo

La electrificación del uso de calor residencial se proyectará utilizando series de tiempo porque a partir de los datos históricos es posible identificar las tendencias y comportamientos futuros. En esta sección se describirán algunos conceptos importantes para su estudio.

- **Estacionariedad:** Para estudiar el comportamiento de las series de tiempo se debe verificar que estas sean estacionarias, es decir que su media y varianza se mantengan constantes a lo largo del tiempo y que la covarianza dependa únicamente de un retardo.

En la Figura 3.1 se observan dos series de tiempo, en la Figura 3.1(a) la serie es estacionaria porque los valores oscilan entorno a un punto medio, mientras que en la Figura 3.1(b) la serie es no estacionaria porque la serie presenta una tendencia creciente, con una media que se va incrementando en el tiempo.

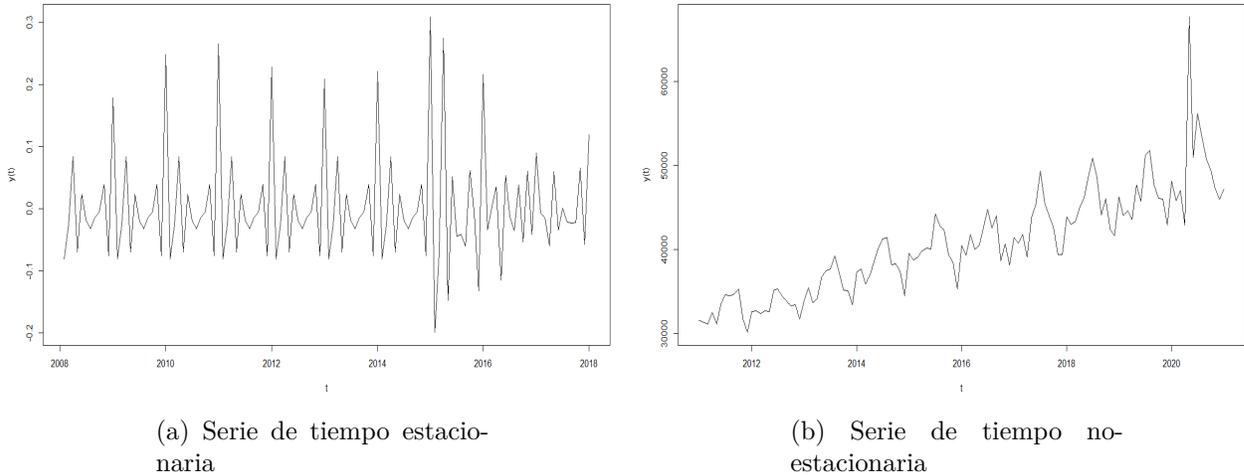


Figura 3.1: Estacionariedad en series de tiempo

El comportamiento de la demanda eléctrica residencial por lo general presenta una tendencia creciente y una componente estacional, por esto, mediante una inspección visual se puede determinar si existe estacionariedad. Sin embargo, en algunos casos la tendencia es imperceptible. En dichas situaciones es conveniente aplicar los tests ADF y KPSS.

Para mayor información consultar [40].

- **Test de Dickey-Fuller:** Para determinar si una serie de tiempo es o no estacionaria se le puede aplicar el test de Dickey-Fuller (1979). Para la proyección de la demanda eléctrica se puede considerar el siguiente modelo:

$$Y_t = \rho Y_{t-1} + u_t, t \in \mathbb{Z} \quad (3.1)$$

donde Y_t es el valor de la demanda eléctrica en el tiempo t , Y_{t-1} el valor de la demanda eléctrica en el tiempo $t-1$, u_t es ruido blanco y $|\rho| < 1$ es el parámetro que se quiere determinar. El objetivo es realizar un regresión con los datos y probar que el parámetro ρ es igual a 1. Para ello se restará a ambos lados de la ecuación 2.1 el término Y_{t-1} con lo que se obtiene:

$$\Delta Y_t = \delta Y_{t-1} + u_t, t \in \mathbb{Z} \quad (3.2)$$

donde Δ es el operador de primeras diferencias y δ es $\rho - 1$. Por lo tanto, la prueba consiste en contrastar la hipótesis.

- $H_o: \delta = 0$, si se comprueba esta hipótesis la serie no es estacionaria, porque ρ debiese tener un valor menor a uno.

- H_1 : $\delta < 0$, aquí se cumple que ρ es menor a 1.

Una extensión de la prueba anterior es el test de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) el cual fue desarrollado para los casos en que el término del error u_t está correlacionado. Esta prueba consiste en agregar los valores retardados de la variable ΔY_t y estimar la siguiente regresión:

$$\Delta Y_t = \delta Y_{t-1} + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta Y_{t-1} + \epsilon_t, t \in \mathbb{Z} \quad (3.3)$$

donde ϵ_t es ruido blanco. En general, mediante la aplicación de este test se puede determinar si una serie de tiempo es estacionaria. Sin embargo, su aplicación en la demanda eléctrica residencial es distinta porque la serie de tiempo presenta una tendencia y una componente estacional que podría conducir a un error. Por ello, se suele aplicar una segunda prueba de carácter complementario a la descrita, la cual se denomina test KPSS.

Para mayor información consultar [41] y [42].

- **Test KPSS:** El test Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin (KPSS) determina si una serie es estacionaria entorno a un media o si es estacionaria entorno a una tendencia. Los fundamentos del test están basados en la regresión lineal de la siguiente ecuación:

$$\Delta Y_t = \gamma_0 + \gamma_1 Y_{t-1} + \gamma_2 t + \epsilon_t \quad (3.4)$$

La finalidad del modelo es descomponer la serie de tiempo en tres partes en la cuales se puede distinguir una tendencia determinística, un camino aleatorio y un error estacionario, es importante mencionar que ϵ_t es ruido blanco y no una cuarta descomposición de la serie. Si los datos son estacionarios, entonces tendrán un intercepto fijo γ_0 , y si no se cumple esto la serie será estacionaria entorno a una tendencia; las hipótesis del test son las siguientes:

- H_0 : la serie de tiempo es estacionaria.
- H_1 : la serie de tiempo es no estacionaria.

Para mayor información consultar [43].

- **Coefficiente de correlación de Pearson:** El coeficiente de correlación de Pearson muestra la dependencia lineal entre dos variables aleatorias. En este trabajo se utilizará para determinar la relación entre la demanda eléctrica residencial y las variables externas. Su fórmula es la siguiente:

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X,Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = Cor(X,Y) \quad (3.5)$$

donde σ_X y σ_Y son las desviaciones estándar de las series de tiempo X e Y respectivamente. Este índice de correlación varía en el intervalo [-1,1]. Para cuantificar el efecto se puede utilizar el criterio de Cohen, que se explica a continuación:

- Si $\rho_{X,Y}$ se encuentra en el intervalo $[0.1, 0.3]$ la relación entre las dos series de tiempo es pequeña.
- Si $\rho_{X,Y}$ se encuentra en el intervalo $[0.3, 0.5]$ la relación entre las dos series de tiempo tiene un efecto medio.
- Si $\rho_{X,Y}$ se encuentra en el intervalo $[0.5, 1]$ la relación entre las dos series de tiempo es fuerte.

Para mayor información consultar [44].

- **Función de Autocorrelación:** Para determinar la similitud existente entre el comportamiento presente de una serie de tiempo y su comportamiento pasado se utiliza la función de autocorrelación (ACF). La finalidad de esta función es determinar si los errores o las perturbaciones en las series de tiempo están relacionados linealmente entre si.

$$\rho_{t,k} = \frac{Cov(Y_t, Y_{t+k})}{\sqrt{Cov(Y_t, Y_{t+k})\gamma_t}} \quad (3.6)$$

donde $\gamma_t = E[(Y_t - \mu)(Y_{t+s} - \mu)]$. Los valores de la función se encuentran en el intervalo $[-1,1]$. En este trabajo se analizará el correlograma de esta función.

Para mayor información consultar [45].

- **Función de Autocorrelación Parcial:** Esta función, abreviada como PACF, se introdujo dentro de la metodología Box-Jenkins para determinar el número de elementos autorregresivos de una serie de tiempo. La diferencia de esta función con la de autocorrelación es que en la PACF la dependencia lineal de los valores anteriores no se considera. Su fórmula es la siguiente:

$$f_k = \begin{cases} Cor(x_1, x_0) = \rho_1, & \text{si } k = 1 \\ Cor(x_k - x_k^{k-1}, x_0 - x_0^{k-1}), & \text{si } k \geq 2 \end{cases} \quad (3.7)$$

donde $Cor()$ es la correlación de Pearson; si el rezago k es igual a 1, la función PACF adquiere el valor de la función ACF en el primer rezago, si el rezago es mayor o igual a 2 entonces la función PACF adquiere el valor dado por la correlación entre la diferencia de los valores en el rezago k y la diferencia de los valores en el rezago cero.

Para mayor información consultar [46].

- **Test de Ljung-Box:** El test se utiliza para verificar que las autocorrelaciones de una serie de tiempo sean distintas de cero. Las hipótesis de la prueba son las siguientes:
 - H_0 : Los datos se distribuyen de forma independiente
 - H_1 : Los datos no se distribuyen de forma independiente.

Este test es utilizado en los modelos autorregresivos integrados de media móvil para verificar que los residuos no posean autocorrelación. El estadístico de la prueba es el siguiente:

$$Q = n(n + 2) \sum_{k=1}^h \frac{\rho_k^2}{n - k} \quad (3.8)$$

donde n es el tamaño de la muestra, k es el rezago, h el número de rezagos con los que se esta probando y ρ_k es la autocorrelación en el rezago k . Para mayor información consultar [47].

- **Test de Granger:** El objetivo de este test es determinar si una serie de tiempo sirve para predecir a otra variable, la prueba será utilizada en la proyecciones para verificar cual de las variables externas propuestas causará a la demanda eléctrica. Al aplicar el test en el software R se deben tener en cuenta algunas consideraciones, primero, las series de tiempo deben ser estacionarias, segundo, el número de rezagos considerados importa y los términos de error no están correlacionados. Para mayor información consultar [48].
- **Criterio de Akaike:** El estadístico de Akaike, abreviado como AIC, está basado en la teoría de la información y se utiliza en los modelos autorregresivos integrados de media móvil para determinar el número óptimo de parámetros. Su ecuación es la siguiente:

$$AIC = -\frac{2L}{T} + \frac{2(p + d + q)}{T} \quad (3.9)$$

donde p es el número de parámetros autorregresivos, q el número de medias móviles, d el número de diferencias para hacer la serie estacionaria, T el número de instantes considerados e la serie y L el valor de logaritmo de la función de verosimilitud. Para mayor información consultar [49] y [50].

- **MAE:** El error medio absoluto (MAE) es un buen indicador para medir la precisión de un modelo. Su formula es la siguiente [51]:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_t - \hat{y}_t| \quad (3.10)$$

- **MAPE:** El porcentaje de error medio absoluto se calcula encontrando el error absoluto en cada periodo de tiempo, dividiendo este entre el valor real observado para ese periodo y después promediando estos errores absolutos en porcentaje. Este indicador es útil porque permite comparar la precisión entre diferentes modelos de predicción. Su formula es la siguiente [52]:

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}}{n} \quad (3.11)$$

- **Residuos:** Los residuos son una medida del error que se comete al estimar la variable dependiente, se calcula como la diferencia que existe entre el valor real y el valor estimado y estos puede ser nulos, positivos o negativos [53].

3.3. Modelos de Proyección

En esta sección se presentan los modelos de proyección considerados en el trabajo, cada uno de ellos es relevante porque los modelos más complejos se construyen a partir de los modelos más simples, consultar [54], [55], [56] y [57].

- **Procesos autoregresivos (AR):** En los procesos AR el valor de una observación depende de las observaciones anteriores. La demanda eléctrica se puede representar por la siguiente ecuación:

$$y_t = \delta + \alpha_1 y_{t-1} + \dots + \alpha_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (3.12)$$

donde Y_t es la demanda eléctrica en el tiempo t , δ es una constante, α es una proporción que se requiere determinar y ϵ_t es un término de error aleatorio no correlacionado con media cero y varianza constante (ruido blanco). El orden del modelo es AR(p) y se determina a partir del correlograma de la función de autocorrelación parcial (PACF).

- **Proceso de media móvil (MA):** En los procesos de media móvil una observación es una combinación lineal de términos de error con ruido blanco. La demanda eléctrica se puede representar por la siguiente ecuación:

$$y_t = \epsilon + \beta_0 u_t + \dots + \beta_q u_{t-q} \quad (3.13)$$

donde Y_t es la demanda eléctrica en el tiempo t , β es una proporción que se requiere determinar, u_t es el error asociado al tiempo t y ϵ_t es un término de error aleatorio no correlacionado con media cero y varianza constante (ruido blanco). El orden del modelo es MA(q) y se determina a partir del correlograma de la función de autocorrelación (ACF).

- **Proceso autorregresivo y de media móvil (ARMA):** En los procesos ARMA el valor de una observación depende de las observaciones anteriores y del error asociado a ellas. La demanda eléctrica se puede representar por la siguiente ecuación:

$$y_t = \theta + \alpha_1 y_{t-1} + \dots + \alpha_p y_{t-p} + \epsilon_t + \beta_0 u_t + \dots + \beta_q u_{t-q} \quad (3.14)$$

donde Y_t es la demanda eléctrica residencial en el tiempo t , θ es una constante y los otros términos ya fueron descritos en los procesos (AR) y (MA). El orden del modelo es ARMA(p,q) y se determina a partir de los correlogramas PACF y ACF.

- **Proceso autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA):** Si la serie de tiempo se debe diferenciar para poder alcanzar la estacionariedad, se dice que la serie es integrada y de ahí el nombre de este modelo. La ecuación de este modelo es la misma que la utilizada en el modelo ARMA con la diferencia de que la serie de tiempo ya se encuentra diferenciada. Se define el orden del modelo ARIMA (p,d,q), donde d es el número de diferenciaciones realizadas a la serie de tiempo y (p,q) son los parámetros (AR) y (MA) respectivamente.
- **Proceso estacional autorregresivo integrado de media móvil (SARIMA):** Los modelos SARIMA a diferencia de los modelos ARIMA incluyen una componente estacional, la cual se determina a partir de los correlogramas ACF y PACF. Se define el orden

del modelo como $SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)[s]$. Al existir una componente estacional en un periodo s , que es de doce meses para la demanda eléctrica, en los correlogramas se obtienen valores que sobrepasan la banda de confianza cada s rezagos, lo que indica que se debe agregar un componente P o Q .

- **Proceso estacional autorregresivo integrado de media móvil con variable externa (SARIMAX):** La diferencia entre los modelos SARIMAX y SARIMA radica en que en el primero se agrega un regresor externo a la ecuación que define el comportamiento de la variable (demanda eléctrica). Es importante mencionar que las variables externas deben ser estacionarias de lo contrario las proyecciones podrían conducir a algún error.

3.4. Metodología Box-Jenkins

La metodología Box-Jenkins se utiliza en los modelos descritos anteriormente y tiene como finalidad encontrar uno o varios modelos que permitan desarrollar proyecciones de una serie de tiempo. A modo general, lo que se busca es encontrar un modelo con el menor número de parámetros y que presente el error más bajo. Para determinar el modelo idóneo se siguen los siguientes pasos:

- **Identificación:** Dada una serie de tiempo se busca verificar que esta sea estacionaria, si no lo es, aplicar las transformaciones necesarias hasta lograrlo.
- **Estimación:** Estimar el modelo el cual puede ser tipo AR, MA, ARMA, ARIMA, ARIMAX, SARIMA, SARIMAX.
- **Diagnosis:** Comprobar que las propiedades empíricas correspondan a las hipótesis del modelo.
- **Predicción:** Utilizar el modelo para realizar las proyecciones.

Para mayor información sobre esta metodología consultar [58], [59] y [60].

3.4.1. Sin Variable Externa

A continuación se explicará como se utiliza la metodología Box-Jenkins para realizar proyecciones; en la Figura 3.2 se observa el diagrama de flujo de los modelos descritos en la sección 3.3, sin considerar variable externa.

En un inicio se dispone de una serie de tiempo la cual incluye información histórica de la variable que se quiere proyectar, lo primero que se debe hacer es verificar la estacionariedad de la serie observando la tendencia y oscilaciones, si no es estacionaria se hace una transformación logarítmica para estabilizar la varianza y realiza una nueva inspección. Si la serie nuevamente es no estacionaria se aplica una diferencia finita al logaritmo natural, es importante mencionar que en esta parte se aplican los test ADF y KPSS.

Verificada la estacionariedad de la serie se debe construir el modelo utilizando los correlogramas ACF y PACF, con ello se pueden determinar los parámetros (p,q) y (P,Q) de los

modelos descritos. Luego, construido el modelo se comprueba que los residuos no estén correlacionados, para esto se realiza con una inspección visual y se aplica el test de Ljung-Box.

Si los residuos están correlacionados se realiza un ajuste al modelo agregando o quitando parámetros $(p,q)(P,Q)$ hasta lograr que los residuos no estén correlacionados, si no lo están entonces se determina el error de las proyecciones mediante el MAPE, si es satisfactorio se concluyen las proyecciones y si no lo es nuevamente se ajustan los términos AR y MA hasta completar el diagrama de la figura.

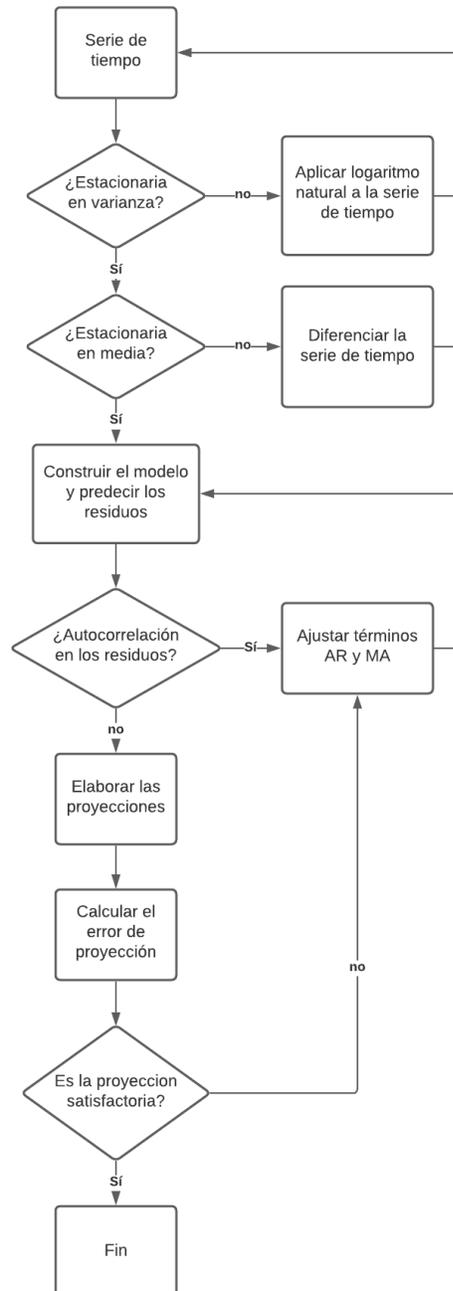


Figura 3.2: Diagrama de flujo de los modelos de proyección: sin variable externa

3.4.2. Con Variable Externa

En la Figura 3.3 se observa el diagrama de flujo de los modelos de proyección que consideran el uso de variables externas.

En un inicio se dispone de una serie de tiempo la cual incluye información histórica de la variable que se requiere proyectar, lo primero que se debe hacer es verificar la estacionariedad de la serie siguiendo los mismos pasos explicados en la sección sin variable externa, verificada la estacionariedad de la serie se procede a analizar las variables externas.

Lo primero que se debe verificar es si existe una correlación entre la serie de tiempo que se quiere proyectar y las variables externas, para ello se calcula el coeficiente de correlación de Pearson y se descartan aquellas variables que no cumplan con el criterio de Cohen, después de este primer filtro se procede a comprobar la estacionariedad de las variables externas de la misma forma que se hizo con la serie original.

Luego se debe determinar la causalidad entre las variables externas y la serie de tiempo, para realizar esto se aplicará el test de Granger a estas series y se determinará un estadístico para saber si la variable externa causa en forma de Granger a la serie de tiempo. La virtud del test es que si no se cumple lo anterior se descarta la variable y se trabaja con una variable menos, facilitando el trabajo.

Es importante mencionar que en esta etapa la elección del número de rezagos tiene una gran influencia en test de Granger, es por esto que el número óptimo de retardos se determina a partir del criterio de información de Akaike (AIC).

Finalmente, se procede a construir el modelo de proyección y se siguen las etapas descritas en la subsección 3.4.1. Es importante notar que una vez han sido filtradas las variables externas estas no se vuelven a modificar en las proyecciones, es decir, si se obtiene un modelo con un error muy grande, no se eliminan las variables externas para reducirlo, únicamente se pueden ajustar los parámetros intrínsecos del modelo $(p,d,q)(P,D,Q)$.

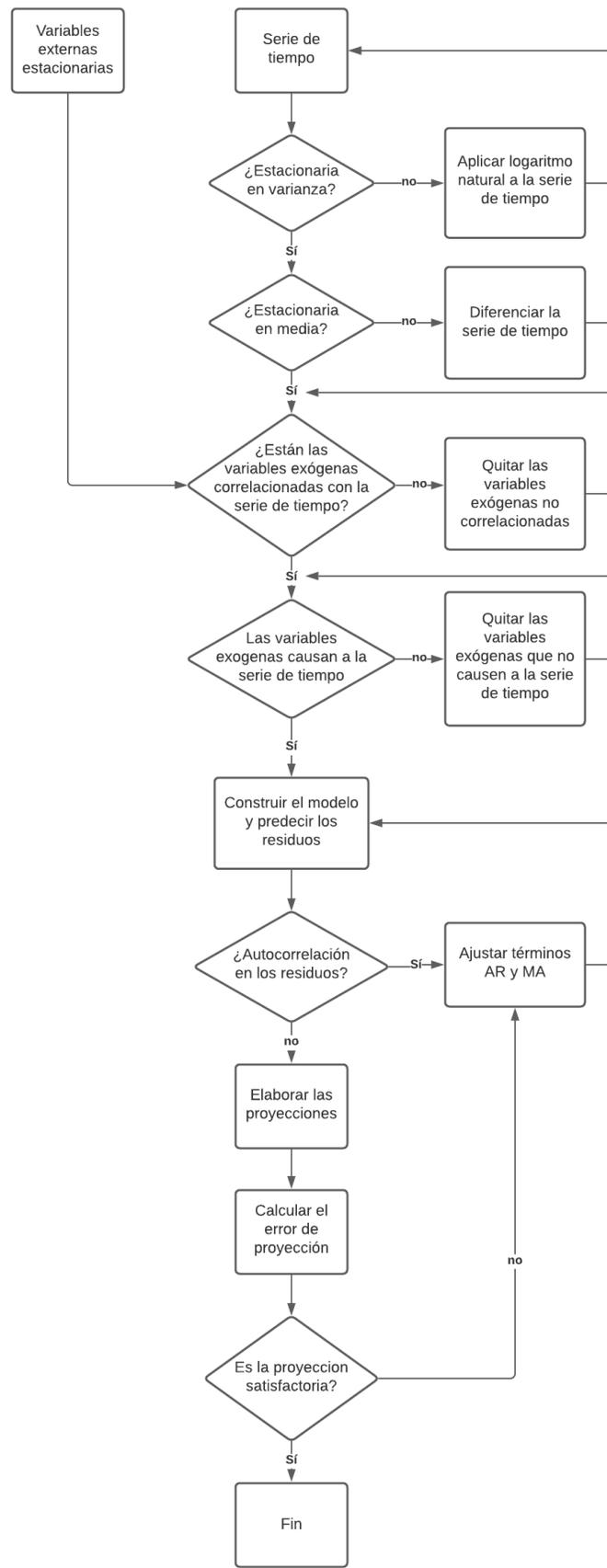


Figura 3.3: Diagrama de flujo de los modelos de proyección: con variable externa

Capítulo 4

Metodología

Uno de los objetivos del presente trabajo es proyectar la demanda de calor para las diferentes zonas geográficas de Chile. Para realizar esto se construirá una base de datos de 10 años de extensión para proyectar mediante los modelos autorregresivos integrados de media móvil los valores futuros de la electrificación del calor.

La idea pareciera ser simple. Sin embargo, es complejo construir una base de datos con la demanda histórica del calor porque la información es escasa y no se encuentra disponible a un nivel regional. Por esto, se aborda el problema de una manera diferente y es lo que se explicará a continuación.

A través de la revisión bibliográfica se encuentra un documento que caracteriza el uso de la energía en los hogares chilenos [2]. En él se indica cual es el consumo energético de las viviendas, los combustibles que utilizan y el porcentaje de la demanda que corresponde al uso de calor; todo a nivel regional.

A partir de lo anterior, la solución al problema radica en construir una base de datos regional que incluya a los combustibles utilizados por los hogares chilenos, estos son el gas licuado de petróleo, el gas natural, la leña y la electricidad, luego se procede a realizar las proyecciones de la demanda residencial de los combustibles y extraer la porción correspondiente al calor.

Para determinar este porcentaje se consulta [2]. En el documento se observó que los principales cambios con respecto al uso de la energía de los hogares chilenos entre los años 2009 y 2018 fue una disminución de la demanda energética, del uso de calefacción, de agua caliente sanitaria e iluminación. Por otro lado, la tenencia de electrodomésticos aumentó.

Al comparar esta información con las políticas públicas y el marco regulatorio, las tendencias anteriores parecieran ser constantes a lo largo del tiempo, y si se considera lo anterior como válido, se puede determinar una ecuación de la recta para determinar el valor de los ponderadores de calor en el futuro y proyectar la electrificación del uso de calor residencial.

La validez del supuesto mencionado anteriormente es un punto esencial en el trabajo y la racionalidad de este se basa en las políticas públicas que se han implementado en el país. De ellas, se puede mencionar las políticas de ahorro energético, iluminación eficiente, recambio de calefactores, aislación residencial, ahorro del agua, etc.

En el diagrama de la Figura 4.1 se observa el proceso descrito anteriormente. Es importante mencionar que la caja de nombre 'Proyectar los combustibles' representa al diagrama de la Figura 3.2 y 3.3.

En las siguientes secciones se explicará en detalle los procesos del diagrama, en la sección 4.1 se describirá como se construyeron las base de datos y en el ejemplo práctico, realizado para la región de la Araucanía se explicará como se realizaron las proyecciones de los combustibles y como se obtuvieron los ponderadores de calor para determinar la electrificación del uso de calor residencial.

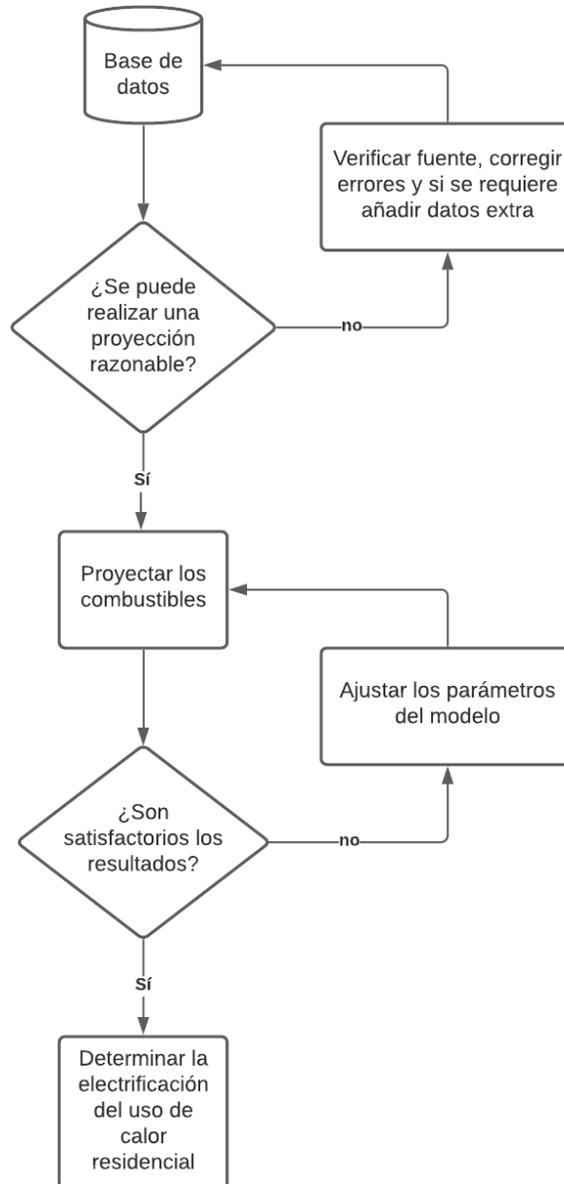


Figura 4.1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada

4.1. Base de datos

En esta sección se explicará como se generaron las bases de datos de los combustibles residenciales y las variables externas.

4.1.1. Demanda Eléctrica

La base de datos de la demanda eléctrica residencial se construyó con la información obtenida de tres fuentes: el instituto nacional de estadísticas (INE), energía abierta y la comisión nacional de energía (CNE). En un inicio se consultó el portal web del INE y se descargaron los boletines mensuales de distribución y generación eléctrica a nivel regional, los datos presentes en estos documentos se fueron ingresando a una planilla de Excel.

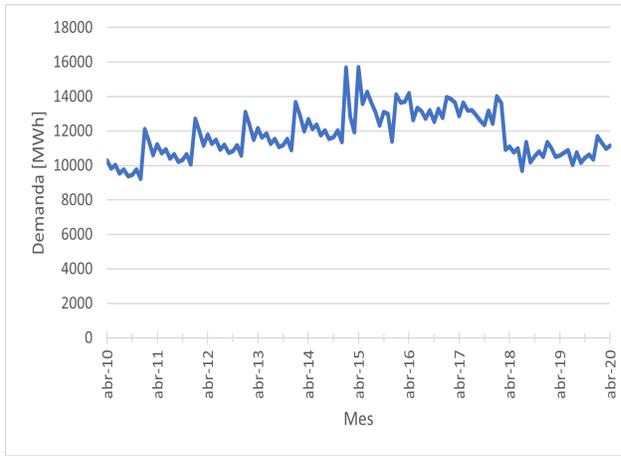
Al ingresar estos datos se pudo observar que la información algunas regiones no se encontraba disponible, para solucionar este problema se consultó con la segunda fuente de información: el portal web de energía abierta. En él se logró encontrar la información mensual la demanda eléctrica de todas las regiones del país entre los años 2015-2020. Sin embargo, esta información en conjunto con la de la primera fuente no llegó a ser suficiente para alcanzar una antigüedad de diez años, necesaria para realizar las proyecciones.

Para solucionar este inconveniente se consultó con la tercera fuente de información: el portal web de la CNE. En ella se encontró un documento en el cual se tabula la demanda histórica de los clientes de las distribuidoras entre los años 2006-2018 [61]. Se investigó cual era el área de concesión de cada distribuidora y agruparon los datos región por región para determinar la demanda eléctrica residencial, así fue posible completar la información de los años restantes.

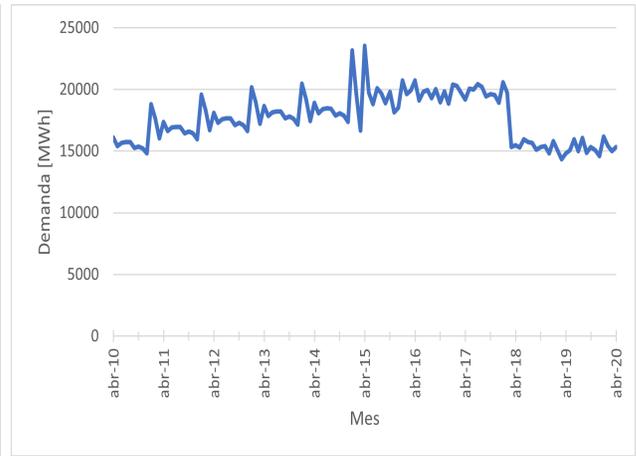
Es de importancia mencionar que otro inconveniente que presentaban los datos, del documento de la CNE, era que la información se encontraba tabulada anualmente mientras que la información tabulada hasta entonces tenía una distribución mensual. Para corregir esto se debieron normalizar los datos mes a mes a través de ponderadores. Esto permitió completar la información faltante; sólo resta verificar la calidad de los datos obtenidos.

Para esto se graficó la demanda eléctrica residencial en el tiempo y se estudió su comportamiento para encontrar patrones atípicos o saltos que pudiesen introducir algún error en las proyecciones. Es conocido que la demanda eléctrica posee una tendencia creciente y un comportamiento estacional, diferencia de consumo entre el verano e invierno. Por ende, si una de las curvas no presenta este comportamiento es probable que exista algún error.

En general, se pudo observar que la demanda eléctrica de la mayoría de la regiones presentaban un comportamiento normal a excepción de las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá, Atacama y Coquimbo. En la Figura 4.2(a) y 4.2(b) se observa la demanda histórica de las primeras dos regiones, en ellas se puede ver la presencia de un escalón en el año 2018. Como este es un comportamiento anormal que podría conducir a errores futuros, se elimina esta información de la base de datos, a partir del punto en el cual la demanda comienza a caer.



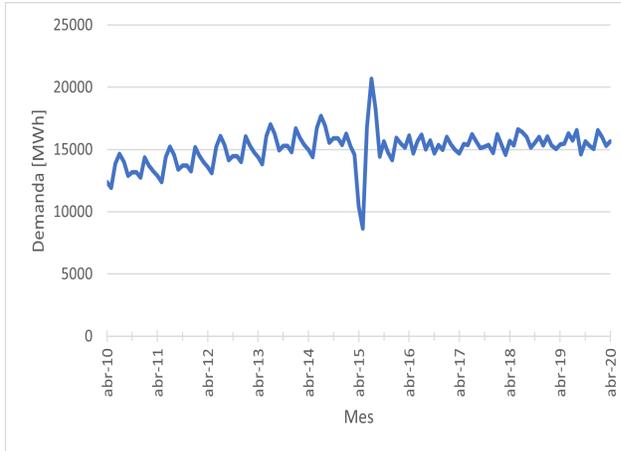
(a) Región de Arica-Parinacota



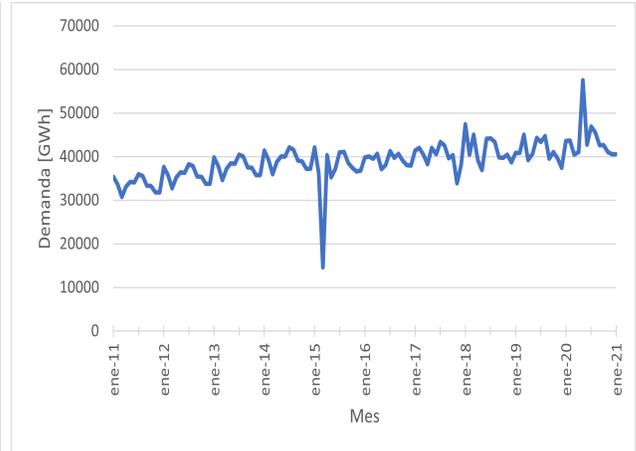
(b) Región de Tarapacá

Figura 4.2: Presencia de un escalón en la demanda eléctrica residencial

En las Figuras 4.3(a) y 4.3(b) se observa la demanda eléctrica de la regiones de Atacama y Coquimbo, en ellas se puede ver la presencia de una caída abrupta a mediados del año 2015. En un inicio, se pensó que era un error intrínseco de las fuentes de información. Sin embargo, al investigar en los medios de comunicación se descubrió que en marzo de año 2015 un temporal afectó a la zona del norte grande y chico, produciendo el desbordamiento de los ríos e inundando varias ciudades.



(a) Región de Atacama



(b) Región de Coquimbo

Figura 4.3: Caída en la demanda eléctrica residencial

Es importante mencionar que se requiere de una base de datos cuya extensión sea como mínimo de 10 años para realizar proyecciones en el largo plazo [62]. En el trabajo se cumplió con ello, sin embargo, no se consideró información de mayor antigüedad para no introducir perturbaciones indeseadas, como el efecto del terremoto ocurrido en Chile el año 2010, la crisis financiera del año 2008, el corte del gas argentino, entre otros eventos.

4.1.2. Consumo de Gas

La base de datos del consumo de gas se construyó consultando la información del portal web de energía abierta. Allí se encontraron datos a nivel residencial para el gas licuado de petróleo (GLP) y el gas natural (GN). Sin embargo, es importante mencionar que no se encontraron proyecciones para estos insumos, por lo que se tuvieron que realizar utilizando los métodos autorregresivos integrados de media móvil.

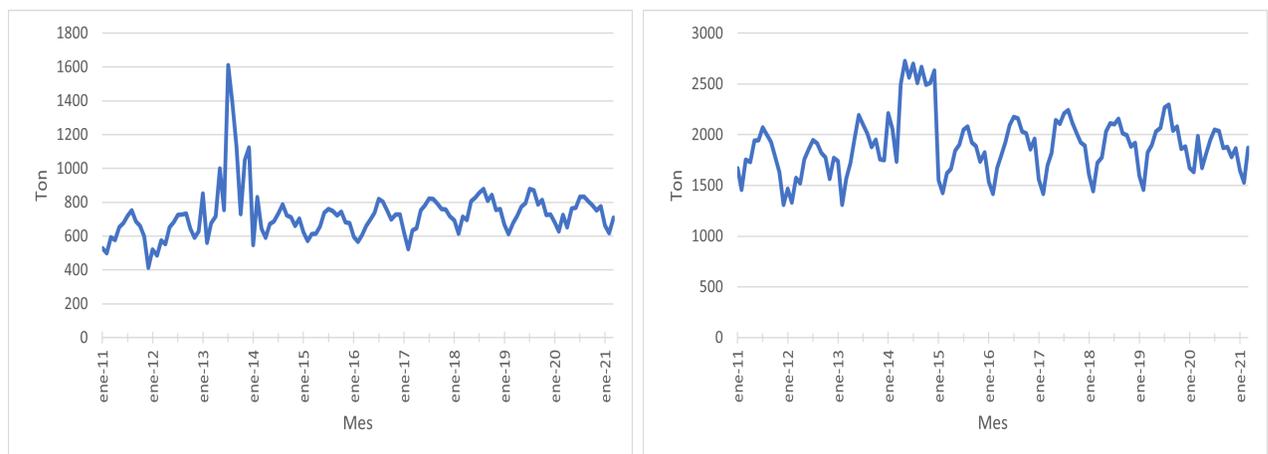
Los datos del gas licuado de petróleo incluyen la información en granel y envasado. En este trabajo se proyectó la suma de estas dos categorías, pero igualmente se pueden realizar proyecciones por separado si fuese necesario. Por lo general, las curvas de gas tienen un comportamiento estacional y una tendencia creciente al igual que la demanda eléctrica; eso fue lo que se consideró para verificar la calidad de los datos.

En la Figura 4.4(a) se observa que en la región de Tarapacá los datos alcanzan un valor muy grande con respecto a la tendencia de la serie. Para corregir esto se procedió de la misma forma que en la subsección 4.1.1. Inicialmente se buscó información que justificara este comportamiento erróneo pero al no encontrarla se eliminó todo el bloque problemático de la base de datos.

En la Figura 4.4(b) se observa un comportamiento de tipo escalón en la región de Antofagasta, para solucionar este inconveniente se procede de igual manera que en la demanda eléctrica. Para una comparar los datos, las toneladas de gas licuado de petróleo se convirtieron a [GWh] utilizando la conversión de la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Conversión eléctrica del gas licuado de petróleo. Fuente: [63]

GLP [kg]	Electricidad [kWh]
1	13.39



(a) Región de Tarapacá

(b) Región de Antofagasta

Figura 4.4: Caída en el consumo mensual de gas licuado de petróleo

La base de datos del gas natural incluye la información a nivel regional en metros cúbicos. Es importante notar que no todas las regiones del país cuentan con una red de gas natural, sólo 10 de las 16 regiones cuentan con ella; por otro lado, para verificar la calidad de los datos se procedió de la forma descrita en los párrafos anteriores. Es relevante mencionar que no se encontraron escalones ni cambios abruptos en las series.

Para una posterior comparación de los datos, los metros cúbicos de gas natural se convirtieron a [GWh] utilizando la conversión de la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Conversión eléctrica del gas natural. Fuente: [63]

GN [m^3]	Electricidad [kWh]
1	11.7

4.1.3. Consumo de Leña

Para generar una base de datos del consumo de leña se consultó el portal web del instituto forestal chileno y se obtuvo un archivo de Excel con la demanda histórica. Al ingresar los datos se observó que estos únicamente representaban el consumo de leña a nivel país, esto es un problema pues se requiere conocer la realidad de las regiones.

Para solucionar esto se consultó [64] y se determinó un ponderador para cada región con respecto a la demanda a nivel nacional. En la Tabla 4.3 se muestran los ponderadores que representan la distribución del consumo de leña en Chile.

Tabla 4.3: Distribución del consumo de leña en el país. Fuente: [64]

Región	Ponderador (%)
Arica-Parinacota	0.08964
Tarapacá	0.08964
Antofagasta	0.08964
Atacama	0.08964
Coquimbo	0.08964
Valparaíso	2.5946
RM	3.7391
Ohiggins	4.4252
Maule	4.73743
Ñuble	1.44427
Bío-Bío	19.8779
Araucanía	17.5695
Los Ríos	13.0807
Los Lagos	26.4765
Aysén	4.6683
Magallanes	0.9383
Total	100

Para comparar la leña con los otros combustibles se convirtieron los metros cúbicos estéreos [m^3st] a [GWh]. Es relevante mencionar que se consideró el poder calorífico promedio de las distintas especies de árboles utilizadas como madera y su humedad. Es importante mencionar que en el trabajo se eligió una humedad del 40 %, esto se describe en detalle en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Equivalente eléctrico de la leña para diferentes niveles de humedad. Fuente: [65]

Especie	Humedad 30 %	Humedad 40 %	Humedad 50 %
Eucaliptus Globulus	1889.5	1539.1568	1188.8136
Ulmo	1748	1427.4836	1106.9672
Aromo	1665.5	1365.75845	1066.0169
Roble	1635.5	1354.11365	1072.7273
Eucaliptus Nitens	1600	1303.05085	1006.1017
Lenga	1514	NA	NA
Radal	1303.5	NA	NA
Coigue	1319	1144.7037	970.4074
Promedio	1584.375	1326.440342	1068.505683

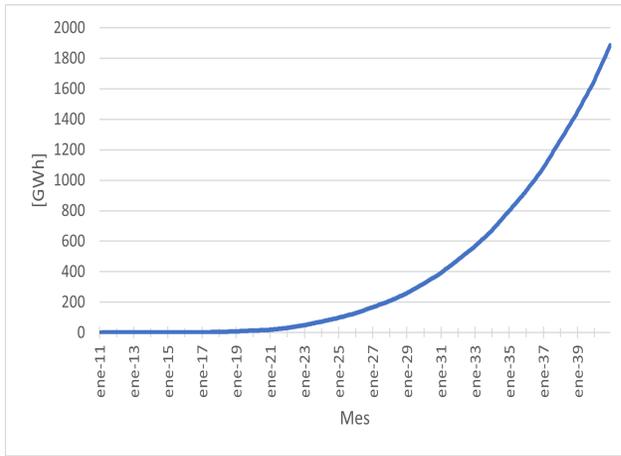
4.1.4. Variables Externas

Las proyecciones que se realizaron de la demanda eléctrica consideraron el efecto de variables externas, estas son: el aumento de la demanda producto de la Electromovilidad, el aumento en la generación debido a una mayor penetración de las tecnologías de generación distribuida, la población, el producto interno bruto regional, el precio del barril de petróleo, el precio del gas natural y el ahorro energético asociado a las medidas de eficiencia energética.

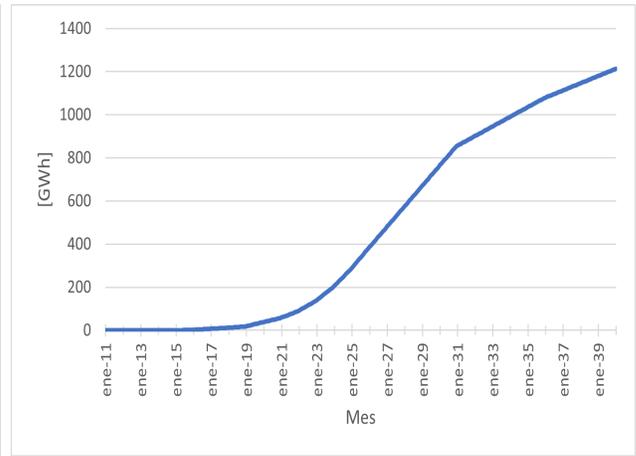
En este trabajo se construyó una base de datos para las 7 variables externas, en la cual se incluye el comportamiento histórico y proyecciones realizadas por entidades gubernamentales, consultar [66], [67] y [68]. Es importante mencionar que para introducir el efecto de las variables en el software R se requiere conocer el valor futuro de los datos.

En la Figura 4.5(a) se observa una proyección del aumento de la demanda eléctrica en Chile debido a la penetración de la electromovilidad, es importante mencionar que se incluye esta variable debido a que un mayor uso de vehículos eléctricos tendrá un impacto en la demanda eléctrica residencial.

En la Figura 4.5(b) se observa una proyección del aumento en la capacidad de generación eléctrica debido a una mayor penetración de las tecnologías de generación distribuida, es importante mencionar que se incluye la generación distribuida como variable externa debido a que la instalación de estos equipos reducirá el costo de las cuentas de luz a nivel residencial y por ende, podría favorecer el consumo de electricidad.



(a) Aumento de la demanda eléctrica producto de la electromovilidad

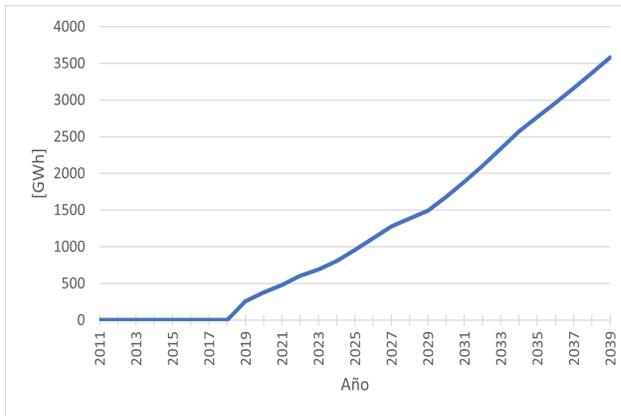


(b) Aumento en la capacidad de generación por la inserción de tecnologías GD

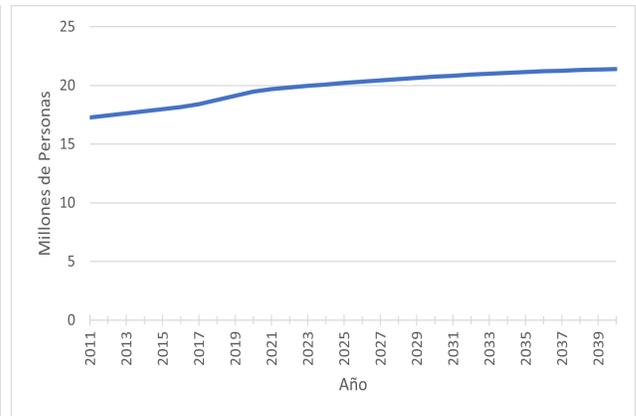
Figura 4.5: Electromovilidad y generación distribuida

En la Figura 4.6(a) se observa una proyección del ahorro en energía eléctrica debido a la implementación de políticas públicas que fomentan el ahorro energético en el país. Es importante mencionar que se incluye la eficiencia energética como variable externa debido al efecto que podría tener en la demanda eléctrica residencial.

En la Figura 4.6(b) se observa una proyección de la población en Chile. Es importante mencionar que se considera a la población como una variable externa debido a que un mayor número de personas viviendo en una localidad implica una mayor demanda eléctrica; en el desarrollo del trabajo se considera la población como una variable a nivel regional.



(a) Ahorro en energía eléctrica producto de las medidas de eficiencia energética



(b) Proyección de la población chilena

Figura 4.6: Eficiencia energética y población de Chile

En la Figura 4.7(a) se observa una proyección del producto interno bruto (PIB) de Chile en miles de millones de pesos. Se considera el PIB como variable externa debido a que representa el poder adquisitivo de los hogares, por ende, podría tener una correlación con la demanda eléctrica; es importante mencionar que se trabajó con la información a nivel regional.

En la Figura 4.7(b) se observan las proyecciones del precio del gas en [dólares/MBtu], es importante mencionar que se incluye el precio del gas como variable externa debido a que es uno de los combustibles más utilizados por los hogares chilenos y el precio de este insumo podría influir en la demanda eléctrica residencial.

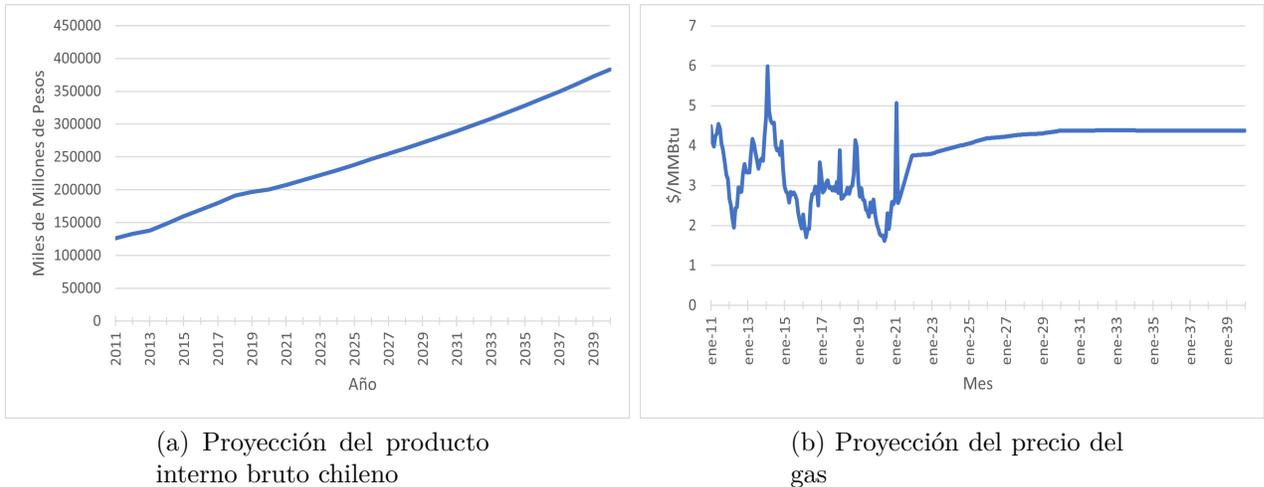


Figura 4.7: Producto interno bruto regional y precio del gas

En la Figura 4.8 se observan las proyecciones del precio del petróleo en dolares por barril. Es importante mencionar que se incluye el precio del petróleo como variable externa debido al uso que tiene como combustible en la generación eléctrica, en calefacción, etc.

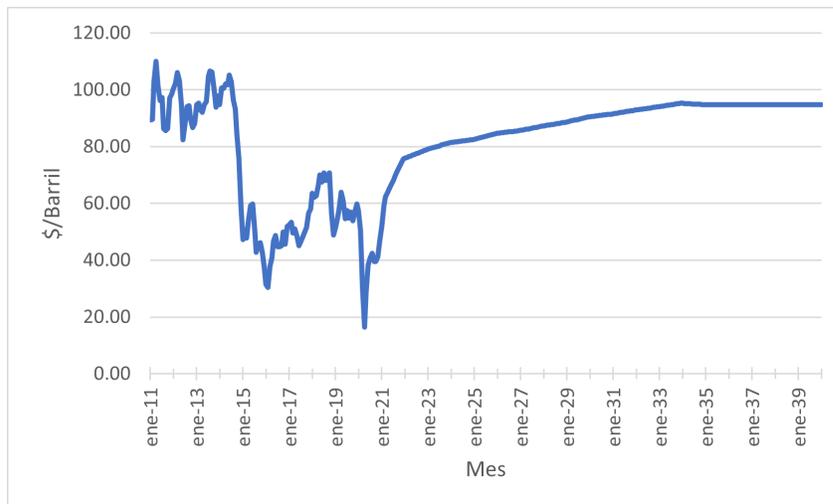


Figura 4.8: Proyección del precio del petróleo en Chile

4.2. Implementación en R

En este trabajo se utilizó el software estadístico R en su versión 4.0.5. Para implementar los modelos ARIMA/ARIMAX se instalaron las siguientes librerías:

- **astsa**: Incluye funciones que son complementarias para el análisis de series de tiempo y sus aplicaciones.
- **forecast**: Incluye métodos y herramientas para la visualización y análisis de las predicciones, incluye funciones para el modelamiento ARIMA.
- **lmtest**: Incluye una serie de tests, conjuntos de datos y ejemplos para verificar las propiedades de las series de tiempo.
- **lubridate**: Incluye funciones que permiten manejar las fechas de la serie de tiempo con una mayor comodidad.
- **tidyverse**: Incluye un conjunto de paquetes destinados para la ciencia de los datos, visualización de gráficos, importación de datos, manipulación de datos, etc.
- **tseries**: Incluye herramientas para el análisis de series de tiempo y funciones para la implementación de los modelos ARMA.
- **vars**: Permite realizar estimaciones, selección de lag, test de diagnóstico, predicciones, análisis de causalidad, entre otras funciones.

Para realizar las proyecciones se utilizaron diversas funciones de R, las principales se mencionan a continuación:

- `accuracy()`: A partir de una proyección es capaz de entregar un set con los diferentes tipos de errores, ME, RMSE, MAE, MPE, MAPE, MASE y ACF1.
- `acf()`: Esta función determina la autocorrelación de una serie de tiempo y por defecto gráfica el correlograma.
- `adf.test()`: Esta aplica el test de dickey fuller para una serie de tiempo, si el p value es menor a 0.05 entonces la serie es estacionaria o de tendencia estacionaria.
- `auto.arima()`: Esta función determina el mejor modelo ARIMA de acuerdo con los criterios AIC, BIC y AICc.
- `Box.test()`: Se aplica el test de Ljung-Box a los residuos del modelo proyectado. Si p value es mayor a 0.05 entonces no existe autocorrelación en los residuos.
- `cbind()`: Permite un vectores, matrices y conjunto de datos en una única matriz.
- `diff()`: Si no se especifica un retardo en los argumentos de la función entonces le aplica a una serie sus diferencias, restando el argumento en el tiempo t con el argumento en el tiempo t-1.
- `forecast::forecast()`: Esta función ejecuta las proyecciones de los modelo construido.
- `grangertest()`: Esta función ejecuta el test de causalidad de Granger.

- `kps.test()`: Esta función ejecuta el test KPSS, si p value es mayor a 0.05 entonces la serie es estacionaria entorno a la media.
- `pacf()`: Esta función determina la autocorrelación parcial de una serie de tiempo y por defecto grafica el correlograma.
- `residuals()`: Es una función genérica que permite obtener los residuos de un modelo.
- `seasonplot()`: Esta función permite graficar una serie de tiempo de acuerdo con la estacionalidad que esta presente.
- `ts()`: Esta función convierte los archivos de excel a un formato en series de tiempo con la fechas definidas adecuadamente.
- `VARselect()`: Para una serie de tiempo encuentra el orden óptimo de acuerdo con el criterio AIC, HQ o SC.
- `write.table()`: A través de este comando se pueden convertir los resultados obtenidos en formato csv.

Para mayor información consultar [69].

4.3. Ejemplo: Región de la Araucanía

En esta sección se explicará como se realizaron las proyecciones de la electrificación del calor residencial para la región de la Araucanía. Es importante mencionar que el método que se explicará es válido para las regiones restantes.

4.3.1. Estacionariedad y Estacionalidad

Inicialmente se dispone de una base de datos de la demanda eléctrica de la región de la Araucanía, el primer paso es verificar la estacionariedad de la serie. En la Figura 4.9 se observa el comportamiento histórico de la demanda eléctrica en esta región, a priori se puede ver que la serie de tiempo es no estacionaria porque tiene una tendencia creciente.

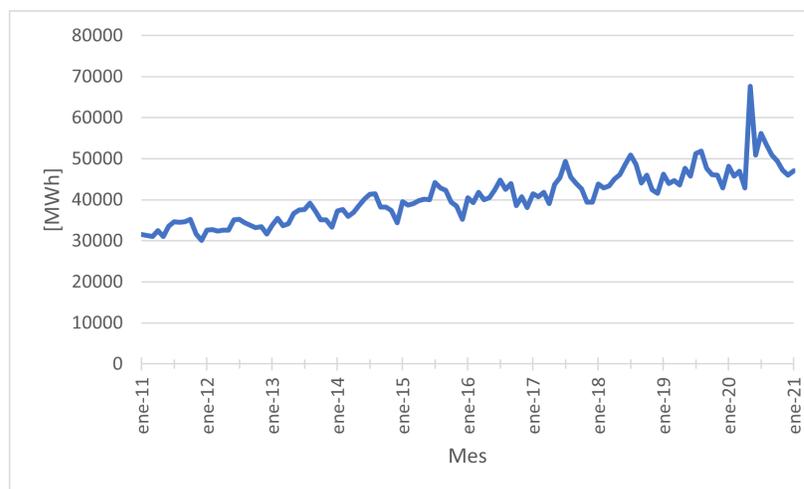


Figura 4.9: Demanda eléctrica residencial de la Araucanía

Como los datos son no estacionarios se aplica el logaritmo natural a la serie de demanda eléctrica para estabilizar la varianza. En la Figura 4.10 se observa el logaritmo natural de la demanda eléctrica residencial de la Araucanía. A priori, se observa un comportamiento similar al de la Figura 4.9 y se infiere que esta serie tampoco es estacionaria.

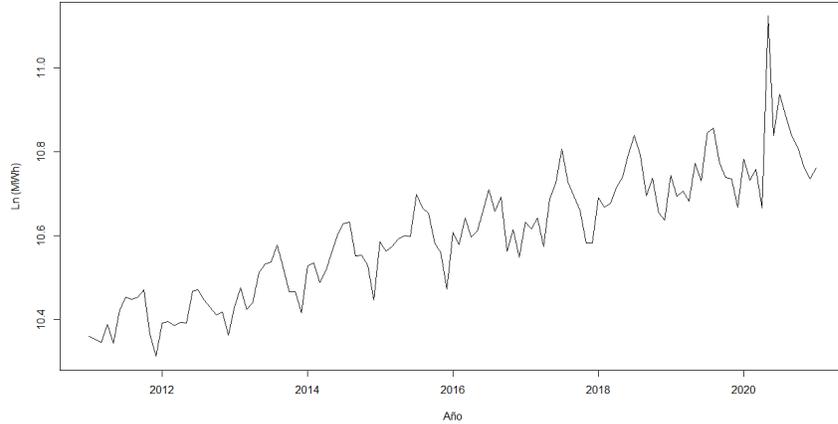


Figura 4.10: Logaritmo natural de la demanda eléctrica en la Araucanía

Para lograr la estacionariedad se aplica una diferenciación para eliminar esta tendencia. En la Figura 4.11 se puede ver que los datos oscilan entorno a una media y pareciera ser que la varianza es constante en el tiempo con lo cual se obtendría la estacionariedad. Sin embargo, en la gráfica hay una gran perturbación en los primeros meses del año 2020 y se deben verificar las conjeturas con las pruebas ADF y KPSS.

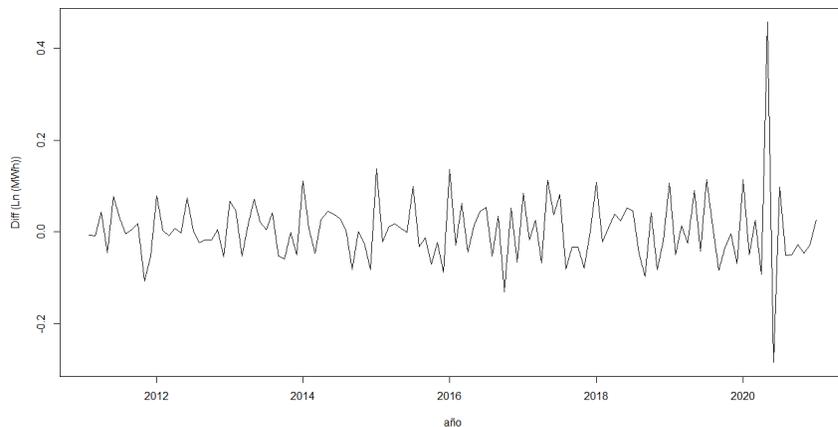


Figura 4.11: Primeras diferencias en la región de la Araucanía

En la Tabla 4.5 se observan los resultados del test aumentado de Dickey-Fuller para la demanda eléctrica (Y_t), el logaritmo natural de la demanda eléctrica ($\ln(y_t)$), y la primera diferencia aplicada al logaritmo natural, ($\text{diff}(\ln(y_t))$). Se puede ver que el p-value es 0.01 en las tres series de tiempo, esto indica que no existen raíces unitarias en las series y que debiesen

ser estacionarias en los tres casos. Sin embargo, sabemos que esto no es cierto porque en la inspección gráfica ellas no tenían un comportamiento estacionarios, lo que indica que la series de tiempo son estacionarias entorno a una tendencia.

Tabla 4.5: Test ADF aplicado a la demanda eléctrica residencial

ADF	y(t)	ln(y(t))	diff(ln(y(t)))
Dickey-Fuller	-8.1814	-7.6289	-17.316
Lag Order	0	0	0
p-value	0.01	0.01	0.01

En consecuencia, para verificar que la serie de tiempo es o no estacionaria entorno a la tendencia se aplica el test KPSS. En la Tabla 4.6 se puede ver que con una diferenciación la serie alcanzó un valor p-value de 0.1, lo que indica que la estacionariedad se fue obtenida.

Tabla 4.6: Test KPSS aplicado a la demanda eléctrica residencial

KPSS	y(t)	ln(y(t))	diff(ln(y(t)))
KPSS Level	2.2593	2.307	0.0222
Truncation lag parameter	4	4	4
p-value	0.01	0.01	0.1

Resta verificar estacionalidad de la demanda eléctrica. Para ello se utiliza el comando `seasonplot()` de R y se obtiene la Figura 4.12. En ella se puede ver que las curvas son similares en todos los años lo que indica la presencia de una componente estacional en los modelos de proyección.

Es interesante notar que la demanda eléctrica del año 2020 presenta un gran salto en los meses de invierno y esto coincide con el comienzo de las cuarentenas en Chile para enfrentar la pandemia del coronavirus.

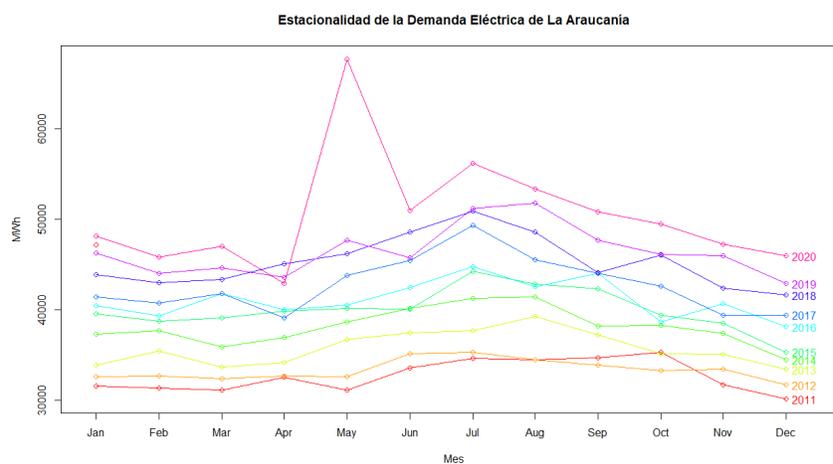


Figura 4.12: Estacionalidad de la demanda eléctrica en la Araucanía

4.3.2. Variables Externas en la Araucanía

Para determinar que variables externas se incluyen en el modelo de proyección se debe determinar el coeficiente de correlación de Pearson entre la demanda eléctrica y las variables externas. En la Tabla 4.7 se puede observar que todas las variables externas a excepción de eficiencia energética tienen un valor en modulo mayor a 0.5, lo que indica que la correlación es fuerte de acuerdo con el criterio de Cohen. Por ende, eficiencia energética se quita del modelo.

Tabla 4.7: Coeficiente de correlación de Pearson entre la demanda eléctrica residencial de la Araucanía y las variables externas

Región de la Araucanía		
Variable Dependiente	Variable Independiente	Correlación
Demanda Eléctrica	Eficiencia Energética	0
	Electromovilidad	0.7716261
	Precio del Gas	-0.5059759
	Generación Distribuida	0.7595887
	Petróleo	-0.6758249
	PIB	0.8216796
	Población	0.8785802

Luego, se procede a comprobar la estacionariedad de las variables externas siguiendo el mismo procedimiento descrito en la subsección 4.3.1. Una vez obtenida se determina una relación de causalidad de Granger entre las variables externas y la demanda eléctrica. Para ello, se determina el lag óptimo de las series de tiempos utilizando el criterio AIC y luego se ingresan los datos en la función `grangertest()`. Esto se observa en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8: Test de Granger entre la demanda eléctrica y las variables externas

Región de la Araucanía					
Variable Dependiente	Variable Independiente	Res.Df	Df	F	Pr(>F)
Demanda eléctrica	Electromovilidad	72	-23	0.6175	0.8949
	Precio del gas	73	-23	0.5642	0.9317
	Generación distribuida	72	-23	4.0306	2.08E-05
	Precio del petróleo	73	-23	2.1933	0.0103
	PIB	72	-23	2.337	0.006367
	Población	72	-23	0.569	0.9284
Electromovilidad	Demanda eléctrica	116	-1	0.8371	0.3621
Precio del gas		117	-1	0.0697	0.7922
Generación distribuida		116	-1	0.498	0.4818
Precio del petróleo		115	-2	0.0972	0.9075
PIB		94	-12	0.7185	0.7294
Población		116	-1	0.0737	0.7865

En la Tabla 4.8 se observan los residuos (Res.DF), el número de retardos (Df), el estadístico F y el parámetro de decisión $\Pr(>F)$. Es importante mencionar que las pruebas se realizaron en dos sentidos, un sentido en el que se considera a las variables exógenas como variables independientes y un sentido contrario en el que estas son dependientes.

Si $\Pr(>F) < 0.05$ se dice que la variable dependiente causa en forma de Granger a la variable independiente, así se descartó generación distribuida, precio del petróleo y PIB regional, pues, se suponía que estas variables causaban a la demanda eléctrica y no al revés.

4.3.3. Construcción del Modelo

Para construir el modelo de proyección de demanda se utiliza la función `auto.arima()` incluida en el software R. Esta función entrega automáticamente un modelo candidato a utilizar que por lo general es bueno. Sin embargo, en algunos casos no considera la estacionariedad de la serie de tiempo ni tampoco la parte estacional, es por ello que es necesario complementar esta función con un análisis de los correlogramas ACF y PACF.

En la Tabla 4.9 se muestran dos modelos de proyección de demanda, el primero corresponde al propuesto por la función `auto.arima()` y el segundo corresponde al modelo final, obtenido a posteriori. Se puede ver que el modelo 1 utiliza 6 parámetros mientras que el modelo 2 sólo utiliza 4. Es por esto que se decide utilizar el segundo modelo; porque el AIC es menor.

Tabla 4.9: Construcción de los modelos de proyección de demanda

ARIMAX	p	d	q	P	D	Q	AIC
Modelo 1	0	1	3	2	0	0	2222.29
Modelo 2	0	1	1	0	1	1	1989.4

Ahora se explicará como se construyó el modelo 2 de la Tabla 4.9. Se consideró $d = 1$ porque se requiere de una diferenciación para alcanzar la estacionariedad. Por otro lado, se eligió $D = 1$ porque las curvas de la Figura 4.12 no tienen un comportamiento estacionario.

Para determinar los parámetros (Q,q) se estudia la función de autocorrelación (ACF) de la primera diferencia de la demanda eléctrica, mostrada en la Figura 4.13. En general, todos aquellos rezagos sobresalgan de la banda de confianza azul se consideran como un término MA, y se suman para obtener el valor de q. Por esto se considera inicialmente $q=7$. Sin embargo, esto no es definitivo, se deben considerar otros factores.

En el Correlograma 4.13 existe una componente estacional que se repite cada 12 meses, en los lags = 1.2, 2.4, 3.2. En estos puntos la función de autocorrelación sobrepasa la banda de confianza, pero estos rezagos se descartan y se obtiene $q=4$. Resta analizar los lags entre [0.0-1.2], se descarta el lag cero por tratarse de la autocorrelación de la serie de tiempo consigo misma y de los tres restantes se considera únicamente el rezago inmediatamente siguiente al lag 0.0 por ser el mayor de estos y ser representativo, así $q=1$.

Para escoger $Q = 1$ se eligió el rezago 1.2 por ser representativo de los rezagos 2.4 y 3.2, que representan la parte estacional de la serie de tiempo.

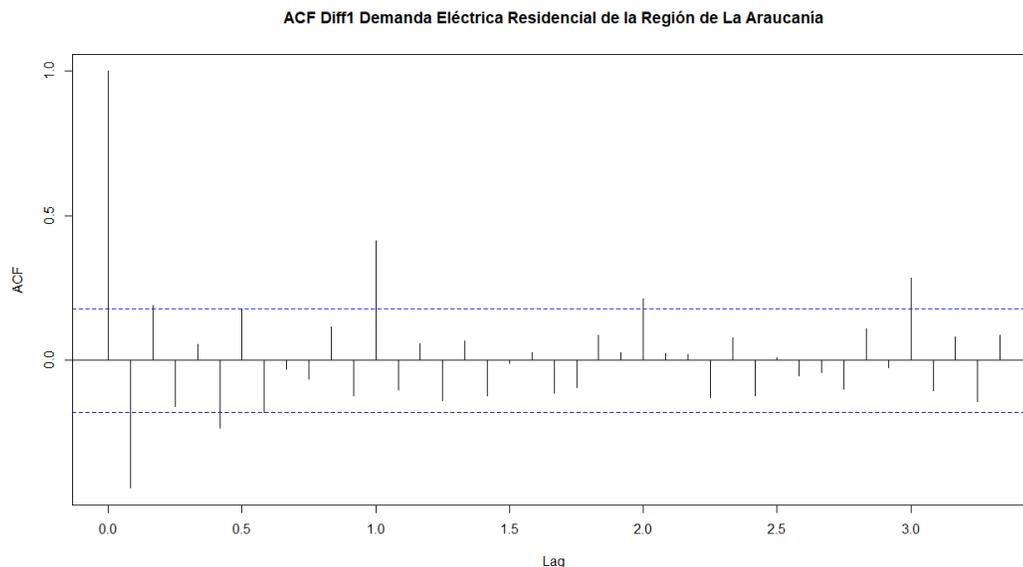


Figura 4.13: ACF de la región de la Araucanía

Para determinar los parámetros (P,p) se estudia la función de autocorrelación parcial (PACF) de la primera diferencia de la demanda eléctrica, mostrada en la figura 4.14. Al igual que en el correlograma anterior cada rezago que sobresale de la banda azul se considera como un término AR, y se suman para obtener el valor de p . Por esto, se considera inicialmente $p=7$. Sin embargo, al igual que en el caso anterior, esto no es definitivo.

No se considera el rezago cero ni tampoco los términos estacionales, por ende $p = 5$. Luego se considera el mayor de los rezagos dentro del periodo de un año y se descarta el resto por no ser representativo, así $p = 1$. A posteriori el programa indicó que el AIC era menor si se consideraba $p = 0$ y por eso se dejó este último valor. Por otro lado, se consideró $P = 0$, porque no hay términos que sobresalgan de la banda en los lags 1.2, 2.4 y 3.2.

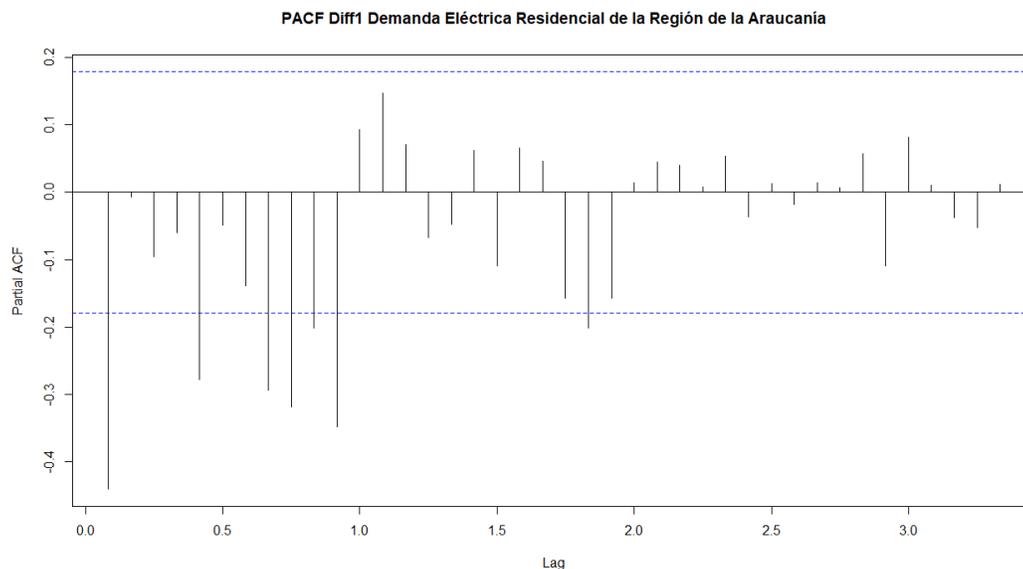


Figura 4.14: PACF de la región de la Araucanía

4.3.4. Errores del Modelo

Concluida la construcción del modelo se procede a verificar los residuos. En la Figura 4.15 se grafica la diferencia entre el valor real y el valor estimado de la demanda eléctrica considerando el modelo 2 de la Tabla 4.9. Se puede decir que esta diferencia oscila entorno a una media y pareciera ser que no existe autocorrelación en los errores, pero esto se debe verificar.

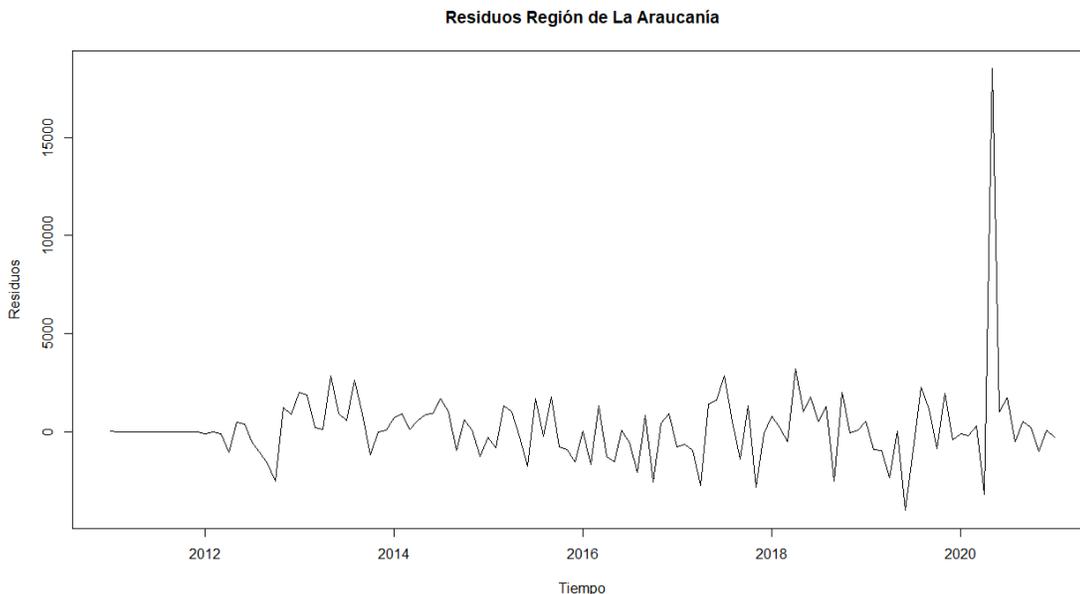


Figura 4.15: Residuos de la demanda eléctrica en la región de la Araucanía

En la Tabla 4.10 se observan los resultados del test Ljung-Box. El criterio de decisión para confirmar que los residuos no estén correlacionados es un valor p-value > 0.05 y se puede ver que esto se cumple.

Tabla 4.10: Test de Ljung Box en la Araucanía

Ljung Box	ARIMA(0,1,1)(0,1,1)[12]
X-squared	0.46145
df	1
p-value	0.4969

En la Tabla 4.11 se observan los errores asociados al modelo 2 de la Tabla 4.9. El indicador a considerar para evaluar la eficacia del modelo es el error porcentual medio absoluto (MAPE), cuyo valor es 2.547. Esto quiere decir que las proyecciones podrían estar erradas en un 2.547%. Si se requiere saber de cuantos [MWh] es este error, se utiliza el error medio absoluto (MAE), en este caso su valor es de 1107.31 [MWh].

Tabla 4.11: Errores en las proyecciones de demanda eléctrica de la Araucanía

Errores	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	ACF1
ARIMAX	203.78	2121.66	1107.31	0.2990	2.547	0.5009	-0.061

4.3.5. Proyección de los Combustibles

La proyección de la demanda eléctrica se realiza con el comando `forecast::forecast()` descrito en la sección 4.2. En la Figura 4.16 se observa el resultado de la proyección de demanda eléctrica. El programa entrega tres posibles tendencias, una al alza con un intervalo de confianza del 95 %, una tendencia promedio y una a la baja con un intervalo de confianza del 95 %. En el trabajo se considera únicamente la tendencia promedio.

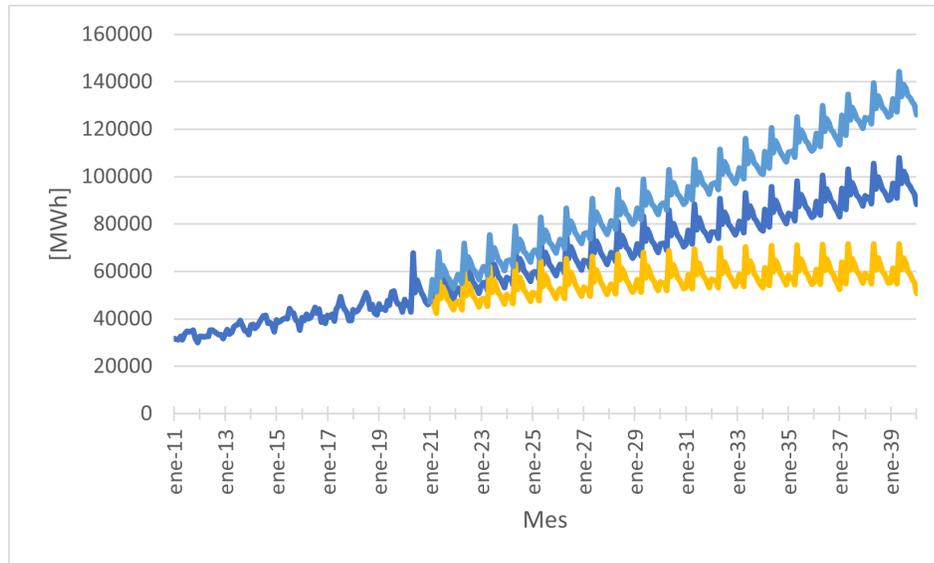


Figura 4.16: Proyección de la demanda eléctrica residencial en la Araucanía

El proceso explicado en las subsecciones 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 y 4.3.4 se repite para obtener la información de las regiones restantes y estimar el consumo de gas licuado de petróleo, gas natural y leña. La proyección obtenida de los combustibles se muestra en la Figura 4.17.

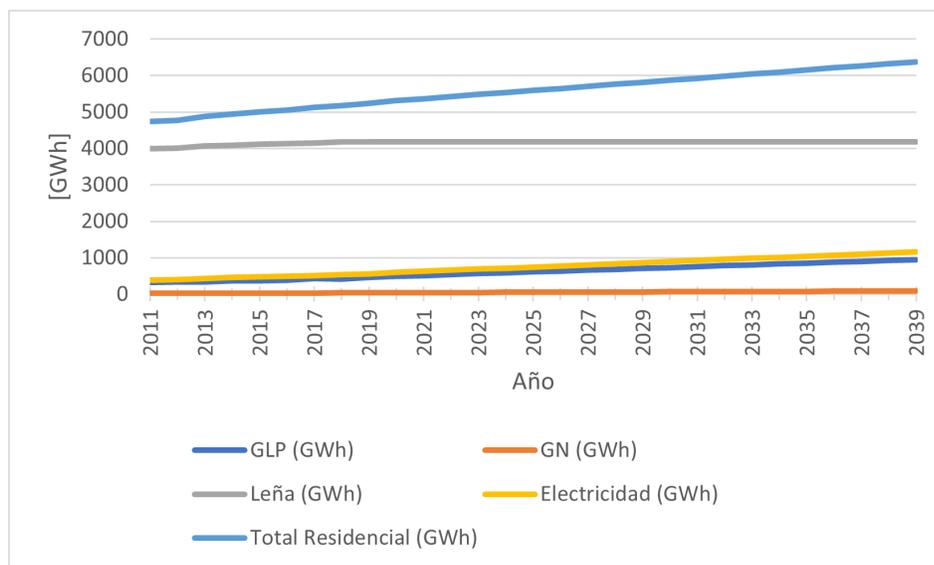


Figura 4.17: Proyección de los combustibles residenciales en la Araucanía

4.3.6. Ponderadores de Calor

Se debe determinar que porción de la demanda energética total de los hogares corresponde al uso del calor. Para ello, se considera el supuesto de que las principales tendencias con respecto al uso de la energía se mantendrán constantes en el tiempo. A continuación se listan estas tendencias y se explican las razones por las cuales se considerarán como constantes.

- Disminución de la demanda de energía por vivienda: Es probable que esta tendencia se mantenga constante en el futuro debido a la disminución del número de habitantes por vivienda y por la aplicación de políticas públicas que fomenten el ahorro energético, como la iluminación eficiente, el etiquetado de electrodomésticos y el recambio tecnológico.
- Disminución del uso de calefacción: Es probable que esta tendencia se mantenga constante en el futuro debido a las políticas publicas implementadas en la actualidad por el gobierno chileno, como por ejemplo, el recambio de calefactores a leña y el mejoramiento de la aislación residencial.
- Disminución del uso de calor en el agua caliente sanitaria: Es probable que esta tendencia se mantenga constante en el futuro debido a que en el país se están aplicando varias políticas publicas para fomentar el ahorro de agua.
- Aumento de la demanda de calor en la cocción de alimentos: Es probable que esta tendencia se mantenga constante en el futuro principalmente por el aumento de electrodomésticos en la cocina, hervidores, microondas, cafetera, hornillo eléctrico, parrilla eléctrica, freidoras de aire, tostadoras eléctricas, etc.

La racionalidad de mantener constantes supuestos es determinar un ponderador anual de calor que al multiplicarlo con la demanda de energía total permita obtener el valor la electrificación de calor residencial. Se dispone de la información real de los años 2009 y 2018, dos puntos en el plano, por ende, se puede obtener una ecuación de la recta que determine cual será el valor de los ponderadores en el futuro. Esto se puede visualizar en la Tabla 4.12. Para mayor información consultar el anexo G.

Tabla 4.12: Demanda anual de calor por vivienda y ponderadores anuales a nivel nacional. Fuente: [2]

Item	Año 2009 [kWh]	Año 2018 [kWh]	λ_{2009}	λ_{2018}
Cocción de alimentos	234	284	0.0278	0.0351
Horno	73	71	0.0087	0.0088
ACS	1596	1328	0.1894	0.1643
Lavado de loza	213	200	0.0253	0.0247
Hervidor	40	83	0.0047	0.0103
Microondas	18	21	0.0021	0.0026
Secado ropa	59	129	0.007	0.016
Calefacción	4614	4051	0.5475	0.5012
Total calor	6847	6167	0.8124	0.763
Total hogar	8428	8083	1	1

4.3.7. Electrificación del Uso de Calor en la Araucanía

Es importante mencionar que utilizando los ponderadores de las Tablas G.4, G.5, G.6 y G.7 se proyectó la demanda de calor residencial en la Araucanía. Esto se puede visualizar en la figura 4.18.

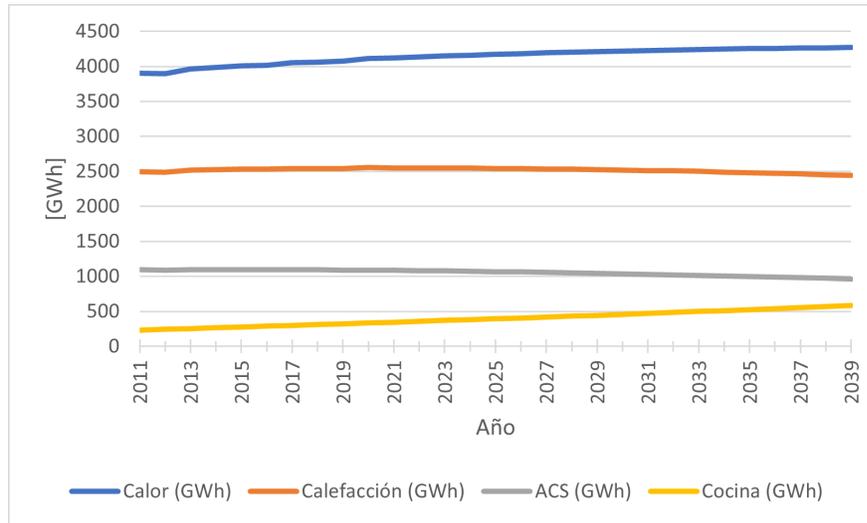


Figura 4.18: Demanda de calor residencial de la Araucanía

Para determinar la electrificación del uso de calor residencial se utilizó un procedimiento parecido al descrito anteriormente. Para ello se multiplicaron los ponderadores de la Tabla G.8 con la demanda eléctrica de la región. En la Figura 4.19 se muestra la electrificación del uso calor residencial en la región de la Araucanía.

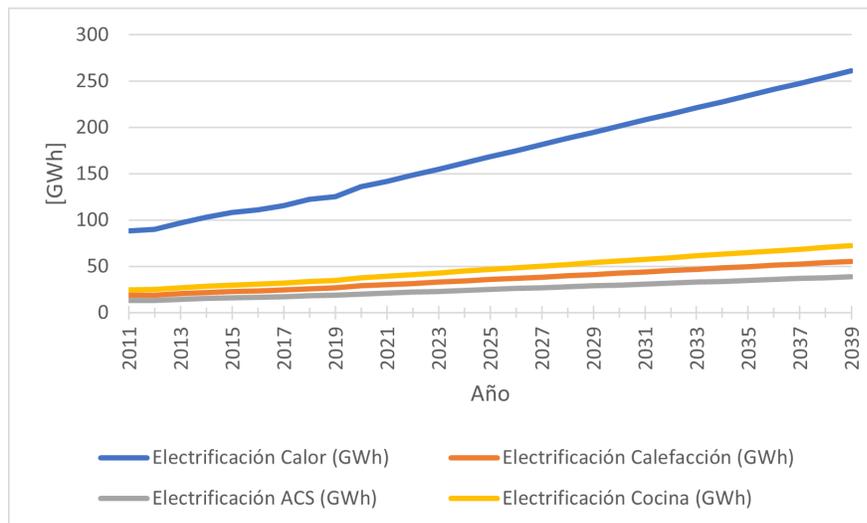


Figura 4.19: Electrificación del uso de calor residencial en la Araucanía

El proceso descrito en esta sección se debe repetir para las 15 regiones restantes. Esto permitirá agrupar los datos por zona geográfica y obtener un valor a nivel país.

Capítulo 5

Resultados

Este capítulo se presentan los resultados obtenidos en seis secciones, una para los datos a nivel país y cinco para las zonas geográficas. En cada sección se presentan tres figuras y una tabla, el primer gráfico muestra la proyección de los combustibles residenciales, el segundo muestra la proyección de la demanda de calor y el tercero muestra la electrificación del uso de calor residencial. En la tabla que se encuentra al final de cada sección se resumen las principales tendencias e indicadores.

Es importante mencionar que los gráficos representan la demanda anual de un ítem en [GWh], es decir, los puntos que se encuentran entre dos años consecutivos no existen porque la demanda anual se calcula a fin de año y no en los meses intermedios. La utilidad de representar así la información radica en que se pueden visualizar rápidamente las tendencias y comportamientos futuros del insumo que se requiera.

Es relevante mencionar algunos puntos con respecto a la relación entre el segundo y tercer gráfico de las secciones de este capítulo. La segunda curva, la curva de la demanda de calor residencial, incluye el uso de todos los insumos energéticos de un hogar. Esto quiere decir que no se puede determinar con esa gráfica que porcentaje del uso de calor corresponde exclusivamente a electricidad, gas o leña.

La tercera gráfica mostrada en las secciones representa exclusivamente el uso eléctrico de calor, el uso de los otros combustibles residenciales no es considerado en este trabajo. La importancia de esta gráfica radica en que permite caracterizar la demanda eléctrica de calor residencial y visualizar sus principales tendencias. A continuación se procede a mostrar los resultados obtenidos por zona geográfica.

5.1. País

En esta sección se presentan las proyecciones de los insumos energéticos residenciales, las proyecciones de la demanda de calor y la electrificación del calor residencial en el país.

En la Figura 5.1 se observa la proyección de los principales insumos energéticos utilizados por los hogares en Chile, estos son el gas licuado de petróleo, el gas natural, la leña y la electricidad; las proyecciones presentan una distribución anual y se considera como horizonte el año 2039.

De la Gráfica 5.1 se puede ver que el uso de todos los insumos, a excepción de la leña, aumentarán su uso. El consumo de gas licuado de petróleo aumentará en 4473 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 47 % en un periodo de 20 años.

El uso del gas natural aumentará en 3918 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 59 % en un periodo de 20 años; la demanda eléctrica aumentará en 8085 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 59 % en un periodo de 20 años. Con respecto al uso de leña, su consumo se mantendrá constante en 23767 [GWh].

Para representar el consumo energético total de los hogares se sumaron todos los combustibles. Se observa que la demanda energética total aumentará en 16478 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 30 % en un periodo de 20 años.

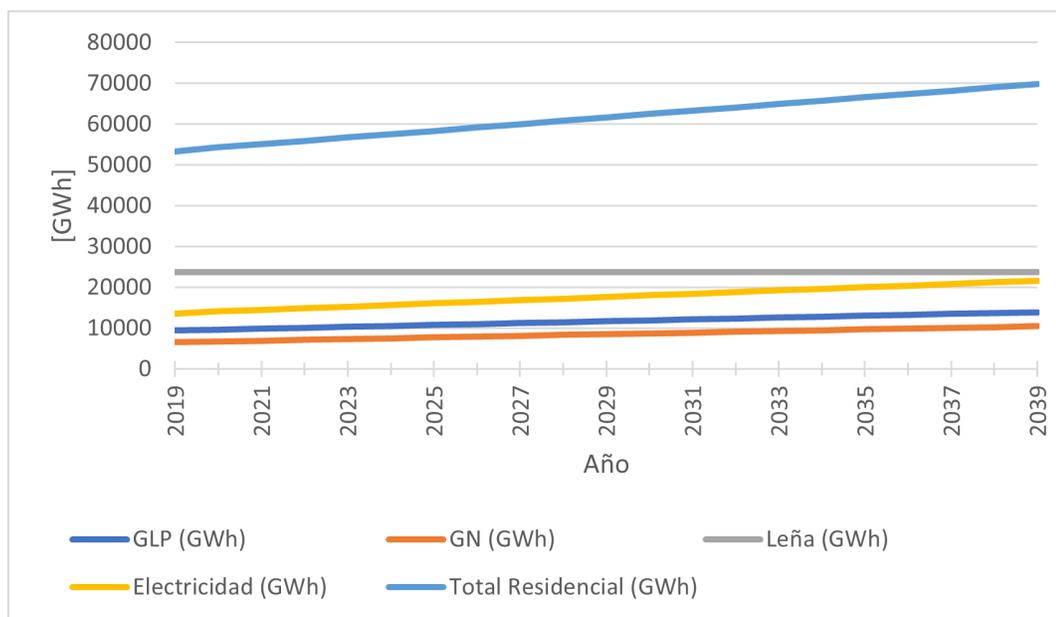


Figura 5.1: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares chilenos

En la Figura 5.2 se observa la proyección de la demanda de calor en los hogares de Chile, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso de calefacción aumentará en 993 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 3.8 % en un periodo de 20 años.

Con respecto al uso calor en el agua caliente sanitaria, su uso disminuirá en 993 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un descenso del 9.1 % en un periodo de 20 años. El uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en 3051 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 98 % en un periodo de 20 años.

Es importante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del calor. Se puede observar que la demanda de calor aumentará en 4810 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 11.9% en un periodo de 20 años.

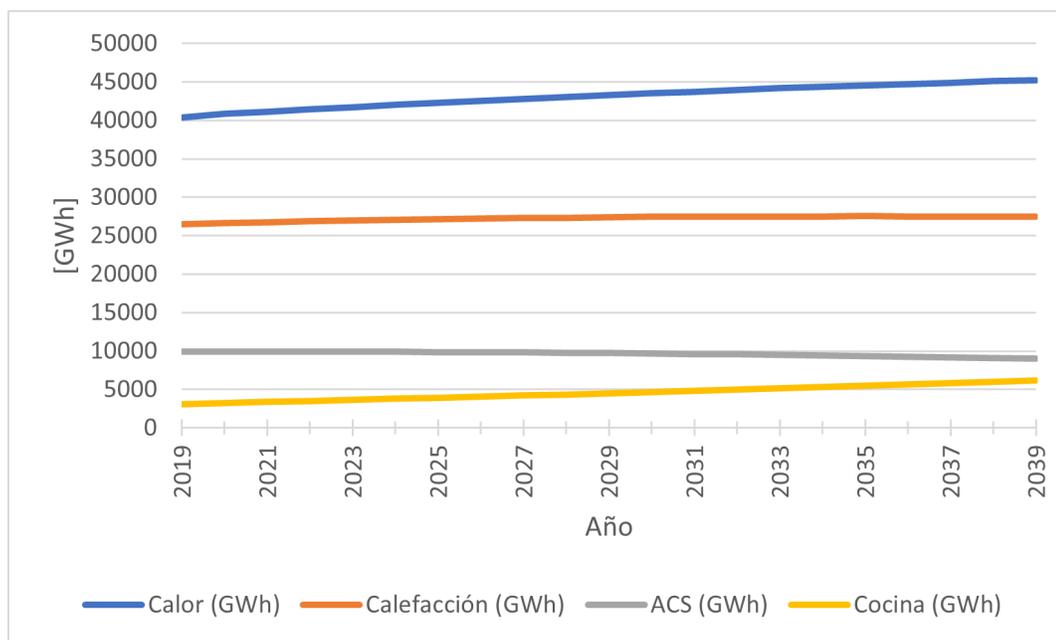


Figura 5.2: Proyección de la demanda de calor en Chile

En la Figura 5.3 se observa la proyección de la demanda eléctrica de calor en los hogares de Chile, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso eléctrico de la calefacción aumentará en 348 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 3.8% en un periodo de 20 años.

Con respecto al uso eléctrico del calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 231 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 62% en un periodo de 20 años. Por último, el uso eléctrico del calor en la cocción de alimentos aumentará en 580 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 59% en un periodo de 20 años.

Es relevante notar que la curva de color azul de la figura representa la suma de la curva eléctrica de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del eléctricos del calor que no se encuentran explícitos. Se puede observar que la demanda eléctrica de calor aumentará en 1903 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 59% en un periodo de 20 años.

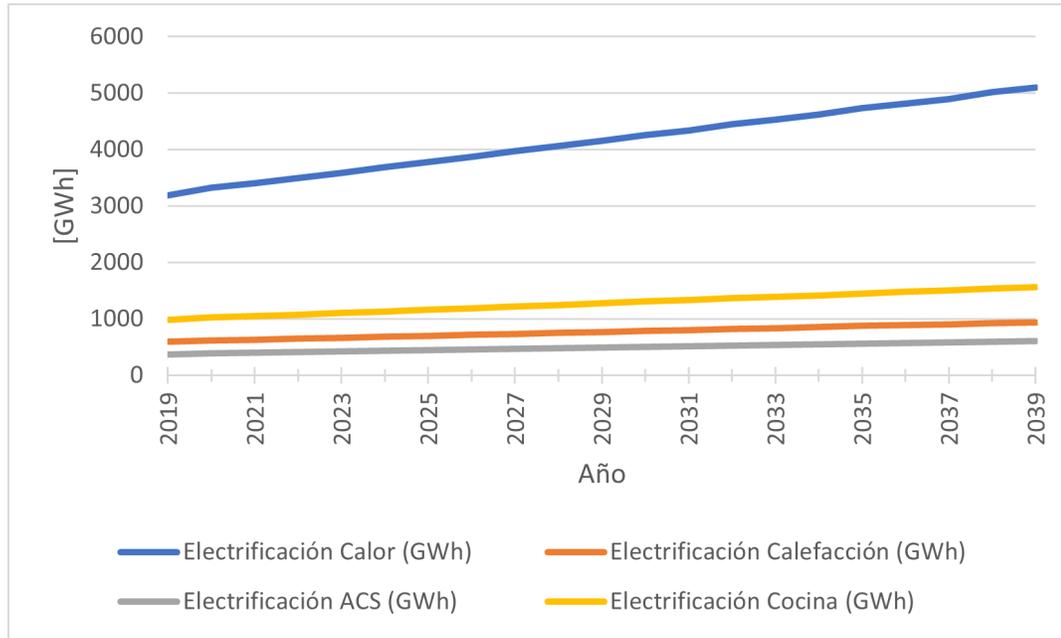


Figura 5.3: Proyección de la demanda eléctrica de calor en Chile

En la Tabla 5.1 se resumen las principales características de los gráficos descritos en la sección, donde min, max, \bar{x} , $X_{2039} - X_{2019}$, Δ y tasa anual son el valor mínimo, máximo, promedio, la diferencia entre el valor del año 2039 y 2019, la diferencia porcentual entre el 2019 y 2039 y la tasa anual de crecimiento o decrecimiento. Todos los valores se encuentran en [GWh] a excepción de Δ y tasa anual.

Tabla 5.1: Indicadores de los resultados a nivel nacional

Insumo	Min	Max	\bar{x}	$X_{2039} - X_{2019}$	Δ (%)	Tasa anual (%)
GLP	9449	13923	11695	4473	47.34	2.36
GN	6549	10468	8513	3918	59.82	2.99
Leña	23767	23767	23767	0	0	0
Y_t	13565	21651	17654	8085	59.60	2.98
Total	53331	69810	61631	16478	30.89	1.54
Q_t	40396	45207	43132	4810	11.9	0.59
Calefacción	26454	27550	27247	993	3.75	0.18
ACS	9026	9957	9636	-903	-9.10	-0.45
Cocina	3108	6159	4560	3051	98.16	4.90
$Y(Q_t)$	3193	5096	4156	1903	59.61	2.98
Y_t Calefacción	591	940	767	348	59.02	2.95
Y_t ACS	371	603	488	231	62.50	3.12
Y_t Cocina	981	1561	1275	580	59.16	2.95

Los resultados se pueden observar con detalle en las Tablas A.1, B.1 y C.1 del anexo.

5.2. Norte Grande

En esta sección se presentan las proyecciones de los insumos energéticos residenciales, la proyección de la demanda de calor y la electrificación del calor residencial para la zona del norte grande.

En la Figura 5.4 se observa la proyección de los principales insumos energéticos utilizados por los hogares del norte grande, estos son el gas licuado de petróleo, el gas natural, la leña y la electricidad, las proyecciones se presentan con una distribución anual y se considera como horizonte el año 2039.

De la Gráfica 5.4 se observa que el uso de todos los insumos, a excepción de la electricidad, se mantendrán constante en el tiempo, si se desglosa esta información, se puede ver que el uso de gas licuado de petróleo aumentará en 46 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 9.9 % en un periodo de 24 años.

Con respecto al gas natural, su uso aumentará en 0.03 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 0.3 % en un periodo de 24 años; el uso de leña aumentará en 0.92 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 1.5 % en un periodo de 24 años. Estas variaciones son menores con respecto al eje de las ordenadas y es por esto que el comportamiento de estos combustibles pareciera ser constante en el tiempo.

La demanda eléctrica aumentará en 638 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 77 % en un periodo de 24 años. Para representar el consumo energético total de los hogares del norte grande se sumaron todos los combustibles. Se puede ver que la demanda energética total de los hogares del norte grande aumentará en 686 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 50 % en un periodo de 24 años.

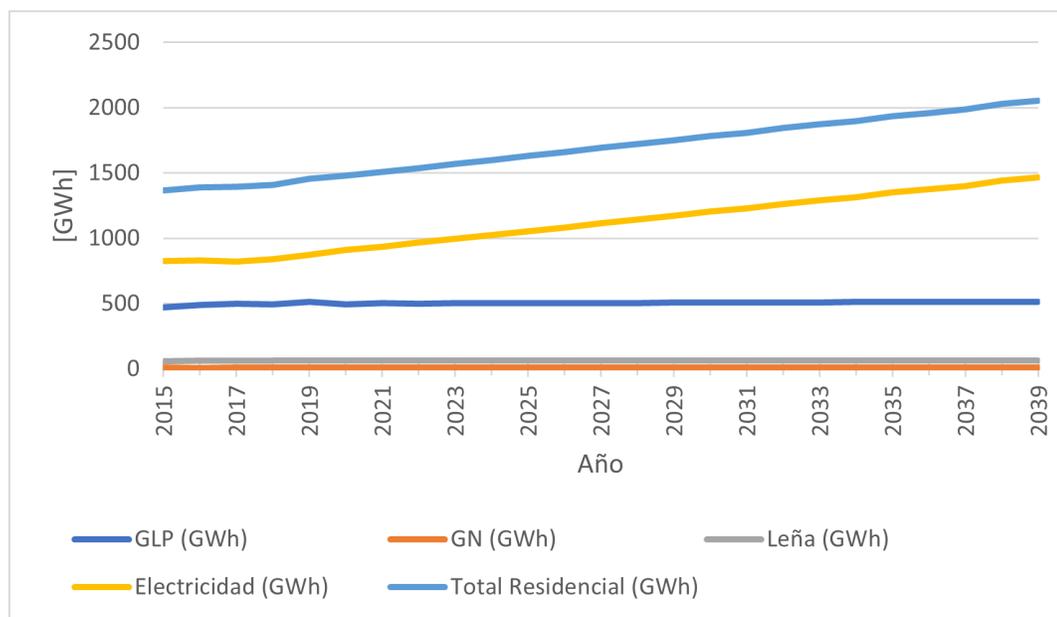


Figura 5.4: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte grande

En la Figura 5.5 se observa la proyección de la demanda de calor en los hogares del norte grande, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso de calefacción disminuirá en 108 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un descenso del 54 % en un periodo de 24 años.

Con respecto al uso calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 57 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 16 % en un periodo de 24 años. Por último, el uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en 108 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 104 % en un periodo de 24 años.

Es importante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del calor. Se puede observar que la demanda de calor aumentará en 156 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 18 % en un periodo de 24 años.

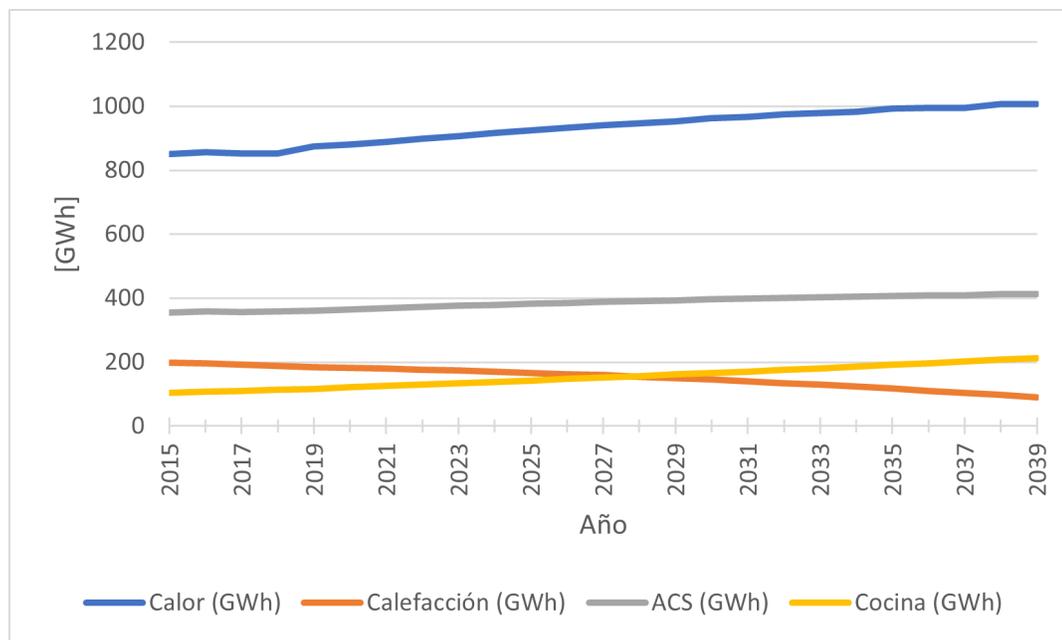


Figura 5.5: Proyección de la demanda de calor en el norte grande

En la Figura 5.6 se observa la proyección de la demanda eléctrica de calor en los hogares del norte grande, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso eléctrico de la calefacción aumentará en 22.9 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 77 % en un periodo de 24 años.

Con respecto al uso eléctrico del calor en el agua caliente sanitaria, no existe información de este ítem para la zona del norte grande, es por esto que los valores se dejan como nulo en la gráfica. El uso eléctrico del calor en la cocción de alimentos aumentará en 66 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 77 % en un periodo de 24 años.

Es relevante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos eléctricos

del calor. Se puede observar que la demanda eléctrica de calor aumentará en 168 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 77% en un periodo de 24 años.

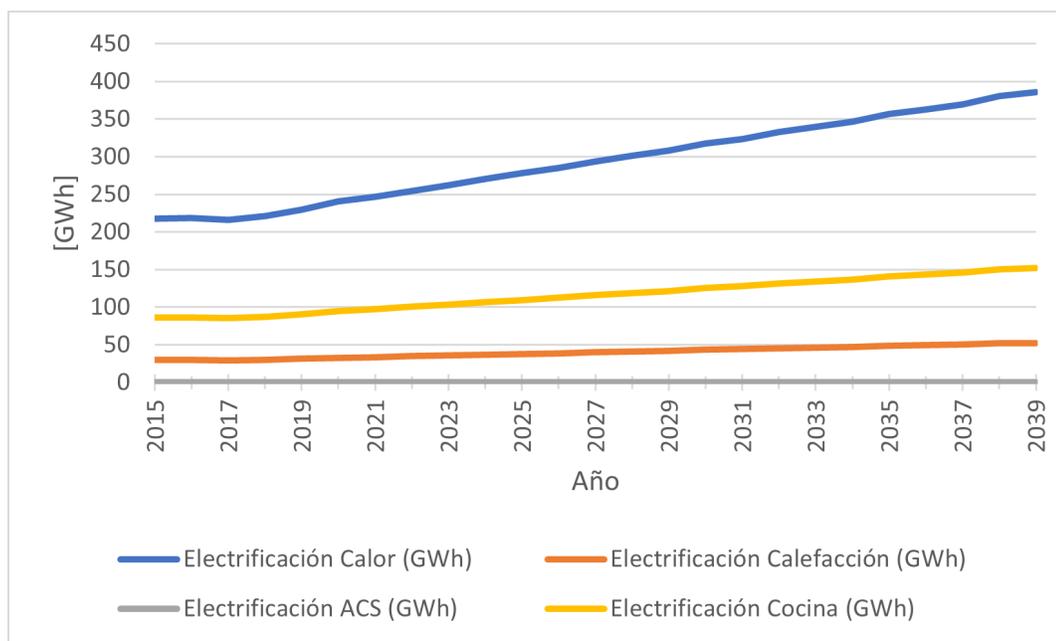


Figura 5.6: Proyección de la demanda eléctrica de calor en el norte grande

En la Tabla 5.2 se resumen las principales características de los gráficos descritos en la sección, donde min, max, \bar{x} , $X_{2039} - X_{2015}$, Δ y tasa anual son el valor mínimo, máximo, promedio, la diferencia entre el valor del año 2039 y 2015, la diferencia porcentual entre el 2015 y 2039 y la tasa anual de crecimiento o decrecimiento. Todos los valores se encuentran en [GWh] a excepción de Δ y tasa anual.

Tabla 5.2: Indicadores de los resultados en el norte grande

Indicadores	Min	Max	\bar{X}	$X_{2039} - X_{2015}$	Δ (%)	Tasa anual (%)
GLP	468	514	503	46	9.91	0.41
GN	7.79	9.65	8.38	0.03	0.300	0.012
Leña	62	63	63	0.92	1.47	0.06
Y_t	819	1464	1116	638	77.38	3.2
Total	1365	2051	1692	686	50.25	2.09
Q_t	849	1006	933	156	18.42	0.76
Calefacción	90	198	153	-108	-54.44	-2.26
ACS	355	412	386	57	16.19	0.67
Cocina	103	212	153	108	104.56	4.35
$Y(Q_t)$	216	386	294	168	77.38	3.22
Y_t Calefacción	29	52	40	22	77.38	3.22
Y_t ACS	0	0	0	0	N/A	N/A
Y_t Cocina	85	152	116	66	77.38	3.22

Los resultados se pueden observar con detalle en las Tablas A.2, B.2 y C.2 del anexo.

5.3. Norte Chico

En esta sección se presentan las proyecciones de los insumos energéticos residenciales, la proyección de la demanda de calor y la electrificación del calor residencial para la zona del norte chico.

En la Figura 5.7 se observa la proyección de los principales insumos energéticos utilizados por los hogares del norte chico, el gas licuado de petróleo, gas natural, leña y electricidad, las proyecciones se presentan con una distribución anual y se considera como horizonte el año 2039.

De la Gráfica 5.7 se observa que el uso de todos los insumos, a excepción de la leña, aumentarán su demanda, si se desglosa esta información, se puede ver que el uso de gas licuado de petróleo aumentará en 243 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 45 % en un periodo de 22 años; el uso de leña se mantendrá constante en 42.6 [GWh].

Con respecto al gas natural, su uso aumentará en 6.4 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 449 % en un periodo de 22 años. La demanda eléctrica del norte chico aumentará en 324 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 48 % en un periodo de 22 años.

Para representar el consumo energético total de los hogares del norte chico se sumaron todos los combustibles. Se puede ver que la demanda energética total de los hogares aumentará en 575 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 30 % en un periodo de 22 años.

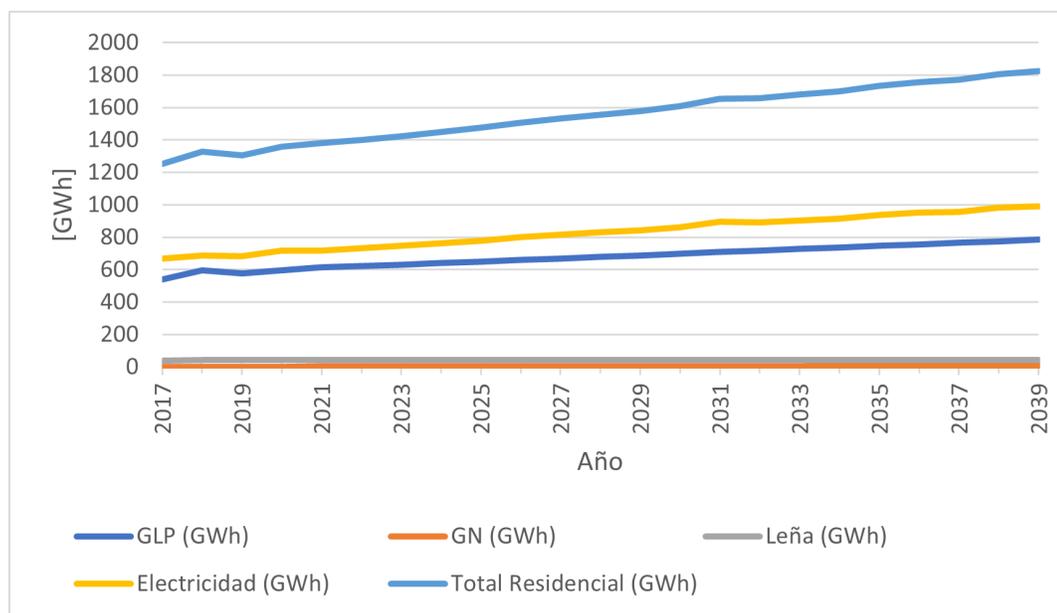


Figura 5.7: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte chico

En la Figura 5.8 se observa la proyección de la demanda de calor en los hogares del norte chico, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso de calefacción disminuirá en 109 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un descenso del 3.8 % en un periodo de 22 años.

Con respecto al uso calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 66 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 16 % en un periodo de 22 años. Por último, el uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en 115 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 96 % en un periodo de 22 años.

Es importante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del calor. Se puede observar que la demanda de calor aumentará en 130 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 17 % en un periodo de 22 años.

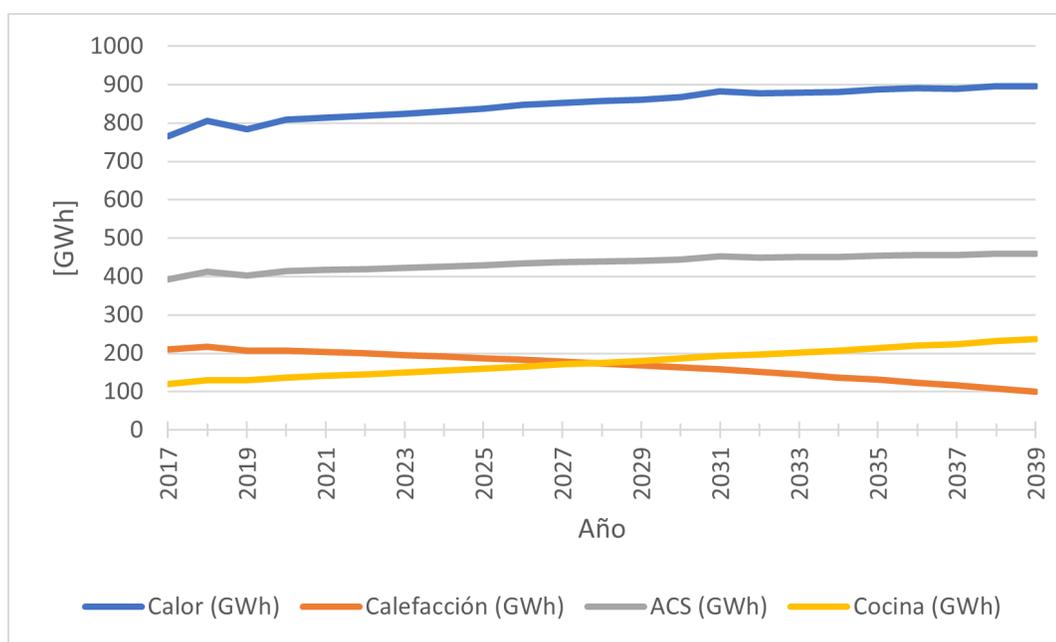


Figura 5.8: Proyección de la demanda de calor en el norte chico

En la Figura 5.9 se observa la proyección de la demanda eléctrica de calor en los hogares del norte chico, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso eléctrico de la calefacción aumentará en 11 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento de un 48 % en un periodo de 22 años.

Con respecto al uso eléctrico del calor en el agua caliente sanitaria, no existe información de este ítem en la zona del norte chico, es por esto que se deja como nulo en la gráfica. El uso eléctrico del calor en la cocción de alimentos aumentará en 33 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 48 % en un periodo de 22 años.

Es relevante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos eléctricos

del calor. Se puede observar que la demanda eléctrica de calor aumentará en 85 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 48 % en un periodo de 22 años.

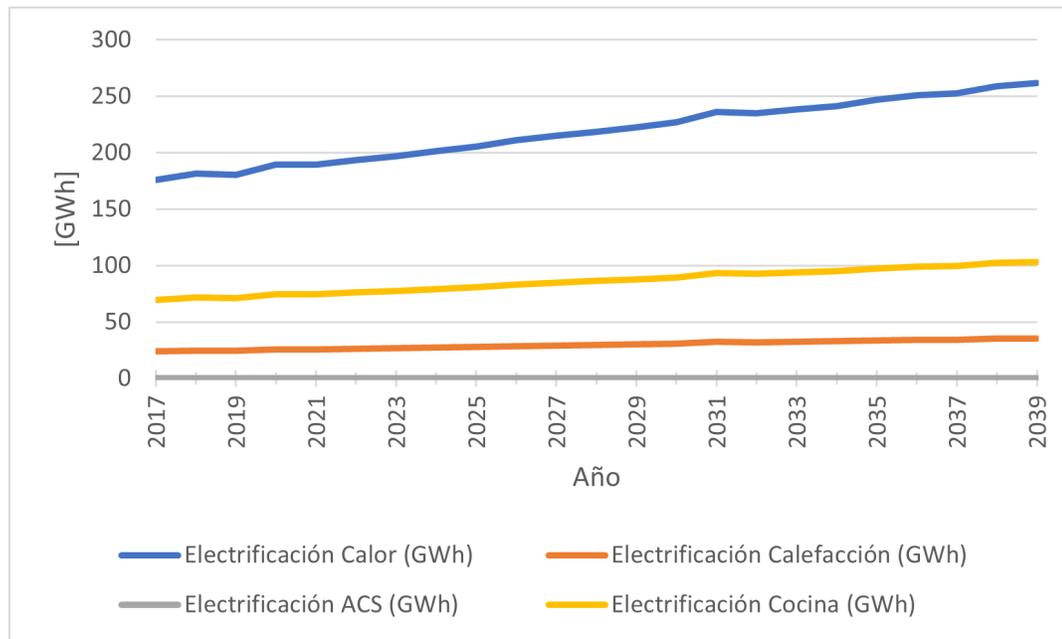


Figura 5.9: Proyección de la demanda eléctrica del calor en el norte chico

En la Tabla 5.3 se resumen las principales características de los gráficos descritos en la sección, donde min, max, \bar{x} , $X_{2039} - X_{2017}$, Δ y tasa anual son el valor mínimo, máximo, promedio, la diferencia entre el valor del año 2039 y 2017, la diferencia porcentual entre el 2017 y 2039 y la tasa anual de crecimiento o decrecimiento. Todos los valores se encuentran en [GWh] a excepción de Δ y tasa anual.

Tabla 5.3: Indicadores de los resultados en el norte chico

Indicadores	Min	Max	\bar{x}	$X_{2039}-X_{2017}$	Δ (%)	Tasa anual (%)
GLP	540	784	677	243	45.14	2.05
GN	1.42	7.83	4.69	6.40	449.53	20.43
Leña	42	42	42	0.23	0.55	0.02
Y_t	666	991	828	324	48.69	2.21
Total	1250	1825	1553	575	45.98	2.09
Q_t	764	896	850	130	17.12	0.77
Calefacción	100	216	167	-109	-52.24	-2.37
ACS	392	459	435	66	16.87	0.76
Cocina	120	236	177	115	95.82	4.35
$Y(Q_t)$	175	261	218	85	48.69	2.21
Y_t Calefacción	23	35	29	11	48.69	2.21
Y_t ACS	0	0	0	0	N/A	N/A
Y_t Cocina	69	103	86	33	48.69	2.21

Los resultados se pueden observar con detalle en las Tablas A.3, B.3 y C.3 del anexo.

5.4. Zona Centro

En esta sección se presentan las proyecciones de los insumos energéticos residenciales, la proyección de la demanda de calor y la electrificación del calor residencial para la zona central del país.

En la Figura 5.10 se observa la proyección de los principales insumos energéticos utilizados por los hogares de la zona central, el gas licuado de petróleo, gas natural, leña y electricidad, las proyecciones se presentan con una distribución anual y se considera como horizonte el año 2039.

De la Gráfica 5.10 se observa que el uso de todos los insumos, a excepción de la leña, aumentarán su demanda, si se desglosa esta información, se puede ver que el uso de gas licuado de petróleo aumentará en 1846 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 37 % en un periodo de 28 años; el uso de leña se mantendrá constante en 2557 [GWh].

Con respecto al gas natural su uso aumentará en 3062 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 104 % en un periodo de 28 años. La demanda eléctrica de la zona central aumentará en 5594 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 88 % en un periodo de 28 años.

Para representar el consumo energético total de los hogares de la zona central se sumaron todos los combustibles. Se puede ver que la demanda energética de los hogares en Chile aumentará en 10617 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 64 % en un periodo de 28 años.

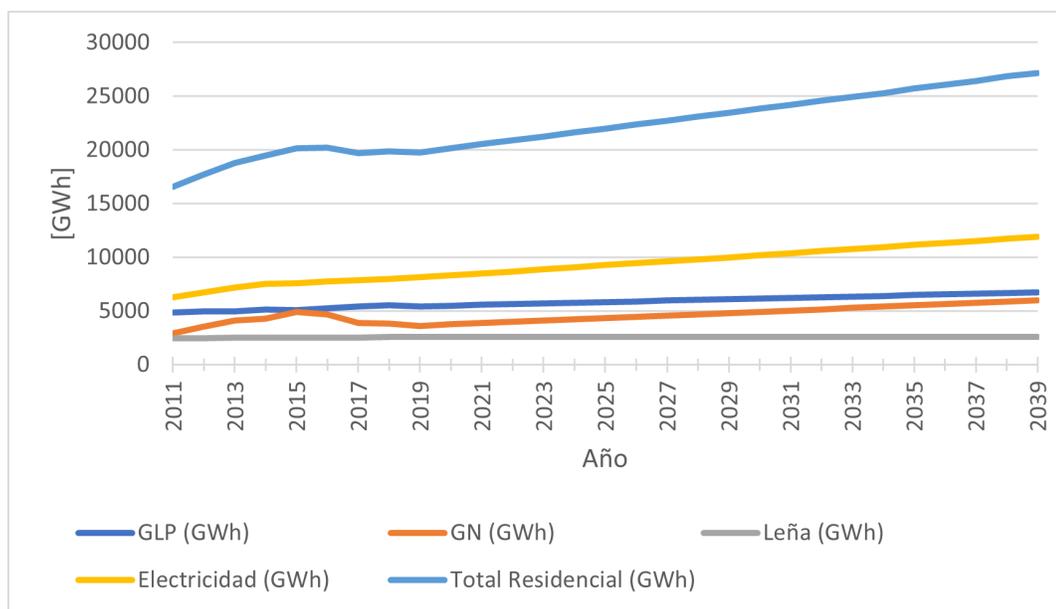


Figura 5.10: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona centro

En la Figura 5.11 se observa la proyección de la demanda de calor en los hogares de la zona centro, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso de calefacción aumentará en 1041 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 13% en un periodo de 28 años.

Con respecto al uso calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 483 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 12% en un periodo de 28 años. Por último, el uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en 1739 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 186% en un periodo de 28 años.

Es importante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del calor. Se puede observar que la demanda de calor aumentará en 4213 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 32% en un periodo de 28 años.

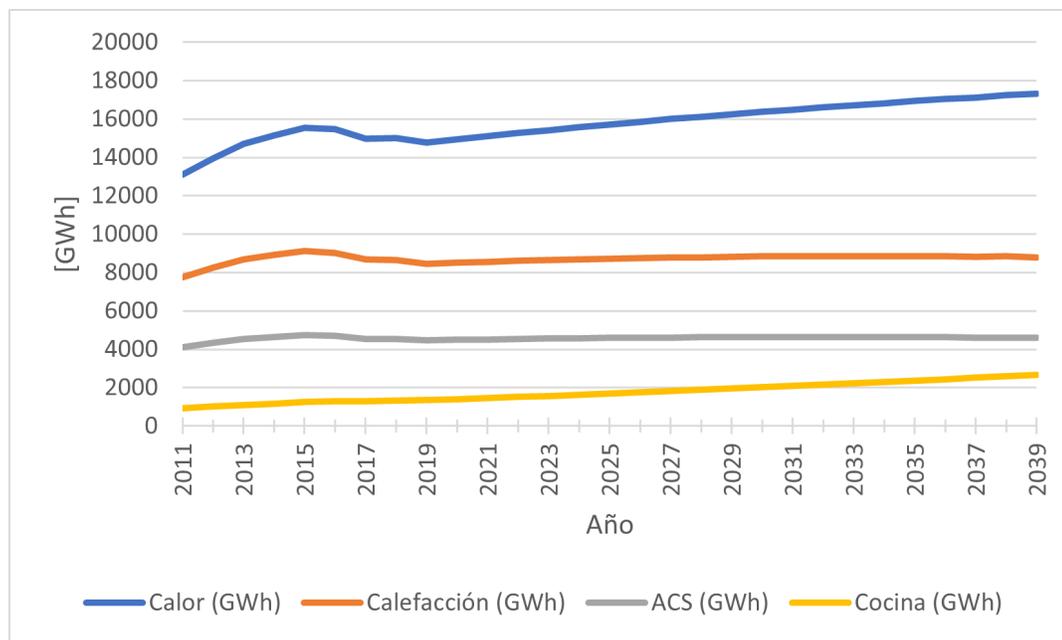


Figura 5.11: Proyección de la demanda de calor en la zona centro

En la Figura 5.12 se observa la proyección de la demanda eléctrica de calor en los hogares de la zona central, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso eléctrico de la calefacción aumentará en 256 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 89% en un periodo de 28 años.

Con respecto al uso eléctrico del calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 159 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 92% en un periodo de 28 años. Por último, el uso eléctrico del calor en la cocción de alimentos aumentará en 383 [GWh], lo que representa un aumento del 87% en un periodo de 28 años.

Es relevante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del

eléctricos del calor. Se puede observar que la demanda eléctrica de calor aumentará en 1290 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 88 % en un periodo de 28 años.

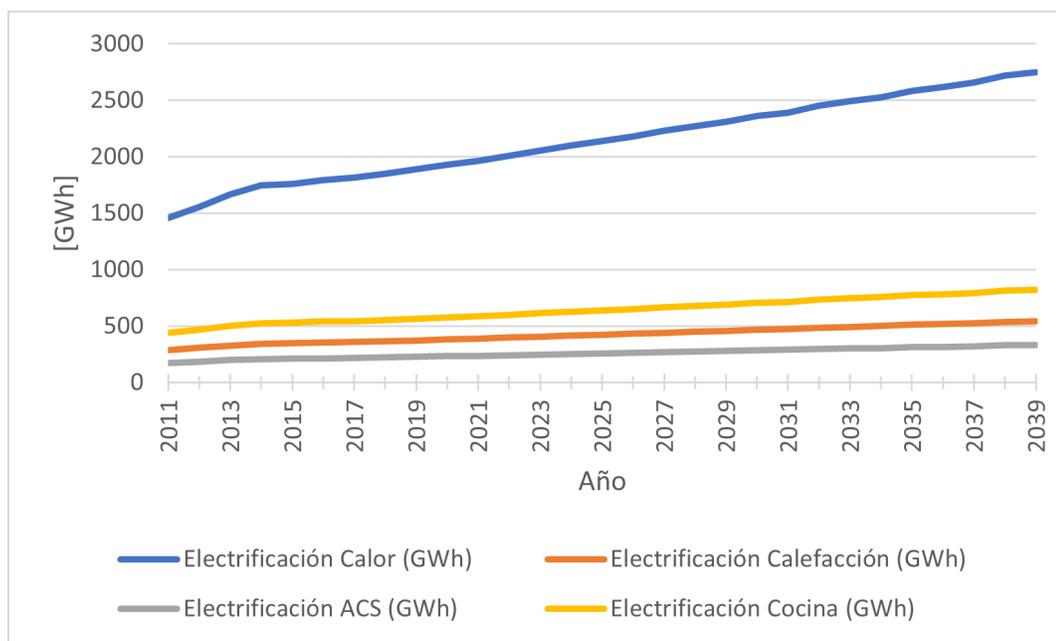


Figura 5.12: Proyección de la demanda eléctrica de calor en la zona centro

En la Tabla 5.4 se resumen las principales características de los gráficos descritos en la sección, donde min, max, \bar{x} , $X_{2039} - X_{2011}$, Δ y tasa anual son el valor mínimo, máximo, promedio, la diferencia entre el valor del año 2039 y 2011, la diferencia porcentual entre el 2011 y 2039 y la tasa anual de crecimiento o decrecimiento. Todos los valores se encuentran en [GWh] a excepción de Δ y tasa anual.

Tabla 5.4: Indicadores de los resultados en la zona centro

Indicadores	Min	Max	\bar{x}	$X_{2039} - X_{2011}$	Δ (%)	Tasa anual (%)
GLP	4882	6728	5832	1846	37.82	1.35
GN	2918	5980	4588	3062	104.91	3.74
Leña	2442	2557	2542	114	4.67	0.16
Y_t	6300	11895	9281	5594	88.78	3.17
Total	16544	27162	22245	10617	64.17	2.29
Q_t	13099	17313	15777	4213	32.16	1.14
Calefacción	7758	9110	8717	1041	13.42	0.47
ACS	4113	4749	4576	483	11.76	0.42
Cocina	930	2669	1751	1739	186.89	6.67
$Y(Q_t)$	1460	2751	2147	1290	88	3.15
Y_t Calefacción	287	544	424	256	89.40	3.19
Y_t ACS	173	332	258	159	91.73	3.27
Y_t Cocina	438	822	642	383	87.33	3.11

Los resultados se pueden observar con detalle en las Tablas A.4, B.4 y C.4 del anexo.

5.5. Zona Centro-Sur

En esta sección se presentan las proyecciones de los insumos energéticos residenciales, la proyecciones de la demanda de calor y la electrificación del calor residencial para la zona centro-sur del país.

En la Figura 5.13 se observa la proyección de los principales insumos energéticos utilizados por los hogares de la zona centro-sur, el gas licuado de petróleo, gas natural, leña y electricidad, las proyecciones se presentan con una distribución anual y se considera como horizonte el año 2039.

De la Gráfica 5.13 se observa que el uso de todos los insumos, a excepción de la leña y el gas natural, aumentarán su demanda, si se desglosa esta información, se puede ver que el uso de gas licuado de petróleo aumentará en 2276 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 99 % en un periodo de 20 años.

Con respecto al consumo de gas natural, su uso disminuirá en 23.5 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un descenso del 11.5 % en un periodo de 20 años. La demanda eléctrica aumentará en 2622 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 89 % en un periodo de 20 años; el uso de la leña se mantendrá constante en 10369 [GWh].

Para representar el consumo energético total de los hogares de la zona centro-sur se sumaron todos los combustibles. Se puede ver que la demanda energética de los hogares de la zona centro-sur aumentará en 4875 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 30 % en un periodo de 20 años.

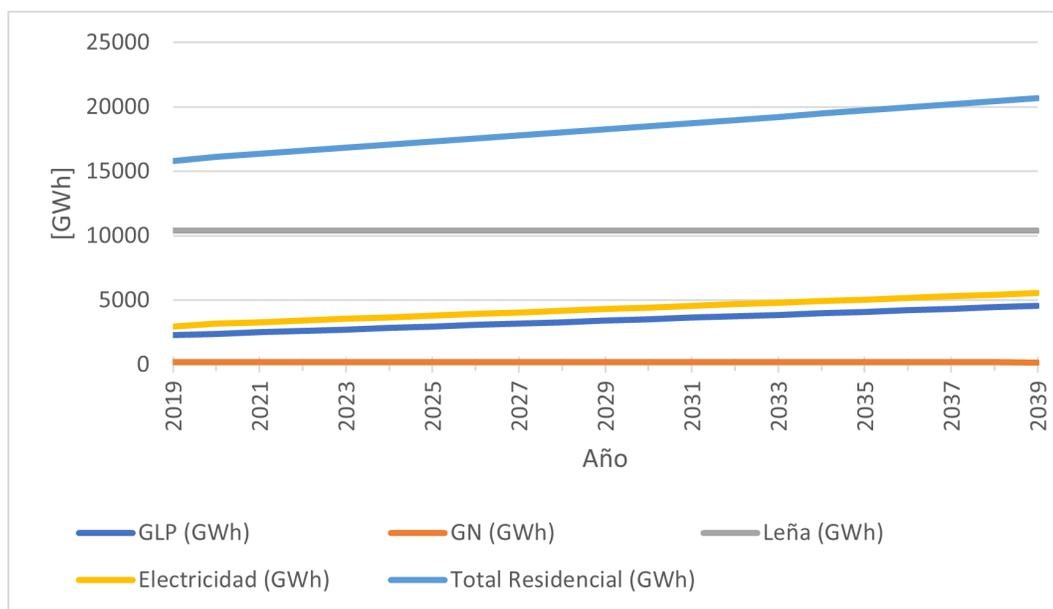


Figura 5.13: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona centro-sur

En la Figura 5.14 se observa la proyección de la demanda de calor en los hogares de la zona centro-sur, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso de calefacción aumentará en 243 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 3.2 % en un periodo de 20 años.

El uso de calor en el agua caliente sanitaria disminuirá en 160 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un descenso del 4.9 % en un periodo de 20 años. El uso de calor en la cocina aumentará en 919 [GWh], lo que indica un aumento del 95 % en un periodo de 20 años.

Es importante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del calor. Se puede observar que la demanda de calor aumentará en 1529 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 12.4 % en un periodo de 20 años.

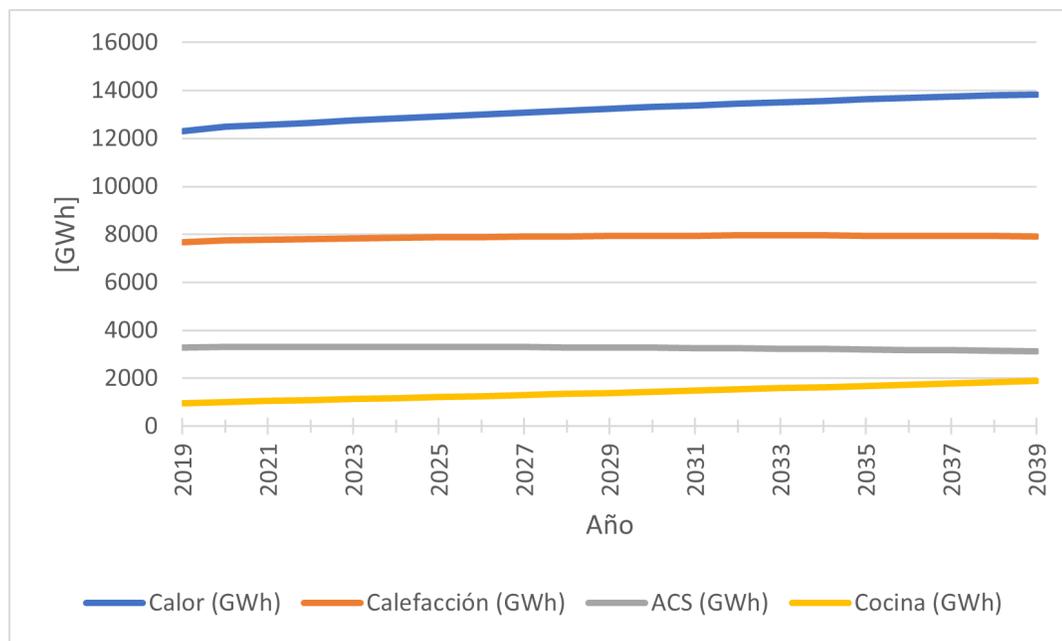


Figura 5.14: Proyección de la demanda de calor en la zona centro-sur

En la Figura 5.15 se observa la proyección de la demanda eléctrica de calor en los hogares de la zona centro-sur, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso eléctrico de la calefacción aumentará en 125 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 89 % en un periodo de 20 años.

Con respecto al uso eléctrico del calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 88 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 89 % en un periodo de 20 años. El uso eléctrico del calor en la cocción de alimentos aumentará en 163 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 89 % en un periodo de 20 años.

Es relevante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del eléctricos del calor. Se puede observar que la demanda eléctrica de calor aumentará en 589

[GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 89% en un periodo de 20 años.

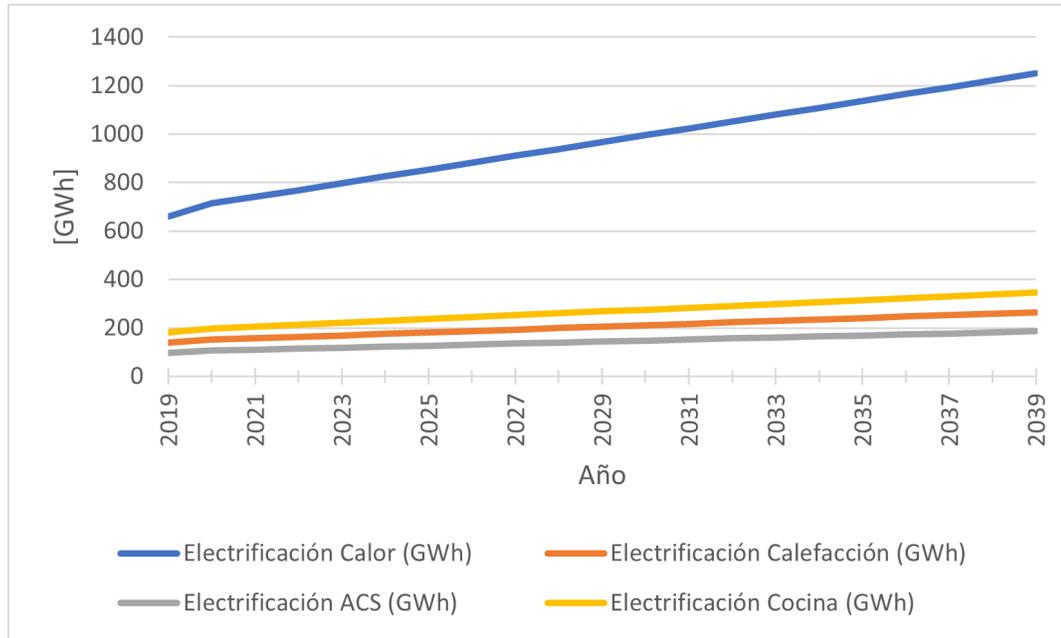


Figura 5.15: Proyección de la demanda eléctrica de calor en la zona centro-sur

En la Tabla 5.5 se resumen las principales características de los gráficos descritos en la sección, donde min, max, \bar{x} , $X_{2039} - X_{2019}$, Δ y tasa anual son el valor mínimo, máximo, promedio, la diferencia entre el valor del año 2039 y 2019, la diferencia porcentual entre el 2019 y 2039 y la tasa anual de crecimiento o decrecimiento. Todos los valores se encuentran en [GWh] a excepción de Δ y tasa anual.

Tabla 5.5: Indicadores de los resultados en la zona centro-sur

Indicadores	Min	Max	\bar{x}	$X_{2039} - X_{2019}$	Δ (%)	Tasa anual (%)
GLP	2279	4555	3413	2276	99.86	4.99
GN	180	203	188	-23.50	-11.53	-0.57
Leña	10369	10369	10369	0	0	0
Y_t	2935	5558	4295	2622	89.33	4.46
Total	15788	20663	18266	4875	30.87	1.54
Q_t	12306	13836	13187	1529	12.42	0.62
Calefacción	7670	7957	7890	243	3.17	0.15
ACS	3125	3312	3257	-160	-4.89	-0.24
Cocina	970	1889	1410	918	94.62	4.73
$Y(Q_t)$	660	1250	966	589	89.33	4.46
Y_t Calefacción	139	264	204	124	89.33	4.46
Y_t ACS	98	185	143	87	89.33	4.46
Y_t Cocina	182	346	267	163	89.33	4.46

Los resultados se pueden observar con detalle en las Tablas A.5, B.5 y C.5 del anexo.

5.6. Zona Sur

En esta sección se presentan las proyecciones de los insumos energéticos residenciales, la proyección de la demanda de calor y la electrificación del calor residencial para la zona sur del país.

En la Figura 5.16 se observa la proyección de los principales insumos energéticos utilizados por los hogares de la zona sur, el gas licuado de petróleo, gas natural, leña y electricidad para el año 2039, las proyecciones se presentan con una distribución anual y se considera como horizonte el año 2039.

De la Gráfica 5.16 se observa que el uso de todos los insumos, a excepción de la leña, aumentarán su demanda, si se desglosa esta información, se puede ver que el uso de gas licuado de petróleo aumentará en 888 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 196 % en un periodo de 28 años.

Con respecto al gas natural, su uso aumentará en 2299 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 115 % en un periodo de 28 años. La demanda eléctrica aumentará en 1100 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 171 % en un periodo de 28 años; el uso de la leña se mantendrá constante en 10734 [GWh].

Para representar el consumo energético total de los hogares de la zona sur se sumaron todos los combustibles. Se puede ver que la demanda energética de los hogares de la zona sur aumentará en 4768 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento de un 35 % en un periodo de 28 años.

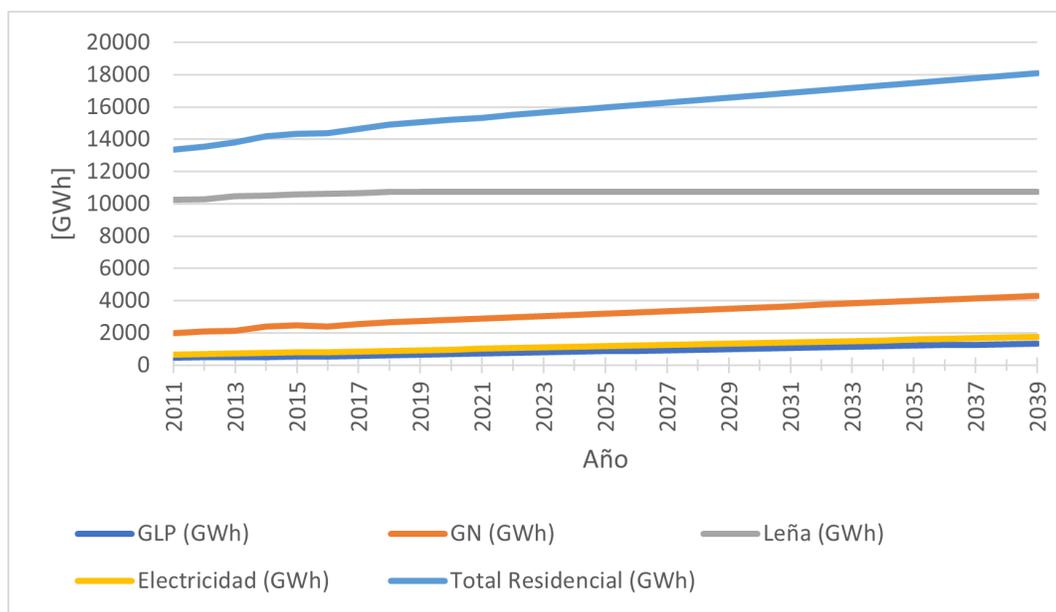


Figura 5.16: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona sur

En la Figura 5.17 se observa la proyección de la demanda de calor en los hogares de la zona sur, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso de calefacción aumentará en 1239 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 11.9% en un periodo de 28 años.

Con respecto al uso calor en el agua caliente sanitaria, su uso disminuirá en 818 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un descenso del 44% en un periodo de 28 años. El uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en 852 [GWh], lo que representa un aumento del 286% en un periodo de 28 años.

Es importante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del calor. Se puede observar que la demanda de calor aumentará en 1778 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 14% en un periodo de 28 años.

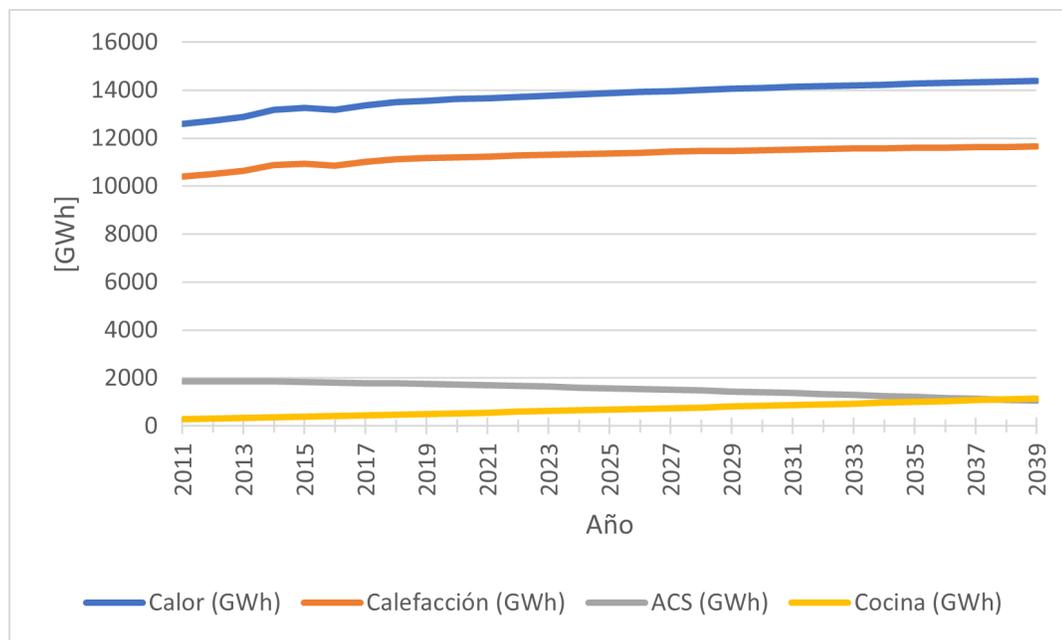


Figura 5.17: Proyección de la demanda de calor en la zona sur

En la Figura 5.18 se observa la proyección de la demanda eléctrica de calor en los hogares de la zona sur, donde se incluye el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y la cocción de alimentos. Se puede ver que el uso eléctrico de la calefacción aumentará en 28 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 179% en un periodo de 28 años.

Con respecto al uso eléctrico del calor en el agua caliente sanitaria, su uso aumentará en 53 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 169% en un periodo de 28 años. El uso eléctrico del calor en la cocción de alimentos aumentará en 86 [GWh] para fines del año 2039, lo que representa un aumento del 170% en un periodo de 28 años.

Es relevante notar que la curva azul representa la suma de la curva de calefacción, agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y una cuarta curva que representa otros usos del

eléctricos del calor. Se puede observar que la demanda eléctrica de calor aumentará en 283 [GWh] para fines del año 2039, lo que indica un aumento del 170 % en un periodo de 28 años.

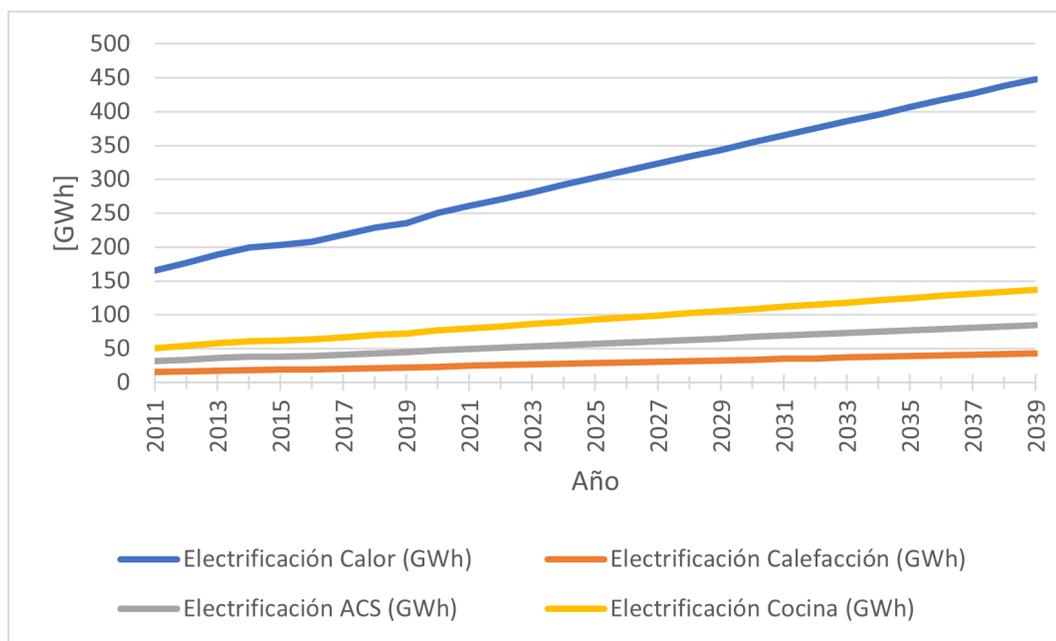


Figura 5.18: Proyección de la demanda eléctrica de calor en la zona sur

En la Tabla 5.6 se resumen las principales características de los gráficos descritos en la sección, donde min, max, \bar{x} , $X_{2039} - X_{2011}$, Δ y tasa anual son el valor mínimo, máximo, promedio, la diferencia entre el valor del año 2039 y 2011, la diferencia porcentual entre el 2011 y 2039 y la tasa anual de crecimiento o decrecimiento. Todos los valores se encuentran en [GWh] a excepción de Δ y tasa anual.

Tabla 5.6: Indicadores de los resultados en la zona sur

Indicadores	Min	Max	\bar{x}	$X_{2039} - X_{2011}$	Δ (%)	Tasa anual (%)
GLP	451	1340	866	888	196.55	7.01
GN	1991	4291	3181	2299	115.50	4.12
Leña	10254	10734	10674	479	4.67	0.16
Y_t	641	1741	1178	1100	171.66	6.13
Total	13338	18107	15901	4768	35.75	1.27
Q_t	12597	14375	13765	1777	14.11	0.50
Calefacción	10407	11646	11273	1239	11.90	0.42
ACS	1051	1869	1538	-818	-43.78	-1.56
Cocina	297	1149	697	852	286.44	10.23
$Y(Q_t)$	165	448	303	282	170.72	6.09
Y_t Calefacción	15	42.87	28.73	27.50	178.93	6.39
Y_t ACS	31.42	84	57	53	169.32	6.04
Y_t Cocina	50.83	137	93	86	170.09	6.07

Los resultados se pueden observar con detalle en las Tablas A.6, B.6 y C.6 del anexo.

Capítulo 6

Análisis de los Resultados

6.1. Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede afirmar que la demanda de los combustibles residenciales, a excepción del uso de leña, aumentarán para fines del año 2039; las razones son múltiples. Por ejemplo: la demanda de los combustibles residenciales está correlacionada positivamente con la población y los ingresos de los hogares, también una mayor penetración de tecnologías de generación distribuida y vehículos eléctricos aumentará la demanda de energía.

En la Tabla 4.7 se puede ver que la correlación entre las cuatro variables mencionadas anteriormente y la demanda eléctrica residencial es fuerte, y como se sabe que en el futuro estas cuatro variables crecerán (ver Figuras 4.5(a) y 4.5(b), 4.6(b), 4.7(a)), es natural que la demanda eléctrica también crezca.

Es importante mencionar que los coeficientes de correlación no se calcularon para el gas licuado ni el gas natural. Sin embargo, de los resultados obtenidos es altamente probable que los dos combustibles estén correlacionados por lo menos con las variables población e ingreso. La razón de esto es que un aumento en el número de habitantes implica un mayor número de consumidores y un aumento en el ingreso implica un uso más relajado de la energía.

Se espera que la demanda de leña se mantenga constante a lo largo de los años. Las razones están relacionadas con las prohibiciones impuestas por el gobierno para enfrentar los problemas ambientales derivados de su uso. Una interrogante derivada de este resultado es el porque el uso de leña no va a la baja; para ello no hay respuesta, sólo suposiciones.

Una de ellas es que debido a la baja regulación y fiscalización del mercado, los hogares seguirán utilizando la leña por ser más barata. Otra suposición es que las medidas restrictivas únicamente tendrán efecto en las ciudades, donde es posible la fiscalización, mientras que en las localidades donde exista pobreza energética la fiscalización sería menor. Esto estabilizaría consumo de leña en el tiempo.

De los resultados obtenidos se puede afirmar que la demanda de calor aumentará a lo largo del país. La razón principal se debe a que la demanda de calor está fuertemente relacionada con la demanda de los combustibles y esto es así porque el gas y leña se utilizan exclusivamente para calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos.

Es relevante notar que el uso de calor en calefacción y agua caliente sanitaria no aumentará en todas las regiones de Chile. Las razones están relacionadas con las políticas públicas implementadas, como el mejoramiento de la aislación residencial, el recambio de calefactores, la eficiencia energética y el ahorro de agua para enfrentar la crisis hídrica. El uso de calor en la cocina aumentará en todas las regiones y se debe principalmente a un aumento del número de electrodomésticos: hornos eléctricos, freidoras, tostadoras, cafeteras, hervidores, etc.

La electrificación del uso de calor residencial aumentará en todas las regiones y se debe al traspaso de la demanda de leña a la electricidad y los ahorros en las cuentas de luz producto de las instalaciones de generación distribuida. Se puede decir que en promedio un 33 % de la demanda eléctrica residencial se destina al uso de calor en la cocina y un 13 % se destina a calefacción. El uso de electricidad en el agua caliente sanitaria representa un 17 % del consumo eléctrico total sin considerar al norte grande y chico.

Los errores que pudiesen tener los resultados son complejos determinar debido a que las proyecciones dependen de múltiples factores, como la información disponible en la base de datos, el método utilizado y los supuestos considerados. Para minimizar los posibles errores se consultaron fuentes de información confiables y se utilizó un método de proyección robusto con supuestos razonables. Sin embargo, siempre existe algún tipo de error y únicamente se pudo estimar el error asociado al método de proyección.

El error porcentual medio absoluto de las proyecciones de los combustibles promedió un 2.1 % para la demanda eléctrica, un 4 % para la demanda de gas licuado de petróleo, un 7.3 % para demanda de gas natural y un 0.6 % para la demanda de leña. Es importante mencionar que también se estimó el error medio absoluto para la demanda de calor residencial y la electrificación del calor. La virtud de este error es que puede ser multiplicado por ponderadores, esto se puede ver en la Tabla E.1 del anexo.

6.2. Observaciones

Existe poca información de la electrificación del uso de calor residencial, por esta razón es difícil establecer un marco comparativo. Se dispone de los valores reales de la demanda eléctrica, gas licuado de petróleo y gas natural, sin embargo, la información con respecto al uso de leña es escasa. Únicamente se dispone de una base de datos que indica el consumo a nivel país, pero no se menciona que proporción corresponde a cada región, ni que tipo de madera se utiliza, ni su humedad. Estos factores pueden causar una gran variación en los resultados.

La proporción de leña que le corresponde a cada región se obtuvo de [64]. El poder calorífico de la leña se obtuvo promediando el poder calorífico de todas las especies de árboles utilizadas como madera, ver [65]. El dato que no se pudo obtener fue la humedad con la cual se consume la leña. Este es un valor de suma importancia porque puede generar grandes variaciones en las proyecciones de demanda. Para determinarlo se comparó mediante ensayo y error la demanda energética proyectada con la demanda energética real en el año 2018, que es de 50763 [GWh]; único valor real que se dispone.

En un inicio se consideró una humedad del 30 % y la demanda energética proyectada fue de aproximadamente 60.000 [GWh]. Este valor es un 20 % más grande que el valor mencionado en el párrafo anterior, por ello se realizaron nuevamente las proyecciones considerando esta vez una humedad del 40 %. Así se obtuvo un valor de 52.900 [GWh] para la demanda energética, lo cual es razonable porque la diferencia con el valor real es menor a un 5 %.

La observación que se desprende del resultado anterior es que la mayor parte de la leña consumida en Chile es húmeda, pues el umbral que separa lo seco de lo húmedo es del 30 %. Este resultado da cuenta de la informalidad y la baja fiscalización que existe en el mercado.

Una interrogante de interés es cuantificar la diferencia entre las proyecciones de la demanda eléctrica realizadas con variable externa y las proyecciones realizadas sin variable externa. Al comparar los errores de proyección de estas dos técnicas se pudo observar que el MAPE de las proyecciones ARIMA es de un 2.12 %, mientras que el MAPE de las proyecciones ARIMAX es de un 2.09 %. Se puede ver que la inclusión de las variables externas mejora las proyecciones de demanda y por ello se escogió la modelación con variable externa. En la Tabla F.1 se puede ver esta información con mayor detalle.

6.3. Gestión de la Demanda

El último objetivo de este trabajo es ver el rol de la electrificación del uso de calor residencial en la gestión de la demanda eléctrica. De los resultados obtenidos se puede decir que a nivel nacional la electrificación del uso de calor residencial representa aproximadamente un 23 % de la demanda eléctrica residencial. Si se observa la Tabla C.1 del anexo, se puede ver que en el año 2019 la demanda eléctrica de calor alcanzó un valor de 3193 [GWh] y se espera que para el año 2039 aumente en 1903 [GWh], lo que indica un crecimiento anual del 2.66 %.

Frente a un escenario de mayor penetración de las energías renovables, generación distribuida e incertidumbre, el gestionar la demanda es una herramienta útil para la operación de los sistemas eléctricos. De acuerdo con [70] se espera que la demanda eléctrica de clientes regulados aumente un 2.28 % para el 2039. Lo cual es similar al porcentaje en el cual crecerá la electrificación del calor residencial.

La electrificación del calor residencial corresponde a un 36.5 % del consumo de electricidad. Se incluye en los resultados el uso de electricidad en calefacción, agua caliente sanitaria y electrodomésticos en la cocina. A continuación se mostrarán dos subsecciones, en una de ellas se cuantificará el efecto de las medidas de eficiencia energética y en la otra se buscará discutir el rol del control directo de cargas eléctricas en la gestión de demanda.

6.3.1. Medidas de Eficiencia Energética

Esta medida puede tener un efecto indirecto en la gestión de demanda en el largo plazo porque los hogares pueden renovar y adquirir aquellos electrodomésticos que hagan un mejor uso de la energía. A modo de ejemplo: Se cuantificará el ahorro en electricidad que un hogar podría obtener al mejorar la aislación de su vivienda, renovar el calefactor eléctrico, el termo eléctrico, el microondas y el hervidor.

En la tabla 6.1 se observan dos tipos de electrodomésticos utilizados en la cocina, un microondas y un hervidor. Para cada uno de ellos se presenta un equipo de alta y baja eficiencia. La diferencia de potencia entre los microondas es de 750 [W] y la de los hervidores es de 1150 [W].

Esta es una comparación entre uno de los equipos más y menos eficientes que se pueden encontrar en el mercado chileno, considerando la fecha de elaboración del presente informe. Si se considera que la capacidad de los equipos no juega un rol y que el tiempo que permanece encendido es el mismo, entonces la potencia conjunta de estos electrodomésticos podría disminuir en 1900 [W] si se decide renovar estos equipos.

Para efectos de los cálculos, si se considera que un microondas se utiliza en promedio 15 minutos al día y un hervidor 10 minutos [71], entonces el ahorro anual de energía que percibiría un hogar al cambiar estos equipos es de 168 [kWh]. Si se extrapola esta información para el país y se considera que en Chile existen 6,499,455 viviendas [72], y de ellas un 10% de ellas renueva el microondas y el hervidor; el ahorro podría llegar a ser de 109 [GWh] al año. Comparar este dato con la información de la Tabla C.1.

Tabla 6.1: Recambio de electrodomésticos en una cocina

Electrodoméstico	Modelo	Potencia [W]	Capacidad [Lt]
Microondas	Galanz GLC0V317BKSM071	700	17
	Teka ML 822 BIS L	1450	22
Hervidor	Sindelen HA-4510RJ	1600	1.5
	Hervidor Funciones Cuisinart	2750	1.7

Con respecto al uso de calefactores eléctricos; no es claro cual es el efecto de renovarlos porque el equipo óptimo depende del espacio que se requiere calefaccionar. Lo que se puede decir es que en promedio un hogar los mantiene encendidos durante 5 horas al día [71] y que su penetración alcanza el 72% del mercado de calefacción chileno [73]. Para mejorar el uso de la calefacción puede mejorar la aislación residencial de una vivienda.

En particular, se puede mejorar la aislación de la techumbre, el piso, los muros y las ventanas de un hogar; esto puede reducir aproximadamente en un 60% el consumo energético destinado a calefacción [22]. Si se considera que un 10% de los hogares chilenos deciden aplicar esta medida, el ahorro en electricidad podría llegar a ser de 76.7 [GWh] al año. Comparar este dato con la información de la Tabla C.1.

El último punto a mencionar es el efecto de los termos eléctricos para el uso de agua caliente sanitaria. En general, es conveniente elegir aquel equipo que consuma una menor cantidad de electricidad por litro de agua, esto se logra comprando los equipos de mayor tamaño que pueden llegar a almacenar entre 200-300 litros de agua. Por ejemplo, en la Tabla 6.2 se observan dos modelos, uno con una capacidad de 303 [Lt] y otro con una capacidad de 30 [Lt]. Al dividir la capacidad con la potencia se observa que el rendimiento del modelo Rheem es de 94.69 [Lt/kW], mientras que el modelo Albin Trotter es de 13.04 [Lt/kW], lo que representa una diferencia de rendimiento de hasta 81.65 [Lt/kW].

El inconveniente de renovar estos equipos es su elevado costo y el hecho de que el equipo más

eficiente podría no adecuarse a las necesidades de una familia promedio. En consecuencia, no es posible cuantificar con precisión el efecto de renovar un termo eléctrico porque se desconoce el uso que se le da al agua caliente y lo más importante es que desconoce el número de viviendas que disponen de este equipo.

Tabla 6.2: Recambio de un termo eléctrico

Electrodoméstico	Modelo	Potencia [kW]	Capacidad [Lt]
Termo Eléctrico	Rheem: Tipo Piso	3.2	303
	ATMD Albin Trotter	2.3	30

6.3.2. Control Directo de Carga

Para gestionar la demanda eléctrica de calor se puede aplicar un control directo sobre las cargas. El objetivo de esta técnica es desconectar los electrodomésticos susceptibles de ser gestionados para reducir la demanda eléctrica en hora punta. Para ello, los clientes pueden establecer un contrato con las distribuidoras, en la cual acceden a que un operador de la red pueda desconectar algunos equipos del hogar a cambio de un beneficio económico, como un descuento en la cuenta de luz.

Por lo general, los equipos que pueden ser gestionados mediante esta técnica son aquellos que presenten una inercia térmica como los calefactores, termo eléctricos, hervidores, entre otros. El problema de la gestión de demanda orientada al calor es que los usos de la energía son de carácter inmediato e impostergable. Es relevante notar que aproximadamente un 30 % de la demanda eléctrica de calor corresponde al uso de electrodomésticos en la cocina, ver tabla C.1.

Los equipos utilizados en la cocina son el microondas, hervidor, horno eléctrico, cafetera, etc. Todos ellos poseen cierta inercia térmica, pero a excepción del hervidor, no pueden ser desconectados de la red porque se alteraría el proceso de cocción de los alimentos. En general las necesidades alimenticias son de carácter imprescindible e impostergable, por ende, la probabilidad de gestionar estos electrodomésticos es baja.

Para gestionar la demanda eléctrica de calefacción se debe gestionar el uso de los calefactores en hora punta. La necesidad de calefacción es de carácter impostergable, sin embargo, estos equipos presentan inercia térmica, por ende, es factible desconectarlos de la red unos minutos sin sacrificar el confort térmico. Si se considera que un año tiene 8760 horas y que se puede gestionar un 10 % de los calefactores eléctricos del país, entonces se podrían gestionar aproximadamente 8.76 [MW]. Comparar este dato con la información de la Tabla C.1.

Con respecto a la demanda eléctrica de calor en el agua caliente sanitaria, es posible gestionarla porque los termo eléctricos además de calentar el agua pueden mantener su temperatura, por ende, es factible desconectar por unos minutos estos equipos de la red. A priori, no se conoce cuantos hogares tienen esta tecnología. Sin embargo, si se asume que un 10 % de ellos se pueden desconectar, entonces se podrían gestionar 5.57 [MW]. De acuerdo con [74], la factibilidad de aplicar este tipo de técnicas en calefacción y agua caliente sanitaria es alta porque a los consumidores no les suele molestar que su demanda máxima se vea reducida un poco, mientras ocurra ocasionalmente durante el año y unos pocos minutos.

Capítulo 7

Conclusión

En el trabajo se cumplieron los objetivos, se realizó una revisión bibliográfica para reconocer el estado actual de las principales tendencias, normativas, marco regulatorio y políticas públicas que sean de utilidad para realizar las proyecciones de la demanda eléctrica de calor, se realizaron proyecciones de la electrificación del uso de calor residencial y su rol la gestión de la demanda eléctrica chilena.

La metodología utilizada en el trabajo permite obtener proyecciones de la electrificación del uso de calor residencial; esta consiste en construir una base de datos con la información de los combustibles residenciales utilizados en el país, para luego proyectar su demanda utilizando los modelos autorregresivos integrados de media móvil y así extraer la porción que corresponde a la electrificación del calor; el horizonte que se consideró en las proyecciones es el año 2039.

La demanda residencial de gas licuado de petróleo y electricidad aumentará en todas las zonas geográficas del país, en promedio un 47 % y un 60 %, el uso de gas natural aumentará en todas las zonas geográficas a excepción de la zona centro-sur, en promedio este aumento será de un 60 %. La leña es el único combustible que mantendrá constante su demanda por restricciones impuestas por el gobierno.

La demanda residencial de calor aumentará en todas las zonas geográficas del país en promedio un 12 %, el uso de calefacción aumentará en todas las zonas a excepción del norte grande y norte chico, en promedio este aumento será 4 %, el uso de agua caliente sanitaria aumentará en todas las zonas a excepción de la zona centro-sur y sur. Sin embargo, en promedio su uso disminuirá un 9 %, el uso de calor en la cocción de alimentos aumentará en todas las regiones de Chile, en promedio este aumento será de un 98 %.

La electrificación del uso de calor, calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos aumentará en todas las zonas del país un 60 %, 59 %, 63 % y 59 % respectivamente. La gestión de la demanda eléctrica de calor mediante el control directo de cargas es factible de realizar en calefactores y termo eléctricos debido a su inercia térmica. Sin embargo, la gestión de los electrodomésticos en la cocina no es factible de realizar porque las necesidades alimenticias de las personas son de carácter impostergable.

Capítulo 8

Trabajo Futuro

La electrificación del uso de calor residencial es un tema sobre el cual se ha investigado poco y los resultados obtenidos en este trabajo buscan cubrir esta falta de información, sin embargo, siempre se puede mejorar y el objetivo de esta sección es mencionar los temas de investigación en los se puede trabajar en el futuro para lograr este propósito.

Un trabajo a realizar en el futuro es la actualización de la base de datos construida, con énfasis en el consumo de leña en el país, si se pudiese disponer de información confiable que indique el consumo de leña a nivel regional, el tipo de madera que se utiliza y la humedad del tronco, entonces mejorarían considerablemente los resultados y no sólo eso, sino que al actualizar la información se podría cuantificar el efecto del estallido social y la pandemia del coronavirus en la electrificación del calor.

Un segundo trabajo a realizar en el futuro es incluir variables externas para proyectar la demanda de gas y leña, en este trabajo únicamente se incluyeron variables externas para la proyección de la demanda eléctrica y se pudo observar que error porcentual medio absoluto fue menor, por ende, proyectar el gas y leña con esta técnica mejoraría los resultados, incluso se puede ir un paso más allá e incluir otras variables como el clima, la población rural de la zona, condición socioeconómica de las viviendas, etc.

Un tercer trabajo realizar en el futuro es en la recopilación de información o estudios que verifiquen los supuestos considerados, es decir verificar que las viviendas del país disminuirán su demanda energética, disminuyendo del uso de calefacción, agua caliente sanitaria y por otro lado, verificar que el aumento de la tenencia de electrodomésticos en la cocina de los hogares chilenos aumentará a lo largo de los años.

Un cuarto trabajo a realizar en el futuro es un estudio matemático para determinar el método óptimo para realizar proyecciones de la demanda eléctrica de calor. Aparte de los modelos autorregresivos integrados de media móvil existen como los modelos de regresión, de distribución de probabilidad, redes neuronales, etc, y cada uno de ellos tiene un matiz diferente y determinar matemáticamente cual de ellos brinda los mayores beneficios a la electrificación del uso de calor es de interés.

Un quinto trabajo a realizar en el futuro es cuantificar el aumento o disminución del uso de calefacción y agua caliente sanitaria producto del cambio climático y actualizar los datos.

Bibliografía

- [1] Futuro 360, Desafío Tierra, 26/02/2020, disponible en: https://www.futuro360.com/desafiotierra/chile-ciudades-contaminacion_20200226/.
- [2] Corporación tecnológica del desarrollo, Informe final de usos de la energía en los hogares Chile en el año 2018, Diciembre 2019, pp 3-13, 29-30 y 103-105.
- [3] Ayllu Solar, Manual Sobre Instalaciones de Plantas Fotovoltaicas, SERC-Chile, Mayo 2018.
- [4] Alejandra Molina Monje & Francisco Martínez, Modelo de generación fotovoltaica, Ministerio de Energía de Chile, Centro de Energía, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Marzo 2017.
- [5] Guía para la descripción de proyectos de centrales solares de generación eléctrica en el SEIA.
- [6] Junkers, Módulo 5: Bombas de calor: Aire-Agua.
- [7] Ministerio de Energía, Bombas de Calor: Una guía para el usuario, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Santiago de Chile, Agosto 2020.
- [8] B.A. Ortega Leiva, Evaluación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica para una casa representativa en diferentes climas de Chile, Santiago de Chile, Universidad de Chile, Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, año 2017.
- [9] GIZ, NAMA Chile, Ministerio de Energía, Índice de precios: Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile, Santiago de Chile, Enero 2020.
- [10] GIZ, NAMA Chile, Ministerio de Energía, Lista de proveedores: Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile, Santiago de Chile, Enero 2020.
- [11] GIZ, NAMA Chile, Ministerio de Energía, Estudio de Mercado, Bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas en Chile, Enero 2020.
- [12] GIZ, NAMA Chile, Ministerio de Energía, Bombas de Calor: Una guía para el usuario. Santiago de Chile, Agosto 2020.
- [13] Ministerio de energía, Modificación ley N°19.656, sobre concesiones de energía geotérmica. Comisión de Hacienda, Cámara de Diputados.
- [14] Agencia de Sostenibilidad Energética & Corfo, Manual de Desarrollo de Proyectos: Energía Distrital, Providencia, Santiago de Chile, Diciembre 2018.
- [15] EBP Chile & Corporación de desarrollo tecnológico, Informe final: Estudio para la obtención de una hoja de ruta para el desarrollo de la calefacción distrital en Chile, CIFES - Ministerio del Medio Ambiente, Febrero 2016.

- [16] Unidad de Desarrollo Tecnológico, Evaluación de soluciones tecnológicas térmicas y eléctricas, marco regulatorio e instrumentos. Calefacción distrital con biomasa en Chile, Marco normativo vigente y propuestas de perfeccionamiento.
- [17] J.I. Seminario Castelblanco, Evaluación técnico económica de calefacción distrital en Punta Arenas. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico e ingeniero civil industrial. Universidad de Chile, Santiago de Chile, Octubre 2012.
- [18] Jaime Zuazagoitia, Cogeneración con Biomasa. Seminario Cigre, Diversificación Energética de Chile, Posibles vías hacia la autonomía. Hotel Crowne Plaza, Santiago, Septiembre 2005.
- [19] Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, Guía de la Cogeneración, Madrid, Año 2010.
- [20] Acondicionamiento térmico de vivienda existente. Una Guía para el dueño de casa. Corporación del desarrollo tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción, Santiago, Chile, 2015, pp 32-33.
- [21] Acondicionamiento térmico de vivienda existente. Una Guía para el dueño de casa. Corporación del desarrollo tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción, Santiago, Chile, 2015, pp 41-43.
- [22] Manual de (Re)Acondicionamiento Térmico, Una guía para el dueño de casa.
- [23] Corporación del Desarrollo Tecnológico, Concepción, Chile, 1º Edición, Abril 2016, pp 22-23.
- [24] Corporación de Desarrollo Tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción, Acondicionamiento térmico de vivienda existente, una guía para el dueño de casa, Santiago de Chile, Año 2015.
- [25] Corporación del desarrollo tecnológico, Manual de (Re)Acondicionamiento Térmico. Una Guía para el dueño de casa. Concepción, Chile, Abril 2016.
- [26] Corporación de Desarrollo Tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción, Manual de Acondicionamiento Térmico, Criterios de Intervención, Techumbre, Muro, Ventanas, Calefacción. Santiago de Chile, Año 2015.
- [27] Red de Pobreza Energética, Informe de Leña, Septiembre 2020, página 8.
- [28] Red de Pobreza Energética, Informe de Leña, Septiembre 2020, pp 41,47.
- [29] Red de Pobreza Energética, Informe de Leña, Septiembre 2020, pp 62-65.
- [30] Red de Pobreza Energética, ¿Qué es la pobreza energética?, Infografía. Universidad de Chile & Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo.
- [31] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. Energía 2050. Política Energética de Chile, página 9.
- [32] C.Amigo, P.Araya, M. Billi, R.Calvo, T.Oyarzún, A. Urquiza. Políticas públicas y pobreza energética en Chile: ¿Una relación fragmentada?, Red de pobreza energética, Agosto 2018, pp 16-19.
- [33] Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, disponible en: <https://energia.gob.cl/>.
- [34] Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, disponible en: <https://mma.gob.cl/>.

- [35] Comisión Nacional de Energía, Gobierno de Chile, disponible en: <https://www.cne.cl/>.
- [36] César Pastén, Chile, energía y desarrollo, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Mayo 2012.
- [37] Comunidad de Madrid, Guía Básica de la Gestión de la Demanda Eléctrica, Año 2007, pp 24-28.
- [38] Dasla Pando, Informe de Trabajo Dirigido, Aplicabilidad de la gestión de demanda en el sistema eléctrico chileno, Universidad de Chile, Mayo 2020, pp 10-12.
- [39] Ministerio de Educación, Gobierno de Chile, Módulo: Las Zonas Naturales de Chile, 5º Básico: Historia, Geografía y Ciencias Sociales. Fichas de Trabajo, Año 2015, página 11.
- [40] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 9-12.
- [41] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 30-33.
- [42] Damodar N. Gujarati, Basics Econometrics, Fourth Edition, pp 817- 820.
- [43] Statistics How To, KPSS Test, disponible en: <https://www.statisticshowto.com/kpss-test/>.
- [44] Statistics How To, Correlation Coefficient, disponible en: <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/correlation-coefficient-formula/>.
- [45] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 14-16.
- [46] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 50-52.
- [47] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 18-19.
- [48] Damodar N. Gujarati, Basics Econometrics, Fourth Edition, pp 696-702.
- [49] Damodar N. Gujarati, Basics Econometrics, Fourth Edition, pp 536- 537.
- [50] Adriana Marcela Ariza Ramírez, Métodos Utilizados Para el Pronóstico de Demanda de Energía Eléctrica en Sistemas de Distribución, Universidad Tecnológica de Pereira, Año 2013, página 71.
- [51] Statistics How To, Absolute Error & Mean Absolute Error, disponible en: <https://www.statisticshowto.com/absolute-error/>.
- [52] Adriana Marcela Ariza Ramírez, Métodos Utilizados Para el Pronóstico de Demanda de Energía Eléctrica en Sistemas de Distribución, Universidad Tecnológica de Pereira, Año 2013, página 35.
- [53] Statistics How To, Residual Values in Regression Analysis, disponible en: <https://www.statisticshowto.com/residual/>.
- [54] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 38-77.
- [55] Damodar N. Gujarati, Basics Econometrics, Fourth Edition, pp 838- 840.

- [56] Adriana Marcela Ariza Ramírez, Métodos Utilizados Para el Pronóstico de Demanda de Energía Eléctrica en Sistemas de Distribución, Universidad Tecnológica de Pereira, Año 2013, pp 66-69.
- [57] Robert Nau, Statistical Forecasting. Notes on Regression and Time Series Analysis. Fuqua School of Business, Duke University, disponible en: <https://people.duke.edu/~rnau/411home.htm>.
- [58] Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1976) Time Series Analysis: Forecasting and Control. Revised Edition, Holden Day, San Francisco.
- [59] Adriana Marcela Ariza Ramírez, Métodos Utilizados Para el Pronóstico de Demanda de Energía Eléctrica en Sistemas de Distribución, Universidad Tecnológica de Pereira, Año 2013, pp 71-73.
- [60] Damodar N. Gujarati, Basics Econometrics, Fourth Edition, pp 840-848.
- [61] Comisión Nacional de Energía. Informe Definitivo de Previsión de Demanda, Santiago de Chile, Enero 2020.
- [62] Sandra Hernández, Análisis de Series de Tiempo, Curso Regional sobre Hoja de Balance de Alimentos. Series de Tiempo y Análisis de Política, Enero 2015, página 12.
- [63] Selectra, Factores de Conversión, Propano-Gas, disponible en: <https://propanogas.com/faq/factor-conversion>
- [64] Corporación Tecnológica del Desarrollo, Medición del Consumo Nacional de Leña y Otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera, Diciembre 2015, página 65.
- [65] Gobierno de Chile, Indicadores de Energía Calórica de la Leña. Infografía.
- [66] Comisión Nacional de Energía, Informe Definitivo de Previsión de Demanda, Gobierno de Chile, Enero 2020, pp 22-23, 28-31.
- [67] Coordinador Eléctrico Nacional, Proyección de Demanda Eléctrica 2019-2039, Enero 2020, pp 13-15.
- [68] Banco Central de Chile, disponible en: <https://www.bcentral.cl/>
- [69] Jeffrey S. Racine, Reproducible Econometrics Using R. Oxford University Press, Año 2019, pp 3-5.
- [70] BNamericas, Radiografía al pronóstico de demanda eléctrica de Chile a partir del 2021, disponible en: <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/radiografia-al-pronostico-de-demanda-electrica-de-chile-a-partir-de-2021>
- [71] Enel, Consumo de Artefactos Eléctricos en el hogar, disponible en: <https://www.enel.cl/es/clientes/informacion-util/consumo-artefactos-electricos.html>
- [72] INE, Resultados Censo 2017, disponible en: <http://resultados.censo2017.cl/>
- [73] El Economista, Aparatos Eléctricos Alcanzan el 72 % de Participación en el Mercado en Calefacción, disponible en : <https://www.economistaamerica.cl/empresas-eAm-chile/noticias/6061694/09/14/Aparatos-electricos-alcanzan-72-de-participacion-de-mercado-en-calefaccion.html>
- [74] N. Zhang, L. Ochoa, D. Kirschen, Investigating the Impact of Demand Side Management on Residential Customers, pp 5-6.

Anexo A

Combustibles Residenciales

En las Tablas A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 y A.6, se muestran en detalle las proyecciones anuales de los combustibles residenciales a nivel país y por zona geográfica. En particular, se tabulan los resultados para el consumo de gas licuado de petróleo, gas natural, leña, electricidad y la demanda energética total, que representa la suma de los cuatro combustibles mencionados; todo se encuentra calculado en [GWh].

Tabla A.1: Proyección de los principales combustibles utilizados hogares chilenos

Año	GLP[GWh]	GN[GWh]	Leña[GWh]	Electricidad[GWh]	Total[GWh]
2019	9450	6550	23767	13565	53332
2020	9680	6749	23767	14111	54306
2021	9950	6949	23767	14435	55101
2022	10135	7146	23767	14850	55899
2023	10359	7341	23767	15249	56716
2024	10581	7537	23767	15667	57552
2025	10804	7733	23767	16061	58365
2026	11027	7928	23767	16450	59173
2027	11250	8123	23767	16874	60014
2028	11473	8319	23767	17257	60816
2029	11695	8514	23767	17642	61618
2030	11918	8710	23767	18079	62474
2031	12141	8905	23767	18437	63250
2032	12364	9100	23767	18887	64119
2033	12587	9296	23767	19258	64908
2034	12809	9491	23767	19619	65687
2035	13032	9687	23767	20102	66589
2036	13255	9882	23767	20448	67352
2037	13478	10077	23767	20800	68123
2038	13701	10273	23767	21312	69053
2039	13923	10468	23767	21651	69810

Tabla A.2: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte grande

Año	GLP[GWh]	GN[GWh]	Leña[GWh]	Electricidad[GWh]	Total[GWh]
2015	469	8	63	825	1365
2016	489	8	63	829	1389
2017	501	8	64	820	1392
2018	496	10	64	838	1408
2019	511	9	64	872	1455
2020	496	8	64	912	1480
2021	501	8	64	934	1507
2022	499	8	64	965	1537
2023	502	8	64	994	1568
2024	502	8	64	1026	1600
2025	503	8	64	1054	1630
2026	504	8	64	1083	1658
2027	505	8	64	1115	1692
2028	505	8	64	1142	1720
2029	506	8	64	1169	1748
2030	507	8	64	1203	1783
2031	508	8	64	1227	1808
2032	509	8	64	1263	1844
2033	510	8	64	1289	1871
2034	511	8	64	1314	1897
2035	512	8	64	1353	1936
2036	512	8	64	1376	1960
2037	513	8	64	1400	1985
2038	514	8	64	1442	2028
2039	515	8	64	1464	2051

Tabla A.3: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares del norte chico

Año	GLP[GWh]	GN[GWh]	Leña[GWh]	Electricidad[GWh]	Total[GWh]
2017	540	1	42	667	1251
2018	596	2	43	688	1328
2019	577	2	43	683	1305
2020	596	2	43	718	1359
2021	615	3	43	718	1379
2022	622	3	43	733	1401
2023	632	3	43	746	1423
2024	641	4	43	763	1450
2025	651	4	43	778	1475
2026	660	4	43	800	1507
2027	670	4	43	816	1533
2028	679	5	43	829	1556
2029	689	5	43	843	1579
2030	698	5	43	861	1607
2031	708	6	43	896	1652
2032	717	6	43	891	1657
2033	727	6	43	903	1679
2034	736	6	43	914	1700
2035	746	7	43	937	1732
2036	756	7	43	952	1757
2037	765	7	43	957	1772
2038	775	8	43	982	1807
2039	784	8	43	991	1826

Tabla A.4: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona central

Año	GLP[GWh]	GN[GWh]	Leña[GWh]	Electricidad[GWh]	Total[GWh]
2011	4882	2919	2443	6301	16545
2012	4991	3546	2453	6712	17701
2013	4971	4117	2495	7194	18776
2014	5141	4278	2505	7549	19474
2015	5074	4933	2520	7603	20130
2016	5254	4656	2531	7747	20189
2017	5420	3887	2543	7859	19708
2018	5510	3809	2557	7994	19870
2019	5430	3594	2557	8163	19745
2020	5496	3749	2557	8336	20138
2021	5616	3868	2557	8477	20518
2022	5644	3986	2557	8683	20870
2023	5708	4104	2557	8873	21241
2024	5771	4221	2557	9074	21623
2025	5835	4338	2557	9258	21988
2026	5899	4456	2557	9431	22343
2027	5963	4573	2557	9639	22732
2028	6027	4690	2557	9817	23091
2029	6091	4808	2557	9995	23450
2030	6154	4925	2557	10211	23848
2031	6218	5042	2557	10344	24161
2032	6282	5160	2557	10596	24595
2033	6346	5277	2557	10764	24944
2034	6410	5394	2557	10926	25287
2035	6473	5512	2557	11176	25718
2036	6537	5629	2557	11319	26043
2037	6601	5746	2557	11480	26384
2038	6665	5863	2557	11750	26836
2039	6729	5981	2557	11895	27162

Tabla A.5: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona centro-sur

Año	GLP[GWh]	GN[GWh]	Leña[GWh]	Electricidad[GWh]	Total[GWh]
2019	2279	204	10369	2936	15788
2020	2392	196	10369	3175	16132
2021	2498	195	10369	3294	16357
2022	2612	194	10369	3418	16595
2023	2726	194	10369	3546	16835
2024	2841	193	10369	3672	17075
2025	2955	192	10369	3798	17314
2026	3069	191	10369	3923	17553
2027	3184	190	10369	4049	17793
2028	3298	189	10369	4174	18031
2029	3412	189	10369	4300	18270
2030	3527	188	10369	4426	18510
2031	3641	187	10369	4550	18748
2032	3755	186	10369	4678	18989
2033	3869	185	10369	4803	19227
2034	3984	184	10369	4928	19466
2035	4098	184	10369	5056	19707
2036	4212	183	10369	5180	19945
2037	4327	182	10369	5306	20184
2038	4441	181	10369	5434	20426
2039	4555	180	10369	5558	20663

Tabla A.6: Proyección de los principales combustibles utilizados por los hogares de la zona sur

Año	GLP[GWh]	GN[GWh]	Leña[GWh]	Electricidad[GWh]	Total[GWh]
2011	452	1991	10254	641	13339
2012	481	2096	10295	683	13555
2013	491	2121	10472	731	13815
2014	506	2393	10517	771	14187
2015	520	2462	10578	787	14347
2016	533	2397	10626	805	14360
2017	589	2533	10675	846	14642
2018	606	2669	10734	886	14895
2019	652	2741	10734	911	15038
2020	699	2793	10734	971	15197
2021	719	2875	10734	1012	15340
2022	758	2954	10734	1050	15496
2023	792	3033	10734	1090	15648
2024	826	3111	10734	1132	15804
2025	860	3190	10734	1173	15957
2026	895	3269	10734	1214	16111
2027	929	3347	10734	1255	16266
2028	963	3426	10734	1295	16419
2029	997	3505	10734	1335	16571
2030	1032	3583	10734	1377	16727
2031	1066	3662	10734	1419	16881
2032	1100	3741	10734	1459	17034
2033	1135	3819	10734	1498	17186
2034	1169	3898	10734	1537	17338
2035	1203	3977	10734	1581	17495
2036	1237	4055	10734	1620	17647
2037	1272	4134	10734	1658	17798
2038	1306	4212	10734	1704	17957
2039	1340	4291	10734	1742	18107

Anexo B

Demanda de Calor

En las Tablas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5 y B.6 se muestran en detalle las proyecciones anuales de la demanda de calor residencial a nivel país y por zona geográfica. En estas tablas se pueden observar los resultados para la demanda de calor, el uso de calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos en la cocina; todo se encuentra calculado en [GWh].

Tabla B.1: Proyección de la demanda de calor residencial en Chile

Año	Calor [GWh]	Calefacción [GWh]	ACS [GWh]	Cocina [GWh]
2019	40396	26454	9930	3108
2020	40836	26658	9957	3246
2021	41131	26765	9946	3376
2022	41419	26865	9930	3509
2023	41714	26966	9914	3645
2024	42012	27067	9897	3785
2025	42284	27149	9870	3926
2026	42545	27221	9839	4069
2027	42820	27299	9808	4216
2028	43058	27351	9766	4364
2029	43288	27395	9720	4514
2030	43545	27454	9677	4670
2031	43739	27470	9617	4823
2032	43987	27518	9567	4985
2033	44172	27523	9500	5143
2034	44341	27515	9427	5303
2035	44584	27550	9367	5476
2036	44725	27520	9283	5640
2037	44863	27484	9195	5806
2038	45096	27505	9124	5989
2039	45207	27447	9026	6159

Tabla B.2: Proyección de la demanda de calor residencial en el norte grande

Año	Calor [GWh]	Calefacción [GWh]	ACS [GWh]	Cocina [GWh]
2015	849	243	436	127
2016	857	240	439	131
2017	851	234	437	134
2018	853	229	437	137
2019	873	229	448	144
2020	880	225	451	149
2021	888	222	455	154
2022	897	218	460	159
2023	907	215	465	165
2024	916	211	470	171
2025	924	206	474	176
2026	932	202	478	182
2027	941	197	482	188
2028	947	191	485	194
2029	953	186	488	200
2030	962	180	493	206
2031	966	173	495	212
2032	975	167	500	219
2033	979	160	502	225
2034	982	153	503	231
2035	992	146	508	239
2036	994	138	509	244
2037	995	129	510	251
2038	1006	121	515	259
2039	1006	112	515	265

Tabla B.3: Proyección de la demanda de calor residencial en el norte chico

Año	Calor [GWh]	Calefacción [GWh]	ACS [GWh]	Cocina [GWh]
2017	764	210	392	120
2018	804	216	413	130
2019	783	206	402	129
2020	808	207	414	137
2021	813	203	417	141
2022	818	199	419	145
2023	823	195	422	150
2024	830	191	426	155
2025	837	187	429	160
2026	847	183	434	165
2027	853	178	437	170
2028	857	173	439	175
2029	861	168	441	180
2030	867	162	444	186
2031	883	158	452	194
2032	876	150	449	197
2033	879	144	450	202
2034	880	137	451	207
2035	887	130	454	213
2036	891	123	456	219
2037	888	115	455	224
2038	896	108	459	231
2039	895	100	458	236

Tabla B.4: Proyección de la demanda de calor residencial en la zona central

Año	Calor [GWh]	Calefacción [GWh]	ACS [GWh]	Cocina [GWh]
2011	13099	7758	4113	930
2012	13940	8249	4338	1017
2013	14697	8679	4540	1104.
2014	15136	8902	4653	1174
2015	15542	9110	4749	1242
2016	15461	9004	4714	1280
2017	14974	8669	4552	1281
2018	14994	8650	4529	1320
2019	14773	8461	4455	1345
2020	14953	8519	4488	1403
2021	15117	8565	4517	1461
2022	15261	8603	4536	1517
2023	15415	8645	4557	1576
2024	15573	8689	4577	1637
2025	15714	8721	4592	1698
2026	15845	8747	4603	1759
2027	15996	8782	4619	1824
2028	16120	8800	4626	1887
2029	16241	8814	4632	1952
2030	16386	8841	4643	2021
2031	16471	8837	4634	2083
2032	16628	8863	4649	2158
2033	16725	8858	4645	2226
2034	16815	8847	4638	2295
2035	16961	8868	4643	2372
2036	17031	8844	4628	2442
2037	17107	8819	4615	2514
2038	17254	8836	4617	2596
2039	17313	8800	4597	2669

Tabla B.5: Proyección de la demanda de calor residencial en la zona centro-sur

Año	Calor [GWh]	Calefacción [GWh]	ACS [GWh]	Cocina [GWh]
2019	12306	7670	3286	970
2020	12486	7755	3312	1016
2021	12570	7778	3311	1054
2022	12661	7806	3312	1095
2023	12753	7833	3312	1136
2024	12841	7857	3311	1177
2025	12925	7877	3308	1220
2026	13007	7896	3304	1263
2027	13087	7912	3298	1307
2028	13163	7926	3291	1351
2029	13237	7937	3283	1397
2030	13309	7946	3273	1443
2031	13377	7951	3262	1489
2032	13445	7956	3250	1537
2033	13508	7957	3236	1585
2034	13569	7955	3221	1634
2035	13628	7953	3205	1684
2036	13684	7946	3187	1734
2037	13736	7937	3167	1785
2038	13789	7928	3147	1837
2039	13836	7914	3125	1889

Tabla B.6: Proyección de la demanda de calor residencial en la zona sur

Año	Calor [GWh]	Calefacción [GWh]	ACS [GWh]	Cocina [GWh]
2011	12597	10407	1869	297
2012	12732	10516	1858	321
2013	12899	10645	1855	348
2014	13179	10882	1856	376
2015	13250	10933	1835	402
2016	13179	10860	1800	425
2017	13361	11007	1790	454
2018	13516	11131	1775	483
2019	13564	11163	1748	510
2020	13624	11204	1723	538
2021	13670	11234	1694	565
2022	13726	11273	1666	594
2023	13777	11307	1636	623
2024	13828	11341	1607	652
2025	13876	11372	1576	682
2026	13923	11402	1544	713
2027	13969	11431	1511	744
2028	14011	11457	1478	775
2029	14052	11482	1443	806
2030	14093	11506	1408	839
2031	14132	11528	1372	872
2032	14168	11549	1335	905
2033	14202	11567	1297	938
2034	14233	11583	1258	972
2035	14268	11601	1218	1007
2036	14296	11614	1178	1042
2037	14322	11624	1136	1077
2038	14352	11639	1094	1113
2039	14375	11646	1051	1149

Anexo C

Electrificación del Uso de Calor Residencial

En las Tablas C.1, C.2, C.3, C.4, C.5 y C.6, se muestran en detalle las proyecciones anuales de la demanda eléctrica de calor residencial a nivel país y por zona geográfica. En estas tablas se pueden observar los resultados para la demanda eléctrica de calor, uso de calefacción, agua caliente sanitaria y cocción de alimentos en la cocina; donde Y_t es la abreviación de demanda eléctrica; todo se encuentra calculado en [GWh].

Tabla C.1: Electrificación del uso de calor residencial en Chile

Año	Y_t Calor[GWh]	Y_t Calefacción[GWh]	Y_t ACS[GWh]	Y_t Cocina[GWh]
2019	3193	591	371	981
2020	3323	614	386	1021
2021	3399	628	395	1044
2022	3497	646	407	1074
2023	3591	663	419	1103
2024	3689	681	431	1133
2025	3782	698	442	1161
2026	3873	715	453	1189
2027	3973	734	466	1219
2028	4063	750	477	1247
2029	4154	767	488	1274
2030	4256	786	500	1306
2031	4341	801	511	1331
2032	4447	821	523	1363
2033	4534	837	534	1390
2034	4619	852	545	1416
2035	4733	873	558	1451
2036	4814	888	568	1475
2037	4897	903	579	1501
2038	5017	925	593	1537
2039	5097	940	603	1561

Tabla C.2: Electrificación del uso de calor residencial en el norte grande

Año	Y_t Calor[GWh]	Y_t Calefacción[GWh]	Y_t ACS[GWh]	Y_t Cocina[GWh]
2015	218	30	0	86
2016	219	30	0	86
2017	216	29	0	85
2018	221	30	0	87
2019	230	31	0	91
2020	240	33	0	95
2021	246	34	0	97
2022	255	35	0	100
2023	262	36	0	104
2024	271	37	0	107
2025	278	38	0	110
2026	286	39	0	113
2027	294	40	0	116
2028	301	41	0	119
2029	308	42	0	122
2030	317	43	0	125
2031	324	44	0	128
2032	333	45	0	131
2033	340	46	0	134
2034	346	47	0	137
2035	357	49	0	141
2036	363	49	0	143
2037	369	50	0	146
2038	380	52	0	150
2039	386	53	0	152

Tabla C.3: Electrificación del uso de calor residencial en el norte chico

Año	Y_t Calor[GWh]	Y_t Calefacción[GWh]	Y_t ACS[GWh]	Y_t Cocina[GWh]
2017	176	24	0	69
2018	181	25	0	72
2019	180	25	0	71
2020	189	26	0	75
2021	190	26	0	75
2022	193	26	0	76
2023	197	27	0	78
2024	201	27	0	79
2025	205	28	0	81
2026	211	29	0	83
2027	215	29	0	85
2028	219	30	0	86
2029	222	30	0	88
2030	227	31	0	90
2031	236	32	0	93
2032	235	32	0	93
2033	238	32	0	94
2034	241	33	0	95
2035	247	34	0	98
2036	251	34	0	99
2037	252	34	0	100
2038	259	35	0	102
2039	261	36	0	103

Tabla C.4: Electrificación del uso de calor residencial en la zona central

Año	Y_t Calor[GWh]	Y_t Calefacción[GWh]	Y_t ACS[GWh]	Y_t Cocina[GWh]
2011	1460	287	173	439
2012	1556	306	185	468
2013	1667	328	199	500
2014	1749	344	209	525
2015	1761	347	210	529
2016	1796	353	213	540
2017	1817	359	220	543
2018	1849	366	223	553
2019	1888	373	228	564
2020	1928	381	233	577
2021	1962	387	236	587
2022	2009	397	242	601
2023	2053	405	247	615
2024	2099	415	253	628
2025	2142	423	258	641
2026	2182	431	263	653
2027	2230	441	269	667
2028	2271	449	274	679
2029	2312	457	279	692
2030	2362	467	285	706
2031	2392	473	290	715
2032	2451	485	296	733
2033	2490	492	301	744
2034	2527	500	305	756
2035	2585	511	312	773
2036	2618	518	317	782
2037	2655	525	321	794
2038	2717	537	329	812
2039	2751	544	333	822

Tabla C.5: Electrificación del uso de calor residencial en la zona centro-sur

Año	Y_t Calor[GWh]	Y_t Calefacción[GWh]	Y_t ACS[GWh]	Y_t Cocina[GWh]
2019	660	140	98	183
2020	714	151	106	198
2021	741	157	110	205
2022	769	163	114	213
2023	798	169	119	221
2024	826	175	123	229
2025	854	181	127	237
2026	882	187	131	244
2027	911	193	135	252
2028	939	199	140	260
2029	967	205	144	268
2030	996	211	148	276
2031	1023	217	152	283
2032	1052	223	156	291
2033	1080	229	161	299
2034	1108	235	165	307
2035	1137	241	169	315
2036	1165	247	173	323
2037	1193	253	177	331
2038	1222	259	182	339
2039	1250	265	186	346

Tabla C.6: Electrificación del uso de calor residencial en la zona sur

Año	Y_t Calor[GWh]	Y_t Calefacción[GWh]	Y_t ACS[GWh]	Y_t Cocina[GWh]
2011	166	15	31	51
2012	176	16	34	54
2013	189	17	36	58
2014	199	18	38	61
2015	203	19	39	62
2016	208	19	39	64
2017	218	21	41	67
2018	228	21	43	70
2019	235	22	45	72
2020	250	23	47	77
2021	261	25	49	80
2022	271	25	51	83
2023	281	26	53	86
2024	292	28	55	90
2025	302	29	57	93
2026	313	30	59	96
2027	323	31	61	99
2028	334	32	63	102
2029	344	33	65	105
2030	355	34	67	109
2031	365	35	69	112
2032	376	36	71	115
2033	386	37	73	118
2034	396	38	75	121
2035	407	39	77	125
2036	417	40	79	128
2037	427	41	81	131
2038	438	42	83	134
2039	448	43	85	137

Anexo D

Correlación de Pearson

En la Tabla D.1 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson entre la demanda eléctrica residencial y las variables externas para cada región de Chile. Donde η es la abreviación de eficiencia energética, EM es electromovilidad, gas y petróleo se refieren al precio del insumo y pib y población se representan a nivel regional.

Tabla D.1: Coeficiente de correlación de Pearson entre la demanda eléctrica residencial y las variables externas

Y_t Regional	η	EM	Gas	GD	Petroleo	PIB	Población
Arica-Parinacota	0	0.69	-0.53	0.48	-0.37	0.83	0.86
Tarapacá	0	0.68	-0.57	0.48	-0.37	0.59	0.85
Antofagasta	0	0.54	-0.41	0.53	-0.6	0.66	0.66
Atacama	0	0.26	-0.14	0.24	-0.22	0.42	0.45
Coquimbo	0	0.52	-0.29	0.52	-0.41	0.53	0.62
Valparaíso	0	0.45	-0.39	0.44	-0.56	0.55	0.63
RM	0	0.53	-0.37	0.51	-0.49	0.66	0.7
Ohiggins	0	0.71	-0.42	0.69	-0.53	0.75	0.87
Maule	0	0.75	-0.43	0.74	-0.55	0.77	0.81
Ñuble	0	0.77	-0.47	0.75	-0.56	0.83	0.92
Bio-Bio	0	0.7	-0.43	0.7	-0.61	0.7	0.79
Araucanía	0	0.77	-0.51	0.76	-0.68	0.82	0.88
Los Ríos	0	0.76	-0.51	0.74	-0.67	0.81	0.89
Los Lagos	0	0.77	-0.48	0.76	-0.62	0.81	0.87
Aysén	0	0.81	-0.53	0.81	-0.65	0.88	0.95
Magallanes	0	0.52	-0.25	0.5	-0.33	0.58	0.67
Promedio	0	0.64	-0.42	0.6	-0.51	0.7	0.78

Anexo E

Errores

En la Tabla E.1 se presenta el error absoluto medio de las proyecciones realizadas, donde Y_t es la abreviación de la demanda eléctrica residencial y total es la demanda energética total de los hogares, todo calculado en [GWh].

Tabla E.1: Error absoluto medio de las proyecciones

MAE	Norte Grande	Norte Chico	Centro	Centro-Sur	Sur
Y_t	1513.46	1670.34	10579.85	5120.9	1460.99
GLP	87.24	281.35	1349.53	665.38	133.24
GN	3.69	0.9	2524.34	77.46	664.85
Leña	0.36	0.24	14.59	59.17	61.26
Total	1604.75	1952.82	14468.3	5922.91	2320.34
Calor	896.04	1086.85	10442.69	4383.78	1966.11
Calefacción	190.03	227.93	5926.27	2659.46	1678.12
ACS	459.5	557.33	2964.94	1112.17	220.45
Cocina	178.1	217.69	1095.86	427.79	96.66
Y_t Calor	399.19	440.57	2441.73	1151.79	375.34
Y_t Calefacción	54.44	60.08	485.37	243.96	36.33
Y_t ACS	0	0	300.31	171.24	70.77
Y_t Cocina	157.53	173.86	725.95	319.03	114.9

En las Tablas E.2, E.3, E.4 y E.5 se observan los errores en las proyecciones de leña [m^3/st], la demanda eléctrica residencial [GWh], el consumo de gas licuado de petróleo [Ton] y gas natural [Mm3] para todas las regiones de Chile. Donde ME es el error medio, RMSE es el error cuadrático medio, MAE, es el error medio absoluto, MPE es el error medio porcentual, MAPE es el error porcentual medio absoluto y MASE es el error de escala absoluta de media.

Tabla E.2: Errores en las proyecciones del consumo de leña residencial

ARIMA Leña	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE
Nacional	103.8096	129.9801	103.8096	0.5814	0.5814	0.8937

Tabla E.3: Errores en las proyecciones de demanda eléctrica residencial

ARIMAX Yt	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE
Arica-Parinacota	2.0054	292.34	168.83	-0.0117	1.3365	0.2885
Tarapaca	4.1911	535.74	305.67	0.0074	1.6306	0.3555
Antofagasta	-31.1831	1854.4	1038.96	-0.2878	2.9093	0.6477
Atacama	-85.7252	712.07	433.81	-0.786	2.995	0.5086
Coquimbo	-272.8907	2848.2	1236.53	-1.6247	3.7498	0.4965
Valparaíso	-315.4655	2783.7	1599.21	-0.3466	1.4684	0.334
RM	-1749.919	13390.5	8136.16	-0.441	1.6904	0.3949
O'Higgins	-88.3563	1296.3	844.49	-0.2494	1.6914	0.3418
Maule	38.9236	2147.8	1193.94	-0.0826	2.0731	0.411
Ñuble	-29.7648	485.76	332.69	-0.1591	1.3323	0.2813
Bio-Bio	471.1205	4436.42	2486	0.3295	2.3667	0.5558
Araucanía	203.7765	2121.7	1107.31	0.299	2.547	0.5009
Los Ríos	31.6646	566.63	412.27	0.075	2.3746	0.4582
Los Lagos	29.8281	1121.06	811.02	-0.0168	2.2717	0.4509
Aysén	10.7861	128.23	82.71	0.138	1.5438	0.2725
Magallanes	-11.2041	243.45	154	-0.1612	1.5341	0.3807
Promedio	-112.0133	2185.26	1271.6	-0.2074	2.0947	0.4174

Tabla E.4: Errores en las proyecciones del consumo de gas licuado de petróleo residencial

ARIMA GLP	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE
Arica-Parinacota	-0.4141	19.69	13.3008	-0.2367	3.0948	0.393
Tarapaca	1.2932	42.59	28.4483	0.0291	4.1079	0.7744
Antofagasta	6.4999	68.663	45.4881	0.3043	0.3043	2.4139
Atacama	21.1291	309.11	217.5098	0.0354	4.8778	0.4708
Coquimbo	-0.6141	88.41	63.8371	-0.1032	2.5664	0.501
Valparaíso	37.9621	287.02	220.282	0.3723	3.2375	0.654
RM	61.9092	1352.39	955.605	-0.1303	4.448	0.6447
O'Higgins	21.5772	255.44	173.6382	-0.0041	5.1325	0.6919
Maule	20.1974	188.1	139.88	0.1952	4.04	0.6063
Ñuble	-18.0625	77.83	48.7925	-1.4906	3.2002	0.2562
Bio-Bio	-7.3941	308	190.6378	-0.5262	3.9654	0.603
Araucanía	22.2761	376.43	286.0673	0.0518	3.387	0.5594
Los Ríos	5.1238	44.13	32.5169	0.317	3.5643	0.4728
Los Lagos	8.2993	105.33	76.3523	0.147	3.611	0.5767
Aysén	0.9332	31.39	21.833	-0.4205	6.7536	0.6981
Magallanes	-0.0513	3.47	2.5409	-0.8671	7.3068	0.6373
Promedio	11.2915	222.44	157.2956	-0.1454	3.9748	0.6846

Tabla E.5: Errores en las proyecciones del consumo de gas natural residencial

ARIMA GN	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE
Antofagasta	0.4517	4.8711	3.6883	0.3599	6.4545	0.5535
Coquimbo	-0.2541	1.3775	0.8955	-2.3528	6.2835	0.2941
Valparaíso	-5.5366	270.8712	179.4545	-1.6223	8.9422	0.709
RM	-123.4134	3692.572	2337.801	-1.4727	8.5823	0.4687
O'Higgins	-0.1212	10.0834	7.0809	-1.2097	10.6549	0.365
Maule	-0.1399	0.8291	0.4941	-1.0174	3.5994	0.2176
Bio-Bio	-9.6349	83.441	59.9412	-1.5633	5.3196	0.6109
Araucanía	1.548	27.3171	17.021	-1.6081	8.4034	0.7482
Magallanes	56.9886	898.5874	664.848	0.0065	4.0831	0.5992
Promedio	-8.9013	554.4389	363.4694	-1.1644	6.9248	0.5074

Anexo F

Efecto de las Variables Externas

En la Tabla F.1 se observa el error porcentual medio absoluto de las proyecciones de la demanda eléctrica residencial sin variable externa y con variable externa. Como se puede observar, para algunas regiones el error era menor al no considerar variables externas, sin embargo, al realizar un promedio de todas las regiones del país el modelo con variable externa tiene un error de menor valor, razón por la cual se utilizó en las proyecciones de demanda.

Tabla F.1: Efecto de las variables externas en la proyección de la demanda eléctrica

Región	ARIMA	ARIMAX
Arica-Parinacota	1.262036	1.336518
Tarapacá	1.438207	1.630624
Antofagasta	2.916131	2.909255
Atacama	2.739747	2.995006
Coquimbo	3.912793	3.749755
Valparaíso	1.503555	1.468356
RM	1.759928	1.690423
O'Higgins	1.655503	1.691371
Maule	2.162392	2.073058
Ñuble	1.253379	1.332278
Bio-Bio	2.405456	2.366747
Araucanía	2.666866	2.547002
Los Ríos	2.609934	2.37462
Los Lagos	2.495565	2.271667
Aysén	1.581715	1.543766
Magallanes	1.513002	1.534067
Promedio	2.11726306	2.09465706

Anexo G

Ponderadores de Calor

En las Tablas G.1, G.2 y G.3 se observan los ponderadores de calor del año 2018 asociados a las diferentes zonas geográficas de Chile. Al considerar estos ponderadores y los de la Tabla 4.12, de la sección metodología, se construyó una ecuación punto-pendiente para encontrar los ponderadores en el futuro, ver Tablas G.4, G.5, G.6 y G.7. Estos cálculos están basados en el documento [2].

Tabla G.1: Ponderadores del Norte Grande, Norte Chico y la Región de Valparaíso. Fuente: [2]

Item	λ_{2018}
Ducha	0.258
Tina	0.014
Lavado de loza	0.039
Cocina y horno	0.084
Secado de ropa	0.021
Calefacción central	0.001
Calefactores	0.162
Microondas	0.005
Hornillo eléctrico	0.004
Hervidor	0.003
Plancha	0.013
Cafetera	0.002
Total Calor	0.606
Total Hogar: 3943 [kWh]	1

Tabla G.2: Ponderadores de la zona central, centro-sur y la región de Los Ríos. Fuente: [2]

Item	λ_{2018}
Ducha	0.176
Tina	0.007
Lavado de loza	0.028
Cocina y horno	0.043
Secado de ropa	0.018
Calefacción central	0.016
Calefactores	0.475
Microondas	0.003
Hornillo eléctrico	0.002
Hervidor	0.011
Plancha	0.005
Cafetera	0.001
Total Calor	0.785
Total Hogar: 7869 [kWh]	1

Tabla G.3: Ponderadores del la zona sur, sin considerar a la región de Los Ríos. Fuente: [2]

Item	λ_{2018}
Ducha	0.067
Tina	0.003
Lavado de loza	0.021
Cocina y horno	0.018
Secado de ropa	0.003
Calefacción central	0.052
Calefactores	0.774
Microondas	0.001
Hornillo eléctrico	0
Hervidor	0.005
Plancha	0.001
Cafetera	0
Total Calor	0.945
Total Hogar: 25697 [kWh]	1

En las Tablas G.4, G.5, G.6 y G.7 se muestran los ponderadores de calor utilizados para determinar la demanda de calor residencial año por año. Es relevante recordar que la demanda de calor se obtiene al multiplicar estos ponderadores por la demanda energética total que se encuentra en las Tablas A.1, A.2, A.3, A.4, A.5 y A.6 del anexo A.

Es importante mencionar que ZT1 y ZT2 representan a las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo. ZT3, ZT4 y ZT5 representan a las regiones RM, OHiggins, Maule, Ñuble, Bio-Bio, Araucanía y Los Ríos y ZT6 y ZT7 representan a las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes.

Tabla G.4: Ponderadores de calor para las diferentes zonas geográficas

Año	Nacional	ZT1 y ZT2	ZT3, ZT4 y ZT5	ZT6 y ZT7
2009	0.81	0.66	0.83	0.99
2010	0.81	0.65	0.83	0.99
2011	0.8	0.64	0.82	0.98
2012	0.8	0.64	0.82	0.98
2013	0.79	0.63	0.81	0.97
2014	0.78	0.63	0.81	0.97
2015	0.78	0.62	0.8	0.96
2016	0.77	0.62	0.8	0.96
2017	0.77	0.61	0.79	0.95
2018	0.76	0.61	0.79	0.95
2019	0.76	0.6	0.78	0.94
2020	0.75	0.6	0.77	0.93
2021	0.75	0.59	0.77	0.93
2022	0.74	0.58	0.76	0.92
2023	0.74	0.58	0.76	0.92
2024	0.73	0.57	0.75	0.91
2025	0.72	0.57	0.75	0.91
2026	0.72	0.56	0.74	0.9
2027	0.71	0.56	0.74	0.9
2028	0.71	0.55	0.73	0.89
2029	0.7	0.55	0.72	0.88
2030	0.7	0.54	0.72	0.88
2031	0.69	0.53	0.71	0.87
2032	0.69	0.53	0.71	0.87
2033	0.68	0.52	0.7	0.86
2034	0.68	0.52	0.7	0.86
2035	0.67	0.51	0.69	0.85
2036	0.66	0.51	0.69	0.85
2037	0.66	0.5	0.68	0.84
2038	0.65	0.5	0.68	0.84
2039	0.65	0.49	0.67	0.83
Promedio	0.73	0.57	0.75	0.91

Tabla G.5: Ponderadores de calefacción para las diferentes zonas geográficas

Año	Nacional	ZT1 y ZT2	ZT3, ZT4 y ZT5	ZT6 y ZT7
2009	0.55	0.21	0.54	0.87
2010	0.54	0.2	0.53	0.87
2011	0.54	0.2	0.53	0.86
2012	0.53	0.19	0.52	0.86
2013	0.53	0.19	0.52	0.85
2014	0.52	0.18	0.51	0.85
2015	0.52	0.18	0.51	0.84
2016	0.51	0.17	0.5	0.84
2017	0.51	0.17	0.5	0.83
2018	0.5	0.16	0.49	0.83
2019	0.5	0.16	0.49	0.82
2020	0.49	0.15	0.48	0.82
2021	0.49	0.15	0.48	0.81
2022	0.48	0.14	0.47	0.81
2023	0.48	0.14	0.47	0.8
2024	0.47	0.13	0.46	0.8
2025	0.47	0.13	0.46	0.79
2026	0.46	0.12	0.45	0.78
2027	0.45	0.12	0.44	0.78
2028	0.45	0.11	0.44	0.77
2029	0.44	0.11	0.43	0.77
2030	0.44	0.1	0.43	0.76
2031	0.43	0.1	0.42	0.76
2032	0.43	0.09	0.42	0.75
2033	0.42	0.09	0.41	0.75
2034	0.42	0.08	0.41	0.74
2035	0.41	0.08	0.4	0.74
2036	0.41	0.07	0.4	0.73
2037	0.4	0.07	0.39	0.73
2038	0.4	0.06	0.39	0.72
2039	0.39	0.06	0.38	0.72
Promedio	0.47	0.13	0.46	0.80

Tabla G.6: Ponderadores de agua caliente sanitaria para las diferentes zonas geográficas

Año	Nacional	ZT1 y ZT2	ZT3, ZT4 y ZT5	ZT6 y ZT7
2009	0.21	0.34	0.24	0.12
2010	0.21	0.33	0.23	0.11
2011	0.21	0.33	0.23	0.11
2012	0.21	0.33	0.23	0.11
2013	0.2	0.33	0.23	0.11
2014	0.2	0.32	0.22	0.1
2015	0.2	0.32	0.22	0.1
2016	0.19	0.32	0.22	0.1
2017	0.19	0.31	0.21	0.09
2018	0.19	0.31	0.21	0.09
2019	0.19	0.31	0.21	0.09
2020	0.18	0.31	0.21	0.09
2021	0.18	0.3	0.2	0.08
2022	0.18	0.3	0.2	0.08
2023	0.17	0.3	0.2	0.08
2024	0.17	0.29	0.19	0.07
2025	0.17	0.29	0.19	0.07
2026	0.17	0.29	0.19	0.07
2027	0.16	0.29	0.19	0.07
2028	0.16	0.28	0.18	0.06
2029	0.16	0.28	0.18	0.06
2030	0.15	0.28	0.18	0.06
2031	0.15	0.27	0.17	0.05
2032	0.15	0.27	0.17	0.05
2033	0.15	0.27	0.17	0.05
2034	0.14	0.27	0.17	0.05
2035	0.14	0.26	0.16	0.04
2036	0.14	0.26	0.16	0.04
2037	0.13	0.26	0.16	0.04
2038	0.13	0.25	0.15	0.03
2039	0.13	0.25	0.15	0.03
Promedio	0.17	0.29	0.19	0.07

Tabla G.7: Ponderadores en la cocción de alimentos sanitaria para las diferentes zonas geográficas

Año	Nacional	ZT1 y ZT2	ZT3, ZT4 y ZT5	ZT6 y ZT7
2009	0.04	0.08	0.05	0.01
2010	0.04	0.09	0.05	0.01
2011	0.05	0.09	0.05	0.01
2012	0.05	0.09	0.05	0.02
2013	0.05	0.09	0.05	0.02
2014	0.05	0.09	0.05	0.02
2015	0.05	0.09	0.06	0.02
2016	0.05	0.1	0.06	0.02
2017	0.06	0.1	0.06	0.02
2018	0.06	0.1	0.06	0.02
2019	0.06	0.1	0.06	0.03
2020	0.06	0.1	0.06	0.03
2021	0.06	0.1	0.06	0.03
2022	0.06	0.1	0.07	0.03
2023	0.06	0.11	0.07	0.03
2024	0.07	0.11	0.07	0.03
2025	0.07	0.11	0.07	0.03
2026	0.07	0.11	0.07	0.04
2027	0.07	0.11	0.07	0.04
2028	0.07	0.11	0.07	0.04
2029	0.07	0.11	0.08	0.04
2030	0.07	0.12	0.08	0.04
2031	0.08	0.12	0.08	0.04
2032	0.08	0.12	0.08	0.04
2033	0.08	0.12	0.08	0.05
2034	0.08	0.12	0.08	0.05
2035	0.08	0.12	0.09	0.05
2036	0.08	0.12	0.09	0.05
2037	0.09	0.13	0.09	0.05
2038	0.09	0.13	0.09	0.05
2039	0.09	0.13	0.09	0.06
Promedio	0.07	0.11	0.07	0.033

En la Tabla G.8 se muestran los ponderadores de la electrificación del calor residencial.

Tabla G.8: Ponderadores para la electrificación del calor

Zona	Y_t Calor	Y_t Calefacción	Y_t ACS	Y_t Cocina
ZT1 y ZT2	0.2638	0.1364	-	0.3946
ZT3 ZT4 y ZT5	0.2249	0.2118	0.1486	0.2770
ZT6 y ZT7	0.2695	0.0591	0.2016	0.3157

Anexo H

Repositorio

Se crea un repositorio con las bases datos de la demanda eléctrica, el gas licuado de petróleo, el gas natural, la leña y las variables externas utilizadas.

También se incluye una carpeta titulada ‘Modelos y proyecciones’ en la cual se encuentran todos los códigos utilizados en el software R y los archivos de excel necesarios para replicar el trabajo.

Por último, en el drive se encuentra un archivo excel titulado resultados que muestran todos los resultados del trabajo a nivel regional, zona geográfica y a nivel nacional.

El enlace es el siguiente:

<https://drive.google.com/drive/folders/1v5Vc428NCIoaSu9jbNsSfVty8VILSuf8?usp=sharing>