



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UNA PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA
PROYECCIÓN DE DEMANDA POR PARTICIPANTE CONSUMIDOR PARA EL CÁLCULO DE
LA DEMANDA FIRME EN EL MERCADO MAYORISTA**

Edwin Geovanny Guzman Caniche

Asesorado por el Mtro. Ing. Juan Carlos Pozuelos Buezo

Guatemala, abril de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UNA PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA
PROYECCIÓN DE DEMANDA POR PARTICIPANTE CONSUMIDOR PARA EL CÁLCULO DE
LA DEMANDA FIRME EN EL MERCADO MAYORISTA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

EDWIN GEOVANNY GUZMAN CANICHE

ASESORADO POR EL MTRO. ING. JUAN CARLOS POZUELOS BUEZO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. José Guillermo Bedoya Barrios
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonzo Rivera Carrillo
EXAMINADOR	Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UNA PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA
PROYECCIÓN DE DEMANDA POR PARTICIPANTE CONSUMIDOR PARA EL CÁLCULO DE
LA DEMANDA FIRME EN EL MERCADO MAYORISTA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 30 de octubre de 2021.

Edwin Geovanny Guzman Caniche



EEPFI-PP-0083-2022

Guatemala, 12 de enero de 2022

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA PROYECCIÓN DE DEMANDA POR PARTICIPANTE CONSUMIDOR PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA FIRME EN EL MERCADO MAYORISTA**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Todas las áreas - Proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado**, presentado por el estudiante **Edwin Geovanny Guzman Caniche** carné número **200914984**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Gestion De Mercados Electricos Regulados.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

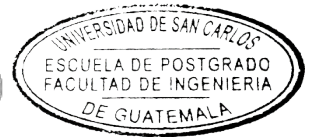
Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Juan Carlos Pozuelos Buezo
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 7702

Mtro. Juan Carlos Pozuelos Buezo
Asesor(a)

Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador(a) de Maestría



Mtro. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0083-2022

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA PROYECCIÓN DE DEMANDA POR PARTICIPANTE CONSUMIDOR PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA FIRME EN EL MERCADO MAYORISTA**, presentado por el estudiante universitario **Edwin Geovanny Guzman Caniche**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, enero de 2022

LNG.DECANATO.OI.256.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN DE UNA PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA PROYECCIÓN DE DEMANDA POR PARTICIPANTE CONSUMIDOR PARA EL CÁLCULO DE LA DEMANDA FIRME EN EL MERCADO MAYORISTA**, presentado por: **Edwin Geovanny Guzman Caniche**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, abril de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por bendecirme enormemente cada día y haberme permitido cumplir esta meta.
- Mis padres** Juan Guzman y Juana Caniche, por todo su amor, esfuerzo y apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida.
- Mi esposa** Mayra Josefina García, por ser el complemento de mi vida, por su apoyo, comprensión, paciencia e impulsarme a finalizar esta meta, pero sobre todo su amor y cariño.
- Mis hermanos** Por el apoyo y ejemplo que me han dado en la vida.
- Familia y amigos** A cada uno de los miembros de mi familia, mis suegros, cuñados, y sobrinos, por todas sus muestras de cariño y apoyo.
- Amigos** A todos mis amigos, en especial a los del grupo juvenil Seguimiento, donde encontré a mis mejores amigos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios que me formó académicamente y me nutrió de conocimientos. Infinitas gracias a mi <i>alma mater</i> .
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los conocimientos en la carrera que me apasiona y me han permitido realizar este trabajo de graduación.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por dame la oportunidad de finalizar el ciclo de pregrado y permitir seguirme especializando en mercados eléctricos.
Mi asesor	Juan Carlos Pozuelos, por su amistad y apoyo en el desarrollo de este trabajo de graduación.
Administrador del Mercado Mayorista	Por permitir desarrollarme profesionalmente, y conocer a grandes profesionales, en especial al departamento de Estudios Eléctricos.
Mis amigos	Por las experiencias vividas y su apoyo en la Universidad, tanto de pregrado como de postgrado.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
3.1. Contexto general	9
3.2. Descripción del problema	9
3.3. Formulación del problema	11
3.3.1. Pregunta central	11
3.3.2. Preguntas auxiliares	11
3.4. Delimitación del problema	12
3.4.1. Delimitación contextual	12
3.4.2. Delimitación geográfica	12
3.4.3. Delimitación temporal	13
4. JUSTIFICACIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
5.1. General	17
5.2. Específicos	17

6.	NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	19
7.	MARCO TEÓRICO	21
7.1.	Mercado Mayorista de Electricidad en Guatemala.....	21
7.1.1.	Marco Institucional	22
7.1.1.1.	Ministerio de Energía y Minas	22
7.1.1.2.	Comisión Nacional de Energía Eléctrica.....	23
7.1.1.3.	Administrador del Mercado Mayorista ..	24
7.1.1.4.	Agentes y participantes del Mercado Mayorista.....	24
7.1.2.	Marco legal.....	25
7.1.3.	Operación del mercado eléctrico de Guatemala	26
7.2.	Demanda eléctrica	28
7.2.1.	Características de la demanda eléctrica	28
7.2.2.	Tipos de consumidores de carga	30
7.2.2.1.	Cargas industriales.....	30
7.2.2.2.	Cargas comerciales.....	30
7.2.2.3.	Cargas residenciales.....	31
7.2.2.4.	Otras cargas.....	31
7.2.3.	Factores que afectan la demanda eléctrica.....	31
7.2.3.1.	Clima	32
7.2.3.2.	Variables socioeconómicas	33
7.2.3.3.	Variables demográficas.....	33
7.2.3.4.	Variables temporales/estacionales	34
7.3.	Oferta y demanda firme.....	35
7.3.1.	Oferta Firme	35
7.3.2.	Oferta Firme Eficiente	37
7.3.3.	Demanda Máxima Proyectada	38

7.3.4.	Demanda Firme	38
7.3.5.	Cálculo de la Demanda Firme	39
7.3.5.1.	Declaración de los participantes consumidores	41
7.3.5.2.	Base de datos de demanda	42
7.3.5.3.	Proyección de la demanda	42
7.3.5.4.	Procedimiento de verificación	43
7.3.5.5.	Determinación de la demanda firme	43
7.3.5.6.	Demanda firme de participantes consumidores nuevos	43
7.4.	Pronósticos	44
7.4.1.	Definición	44
7.4.2.	Horizontes de tiempo de los pronósticos	45
7.4.2.1.	Pronósticos a corto plazo	46
7.4.2.2.	Pronósticos a mediano plazo.....	46
7.4.2.3.	Pronósticos a largo plazo	47
7.4.3.	Métodos de pronósticos.....	47
7.4.3.1.	Pronósticos cualitativos	48
7.4.3.2.	Pronósticos cuantitativos	48
7.4.3.2.1.	Series de tiempo.....	49
7.4.3.2.2.	Métodos causales.....	52
7.4.3.3.	Inteligencia artificial	53
7.4.3.3.1.	Redes Neuronales Artificiales	54
7.4.3.3.2.	Sistemas expertos	55
7.4.3.3.3.	Lógica difusa	55
7.4.3.3.4.	Razonamiento inductivo Fuzzy.....	55
7.4.3.3.5.	Algoritmos genéticos	56

8.	PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	57
9.	METODOLOGÍA	61
9.1.	Características del estudio	61
9.2.	Unidades de análisis	62
9.3.	Variables	62
9.4.	Fases del estudio	64
9.4.1.	Fase 1: exploración bibliográfica	64
9.4.2.	Fase 2: cálculo del error de pronóstico obtenido con la metodología actual.....	64
9.4.3.	Fase 3: selección de modelos y proyección de demanda por participantes consumidores con los modelos seleccionados	65
9.4.4.	Fase 4: creación de herramienta computacional para proyección de demanda por participante consumidor en el mercado mayorista.....	67
9.5.	Resultados esperados.....	68
10.	TECNICAS DE ANÁLISIS.....	69
10.1.	Muestreo no probabilístico	69
10.2.	Regresión exponencial linealizado	69
10.3.	Redes neuronales artificiales	70
10.4.	Árbol de decisiones	70
10.5.	Error Porcentual Medio Absoluto	71
10.6.	Análisis aritmético y estadístico	71
10.7.	Gráficas.....	71
11.	CRONOGRAMA	73

12.	FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	75
13.	REFERENCIAS.....	77
14.	APÉNDICES.....	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Esquema de solución	19
2.	Marco legal del sector eléctrico de Guatemala.....	26
3.	Curva de carga típica del SNI de Guatemala año 2021	29
4.	Procedimiento para el cálculo de la demanda firme.....	40
5.	Patrón aleatorio de demanda	49
6.	Ejemplos de tendencias	50
7.	Patrón estacional de demanda.....	51
8.	Cronograma de actividades.....	73

TABLAS

I.	Principales funciones de la CNEE.....	23
II.	Requerimiento para ser agentes del MM	24
III.	Características de la operación del MM de Guatemala.....	27
IV.	Cálculo de Oferta Firme por tipo de tecnología de generación	36
V.	Información para declarar por participantes consumidores para el cálculo de demanda firme	41
VI.	Definición teórica y operativa de variables	62
VII.	Clasificación de las variables	63
VIII.	Recursos necesarios para la investigación	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
\$	Dólar estadounidense
h	Horas
=	Igual que
kW	Kilovatio
kV	Kilovoltio
>	Mayor que
MW	Megavatio
MWh	Megavatio-hora
<	Menor que
%	Porcentaje
P	Potencia
Q	Quetzales
W	Vatio

GLOSARIO

Agentes de mercado	Son los encargados de producir, llevar y vender la energía al usuario final. Se distribuyen en: Generadores, Distribuidores, Transportistas y Comercializadores.
AMM	Administrador del Mercado Mayorista. Operador del sistema y mercado eléctrico de Guatemala.
CNEE	Comisión Nacional de Energía Eléctrica. Ente regulador del mercado eléctrico de Guatemala.
Comercializador	Persona individual o jurídica, cuya actividad consiste en comprar y vender bloques de energía eléctrica con carácter de intermediación y sin participación en la generación, transporte, distribución y consumo.
Demanda eléctrica	Cantidad de energía o potencia que es consumida por una carga, en un momento o período determinado.
Demanda firme	Es la parte de la Demanda Máxima Proyectada que le corresponde a cada participante consumidor y se requiere que en todo momento el consumidor lo mantenga cubierto a través de contratos.

Despacho económico	Es el despacho de las unidades de generación optimizado al mínimo costo para garantizar el abastecimiento de la demanda del Sistema Nacional Interconectado.
Distribuidor	Encargado de llevar la electricidad desde las redes de transporte de alta tensión, hasta los diferentes puntos de consumo.
DMP	Demanda Máxima Proyectada. Es el mayor requerimiento de potencia anual para el Mercado Mayorista.
Exportador	Es el participante del Mercado Mayorista que realiza actividades de exportación de energía eléctrica.
Gran Usuario	Es el participante del Mercado Mayorista que realiza sus compras de potencia y energía por medio de contratos a término, en el mercado de oportunidad, o mediante un contrato de comercialización con un comercializador.
LGE	Ley General de Electricidad. Norma el desarrollo del conjunto de actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad.
MAPE	Error porcentual absoluto medio, es una medida de la precisión de la predicción de un método de predicción en estadística.

MATLAB	Es una plataforma de programación y computación numérica utilizada para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos.
Microsoft Excel	Programa informático que permite a los usuarios elaborar tablas, gráficas y formatos que incluyan cálculos matemáticos mediante fórmulas.
MM	Mercado Mayorista. Es el conjunto de operaciones de compra y venta de bloques de potencia y energía que se efectúan a corto y a largo plazo entre agentes del mercado.
NCC	Norma de Coordinación Comercial. Normas utilizadas para la coordinación comercial del mercado mayorista en Guatemala.
OFE	Oferta Firme Eficiente. Es la cantidad máxima de potencia de una unidad, central generadora o Transacción Internacional que puede comprometerse en contratos para cubrir la demanda firme.
Participante Consumidor	Para propósitos de coordinación operativa y comercial, se denomina así a los Distribuidores, Comercializadores con actividad de exportación y Grandes Usuarios.
Proyección	Estimación de una variable para un tiempo futuro, basado en su comportamiento en el pasado.

RAMM	Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista.
RLGE	Reglamento de la Ley General de Electricidad.
SNI	Sistema Nacional Interconectado. Es el sistema encargado de generar, transmitir y distribuir toda la energía eléctrica que se produce en Guatemala.
Transportista	Es la persona, individual o jurídica, poseedora de instalaciones destinadas a realizar la actividad de transmisión y transformación de electricidad.

RESUMEN

En los sistemas eléctricos, es de suma importancia conocer con anticipación ciertas variables como la demanda, para realizar una buena planificación. En el mercado eléctrico de Guatemala, anualmente se realiza la proyección de demanda para cada participante consumidor, para el cálculo de su demanda firme. Esta demanda es la que deberá cubrir a través de contratos. En la metodología utilizada actualmente para este fin se han identificado algunos aspectos que pueden introducir error y otros que no son tomados en cuenta al momento de realizar el pronóstico.

En el presente estudio, se plantea si es posible desarrollar una metodología para la proyección de demanda por participante consumidor, que logre reducir el error de pronóstico obtenido con la metodología actual. Para lograrlo se busca proponer una metodología, que logre utilizar suficientes datos históricos disponibles de cada consumidor.

Se eligieron dos modelos basados en inteligencia artificial, para realizar la nueva propuesta de proyección de demanda, lograr procesar suficientes datos históricos y realizar la proyección de cada participante por separado. Los resultados que se esperan son: 1. obtener el modelo que logre reducir en mayor medida el error de pronóstico actual. 2. implementarlo en una herramienta computacional, para reducir los recursos invertidos actualmente y 3. obtener mejores proyecciones de demanda de cada participante consumidor. De esta manera, se llegará a una asignación de demanda firme más acorde a su patrón de consumo, mejorando con ello la planificación global en el sistema eléctrico de Guatemala.

1. INTRODUCCIÓN

La proyección de demanda de energía eléctrica es una parte fundamental en la planificación, a corto, mediano y largo plazo de los sistemas eléctricos de potencia, existiendo variedad de metodologías para realizarlo. Se realizan proyecciones de demanda para un país entero, pero también para usuarios específicos, llamados consumidores.

En Guatemala, existen más de 1,000 participantes consumidores, la mayoría de ellos como grandes usuarios. En el proceso de cálculo de su demanda firme anualmente se realiza la proyección de demanda para cada uno de ellos, cuyas consideraciones se establecen en la NCC-2 del Administrador del Mercado Mayorista. Debido a la cantidad de proyecciones que se debe realizar y los recursos limitados para realizar el proceso, actualmente se utiliza una metodología basada en pocos datos históricos de cada uno. Como resultado se obtiene un nivel elevado de error de pronóstico. Esto lleva a plantear si existe otra metodología que pueda procesar una mayor cantidad de datos para lograr obtener una mejor proyección de su demanda, y que se pueda aplicar a los cientos de consumidores que participan en el mercado mayorista.

La importancia de la solución radica en que una mejor proyección implica un mejor cálculo de la demanda firme de cada consumidor. La demanda firme, es la demanda que deben cubrir a través de contratos con agentes generadores que cuentan con oferta firme eficiente, lo que tiene un impacto económico considerable tanto en los consumidores como en los generadores.

En esta investigación se busca implementar una metodología para realizar la proyección de demanda por participante consumidor, que considere suficientes datos históricos de cada uno. Además, determinar los recursos tecnológicos necesarios para lograr automatizar el proceso de proyección, que reduzcan los recursos que actualmente se utilizan para tal fin. Para lograrlo, se realizó una investigación sobre las metodologías de proyección de demanda. Se eligieron dos metodologías que se adaptaban mejor a nuestras necesidades. Se tomará una muestra de participantes consumidores para realizar la proyección de demanda con la metodología actual y las propuestas. Luego se compararán los resultados para definir cual arrojó resultados con menor error de pronóstico, y aplicarlo al resto de consumidores que no fueron seleccionado en la muestra.

Los modelos elegidos para realizar la propuesta de metodología están basados en inteligencia artificial. Estos modelos ya han sido aplicados en Guatemala y en otras regiones, para realizar pronóstico de demanda global de un país, sector o usuario en específico, pero que no se encontraron antecedentes donde se aplique a una gran cantidad de consumidores, con diferentes patrones de consumo, tal como se pretende realizar en este trabajo de investigación. Se busca implementar la metodología que se pueda aplicar para realizar la proyección de demanda a los más de 1,000 participantes consumidores, y este es el reto de este estudio.

Al finalizar el estudio se espera obtener una metodología que logre reducir el error de pronóstico actual. Además, se pretende implementarlo en una herramienta computacional para lograr procesar mayor cantidad de datos históricos de cada consumidor, realizando la proyección de cada uno y con ello reducir los recursos de tiempo y personal necesarios para su aplicación. Con esto se logrará un cálculo de demanda firme para cada participante consumidor, más acorde a su patrón de consumo y se espera que logren obtener beneficios

económicos, al cubrir mediante contratos, únicamente la demanda que realmente necesita utilizar.

Se analizaron los recursos disponibles y los necesarios, tanto humanos, técnicos, económicos, entre otros, para realizar este trabajo de investigación concluyendo que es factible llevarlo a cabo y lograr finalizarlo con éxito.

El informe final de este trabajo de investigación estará comprendido por cuatro capítulos fundamentales que se describen a continuación: En el capítulo 1, es un marco referencial donde se hace una presentación de estudios previos y antecedentes que se ha realizado y están relacionados con el tema de investigación. En el capítulo 2 se realiza una exploración bibliográfica de los diferentes autores sobre estos temas, para tener un fundamento teórico. Se presentan en cuatro secciones que abarcan los temas de: Mercado Mayorista de Electricidad en Guatemala, Demanda eléctrica, Oferta y demanda firme, y Pronósticos. El capítulo 3 muestra el desarrollo de la investigación, indicando las características, variables y fases del estudio. Además, muestra cómo se obtuvieron los insumos y el análisis que se realizó de la información de la demanda de los participantes consumidores. Por último, en el capítulo 4, se presenta los resultados obtenidos con la metodología actual de proyección de demanda y los obtenidos con las metodologías propuestas, realizando la comparación entre ellos para definir cual metodología presentó un menor error de pronóstico, que es el objetivo principal de este trabajo de investigación.

2. ANTECEDENTES

El pronóstico de demanda de energía eléctrica siempre ha sido un tema muy importante en la planificación de sistemas eléctricos de potencia. Tal es su importancia que se han desarrollado distintas metodologías para realizarlo. Ariza (2013), presenta diferentes métodos que son utilizados para el pronóstico de demanda de energía eléctrica específicamente en sistemas de distribución del sistema eléctrico de Colombia, utilizando distintas clases de software. Entre los métodos presentados se encuentran: de regresión simple, regresión lineal múltiple, series de temporales, distribución de probabilidad, microáreas, redes neuronales artificiales, entre otros. Dentro de estas metodologías, el que mejor se ajustó al comportamiento de la demanda fue el método de Redes Neuronales artificiales con un coeficiente de correlación de 0.9985.

Velásquez, Franco, y García (2009), en cambio compararon el desempeño de un modelo ARIMA, un perceptrón multicapa y una red neuronal autorregresiva para pronosticar la demanda mensual de energía eléctrica en Colombia, para un mes adelante. Los resultados que obtuvieron revelaron que la red neuronal autorregresiva mostró mayor precisión entre los modelos evaluados, lo que va indicando una tendencia que las redes neuronales pueden ser la mejor opción para adoptar en la metodología que se desea proponer.

La tendencia de la mejor precisión de las redes neuronales se va afianzando cuando Sanjinés (2011), indica que los resultados con mínimo error en el pronóstico de la demanda de potencia eléctrica en Bolivia se logra utilizando redes neuronales artificiales. Además, justifica la implementación de redes neuronales artificiales en la predicción de demanda de potencia eléctrica, al

lograr un beneficio económico debido a la reducción de los costos incrementales generados por el error de pronóstico.

Para la aplicación de las redes neuronales en la proyección de demanda de energía eléctrica, se pueden utilizar distintos softwares, y San Miguel (2016) utiliza las redes neuronales para una predicción del consumo eléctrico de un hospital, utilizando Matlab. En su trabajo experimenta con las variables de entrada a la red neuronal para encontrar una solución óptima, logrando una aceptable precisión en sus pronósticos.

Morrillo (2020), también utiliza Matlab para la aplicación redes neuronales artificiales para el pronóstico de demanda de energía eléctrica, específicamente utilizando las herramientas Toolbox/Neural Network Time Series. En su caso el pronóstico de la demanda fue realizada para la Empresa Regional Norte S.A. “Emelnorte S.A.”, una distribuidora de Ecuador, y para la ciudad de Ibarra Ecuador.

En Portugal, también se han realizado investigaciones de pronósticos de demanda con inteligencia artificial logrando modelos confiables para el pronóstico de consumo de energía eléctrica. Rodrigues, Cardeira, y Calado (2014) realizaron un pronóstico de carga de corto plazo utilizando Redes Neuronales Artificiales, para pronosticar un consumo diario típico de un hogar. Para la investigación utilizaron datos con registros de consumo de energía eléctrica en 93 hogares reales de Lisboa, Portugal, entre febrero de 2000 y julio de 2001, tanto para días entre semana como para fines de semana. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que, a pesar de la imprevisibilidad del consumo, se han podido pronosticar con certeza el consumo eléctrico de un hogar.

Y es que la imprevisibilidad del consumo es uno de los principales factores que dificultan realizar un pronóstico aceptable, y son varias las causas que hace que un consumo sea imprevisible. Wallnerström, Setréus, Hilber, Tong y Bertling (2010), comentan que diferentes tipos de aspectos afectan el consumo de energía eléctrica. Entre esos aspectos mencionan la composición de la carga del cliente, el precio de la electricidad, el comportamiento diario de las personas y las condiciones climáticas. En su trabajo investigan como las condiciones meteorológicas afectan el consumo de carga en un municipio de Suecia, para ello utilizan parámetros como temperatura, velocidad y dirección del viento, nubosidad y radiación solar. Entre sus conclusiones indican que la demanda pico ocurre cuando la temperatura tiende a bajar. Para invernaderos, el número de horas con alto consumo de energía es afectado por la radiación solar. Para otras industrias el consumo está relacionado con actividades laborales.

Y en Guatemala, también se ha realizado proyectos recientes. La compañía Mathworks (2021) que es un desarrollador de software de computación matemática, comentan la historia de uno de sus usuarios. En el Administrador del Mercado Mayorista, operador del sistema eléctrico de Guatemala, se creó una herramienta en el software Matlab basada en inteligencia artificial para predecir la demanda de electricidad del sistema eléctrico de Guatemala a corto plazo mediante herramientas como Machine Learning y Deep Learning, con el cual dejaron de realizar pronósticos de demanda por medio de regresión matemática, el cual requería muchos recursos tanto humanos como de tiempo. Después de varias pruebas definieron los modelos de Redes Neuronales Artificiales y de árbol de decisión como los que arrojaron mejores resultados. Con las nuevas herramientas se logró reducir el error de predicción a menos de la mitad. Este antecedente arroja escenarios optimistas respecto a implementar la inteligencia artificial para realizar pronósticos esta vez para los participantes consumidores

de manera individual, en el proceso del cálculo de la demanda firme en el mercado mayorista de Guatemala.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En este apartado se analiza el problema de investigación, primero en su contexto general y luego profundizando en su descripción, formulación y delimitación.

3.1. Contexto general

En los sistemas eléctricos de potencia, es importante conocer con anticipación la demanda que se consumirá en corto, mediano y largo plazo. En el proceso de proyección de cálculo de la demanda firme eficiente, que realiza el operador del sistema eléctrico de Guatemala, se observan aspectos que pueden introducir error en los pronósticos y pueden ser optimizados. Además, que ciertos aspectos no son tomados en consideración al momento de la proyección que pueden influir grandemente en el resultado.

3.2. Descripción del problema

La proyección de demanda de energía eléctrica forma parte importante en la planificación de los sistemas eléctricos de potencia, ya que permite conocer con cierta precisión la demanda de energía eléctrica que se desea abastecer a corto, mediano y largo plazo, y así considerar la cantidad de generación que será requerida.

En el mercado eléctrico de Guatemala, anualmente se realiza el cálculo de la Demanda Máxima Proyectada (DMP) del Sistema Nacional Interconectado (SNI) para el año estacional siguiente, que de acuerdo con la Norma de

Coordinación Comercial No. 2 del Administrador del Mercado Mayorista (AMM), se integra sumando la potencia máxima a generar, la Reserva Rodante Regulante (RRR) y la Reserva Rodante Operativa (RRO). El operador del sistema determina el período y hora que se prevé ocurra la Demanda Máxima Proyectada.

Esta Demanda Máxima Proyectada, es distribuida entre todos los participantes consumidores, calculando para cada consumidor su demanda firme, que consiste en el pronóstico de demanda de ese consumidor en el período y hora que fue determinado que ocurra la Demanda Máxima Proyectada.

Para realizar el cálculo de la demanda firme, cada participante consumidor declara su proyección de demanda, su metodología de proyección, entre otros datos, sin embargo, no existe una metodología unificada y cada participante consumidor puede presentar la metodología que mejor se adapte a sus condiciones.

El operador del sistema por su parte realiza su propia proyección para cada participante consumidor basado en datos históricos y lo compara con el valor declarado por el consumidor. Sin embargo, para realizar esta proyección solamente se utiliza la demanda de este consumidor durante el día de demanda máxima del sistema, de los años anteriores. Es decir, solo se utiliza un dato de demanda por año, para cada consumidor. Esto puede generar errores en el pronóstico, ya que para el día de mayor demanda del SNI, algún consumidor, puede estar fuera por razones como mantenimiento o falla, como también pudo tener un consumo diferente al consumo normal. Al utilizar únicamente este dato como representativo del año completo, tiene a ingresar errores en la proyección.

Además, no existe una metodología para verificar que tan acertadas son las proyecciones con el comportamiento real, lo que no permite comprobar que la metodología utilizada sea la correcta.

Otra de las limitaciones que la metodología actual presenta, es que aún no está totalmente automatizada, por lo cual trabajar con una gran cantidad de datos requeriría una gran inversión de tiempo y recursos, si la automatización no se realiza.

3.3. Formulación del problema

Para formular el problema de investigación se tomará como base una pregunta central y tres auxiliares que se describen a continuación.

3.3.1. Pregunta central

¿Es posible desarrollar una metodología para la proyección de demanda de energía eléctrica aplicado para consumidores, que logre reducir el error en los pronósticos obtenidos con la metodología utilizada actualmente en el cálculo de la demanda firme en el Mercado Mayorista de Guatemala?

3.3.2. Preguntas auxiliares

- ¿De qué magnitud es el error de pronóstico obtenido al utilizar la metodología actual?
- ¿Qué modelos de proyección lograrán procesar mayor cantidad de datos y reducir el error de pronóstico actual?

- ¿Es posible desarrollar una herramienta computacional que logre reducir los recursos requeridos actualmente y logren mejores proyecciones de demanda?

3.4. Delimitación del problema

El trabajo de investigación que se está desarrollando tiene las siguientes delimitaciones:

3.4.1. Delimitación contextual

La metodología para la proyección de demanda que se propone se contextualiza en el elevado error que presentan las proyecciones para los participantes consumidores del mercado eléctrico de Guatemala (como lo son los distribuidores, transportistas y exportadores), que se realizan con la metodología que actualmente se utiliza en el Administrador del Mercado Mayorista, que es el ente operador del Sistema Eléctrico de Guatemala. Dicha proyección es utilizada para el cálculo de la demanda firme para cada participante consumidor de acuerdo con lo indicado en la Norma de Coordinación Comercial No. 2 del Administrador del Mercado Mayorista. Para el desarrollo de la metodología propuesta se escogerán a 20 participantes consumidores, a los cuales se les realizará el pronóstico de demanda y verificación de error de pronóstico.

3.4.2. Delimitación geográfica

El trabajo de investigación se realizará para los consumidores que participan en el mercado eléctrico de Guatemala, por lo que geográficamente se delimita en el país de Guatemala.

3.4.3. Delimitación temporal

Para el desarrollo de la metodología se utilizarán datos históricos de los últimos 5 años (2016 a 2020), para los cuales se realizará la proyección y comparación con los datos reales. Además, de la comparación del error con la metodología propuesta y la metodología que actualmente se utiliza.

4. JUSTIFICACIÓN

El trabajo de investigación que se está desarrollando se presenta dentro de la línea de investigación “Proyectos de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en un mercado eléctrico regulado” de la maestría en Gestión Mercados Eléctricos Regulados, debido a que el cálculo de la demanda firme es una gestión o proceso que se realiza anualmente entre el ente operador del Sistema Eléctrico de Guatemala con los distribuidores (distribución eléctrica), grandes usuarios y exportadores; estos dos últimos muchas veces representados por agentes comercializadores.

Es importante desarrollar este trabajo de investigación ya que una mejor proyección se traduce en un sistema eléctrico más eficiente, mejorando la planificación de la generación y contribuyendo a economizar el despacho de carga. Además, se reduce la cantidad de participantes consumidores que no están de acuerdo con su pronóstico y demanda firme calculada, lo que implícitamente reduce la cantidad de controversias que son elevadas a la Comisión Nacional de Energía Eléctrica, para la que soliciten una resolución de discrepancias entre la proyección presentada por el participante consumidor y la calculada por el Operador del Sistema y Mercado Eléctrico de Guatemala.

La misma normativa nacional da lugar a la búsqueda de mejores herramientas o modelos para realizar la proyección, indicando que mientras no exista otra mejor, se utilice la metodología que está plasmada en la norma.

Adicionalmente, utilizar recursos tecnológicos que automaticen el proceso, permite utilizar mayor cantidad de datos históricos y variables que influyen en el

pronóstico, reduciendo el error, como también permitirá reducir los tiempos invertidos actualmente y lograr mejores los resultados.

Como resultado de un mejor cálculo de demanda firme, se espera un impacto económico considerable en los contratos de potencia entre participantes consumidores y generadores, ya que los participantes consumidores deberán contratar una demanda firme más acorde a lo que realmente necesitan, evitando que contraten una potencia mayor o menor de la requerida.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Implementar una metodología para la proyección de demanda por participante, que logre reducir el error de pronóstico obtenido actualmente para cada participante consumidor en el proceso del cálculo de demanda firme.

5.2. Específicos

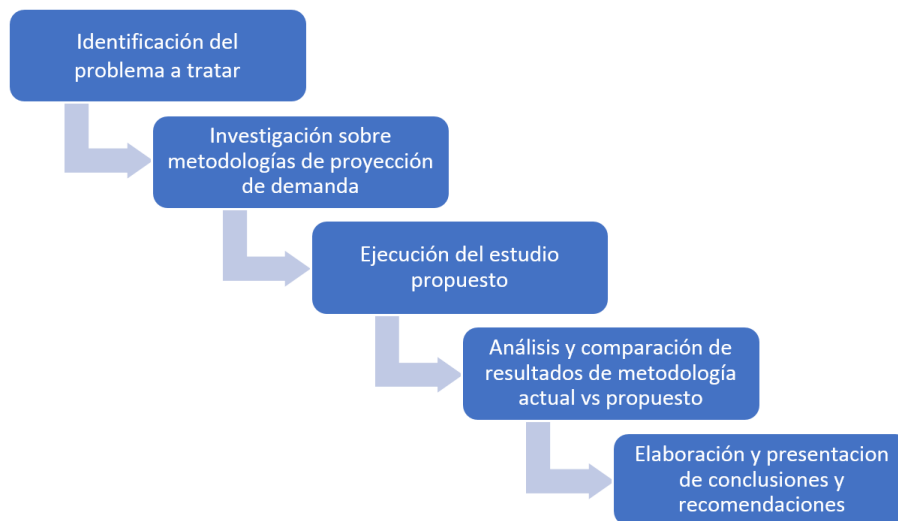
- Determinar cuantitativamente el error de pronóstico obtenido con la metodología utilizada actualmente.
- Seleccionar modelos de proyección que se adapten a las características de la información disponible de la demanda que se desea proyectar y logren reducir el error de pronóstico.
- Implementar el modelo de proyección con menor error en una herramienta computacional que sea capaz de procesar gran cantidad de datos y logre reducir los recursos de tiempo y personal requeridos actualmente.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

Con el estudio de propuesta de metodología para proyección de demanda por participante consumidor para el cálculo de demanda firme, se pretende cubrir la necesidad de obtener mejores proyecciones para los participantes consumidores que a su vez conlleven a una mejor asignación de su demanda firme. Además, también se reducen los recursos de tiempo y personal requerido para realizar esta actividad de cálculo de demanda firme, logrando obtener resultados con menor error y en un menor tiempo a los obtenidos actualmente.

Para lograr los objetivos del estudio se propone el siguiente esquema de solución:

Figura 1. Esquema de solución



Fuente: elaboración propia.

Se inicia con la identificación del problema a tratar, para ello se utilizó el método de árbol de problemas, donde se identifica el problema principal, las causas y los efectos. El árbol del problema para este estudio que se encuentra en la sección apéndices. El siguiente paso es investigar sobre las distintas metodologías existentes para proyección de demanda, conocer las ventajas y desventajas de cada uno y seleccionar las que mejor se adapten a las características de la proyección que se desea realizar.

Con las metodologías ya seleccionadas, se procede a realizar el estudio para obtener las proyecciones de demanda de los participantes consumidores, en esta parte del proceso también se realizará el cálculo de proyecciones utilizando la metodología actual, para así posteriormente proceder a realizar el análisis de los resultados y compararlos según cada tipo de metodología para determinar con cuál se obtuvo un pronóstico con un menor error. Finalizado este análisis, se procederá a elaborar y presentar las conclusiones del estudio y realizar las recomendaciones respectivas.

7. MARCO TEÓRICO

En el presente trabajo de investigación se abarcan cuatro temas principales. En el primero, describe un panorama general del mercado mayorista de electricidad de Guatemala, su marco institucional y legal, y una breve descripción de la forma en cómo se opera el mercado. En la segunda sección se tratará con detalle los conceptos de oferta y demanda firme, y el método de cálculo de la demanda firme establecido en la normativa nacional. La sección 3, se expone la teoría sobre los pronósticos, desde su definición, horizontes de estudio hasta los modelos más comunes que servirán de base para conocer cuál se adapta de mejor manera a las características de la proyección de demanda eléctrica que se desea realizar. Y en la última sección, se describen las características de la demanda eléctrica, que es la variable que será estudiada en el presente trabajo de investigación.

7.1. Mercado Mayorista de Electricidad en Guatemala

El Mercado Mayorista de Electricidad en Guatemala funciona desde 1996 como un mercado libre, cuando se abrió la libre competencia a las funciones de generación y comercialización de energía y se separaron las actividades de la industria eléctrica. Mientras los servicios de transmisión y distribución son actividades reguladas y son prestadas por empresas públicas y privadas, siendo otorgadas mediante licitación pública (Administrador del Mercado Mayorista, 2020).

Para su funcionamiento tiene bien definido un marco institucional donde se encuentran las empresas públicas y privadas con las diferentes funciones que

tiene asignados. Están regidos bajo un marco legal, que parte desde la Ley General de Electricidad hasta normas de operación comercial y operativa, que indican la forma de operar el mercado. Cada uno de los puntos anteriores ayudan a mostrar la forma en que opera el mercado eléctrico mayorista en Guatemala y son tratados en esta sección.

7.1.1. Marco Institucional

El mercado eléctrico de Guatemala funciona a través de instituciones públicas y privadas. El AMM hace una descripción de la forma en que está estructurado el mercado eléctrico de Guatemala:

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) que tiene como principal función el dictar la Política Energética, Planes de Expansión de la Generación y la Transmisión, entre otros. Jerárquicamente, debajo de éste, se encuentra la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) que regula el funcionamiento del mercado eléctrico de Guatemala El operador del sistema y del mercado funcionan como una empresa privada sin fines de lucro denominada Administrador del Mercado Mayorista la cual es supervisada por CNEE, que está a cargo de la operación del sistema eléctrico de Guatemala y la liquidación de las transacciones realizadas en el mercado. El AMM proporciona un espacio donde se reúnen los Agentes del Mercado para realizar operaciones de compra-venta de energía eléctrica (Administrador del Mercado Mayorista, 2020, p. 6)

7.1.1.1. Ministerio de Energía y Minas

Las funciones del Ministerio de Energía y minas (MEM) referente al sector energético son indicados en el artículo 3 de la Ley General de Electricidad (LGE)

donde se expresa que el MEM “es el órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico y aplicar esta ley y su reglamento” (Ley General de Electricidad, 1996, p. 4).

En el Reglamento de la Ley General de Electricidad (1997) también se indica el MEM es el encargado de emitir las autorizaciones definitivas para plantas de generación hidroeléctrica y geotérmica, transporte y distribución y elaborar el Plan de Expansión del Sistema de Transporte.

7.1.1.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) es considerada como el ente regulador. El artículo 4 de la LGE (1996) indica que esta institución es el órgano técnico del MEM, que tendrá independencia funcional y define sus funciones. Entre las principales funciones de la CNEE que se mencionan en la LGE se listan en la tabla I.

Tabla I. Principales funciones de la CNEE

No.	Función
1	Cumplir y hacer cumplir la LGE y sus reglamentos.
2	Prevenir conductas contra la libre competencia.
3	Prevenir conductas contra la libre competencia.
4	Dirimir controversias que surjan entre los agentes del subsector eléctricos.
5	Emitir normas técnicas relativas al subsector eléctrico.
6	Emitir disposiciones y normativas que garanticen el libre acceso y uso de instalaciones de transmisión y distribución.

Fuente: elaboración propia, con información obtenida de Decreto 93-96 (1996).

Ley general de electricidad.

7.1.1.3. Administrador del Mercado Mayorista

El Administrador del Mercado Mayorista, es el ente operador y es definido como “el ente encargado de la administración y coordinación del Mercado Mayorista” (Reglamento del administrador del mercado mayorista, 1998, p. 65).

Dentro de sus principales funciones se mencionan: coordinación de la operación de centrales de generación, interconexiones internacionales y líneas de transmisión, establecer precios de mercado a corto plazo para transferencias de potencia y energía entre los agentes del mercado cuando no correspondan contratos pactados y garantizar la seguridad y abastecimiento de la energía eléctrica en el país (Administrador del Mercado Mayorista, s.f.).

7.1.1.4. Agentes y participantes del Mercado Mayorista

Los agentes del mercado mayorista son definidos en el artículo 39 del RLGE indicando que son los generadores, comercializadores, distribuidores, importadores, exportadores y transportistas, que cumplan con ciertos parámetros, que se indican en la tabla II:

Tabla II. **Requerimiento para ser agentes del MM**

No.	Tipo de Agente	Requerimiento
1	Generadores	tener una Potencia Máxima mayor de cinco megavatios (5 MW).
2	Comercializadores	comprar o vender bloques de energía asociados a una Oferta Firme Eficiente o Demanda Firme de por lo menos dos megavatios (2 MW).
3	Distribuidores	tener un mínimo de 15,000 usuarios.
4	Transportistas	tener una capacidad de transmisión mínima de 10 MW.

Fuente: elaboración propia, con información obtenida de Acuerdo Gubernativo 256-97 (1997).

Reglamento de la ley general de electricidad

En cuanto a los participantes del mercado mayorista, en el RLGE se definen como “el conjunto de los agentes del Mercado Mayorista más el conjunto de las empresas que sin tener esta última condición realizan transacciones económicas en el Mercado Mayorista” (Acuerdo Gubernativo No. 256-97, 1997, p. 23). Entre los participantes no se toman en consideración a los usuarios de distribución sujetos a precios regulados, pero adicionalmente a los agentes mencionados con anterioridad, sí entran dos figuras que, aunque no son considerados agentes, si son participantes del mercado mayorista, estos son los grandes usuarios y los generadores distribuidos renovables. Estos deben cumplir los siguientes parámetros:

- Grandes usuarios: Consumidor de energía cuya demanda de potencia sea mayor a 100 kW (Reglamento de la ley general de electricidad, 1997).
- Generador Distribuido Renovable (GDR): generador cuya tecnología de generación utiliza recursos renovables, que se conecten a instalaciones de distribución y cuyo aporte sea igual o menor a 5 MW (Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía -NTGDR-, 2014).

7.1.2. Marco legal

El marco legal con el cual es regida la operación del mercado cuenta “con vigencia desde 1996, que se ha caracterizado por mantener certeza jurídica, estabilidad y congruencia desde la promulgación de la LGE hasta sus normas operativas para el correcto funcionamiento del mercado y del sistema” (Administrador del Mercado Mayorista, 2020, p. 7).

En la figura No. 2 se observa la estructura del marco legal donde en primer lugar se encuentra la ley suprema de la República de Guatemala que es la

Constitución Política de la República de Guatemala, luego la Ley General de Electricidad y su Reglamento, que dieron lugar al Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista. En el mismo rango se encuentran los Acuerdos gubernativos. Y en un rango inferior se encuentran los acuerdos ministeriales emitidos por el MEM. Por último, se encuentran las resoluciones y normas técnicas emitidas por la CNEE y las normas de coordinación comercial y operativa del AMM. Este grupo de leyes, acuerdos y normas son las encargadas de regular el funcionamiento del mercado eléctrico mayorista de Guatemala (Administrador del Mercado Mayorista, 2020).

Figura 2. **Marco legal del sector eléctrico de Guatemala**



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala*.

7.1.3. **Operación del mercado eléctrico de Guatemala**

El mercado eléctrico de Guatemala es considerado como un mercado de costos, por lo que para la asignación de productos se utiliza el costo variable de

generación (CVG) declarado por las centrales generadoras del SNI. El Administrador del Mercado Mayorista (2020), describe 6 características fundamentales en los que se basa la operación del mercado eléctrico de Guatemala, que son:

Tabla III. **Características de la operación del MM de Guatemala**

No.	Característica	Descripción
1	Demanda Firme y Oferta Firme Eficiente	Los participantes consumidores de forma obligatoria deberán tener contratada su demanda de potencia para un año de duración, para lo cual el AMM le calculará su demanda firme y que el participante consumidor deberá cubrir con oferta firme eficiente mediante un contrato con los participantes generadores que lo posean.
2	Despacho económico de generación	Con el costo variable de generación declarado por las centrales de generación, se realiza una lista de mérito. El mercado es optimizado mediante un despacho económico que consiste en utilizar la oferta disponible para abastecer la demanda prevista minimizando el costo total de la operación.
3	Servicios de transmisión	Este servicio incluye el peaje que es fijado por la CNEE y se liquida según los acuerdos alcanzados entre agentes.
4	Servicios complementarios	Incluye principalmente reservas operativas (primaria, secundaria, terciaria), regulación de frecuencia, control de potencia reactiva y tensión y arranque en negro.
5	Generación forzada	Es la generación que no es requerida por el despacho económico pero que es arrancada para cumplir requerimiento de seguridad operativa, calidad de servicio, exportaciones, entre otros.
6	Otros cargos	Para operar en el mercado mayorista de Guatemala, se deben cancelar cargos por habilitación para realizar transacciones en el mercado mayorista (cuota AMM), y también cargos para realizar transacciones en el MER si se desea participar en este mercado.

Fuente: elaboración propia, con información obtenida de Administrador del Mercado Mayorista (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala*.

7.2. Demanda eléctrica

Al hacer referencia a la energía eléctrica, la demanda es la cantidad de energía o potencia que es consumida por una carga, en un momento o período determinado (Santillán y Pallo, 2019).

La demanda puede ser dada para un consumidor o usuario en particular, una ciudad o un país completo. En la presente sección se describen características de la demanda eléctrica según los tipos de carga, hora del día, día de la semana y los diversos factores que influyen en el comportamiento que pueden llegar a ser útiles de considerar en las proyecciones.

7.2.1. Características de la demanda eléctrica

Entre las características principales de la demanda es que es variante en el tiempo y puede ir mostrando patrones de consumo. En una curva típica de demanda horaria es posible observar que el consumo está relacionado al horario, y en mayoría de sistemas eléctricos de potencia se pueden clasificar en tres períodos: demanda máxima, demanda media y demanda mínima (Santillán y Pallo, 2019).

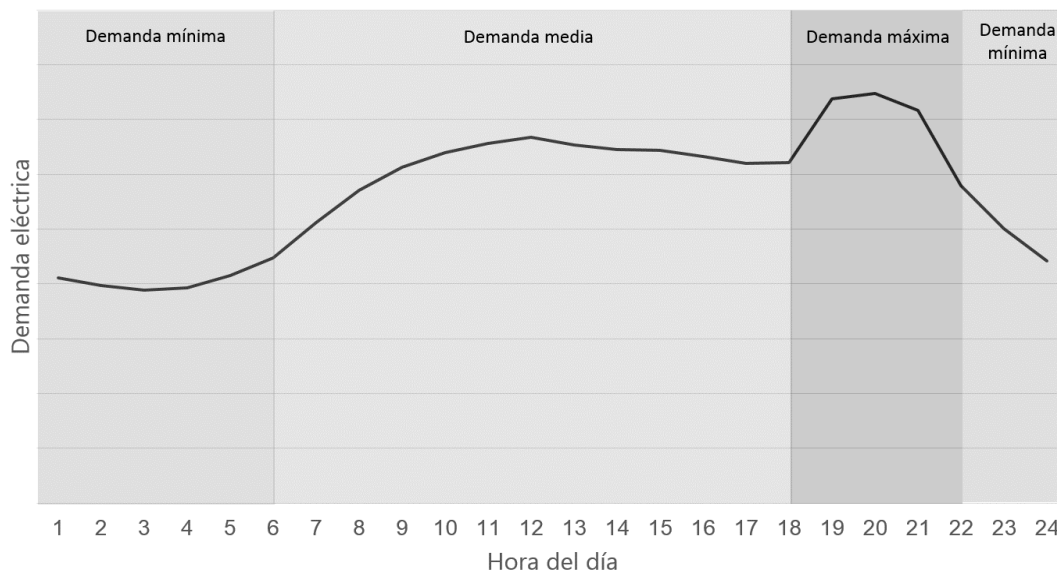
La curva de carga horaria es diferente para cada consumidor y está relacionado a sus patrones de consumo. Es diferente una curva de carga de un usuario residencial que el de uno industrial, dado que las horas de mayor consumo generalmente son diferentes en cada uno. Los sistemas eléctricos de potencia también presentan curvas típicas de carga que son característicos de cada país. Algunos tienen bien definido los períodos del día en los que ocurre la demanda máxima, media y mínima, en otros países la curva es muy plana que es difícil separar los períodos horarios. Normalmente el período de demanda

mínima ocurre en horas de la madrugada, la demanda media en el transcurso del día y la demanda máxima ocurre al entrar la noche típicamente alrededor de las 19 horas.

En la figura No. 3 se observa una curva típica de demanda del Sistema eléctrico de Guatemala para el año 2021, en el cual se observan las bandas horarias donde se distinguen los períodos de demanda máxima, media y mínima. En el artículo 87 del RAMM se definen los períodos de las tres bandas horarias de la siguiente manera:

- Período de demanda máxima: 18 a 22 horas
- Período de demanda media: 06 a 18 horas
- Período de demanda mínima: 22 a 06 horas

Figura 3. **Curva de carga típica del SNI de Guatemala año 2021**



Fuente: Elaboración propia, con datos obtenidos del AMM. Posdespachos publicados del 01/01/2021 al 11/08/2021.

7.2.2. Tipos de consumidores de carga

Existen diferentes tipos de usuarios de energía eléctrica cuyos patrones de consumo difiere entre ellos. Santillán y Pallo (2019) resaltan tres sectores importantes de consumo que son el sector industrial, comercial y residencial. Además, mencionan otros tipos de carga que debido a su patrón de consumo no se puede englobar dentro de alguno de los tres sectores mencionados con anterioridad. A continuación, se describen algunas características principales de cada sector.

7.2.2.1. Cargas industriales

Este tipo de carga corresponde a las industrias y su patrón de consumo está relacionado con su producción y puede variar grandemente según el tipo de industria. Su carga está fuertemente dominada por motores eléctricos. A este tipo de cargas corresponden los grandes clientes (en Guatemala llamado Grandes Usuarios), y Seifi y Sepasian (2011) indican que este tipo de usuarios no obedecen alguna regla concreta en cuanto al comportamiento del consumo de carga, por lo que para realizar algún pronóstico de su demanda es necesario tratar a cada cliente por separado.

7.2.2.2. Cargas comerciales

Las cargas comerciales agrupan a los usuarios dedicados al comercio, para lo cual tiene un consumo constante durante el día y un bajo consumo durante la madrugada y altas horas de la noche, donde el comercio se reduce enormemente, operando prácticamente en toda la demanda media y algunos usuarios en la demanda máxima (Santillán y Pallo, 2019).

7.2.2.3. Cargas residenciales

Es la carga relacionada con el consumo en los hogares o viviendas. Daneshi, Shahidehpour y Choobbari (2008), indican que este tipo de carga tiene la tasa de crecimiento anual más uniforme de los tres (industrial, comercial y residencial), además de la mayor fluctuación estacional en países que son sensibles al clima debido al uso de dispositivos como aires acondicionados y calentadores. En Guatemala, esta fluctuación estacional debido al clima no es tan evidente y logra mantener un comportamiento uniforme durante la mayor parte del año.

7.2.2.4. Otras cargas

Existen otros tipos de carga que no pueden ser considerados en ninguno de los tres tipos anteriores porque tienen patrones de carga muy particulares. Santillán y Pallo (2019) indican un ejemplo de otras cargas a aquellos que son utilizados en el servicio público. Una muestra de ello es el alumbrado público que corresponde un buen porcentaje de consumo de carga durante la noche y madrugada pero que tiene un consumo prácticamente nulo durante el día.

7.2.3. Factores que afectan la demanda eléctrica

El consumo de energía eléctrica puede verse afectado por diversos factores. Los factores que más influencia tienen son diferentes según el tipo de usuario e incluso siendo el mismo tipo de usuario un mismo factor puede influir de diferente manera si estos usuarios se encuentran en distintos países. Al-Alawi e Islam (1996) indican que estos factores pueden ser de tipos climatológicos, socioeconómicos o demográficos, a lo que se pueden agregar factores de

tiempo/estación. A continuación, se mencionan las variables más importantes de cada uno de los tipos.

7.2.3.1. Clima

El clima es una de las variables que más influencia tienen en el consumo de energía eléctrica especialmente en países donde se tienen estacionalidades muy marcadas que según las condiciones climatológicas se hacen necesarios el uso de dispositivos como aires acondicionados, ventiladores, calentadores, entre otros.

Al-Alawi e Islam (1996) mencionan algunas de las variables climatológicas más comunes:

- Temperatura
- Humedad Relativa
- Velocidad del viento
- Precipitación
- Nevadas
- Nivel de Radiación Global
- Duración de la luz solar
- Índice temperatura/humedad
- Índice de sensación térmica

Como se podrá suponer, estos factores influyen en la demanda eléctrica por razones como por ejemplo que el consumo eléctrico en un día demasiado caluroso y húmedo en verano o de un día ventoso y frío en invierno es muy diferente al de un día típico en verano o invierno. Y así cada una de las variables

puede tener mayor o menor influencia en el requerimiento de energía eléctrica por parte de los consumidores.

7.2.3.2. Variables socioeconómicas

Las variables socioeconómicas son otros factores que pueden influir en la demanda eléctrica, aunque de una forma diferente. Seifi y Sepasian (2011) indican algunas de las variables socioeconómicas que más influencia tienen en el consumo eléctrico y se agregan algunas otras:

- Ingresos per cápita
- Producto Nacional Bruto (PNB)
- Producto Interno Bruto (PIB)
- Tarifas de energía eléctrica
- Precios de los combustibles

Un ejemplo de la influencia de estas variables es el precio de la energía eléctrica el cuál si tiende a subir, se reduce el consumo de la electricidad. O si los indicadores económicos como el Producto Nacional Bruto y el Producto Interno Bruto muestran un crecimiento, el consumo de electricidad puede aumentar en casi todos los tipos de clientes o consumidores (Seifi y Sepasian, 2011).

7.2.3.3. Variables demográficas

Las variables demográficas son otro tipo de factores que se deben tomar en consideración si se desea estudiar el comportamiento de la demanda. Y es que al final son los seres humanos los que consumen la energía eléctrica por lo

que estudiar a la población es importante para comprender los patrones de consumo. Entre estas variables se mencionan:

- Población
- Número de usuario con acceso a energía eléctrica
- % de población urbana y rural
- Nivel de ingresos
- Nivel educativo

Respecto a este tipo de variables es evidente que una familia con mayores ingresos o mejor nivel educativo comúnmente tiene un mayor consumo de energía eléctrica, o que la población rural tiene un consumo menor al de la población urbana.

7.2.3.4. Variables temporales/estacionales

El tiempo o la estacionalidad también juega un rol importante en el consumo eléctrico, ya que la demanda de energía eléctrica puede cambiar en cuestión de horas o incluso minutos. Pero no solamente durante un día, sino que durante el año se presentan épocas con marcados patrones de consumo. Seifi y Sepasian (2011) indican algunas de las variables de tiempo que pueden influir en la demanda eléctrica:

- Hora del día (día o noche)
- Día de la semana (día entre semana o fin de semana)
- Época del año (temporada)
- Días festivos

El consumo eléctrico es totalmente diferente durante el día que durante la noche en la mayoría de los usuarios y no es el mismo consumo durante un día de la semana que para el fin de semana. Además, hay épocas muy marcadas con un patrón de consumo muy característico como la época navideña donde el consumo del sector residencial y comercial puede crecer considerablemente. Y atención especial se debe tener a los días festivos que son diferentes en cada región o país, y si se quiere realizar un pronóstico para uno de esos días no se pueden usar datos de un día normal ya que su comportamiento puede cambiar significativamente.

Finalmente, al realizar un pronóstico de demanda eléctrica se deben seleccionar cuidadosamente las variables, ya que son demasiadas y dependiendo de la naturaleza y horizonte del pronóstico, pueden servir unas más que otras. El criterio de selección dependerá de gran manera de la intuición de que realizará el pronóstico (Al-Alawi e Islam, 1996).

7.3. Oferta y demanda firme

Los conceptos de oferta y demanda firmes son características fundamentales de la operación del mercado mayorista de Guatemala. En la presente sección se abordan estos conceptos según están definidos en la normativa de coordinación comercial y operativa de Guatemala.

7.3.1. Oferta Firme

En el Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista (1998), define la oferta firme como una característica técnica que tienen las unidades generadoras y es calculada en función de la Potencia Máxima de la unidad y su disponibilidad.

Mientras que, dentro de las Normas de Coordinación Comercial del AMM, existe una norma dedicada exclusivamente a tratar los temas de oferta y demanda firme, esta es la NCC-2. En esta norma se encuentra una definición más extensa de oferta firme, donde se indica lo siguiente:

Oferta Firme (OF) de cada unidad generadora de los Participantes Productores a la máxima potencia neta –descontados sus consumos internos- capaz de producir, en función de sus características técnicas, su Potencia Máxima y disponibilidad, teniendo en cuenta las restricciones propias de la central o de su sistema de transmisión asociado. La suma de la Oferta Firme de todas las unidades generadoras de un Participante Productor se denomina Oferta Firme Total (OFT). (Administrador del Mercado Mayorista, 2001, p. 1)

En esta misma NCC-2 se hace una descripción de consideraciones a tomar en cuenta en el proceso del cálculo de la oferta firme de las unidades de generación según su tecnología. En la tabla IV, se hace un resumen de esta información.

Tabla IV. **Cálculo de Oferta Firme por tipo de tecnología de generación**

Tecnología de generación	Descripción
Térmicas	La oferta firme de una unidad térmica deberá ser garantizada ante el AMM mediante informe extendido por una empresa certificadora de procesos, donde se indique que tiene las instalaciones necesarias y la disponibilidad de suministro de combustible para poder generar de forma continua durante todo el Año Estacional.
Térmicas a base de combustibles renovables	Son aquellas unidades a base de combustibles que no fósiles, y tendrán OF si garantiza ante el AMM que tiene las instalaciones necesarias y la disponibilidad de suministro de combustible renovable para poder generar de forma continua durante todo el año.

Continuación de la tabla IV.

Tecnología de generación	Descripción
Geotérmicas	Son las unidades generadoras que aprovechan el calor interno de la tierra para producir electricidad.
Eólicas	Para considerar que una central eólica tiene Oferta Firme, deberá fundamentar la potencia que puede garantizar a lo largo de todo el Año Estacional, mediante un estudio basado en registros de viento de velocidad y altura de por lo menos 5 años, considerando además la indisponibilidad forzada que se produce en la misma como consecuencia de la pérdida de viento no previstas en la programación diaria.
Hidráulicas	Para determinar la Oferta Firme de las centrales hidráulicas se establecen las hipótesis de evolución de las variables que reflejan el estado del MM para el año para el cual se realiza el cálculo de la Oferta Firme de los generadores, teniendo en cuenta que este proceso se realizará acorde con las etapas utilizadas en la Programación de Largo Plazo. Este análisis implica la consideración de las modificaciones en la oferta de energía (parque de generación, interconexiones internacionales), en la demanda de energía y en la topología del sistema de transmisión.

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2001). *Norma de coordinación comercial No. 2 oferta y demanda firme.*

7.3.2. Oferta Firme Eficiente

El concepto de la Oferta Firme Eficiente (OFE) también es definida en la NCC-2, y se indica que “es la máxima cantidad de potencia de una unidad, central generadora o transacción internacional que puede ser comprometida en contratos para cubrir la demanda firme”. (Administrador del Mercado Mayorista, 2001, p. 5).

Para realizar el cálculo de la OFE, anualmente en la elaboración de la Programación de Largo Plazo (PLP) se realiza un procedimiento que está indicado en los numerales 2.2.1 y 2.2.2 de la NCC-2, y está basado en simulaciones de despacho económicos para escenarios hidrológicos. El cálculo

de la OFE únicamente se realiza para aquellas unidades o centrales generadoras que estén conectadas de forma permanente al SNI y que cumplan con los requisitos del operar en el Mercado Mayorista (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.3. Demanda Máxima Proyectada

La demanda máxima proyectada (DMP) es definida en la NCC-2 como el mayor requerimiento de potencia durante el año en el mercado mayorista. La DMP es integrado por tres componentes: la potencia máxima a generar, la reserva rodante regulante y la reserva rodante operativa. Para determinar el valor de la DMP se suman estas tres componentes. La potencia máxima para generar se obtiene mediante una proyección basada en registros históricos de generación utilizando para ello modelos econométricos. Otro aspecto importante, en el proceso de cálculo de la DMP es la determinación del período y hora en que se prevé que ocurrirá, y es una función del AMM determinar dicho período (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.4. Demanda Firme

Según las definiciones incluidas en el artículo 1 del RAMM, la demanda firme es la demanda de potencia que calcula el AMM para cada Distribuidor y Gran Usuario y que este debe contratar en el año estacional correspondiente. A la suma de todas las demandas firmes de todos los distribuidores y grandes usuarios se le denomina demanda firme del Sistema Nacional Interconectado. El artículo 72 del RAMM (1998), indica que los distribuidores, grandes usuarios y exportadores tienen la obligación de cubrir su demanda firme mediante contratos de potencia respaldados con OFE, y su incumplimiento se considera falta grave y es sujeta a sanción. También se indica que en caso exista comercialización de

demanda, es el comercializador el que asume la responsabilidad del gran usuario de cubrir la demanda firme de sus clientes.

La demanda firme también puede considerarse como la parte de la demanda máxima proyectada que le corresponde a cada distribuidor, gran usuario y exportador, y la razón de su aplicación es asegurar que el sistema eléctrico garantizar el abastecimiento de suministro eléctrico con suficiente oferta de generación (Administrador del Mercado Mayorista, s.f.)

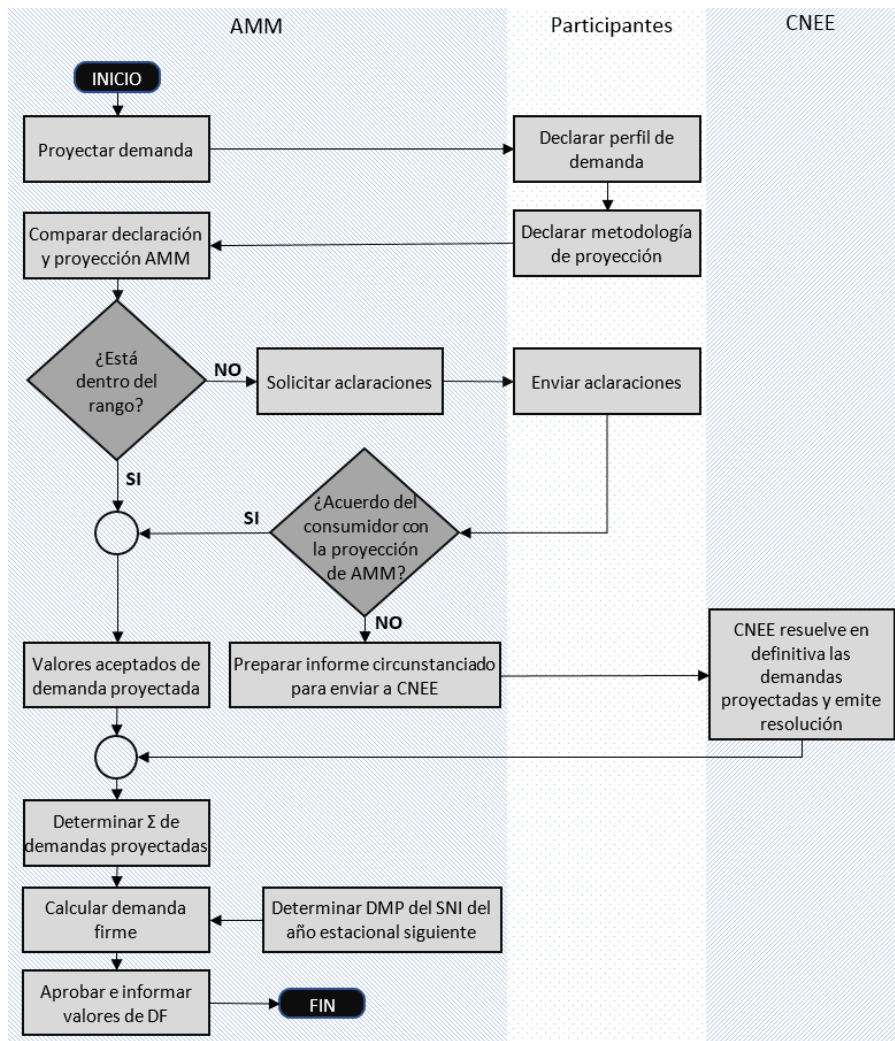
7.3.5. Cálculo de la Demanda Firme

El procedimiento para el cálculo de la demanda firme es descrito en la NCC-2 y consta de varios procesos que son mostrados de forma gráfica en la figura 4. En este procedimiento hay tres actores involucrados, el AMM, los participantes consumidores y la CNEE.

El proceso inicia con la proyección de la demanda para cada participante consumidor realizado por el AMM, luego los participantes consumidores presentan su perfil de carga y metodología de proyección al AMM, que a su vez compara lo declarado por los participantes con la proyección que ha realizado. Si la diferencia resultante de la comparación se encuentra del rango aceptado, se aceptan los valores de la demanda proyectada. Por el contrario, si no se encuentran dentro del rango aceptado, el AMM solicita aclaraciones al participante consumidor. Luego de recibida las aclaraciones del participante consumidor, el AMM si está de acuerdo con la aclaración, procede a aceptar el valor proyectado del participante, de lo contrario envía un informe circunstanciado a la CNEE que deberá resolver el valor de la demanda proyectada para dicho participante. Cuando ya se hayan aceptado o resuelto las demandas proyectadas de todos los participantes consumidores el AMM realiza la sumatoria de todas las

demandas proyectadas y con el valor de la demanda máxima proyectada del SNI para el año estacional siguiente que debió calcular previamente, realiza el cálculo de la demanda firme de cada participante. Por último, se aprueban e informa a los respectivos participantes su valor de demanda firme (Administrador del Mercado Mayorista, s.f.).

Figura 4. Procedimiento para el cálculo de la demanda firme



Fuente: Elaboración propia, con información obtenida de Administrador del Mercado Mayorista (s.f.). *Proceso de demanda firme de grandes usuarios.*

A continuación, se describen consideraciones fundamentales de las partes más importantes del proceso del cálculo de la demanda firme, que están incluidos en la NCC-2.

7.3.5.1. Declaración de los participantes consumidores

Los participantes consumidores durante el proceso del cálculo de su demanda firme deberán declarar cierta información al AMM, a más tardar el 15 de diciembre de cada año. La información que deben presentar se muestra en la tabla V.

Tabla V. **Información para declarar por participantes consumidores para el cálculo de demanda firme**

No.	Información para declarar
1	Proyección de demanda
2	Metodología de proyección
3	Valores proyectados de energía y potencia por banda horaria
4	Curvas de carga típicas para días laborales, sábados, domingo y feriados
5	Condiciones previstas en sus instalaciones para la programación de largo plazo.

Fuente: elaboración propia, con datos obtenidos de Administrador del Mercado Mayorista (2001). *Norma de coordinación comercial No. 2 oferta y demanda firme.*

Esta información que presenten será la base para efectuar los cálculos de la demanda firme para los distribuidores, grandes usuarios y exportadores del SNI (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.5.2. Base de datos de demanda

La base de datos de demanda que se utilizará para realizar las proyecciones de energía y potencia de cada participante consumidor deberá contener toda la información histórica por cada punto de medición y deberá estar detallada por cada distribuidor, gran usuario y exportador, y ser actualizada constantemente (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.5.3. Proyección de la demanda

Según lo indicado en la NCC-2, el AMM deberá verificar que la información presentada por los participantes consumidores sea coherente, mediante la base de datos de demanda y utilizando modelos propios de proyección de demanda. El AMM es el encargado de definir la metodología con mejor ajuste considerando las tendencias de cada participante, y mientras no se defina otra metodología, deberá aplicar el logaritmo natural a una serie de datos históricos utilizando los datos de los últimos cinco años de cada participante. Sin embargo, es importante resaltar que la normativa faculta al AMM para definir otra metodología que mejore los resultados del pronóstico de demanda (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

Para realizar la proyección se deberá realizar ciertas consideraciones como separar las tendencias de crecimiento de los efectos provocados por fenómenos que no se observan si solo se consideran su comportamiento histórico. Tales efectos pueden ser los fenómenos naturales, cambios radicales en los patrones de consumo o cambios en su tecnología que influyan en la eficiencia de los procesos y modifiquen el patrón de consumo eléctrico, entre otros. (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.5.4. Procedimiento de verificación

La NCC-2 indica que la proyección de demanda que declaró el participante consumidor no deberá ser superior al 5 % ni inferior al 2 % de la proyección de demanda que realizó el AMM. Si no se cumple este requerimiento deberá solicitar las aclaraciones pertinentes al participante. Si las aclaraciones aclaran la diferencia entre proyecciones, se acepta el valor de la proyección de demanda que el participante declaró, de lo contrario es elevado a la CNEE que deberá resolver sobre las discrepancias e indicar los valores de demanda proyectadas para el participante (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.5.5. Determinación de la demanda firme

La demanda firme de cada participante consumidor es la parte de la demanda máxima proyectada que le corresponde a este participante y se determina con la proporción entre su demanda proyectada declarada y la suma de todas las demandas proyectadas de cada participante consumidor, que coincida con la hora prevista para la DMP. Matemáticamente, la demanda firme de un participante consumidor es el producto de la demanda máxima proyectada del SNI y la relación de la demanda proyectada de ese participante y la suma de las demandas proyectadas de todos los consumidores (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.3.5.6. Demanda firme de participantes consumidores nuevos

Cuando un nuevo participante consumidor ingrese al mercado mayorista, el AMM calculará su demanda firme basado en las proyecciones declarados por el participante. Si la demanda del participante nuevo supere 5 MW, el AMM

deberá realizar nuevamente el cálculo de la OFE ya que la demanda máxima proyectada deberá incluir la demanda de estos participantes (Administrador del Mercado Mayorista, 2001).

7.4. Pronósticos

Los pronósticos son cada vez más importantes en la industria, ya que conocer de antemano posibles comportamientos futuros permite tomar acciones con anticipación. En esta sección se recopila definiciones de pronóstico de algunos autores, se describen los horizontes de tiempo para realizar pronósticos, así como los tipos de enfoque más comunes. Adicionalmente, se indican los métodos más comúnmente utilizados para realizar pronósticos con una breve explicación de cada modelo.

7.4.1. Definición

Existen varias definiciones para los pronósticos o proyecciones, para lo cual se analizarán algunas para determinar la que mejor se adapta al trabajo que se pretende realizar. Mendoza (2015), hace una recopilación de definiciones entre las que se destacan las de Chapman, Heizer y Render.

Chapman (2006) indica que “La formulación de pronósticos (o proyección) es una técnica para utilizar experiencias pasadas con la finalidad de predecir expectativas del futuro” (p. 17) e indica algunas de sus características fundamentales como que los pronósticos casi siempre son incorrectos, que mientras más corto sea el período más preciso es el pronóstico y que siempre debe incluir un error de estimación.

Por otro lado, Heizer y Render (2009), definen pronosticar como “el arte y la ciencia de predecir eventos futuros. Puede implicar el empleo de datos históricos y su proyección hacia el futuro mediante algún tipo de modelo matemático” (p. 106) y también indican que estos casi nunca son perfectos.

Adicionalmente, para Farrera (2013), existen tres características inherentes de todo pronóstico, la primera es el futuro, ya que el pronóstico es la estimación de una variable para un tiempo futuro, dado que si su valor ya es conocido deja de ser pronóstico. La segunda característica es la incertidumbre, ya que “salvo raras excepciones, todo pronóstico tiene implícito un margen de error” (p. 6), y lo que se busca es minimizar este error. Y la tercera característica es el juicio personal, dado a que el pronóstico es altamente dependiente del pronosticador, debido a este normalmente realiza la selección de los datos y métodos para obtener el pronóstico e interpreta los resultados que se obtiene.

Con el apoyo de estas definiciones y características realizadas por los distintos autores, es posible analizar la propia definición de pronóstico como: una estimación de una variable para un tiempo futuro, basado en su comportamiento en el pasado.

7.4.2. Horizontes de tiempo de los pronósticos

Los pronósticos se pueden realizar en diferentes horizontes de tiempo. Las clasificaciones más comunes son: corto plazo, mediano plazo y largo plazo; que dependiendo de la variable que se quiera proyectar varían en los períodos que abarcan. Por ejemplo, para el pronóstico de demanda de productos de una compañía, Heizer y Render (2009), definen el corto plazo con una extensión de hasta 1 año, el mediano plazo con una extensión de entre 3 meses y 3 años, y el largo plazo es cuando se tiene una extensión de 3 años o más. Sin embargo,

estos intervalos de tiempo son diferentes cuando se trata de demanda de energía eléctrica y diversos autores indican tiempos diferentes para cada horizonte de tiempo. A continuación, se describen las características importantes de los pronósticos de demanda de energía eléctrica indicando en sus principales horizontes de tiempo.

7.4.2.1. Pronósticos a corto plazo

La extensión en el que un pronóstico se considera como corto plazo refiriéndonos específicamente a la demanda de energía eléctrica es definida por varios autores de los cuales se mencionan los siguientes: Seifi y Sepasian (2011), definen que el corto plazo se extiende desde un día hasta una semana; Al-Alawi e Islam (1996) por su parte lo definen desde algunas horas hasta unas semanas y para Hidalgo (2018) es desde una hora hasta una semana. A pesar de que los períodos definidos para el corto plazo no es exactamente el mismo, si son parecidos y se podrían definir desde una hora hasta una semana.

Para Al-Alawi e Islam (1996) el pronóstico realizado para este período desempeña un papel importante para las operaciones diarias de un centro de despacho de carga. Normalmente se realiza en períodos horarios y se utiliza en funciones como asignación de unidades generadoras, despacho económico, coordinación hidrotérmica, gestión de cargas, entre otros

7.4.2.2. Pronósticos a mediano plazo

Para el pronóstico de mediano plazo, los autores indicados anteriormente lo definen de la siguiente manera: Seifi y Sepasian (2011), de varias semanas a varios meses; Al-Alawi e Islam (1996) de algunas semanas a algunos meses; e

Hidalgo (2018) desde un mes hasta un año. Considerando lo anterior se puede definir la extensión del mediano plazo desde una semana hasta varios meses.

Al-Alawi e Islam (1996) indican que durante este período se utiliza el pronóstico para la planificación de adquisición de combustible, programación de mantenimientos, comercialización de energía, entre otras funciones.

7.4.2.3. Pronósticos a largo plazo

Por último, se tienen los pronósticos de largo plazo. Continuando con las definiciones de los autores que se tomarán como ejemplo se encuentran los siguiente: para Seifi y Sepasian (2011), el largo plazo tiene una extensión de varios años; Al-Alawi y Islam (1996) lo definen entre 5 y 25 años; y para Hidalgo (2018) se extiende de uno a diez años. Según las características del sistema eléctrico de Guatemala, se considera que la definición de Hidalgo (2018) se adapta mejor a nuestra realidad por lo cual nuestra propia definición de largo plazo será que tiene una extensión desde 1 año hasta 10 años. Los pronósticos realizados en este horizonte de tiempo son importantes para decidir expansiones de transmisión y generación en un sistema eléctrico, según comentan Al-Alawi e Islam (1996).

7.4.3. Métodos de pronósticos

Existen diferentes formas de clasificar los métodos de los pronósticos. Mendoza (2015) resume el planteamiento de diversos autores clasificando los métodos de pronósticos en dos grandes grupos: cualitativos y cuantitativos. Jaramillo (2012) coincide en la clasificación de los dos grupos, pero comenta que en los últimos años la evolución de la tecnología ha dado como resultado la también evolución de los pronósticos que se basan en la inteligencia artificial, por

lo que se hace necesario agregar un tercer grupo agrupando los pronósticos realizados mediante la inteligencia artificial, que utiliza recursos computacionales y realiza una combinación de los métodos cualitativos y cuantitativos, logrando obtener mejores resultados.

7.4.3.1. Pronósticos cualitativos

Los pronósticos cualitativos se caracterizan porque “se generan a partir de información que no tiene una estructura analítica bien definida” Chapman (2006, p. 18). El mismo autor indica son de utilidad cuando la información histórica disponible es nula. En el caso de la demanda de energía eléctrica este sería el método utilizado para el pronóstico de los usuarios nuevos.

Heizer y Render (2009) también llaman a este tipo de pronósticos como subjetivos ya los resultados son influidos por factores como la intuición, experiencia personal y emociones del que realiza el pronóstico.

7.4.3.2. Pronósticos cuantitativos

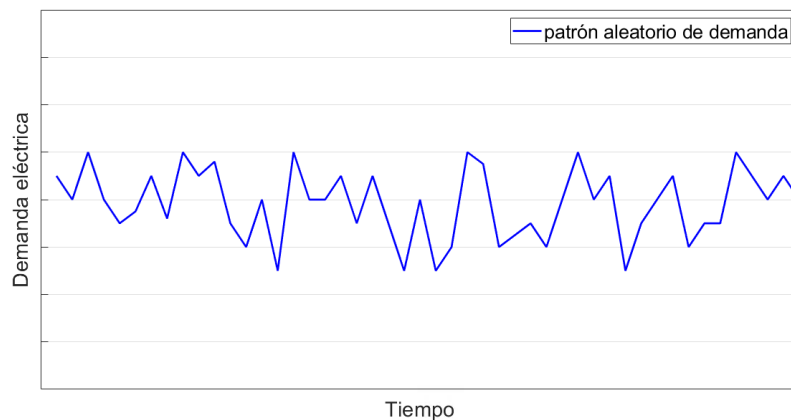
Los pronósticos cuantitativos son los que “utilizan una variedad de modelos matemáticos que se apoyan en datos históricos o variables causales para pronosticar la demanda” Heizer y Render (2009, p. 108). En concordancia a lo anterior, Jaramillo (2012) comenta que los pronósticos cuantitativos se pueden clasificar principalmente en dos tipos: pronósticos de series de tiempo y pronósticos causales. En el primero realiza un pronóstico de una variable a partir de su propio comportamiento histórico y en el segundo se explica el comportamiento de la variable en función de otras variables independientes. En esta sección se estudiará brevemente las características fundamentales de ambos tipos.

7.4.3.2.1. Series de tiempo

Las series de tiempo o temporales se basan en un estudio del pasado para conocer un comportamiento futuro. Chapman (2006) comenta que pronósticos de este tipo se fundamenta en la suposición que el comportamiento en el pasado de la demanda sigue un patrón y este patrón podrá ser utilizado para proyectar el comportamiento de esta demanda en el futuro. Para Orellana (2012) una serie temporal es resultado de realizar observaciones de una variable a lo largo de ciertos intervalos de tiempo como días, meses, años, entre otros

Para Chapman (2006) uno de los objetivos de la mayoría de los modelos de series de tiempo es intentar capturar matemáticamente patrones pasados de la demanda y menciona tres tipos de patrones, el primero es el patrón aleatorio, que indica que la demanda siempre va a poseer un patrón aleatorio es decir su comportamiento no será completamente uniforme y predecible. La figura 5 ejemplifica el patrón aleatorio de la demanda.

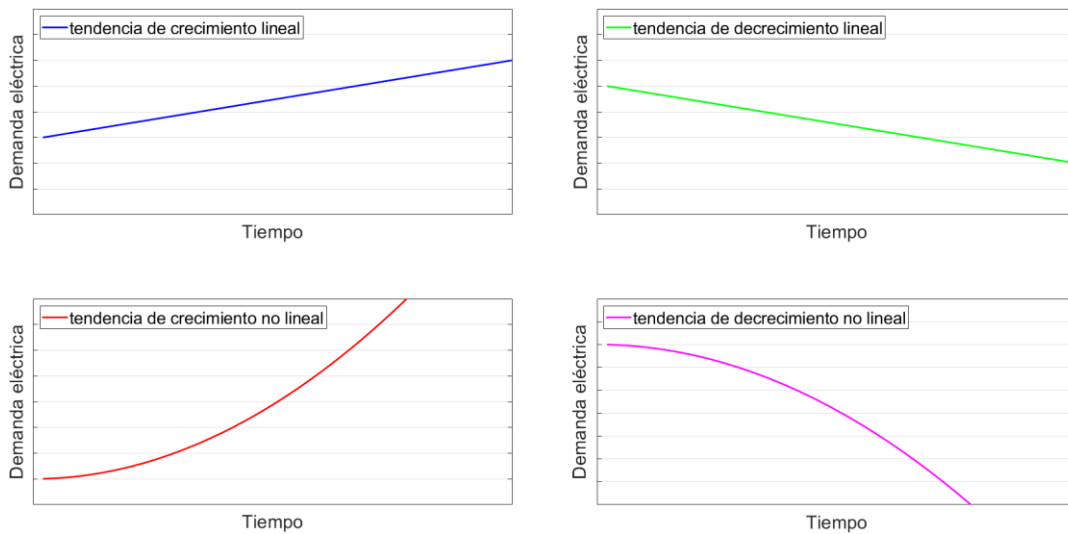
Figura 5. Patrón aleatorio de demanda



Fuente: elaboración propia, basado en Chapman (2006). *Planificación y control de la producción.*

El segundo patrón indicado por Chapman (2006) es de tendencia, indica que la demanda puede tener una tendencia creciente o decreciente y esta puede ser lineal o no lineal. En la figura 6 se observan ejemplos de este tipo de patrón.

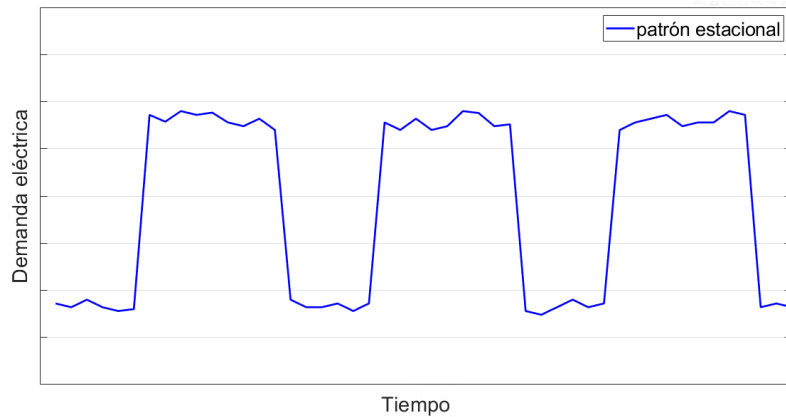
Figura 6. Ejemplos de tendencias



Fuente: elaboración propia, basado en Chapman (2006). *Planificación y control de la producción.*

Por último, el tercer patrón de las series de tiempo que es mencionado por Chapman (2006) es el patrón cíclico que indica que la demanda sigue ciertos ciclos que se repiten en períodos definidos. Un ejemplo de patrón cíclico es el patrón estacional que se da cuando la demanda muestra cierto comportamiento según las estaciones del año. Para la demanda de energía eléctrica este fenómeno se puede observar al notar la diferencia del consumo en verano e invierno. En la figura 7 se muestra el comportamiento de un patrón estacional.

Figura 7. **Patrón estacional de demanda**



Fuente: elaboración propia, basado en Chapman (2006). *Planificación y control de la producción.*

Para la utilización de series de tiempo para realizar pronósticos se han desarrollado muchos métodos, que a continuación se describirán brevemente los que diversos autores han indicado como los más conocidos:

- Promedio Móvil Simple: Es un método que utiliza el promedio matemático utilizando datos reales de los últimos períodos recientes de una variable (Chapman, 2006).
- Promedio Móvil Ponderado: Es un método similar al anterior con las diferencias que en el promedio móvil todos los componentes de la base de datos tienen la misma importancia, mientras que en el promedio móvil ponderado se permite ponderar a cada elemento con diferente nivel de importancia siempre y cuando la suma de todas las ponderaciones sume uno. La asignación de ponderaciones a cada elemento permite con este método variar los efectos del pasado, lo que es una ventaja respecto al promedio móvil simple (Chase, Jacobs y Aquilano, 2009).

- Suavizado Exponencial: Este método es de las más utilizadas y se basa en la suposición de que los datos más recientes son más indicativos del futuro que los datos más antiguos, es decir la importancia de los datos se reduce mientras estos sean más distantes en el pasado. A este método se le denomina suavizado exponencial debido a que cada incremento en el pasado reduce exponencialmente la importancia de sus datos (Chase, Jacobs y Aquilano, 2009).
- Método de Holt-Winter: Es un método donde adicionalmente al suavizado de datos como con los métodos anteriores, considera los efectos de una posible tendencia y estacionalidad de los datos, con el objetivo de replicar los patrones encontrados en el futuro que se quiere pronosticar (Jaramillo, 2012).
- Método ARIMA: Es un método que se utiliza principalmente cuando los datos históricos disponibles tienen un comportamiento que no es fácilmente predecible, y está basado en cálculos de regresiones y análisis del correlograma para identificar patrones en el comportamiento pasado para replicarlos en el futuro. ARIMA es el acrónimo de Autorregresive Integrated Moving Average, que puede interpretarse como Modelo autoregresivo integrado de medias móviles (Jaramillo, 2012).

7.4.3.2.2. Métodos causales

Los métodos causales es un tipo de pronóstico cuantitativo y algunas de sus características principales son mencionados por Chapman (2006) el cual indica que el método causal “se basa en el concepto de relación entre variables; es decir, en la suposición de que una variable medida ‘ocasiona’ que la otra

cambie de una forma predecible” (p. 22). El mismo autor indica que la variable que causa el cambio deberá poder ser medido de forma precisa.

Entre los enfoques más comunes de los métodos causales enumerados por Chapman (2006) se mencionan:

- Modelos de entrada-salida: Son modelos que requieren una gran cantidad de datos, haciendo el proceso largo y costoso. Es usado normalmente para pronósticos de mercados enteros y no para productos específicos (Chapman, 2006).
- Modelos econométricos: Este tipo de modelos están orientados a varios sectores de la economía, y su uso es parecido al modelo anterior (Chapman, 2006).
- Modelos de simulación: Son modelos de simulación por computadora que son muy potentes pero que tiene la recolección de información puede ser muy lenta y costosa, pero que cuando ya se ha poblado al modelo de suficientes datos arroja resultados muy rápidos y económicos (Chapman, 2006).
- Regresión: Este método se relaciona la variable que es objeto de pronóstico con otras variables estimando una ecuación de regresión mediante el método de mínimos cuadrados (Mendoza, 2015).

7.4.3.3. Inteligencia artificial

Existen innumerables definiciones de lo que es inteligencia artificial, pero se destaca la definición de Rich y Knight (1991) que indican que es el estudio de como las computadoras logren realizar tareas que actualmente los humanos logran realizarlo de una mejor manera.

La inteligencia artificial también es definida como la parte de las ciencias de la computación que se encarga del diseño de sistemas cuyas características tiene una gran relación con el comportamiento humano inteligente. Y es que estos métodos han resultado ser más efectivos para los pronósticos que los métodos tradicionales como lo son los cualitativos y cuantitativos, ya que pueden modelar sistemas complejos no lineales donde no se tiene mucha información (Jaramillo, 2012).

Actualmente existen métodos basados en inteligencia artificial de los cuales los más conocidos son los siguientes: Redes Neuronales Artificiales, Sistemas Expertos, Lógica difusa, razonamiento Inductivo Fuzzy y Algoritmos genéticos. A continuación, se describen de manera breve las características de estos métodos.

7.4.3.3.1. Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales son modelos que tratan de emular la forma en que el cerebro aprende humano aprende a procesar la información. En su elaboración se implementa un modelo en una computadora para que pueda simularse, en el cual se deducen las características esenciales de las neuronas, de ahí se deriva su nombre (Toro, Molina y Garcés, 2006).

Se puede afirmar que en las Redes Neuronales “se trata de reproducir el esquema neuronal, tanto en sus unidades de proceso (neuronas), como en sus conexiones y modo de establecerlas” (Pino, Gómez y De Abajo, 2001, p. 26).

Estos modelos son no lineales y son capaces de realizar funciones como aprender, identificar y aproximar, tal como lo hace un cerebro (Herrera, 2007).

7.4.3.3.2. Sistemas expertos

Los sistemas expertos son modelos en computadora que tiene capacidad de razonar y solucionar problemas como lo haría un humano experto. Considerando que los sistemas expertos emulan las actividades de un especialista humano en alguna materia, estos deberán ser capaces de resolver problemas de la misma manera que lo realizaría un humano, trabajar con información que no se tiene certeza de su calidad, explicar resultados, aprender nuevos conocimientos durante la resolución del problema, en resumen, realizar las actividades que realizaría un experto humano (Pino, Gómez y De Abajo, 2001).

7.4.3.3.3. Lógica difusa

Este método surgió después de que se observara que ciertos humanos tienen la capacidad de tomar decisiones correctas a partir de una serie de datos que se expresan lingüísticamente como difusos. En estas series de datos es frecuente el uso de adjetivos o adverbios como: mucho, poco, alto, bajo, entre otros. Con la utilización de este método se pueden desarrollar sistemas de toma de decisiones con ventajas como: Eficiencia y rapidez en la implementación, éxito en casos que los datos de entrada son escasos o imprecisos, entre otros (Hernández, 2003).

7.4.3.3.4. Razonamiento inductivo *Fuzzy*

El método del Razonamiento Inductivo *Fuzzy* (FIR) combina una modelación cualitativa, utilizada para determinar qué grupo de las variables de entrada describe de una mejor manera el comportamiento entrada-salida de los datos de entrenamiento. Dicho de otra manera, a partir de las señales históricas

medidas, aprende los patrones observados para luego predecir el futuro (Herrera, 2007).

7.4.3.3.5. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos simulan los procesos de evolución postulados por Darwin, mediante el uso de operadores genéticos operado sobre una población que evoluciona de generación en generación. Son una herramienta para solucionar problemas complejos de optimización y pueden aplicarse a una gran gama de campos (Piñero, Arco, García y Acevedo, 2003).

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Contexto general

Descripción del problema

Formulación del problema

Delimitación del problema

OBJETIVOS

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 Estudios previos

1.2 Antecedentes

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Mercado Mayorista de Electricidad en Guatemala

2.1.1. Marco Institucional

2.1.1.1. Ministerio de Energía y Minas

2.1.1.2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica

2.1.1.3. Administrador del Mercado Mayorista

2.1.1.4. Agentes y participantes del Mercado Mayorista

2.1.2. Marco Legal

2.1.3. Operación del mercado eléctrico de Guatemala

2.2. Demanda Eléctrica

- 2.2.1. Características de la demanda eléctrica
- 2.2.2. Tipos de consumidores de carga
 - 2.2.2.1. Cargas industriales
 - 2.2.2.2. Cargas comerciales
 - 2.2.2.3. Cargas residenciales
 - 2.2.2.4. Otras cargas
- 2.2.3. Factores que afectan la demanda eléctrica
 - 2.2.3.1. Clima
 - 2.2.3.2. Variables socioeconómicas
 - 2.2.3.3. Variables demográficas
 - 2.2.3.4. Variables temporales/estacionales
- 2.3. Oferta y Demanda Firme
 - 2.3.1. Oferta Firme
 - 2.3.2. Oferta Firme Eficiente
 - 2.3.3. Demanda Máxima Proyectada
 - 2.3.4. Demanda Firme
 - 2.3.5. Cálculo de la Demanda Firme
 - 2.3.5.1. Declaración de los participantes consumidores
 - 2.3.5.2. Base de datos de demanda
 - 2.3.5.3. Proyección de la demanda
 - 2.3.5.4. Procedimiento de verificación
 - 2.3.5.5. Determinación de la demanda firme
 - 2.3.5.6. Demanda firme de participantes consumidores nuevos
- 2.4. Pronósticos
 - 2.4.1. Definición
 - 2.4.2. Horizontes de tiempo de los pronósticos
 - 2.4.2.1. Pronósticos a corto plazo
 - 2.4.2.2. Pronósticos a mediano plazo

- 2.4.2.3. Pronósticos a largo plazo
- 2.4.3. Métodos de pronósticos
 - 2.4.3.1. Pronósticos cualitativos
 - 2.4.3.2. Pronósticos cuantitativos
 - 2.4.3.2.1. Series de tiempo
 - 2.4.3.2.2. Métodos causales
 - 2.4.3.3. Inteligencia artificial
 - 2.4.3.3.1. Redes Neuronales Artificiales
 - 2.4.3.3.2. Sistemas expertos
 - 2.4.3.3.3. Lógica difusa
 - 2.4.3.3.4. Razonamiento inductivo Fuzzy
 - 2.4.3.3.5. Algoritmos genéticos
- 3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN
 - 3.1. Características del estudio
 - 3.1.1. Diseño
 - 3.1.2. Enfoque
 - 3.1.3. Alcance
 - 3.1.4. Unidades de análisis
 - 3.2. Variables
 - 3.3. Fases del estudio
 - 3.3.1. Fase 1: exploración bibliográfica
 - 3.3.2. Fase 2: cálculo del error de pronóstico obtenido con la metodología actual
 - 3.3.3. Fase 3: selección de modelos y proyección de demanda por participantes consumidores con los modelos seleccionados
 - 3.3.4. Fase 4: creación de herramienta computacional para proyección de demanda por participante consumidor en el mercado mayorista
 - 3.4. Determinación de escenarios

- 3.5. Obtención de insumos
- 3.6. Técnicas de análisis de información
- 4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
 - 4.1. Selección de participantes consumidores para realizar proyección
 - 4.2. Resultados de proyección de demanda con metodología actual
 - 4.3. Resultados de proyección de demanda utilizando método de redes neuronales artificiales
 - 4.4. Resultados de proyección de demanda utilizando método de árbol de decisión
 - 4.5. Comparación de errores de pronóstico mediante el método de Error Porcentual Medio Absoluto
 - 4.6. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS

APÉNDICES

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

9.1. Características del estudio

A continuación, se describen las características del estudio tales como el enfoque, alcance y diseño. Estas características ayudan a clarificar el tipo de investigación que se está realizando, estableciendo los límites de esta.

El enfoque del estudio propuesto es cuantitativo, ya que se basará en análisis de datos históricos de la demanda eléctrica de participantes consumidores, y a partir de este análisis proyectar su consumo para el próximo año. El método para verificar la calidad de las proyecciones será por medio de la comparación de la demanda proyectada dada por la metodología para años anteriores contra el valor de la demanda real, lo que hace que este estudio sea puramente cualitativo.

El alcance del estudio es correlacional, dado que busca una metodología y crear modelos para demostrar la correlación entre el comportamiento histórico del consumo de demanda de cada uno de los participantes consumidores con la demanda proyectada de estos mismos consumidores en una ventana de un año hacia adelante. Además, también evaluará la correlación de variables que no se pueden ser previstos con la información histórica, como fenómenos naturales, cambios tecnológicos implementados, temperatura ambiente, entre otros.

El diseño adoptado será no experimental, considerando que no se realizará una manipulación de variables sino únicamente se observará el comportamiento histórico de la demanda de cada participante consumidor, se

clasificará según su tipo y a partir de ese comportamiento mediante la metodología adoptada se proyectará su comportamiento en el futuro.

9.2. Unidades de análisis

La unidad de análisis en estudio son los consumidores de energía eléctrica que participan en el mercado eléctrico mayorista de Guatemala. Los participantes consumidores de energía eléctrica pueden dividirse por tipo de consumidor, antigüedad y nivel de consumo. Los tipos de consumidores puede ser: Distribuidor, Gran Usuario o Exportador; la antigüedad como: Participantes nuevos, participantes entre 1 y 3 años de operar en el mercado mayorista y participantes con más de 3 años de operar en el mercado mayorista de Guatemala; y el nivel de consumo como: menor a 1 MW, de 1 MW a 5 MW y mayor a 5 MW.

9.3. Variables

Las variables en estudio se describen a continuación:

Tabla VI. **Definición teórica y operativa de variables**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Tipo de participante consumidor	Tipo de Participante Consumidor que puede ser Gran Usuario, Distribuidor o Exportador.	Se obtendrá del listado de Grandes Usuarios, Distribuidores y Comercializadores exportadores que cuenta el AMM o MEM.
Demanda de energía eléctrica [MWh]	Energía eléctrica consumida por cada participante consumidor.	Se obtendrá por medio de las lecturas reales de demanda de energía eléctrica de cada participante consumidor, en MWh.

Continuación de la tabla VI.

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Exportaciones de energía eléctrica [MWh]	Energía eléctrica exportada hacia países por comercializadores vecinos.	Se obtendrá por medio de las lecturas reales de la energía exportada cada participante exportador, en MWh.

Fuente: elaboración propia.

Para cada variable de estudio, se muestran sus criterios de clasificación y nivel de medición:

Tabla VII. **Clasificación de las variables**

Variable/Criterio	Categoría		Númérica		Manipulable	Observable	Nivel de Medición
	Dicotómica	Policotómica	Discreta	Continua			
Tipo de participante consumidor		X				X	Nominal
Demanda de energía eléctrica [MWh]				X		X	Razón
Exportaciones de energía eléctrica [MWh]				X		X	Razón

Fuente: elaboración propia.

9.4. Fases del estudio

En esta sección se indican las seis fases que tendrá el estudio de proyección de demanda por participante consumidor, indicando los procesos que se realizarán y herramientas que se utilizarán en cada fase para obtener los resultados esperados.

9.4.1. Fase 1: exploración bibliográfica

En la primera fase se realizará una exploración a la documentación disponible de diferentes autores sobre el tema para tener un fundamento teórico del trabajo de investigación que se realizará.

El primer tema para investigar serán los pronósticos, desde su definición, tipos y modelos más utilizados especialmente para la proyección de demanda eléctrica. Luego se buscará información relacionada con la demanda de energía eléctrica, sus características, tipos y factores que afectan el consumo. Después, se abordará el mercado eléctrico de Guatemala, para conocer su marco legal, las instituciones que la confirma y la forma en que se opera el mercado. Por último, se investigará sobre los conceptos de Oferta y Demanda Firme, según la normativa nacional de Guatemala y el método para calcular la demanda firme.

9.4.2. Fase 2: cálculo del error de pronóstico obtenido con la metodología actual

En la segunda fase, se procederá a calcular el error de pronóstico que se obtiene al utilizar la metodología actual. Para ello se recolectará información histórica de la demanda de los últimos 5 años de los participantes consumidores que operan en el mercado mayorista. Además, se obtendrá el listado de

distribuidores, grandes usuarios y exportadores para realizar la clasificación de los participantes.

Con la información recolectada se seleccionarán a 20 participantes consumidores con los cuales se realizarán las pruebas con las metodologías escogidas en el presente estudio. Los 20 participantes consumidores serán elegidos mediante el muestreo no probabilístico, utilizando criterios para que se incluyan a los diferentes tipos de participantes como grandes usuarios y distribuidores, y que también se incluyan a participantes consumidores de diferentes rangos de consumo y de antigüedad.

Con los datos recolectados y participantes consumidores seleccionados, se realizará una proyección de demanda con la metodología que actualmente se utiliza, y se calculará el error de pronóstico, mediante el método del Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), para posteriormente compararlo con el error de pronóstico que se obtendrá con las otras metodologías a elegir.

La herramienta que se utilizará en esta fase será Microsoft Excel para realizar las proyecciones y cálculo de errores de pronósticos, ya es en este programa informático donde actualmente se realizan las proyecciones.

9.4.3. Fase 3: selección de modelos y proyección de demanda por participantes consumidores con los modelos seleccionados

En la tercera fase, a partir de las investigaciones realizadas sobre los distintos modelos para proyección de demanda, se seleccionarán por lo menos dos modelos para realizar pruebas de proyección de demanda. Considerando la información encontrada en la exploración bibliográfica, los modelos propuestos

están basados en inteligencia artificial y son los siguientes: Redes Neuronales Artificiales y Análisis de Árbol de decisiones. Estos modelos seleccionados se estudiarán a detalle, para conocer la información de entrada que necesitan, las consideraciones que se deben tomar al utilizarlo, y los resultados esperados de cada uno.

Luego de la selección se procederá a realizar la proyección de demanda a cada uno de los 20 participantes consumidores seleccionados en la fase 2 con estos dos modelos seleccionados en este trabajo de investigación. A cada resultado se le calculará el error de pronóstico, nuevamente con el método MAPE.

Con los resultados obtenidos, se procederá a realizar una comparación de los resultados de la fase anterior. Las variables para comparar son: la demanda proyectada por la metodología actual, la demanda proyectada obtenida por las metodologías seleccionadas en el presente trabajo de investigación y la demanda real obtenida de las mediciones. Además, se comparará el error de pronóstico de cada metodología. Esto con el objetivo de verificar si las metodologías seleccionadas reducen los errores de pronóstico que se obtienen actualmente.

En esta fase también se elegirá el modelo definitivo para realizar las proyecciones de demanda el cual se implementará en la metodología final. Este modelo será el que tenga menor error de pronóstico para la mayoría de los participantes consumidores.

Las herramientas que se utilizarán en esta fase serán: 1. Microsoft Excel para almacenar los datos históricos de la demanda por participante y realizar comparaciones de los resultados entre las distintas metodologías y 2. Matlab que es una plataforma de programación y computación numérica utilizada para

analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos, ya que los modelos seleccionados que requieren mayor capacidad de cálculo y utilización de modelos de inteligencia artificial.

9.4.4. Fase 4: creación de herramienta computacional para proyección de demanda por participante consumidor en el mercado mayorista

En la última fase, luego de la selección final del modelo a utilizar para realizar los pronósticos, se procederá a crear una herramienta computacional para la proyección de demanda por participante consumidor en el mercado mayorista, automatizando todos los procesos realizados algunas de las fases anteriores, de manera que para realizar las proyecciones de otros participantes consumidores, así como de otros años, únicamente sea necesario alimentar la base de datos histórica del consumo de demanda de cada participante consumidor, y con unas pocas acciones se logre obtener los resultados de la proyección con un menor error de pronóstico, logrando así un ahorro de los recursos de tiempo y personal que se invierten actualmente para realizar dicha tarea.

En esta fase, una vez concluida la herramienta computacional se podrá calcular de una manera más rápida la proyección de demanda del resto de participantes consumidores que no fueron seleccionados para realizar las pruebas, comprobando así la utilidad de esta herramienta. De esta manera se mejorará el cálculo de la demanda firme para cada participante e implícitamente se mejorará la operación global del mercado mayorista de Guatemala.

La herramienta que se utilizará en esta fase será Matlab. En este programa matemático se implementará el modelo seleccionado y se desarrollará el modelo

computacional que servirá para realizar el cálculo de la proyección de demanda de cualquier otro participante consumidor del cual se tengan disponibilidad de los datos necesarios.

9.5. Resultados esperados

Luego de realizar las diferentes fases del estudio se esperan obtener los siguientes resultados:

- Error de pronóstico de la metodología utilizada actualmente.
- Elección de modelo que logre reducir el error de pronóstico de la metodología utilizada actualmente.
- Herramienta computacional para realizar pronóstico de demanda por participante consumidor, con capacidad de procesar gran cantidad de datos.
- Mejora de proyecciones de demanda por participante consumidor para el proceso de cálculo de demanda firme.
- Reducción de recursos de tiempo y personal utilizados para el cálculo de demanda firme para los participantes consumidores.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS

En esta sección se presentan las técnicas estadísticas que serán utilizadas para el análisis de la información de entrada de los datos de demanda de los participantes consumidores y los que se utilizarán para realizar las proyecciones de demanda y comparaciones entre resultados.

10.1. Muestreo no probabilístico

El muestreo no probabilístico es una técnica donde el investigador selecciona muestras basadas en un juicio subjetivo en vez de realizar una selección al azar. Esta técnica se aplicará para la selección de los 20 participantes consumidores a los que se realizará la proyección de demanda con las diferentes metodologías seleccionadas.

Los criterios utilizados para la selección de los participantes consumidores, será que se incluyan a los diferentes tipos de participantes como grandes usuarios y distribuidores, y que también se incluyan a participantes consumidores de diferentes rangos de consumo, por ejemplo, grandes usuarios desde unos pocos kilovatios hasta decenas de megavatios.

10.2. Regresión exponencial linealizado

La proyección de demanda por participante consumidor para el cálculo de demanda firme actualmente utiliza el modelo de regresión exponencial linealizado, el cual aplica el logaritmo natural a una serie de valores históricos de demanda de cada consumidor, para los últimos 5 años. Esto se realiza mediante

la función de estimación lineal en Microsoft Excel, que calcula las estadísticas de una línea con el método de mínimos cuadrados. Con este modelo se pretende calcular las proyecciones con la metodología actual, para posteriormente comparar con los modelos seleccionados propuestos y verificar si se logra el objetivo de reducir el error.

10.3. Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales un sistema adaptativo que aprende mediante el uso de nodos o neuronas interconectados en una estructura en capas que se asemeja a un cerebro humano. Una red neuronal puede aprender de los datos, por lo que puede entrenarse para reconocer patrones, clasificar datos y pronosticar eventos futuros. El modelo de redes neuronales artificiales será utilizado como el primer modelo seleccionado para realizar proyecciones de demanda de los 20 participantes consumidores seleccionados. Este modelo ha sido elegido por varios pronosticadores para realizar la proyección de demanda de energía eléctrica debido a que ha demostrado tener un menor error de pronósticos respecto a otros modelos. Las proyecciones basadas en redes neuronales artificiales se realizarán en el software matemático Matlab.

10.4. Árbol de decisiones

Los árboles de decisión, o árboles de clasificación y árboles de regresión, es un modelo utilizado para predecir respuestas a los datos. Los árboles de clasificación dan respuestas nominales, como “verdadero” o “falso”. Los árboles de regresión dan respuestas numéricas. Este modelo será utilizado como el segundo seleccionado para realizar los pronósticos de los 20 participantes consumidores seleccionados.

10.5. Error Porcentual Medio Absoluto

El Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE o Mean Absolute Percentage Error) es un indicador del desempeño del Pronóstico de Demanda que mide el tamaño del error (absoluto) en términos porcentuales. Esta técnica será utilizada para calcular el error de pronóstico de la metodología actual y de las metodologías propuestas, para evidenciar de forma cuantitativa el modelo que arroja resultados con menor error de pronóstico o logra una mejor proyección de demanda.

10.6. Análisis aritmético y estadístico

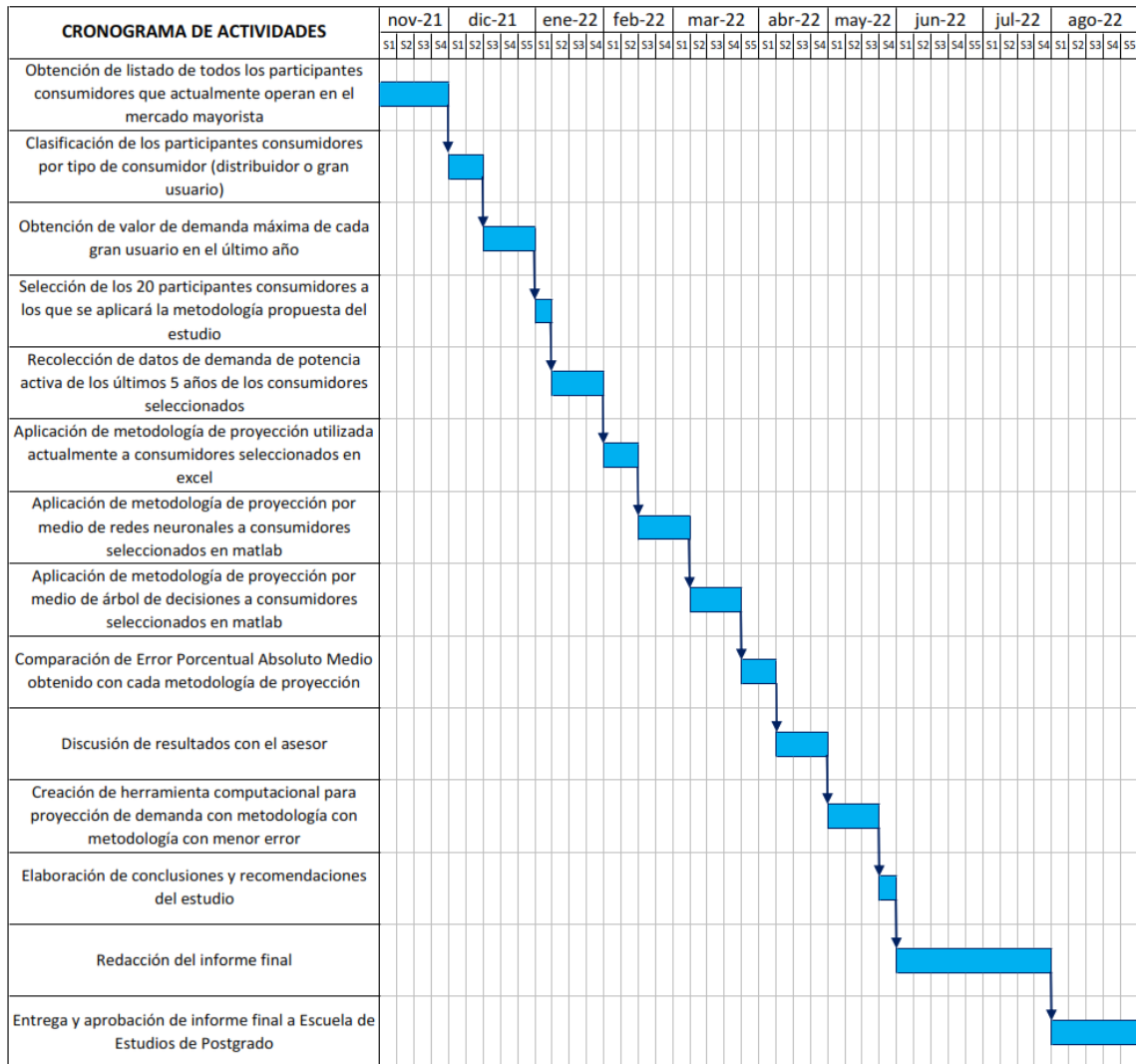
Las comparaciones entre los errores de pronósticos se podrán realizar por medio de operaciones aritméticas básicas, como sumas, restas, promedios y los comparadores “mayor que (>)”, “menor que (<)” o “igual que (=)”. Con estas operaciones básicas se podrá determinar de manera sencilla cual metodología logra tener mejores proyecciones a nivel global, considerando a todos los tipos de consumidores con diferentes niveles de consumo de potencia.

10.7. Gráficas

Las gráficas son una herramienta que permite mostrar los resultados de una forma visualmente sencilla, y permite al lector absorber la idea que el investigador quiere mostrar y con datos numéricos se hace un poco más complicado. Mediante gráficas se presentarán los resultados finales que permitan mostrar la metodología que presenta mejores pronósticos de demanda por participante consumidor.

11. CRONOGRAMA

Figura 8. Cronograma de actividades



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Para llevar a cabo el presente trabajo de investigación, es necesario contar con cierta cantidad de recursos de diferentes tipos, como humanos, financieros, tecnológicos, acceso a la información, equipo, infraestructura y otros. En la tabla VIII se detallan los recursos necesarios, indicando su valor económico estimado y fuente de financiamiento.

Tabla VIII. **Recursos necesarios para la investigación**

Tipo de recurso	Recurso necesario	Valor económico estimado	Fuente de financiamiento
Humanos	Honorarios de tesista	Q. 5,000.00	Propio
	Honorarios de asesor	Q. 5,000.00	Asesor
Financieros	Impresiones	Q. 350.00	Propio
Tecnológicos	Paquete de Microsoft Office 365 (Licencia anual)	Q. 425.00	Propio
	Matlab con librerías Machine Learning y Deep Learning (Licencia anual)	Q. 15,500.00	AMM
	Acceso a internet	Q. 1,200.00	Propio
Acceso a la información	Información pública	--	No aplica
	Mediciones de demanda de participantes consumidores	--	AMM
Equipo	Equipo de cómputo	Q. 5,000.00	Propio
Infraestructura	Oficina	Q. 500.00	Propio
Otros	Imprevistos	Q. 200.00	Propio
	TOTAL	Q. 33,175.00	

Fuente: elaboración propia.

La mayoría de los recursos que se requieren están disponibles. En los recursos humanos, se dispone del tesista y un asesor, donde los gastos de honorarios serán cubiertos por cada uno. Se requiere una fuente aproximada de Q. 350.00 para impresiones y serán cubiertos por el tesista. Respecto a los recursos tecnológicos, el tesista cubrirá los gastos asociados al acceso a internet y el paquete de Microsoft Office, mientras que el Administrador del Mercado Mayorista, entidad en la que labora el tesista, permitirá el uso del software Matlab, con las librerías requeridas para realizar las proyecciones, además de proporcionar la información histórica para el desarrollo de las proyecciones. Cabe mencionar que el uso del software por parte del tesista no representará un costo adicional al AMM. Se dispone del equipo de cómputo y una oficina, requeridos para realizar el trabajo y será proporcionado por el tesista. Por último, se dispone de Q. 200.00 para gastos imprevistos, que también serán de financiamiento propio. Cualquier otro gasto adicional que surja en el desarrollo del trabajo de investigación será cubierto por el tesista.

Siendo los recursos disponibles suficientes para realizar el trabajo de investigación, se considera que es técnica y económicamente factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo 299-98. Reglamento del administrador del mercado mayorista. Diario de Centro América. Guatemala, 01 de junio de 1998.
2. Acuerdo Gubernativo 256-97. Reglamento de la ley general de electricidad. Diario de Centro América. Guatemala, 03 de abril de 1997.
3. Administrador del Mercado Mayorista. (2001). *Norma de coordinación comercial No. 2 oferta y demanda firme. Resolución No. 216-01.* Guatemala, Guatemala, Guatemala: Autor.
4. Administrador del Mercado Mayorista. (2020). *Mercado eléctrico de Guatemala.* Guatemala, Guatemala, Guatemala: Autor. Recuperado de [https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=610Gu%C3%ADa%20para%20inversiones%20mercado%20el%C3%A9ctrico%20de%20Guatemala%20-VF-\[4\]%20\(1\).pdf](https://www.amm.org.gt/portal/?wpfb_dl=610Gu%C3%ADa%20para%20inversiones%20mercado%20el%C3%A9ctrico%20de%20Guatemala%20-VF-[4]%20(1).pdf)
5. Administrador del Mercado Mayorista. (s.f.). *Quiénes Somos.* Guatemala, Guatemala, Guatemala: Autor. Recuperado de https://www.amm.org.gt/portal/?page_id=17
6. Administrador del Mercado Mayorista. (s.f.). *Proceso de demanda firme de grandes usuarios.* Guatemala, Guatemala, Guatemala: Autor. Recuperado de https://www.amm.org.gt/ppt/Proceso_Demanda_Firme.pdf

7. Al-Alawi, S. e Islam, S. (1996). *Principles of electricity demand forecasting, part 1 methodologies*. Power Engineering Journal, vol. 10, no. 3.
8. Ariza, A. (2013). *Métodos utilizados para el pronóstico de demanda de energía eléctrica en sistemas de distribución*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías: Electrónica, Física y Ciencias de la Computación.
9. Chapman, S. (2006). *Planificación y control de la producción*. México: Pearson Educación.
10. Chase, R., Jacobs, R. y Aquilano, N. (2009). *Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
11. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. (2014). *Norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía -NTGDR-*. Guatemala, Guatemala, Guatemala: Autor.
12. Daneshi, H., Shahidehpour, M. y Choobbari, A. (2008). *Long-term load forecasting in electricity market*. IEEE International Conference on Electro/Information Technology.
13. Decreto 93-96. Ley General de Electricidad. Diario de Centro América. Guatemala, 15 de noviembre de 1996.
14. Farrera, A. (2013). *Manual de pronósticos para la toma de decisiones*. Monterrey, México: Editorial Digital. Tecnológico de Monterrey.

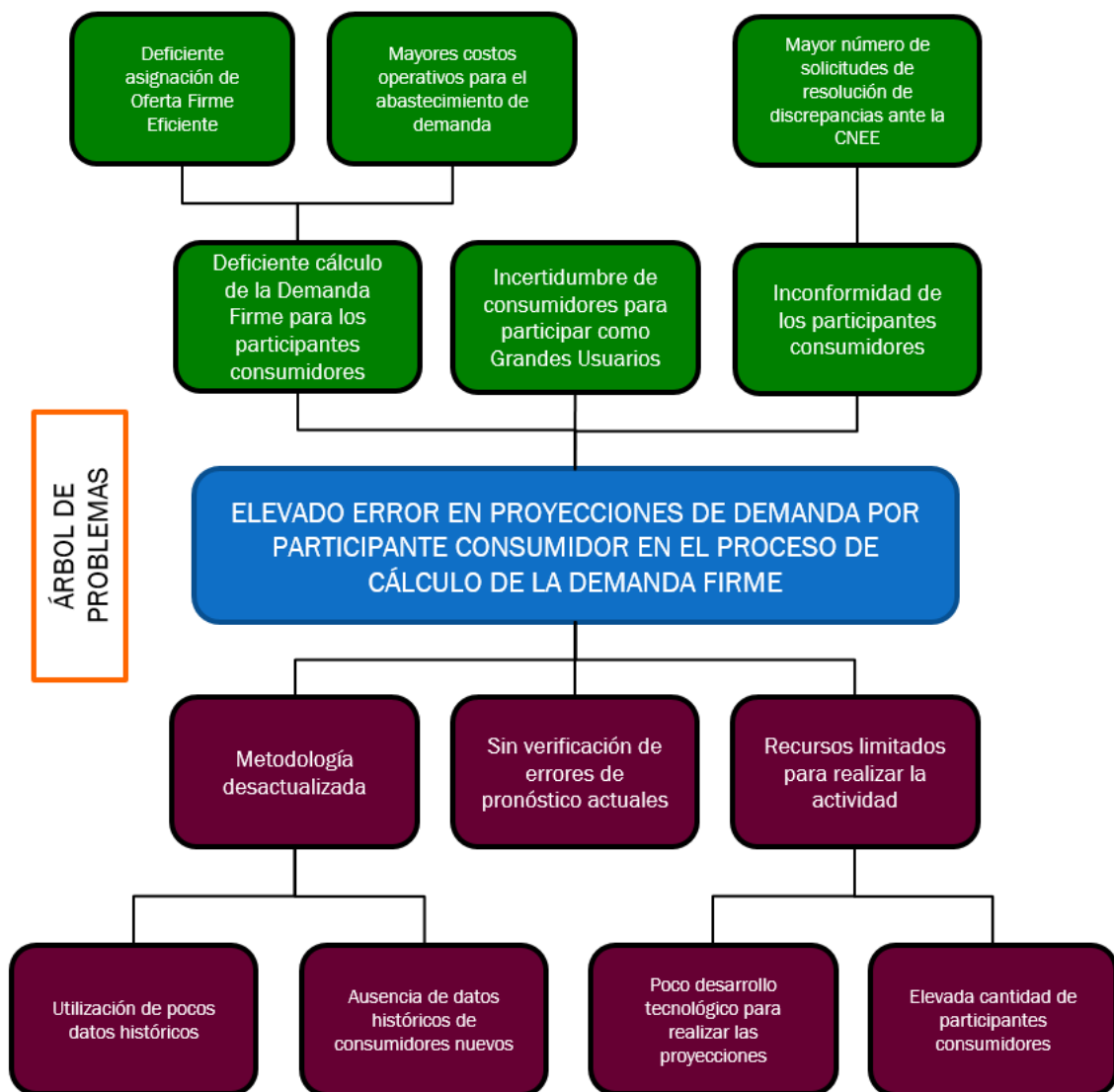
15. Heizer, J. y Render, B. (2009). *Principios de administración de operaciones*. Ciudad de México: Pearson Educación, México.
16. Hernández, M. (2003). *Aclarando la lógica borrosa (Fuzzy Logic)*. La Habana, Cuba: Universidad de La Habana. Facultad de Física.
17. Herrera, L. (2007). *Pronóstico de la demanda utilizando inteligencia artificial*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Escuela de Ingeniería.
18. Hildalgo, F. (2018). *Uso de técnicas estadísticas para determinar la proyección de las ventas de energía eléctrica del sistema interconectado nacional*. Lima, Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal. Escuela Universitaria de Posgrado.
19. Jaramillo, L. (2012). *Pronósticos: métodos cualitativos y cuantitativos vs. métodos de inteligencia artificial*. Bogotá, Colombia: Colegio de Estudios Superiores de Administración CESA.
20. Mathworks. (2021). *Administrador del Mercado Mayorista Develops AI-Based Models for Predicting Electricity Demand*. Natick, Massachusetts, Estados Unidos: Autor. Recuperado de https://www.mathworks.com/company/user_stories/administrador-del-mercado-mayorista-develops-ai-based-models-for-predicting-electricity-demand.html
21. Mendoza, J. (2015). *Diseño de la investigación del sistema de pronósticos de materias primas para la elaboración de premezclas alimenticias para animales*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería.

22. Morillo, D. (2020). *Modelo para el pronóstico de la demanda de energía eléctrica de Emelnorte S.A. - Ibarra aplicando redes neuronales artificiales*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte. Facultad de Ingeniería en Ciencias aplicadas carrera de Ingeniería Industrial.
23. Orellana, J. (2012). *Modelación y pronóstico de la demanda de energía eléctrica de mediano plazo de El Salvador*. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador. Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.
24. Pino, R., Gómez, A. y De Abajo, N. (2001). *Introducción a la inteligencia artificial: sistemas expertos, redes neuronales artificiales y computación evolutiva*. Oviedo, España: Universidad de Oviedo.
25. Piñero, P., Arco, L., García, M. y Acevedo, L. (2003). *Algoritmos genéticos en la construcción de funciones de pertenencia borrosas*. Valencia, España: Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial.
26. Rich, E. y Knight, K. (1991). *Artificial Intelligence*. New York: McGraw-Hill.
27. Rodrigues, F., Cardeira, C. y Calado, J. (2014). *The Daily and Hourly Energy Consumption and Load Forecasting Using Artificial Neural Network Method: A Case Study Using a Set of 93 Households in Portugal*. Lisboa: Energy Procedia Vol.62 (2014) 220-229. Elsevier Ltd.
28. San Miguel, J. (2016). *Desarrollo con matlab de una red neuronal para estimar la demanda de energía eléctrica*. Valladolid: Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales.

29. Sanjinés, G. (2011). *Análisis y pronóstico de la demanda de potencia eléctrica en Bolivia: una aplicación de redes neuronales*. La Paz: Latin American Journal of Economic Development (LAJED) No. 15.
30. Santillán, D. y Pallo, F. (2019). *Estudio de la proyección de la demanda eléctrica y su impacto en el sistema de CNEL EP - unidad de negocio Los Ríos en el período comprendido del 2019 al 2024*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
31. Seifi, H. y Sepasian, M. (2011). *Electric power system planning: issues, algorithms and solutions*. Heidelberg: Springer.
32. Toro, E., Molina, A. y Garcés, A. (2006). *Pronóstico de bolsa de valores empleando técnicas inteligentes*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
33. Velásquez, J., Franco, C. y García, H. (2009). *Un modelo No Lineal para la Predicción de la Demanda Mensual de Electricidad en Colombia*. Cali: Universidad ICESI - Estudios Gerenciales Vol.25 No. 112 (julio-septiembre, 2009).
34. Wallnerström, C., Setréus, J., Hilber, P., Tong, F. y Bertling, L. (2010). *Model of capacity demand under uncertain weather*. IEEE.

14. APÉNDICES

Apéndice 1. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Matriz de coherencia

Planteamiento del problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivos	Metodología	Resultados esperados
Elevado Error en Proyecciones de demanda por participante consumidor en el Proceso de Cálculo de la Demanda Firme	<p>Principal: ¿Es posible desarrollar una metodología para la proyección de demanda de energía eléctrica aplicado para consumidores, que logre reducir el error en los pronósticos obtenidos con la metodología utilizada actualmente en el cálculo de la demanda firme en el Mercado Mayorista de Guatemala?</p> <p>Auxiliares: ¿De qué magnitud es el error de pronóstico obtenido al utilizar la metodología actual? ¿Qué modelos de proyección lograrán procesar mayor cantidad de datos y reducir el error de pronóstico actual? ¿Es posible desarrollar una herramienta computacional que logre reducir los recursos requeridos actualmente y logren mejores proyecciones de demanda?</p>	<p>General: Implementar una metodología para la proyección de demanda por participante, que logre reducir el error de pronóstico obtenido actualmente para cada participante consumidor en el proceso del cálculo de demanda firme.</p> <p>Específicos. Determinar cuantitativamente el error de pronóstico obtenido con la metodología utilizada actualmente. Seleccionar modelos de proyección que se adapten a las características de la información disponible de la demanda que se desea proyectar y logren reducir el error de pronóstico. Implementar el modelo de proyección con menor error en una herramienta computacional que sea capaz de procesar gran cantidad de datos y logre reducir los recursos de tiempo y personal requeridos actualmente.</p>	<p>Enfoque: Cualitativo</p> <p>Alcance: Correlacional</p> <p>Diseño: No experimental</p> <p>FASES</p> <p>Fase 1: Exploración bibliográfica</p> <p>Fase 2: Cálculo del error de pronóstico actual</p> <p>Fase 3: Selección de modelos y proyección de demanda con los modelos seleccionados</p> <p>Fase 4: Creación de herramienta computacional para proyección de demanda</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Error de pronóstico de la metodología utilizada actualmente. 2. Elección de modelo que logre reducir el error de pronóstico de la metodología utilizada actualmente. 3. Herramienta computacional para realizar pronóstico de demanda por participante consumidor, con capacidad de procesar gran cantidad de datos. 4. Mejora de proyecciones de demanda por participante consumidor para el proceso de cálculo de demanda firme. 5. Reducción de recursos de tiempo y personal utilizados para el cálculo de demanda firme para los participantes consumidores.

Fuente: elaboración propia.