

**PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED ELÉCTRICA A MEDIANO
PLAZO MEDIANTE ANÁLISIS DE CONSUMO ELÉCTRICO EN LOS SECTORES
RESIDENCIAL, INDUSTRIAL Y COMERCIAL, USANDO SERIES TEMPORALES
SARIMA: CASO DE ESTUDIO EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A. (EERSA)-
ECUADOR.**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED ELÉCTRICA A MEDIANO PLAZO MEDIANTE ANÁLISIS DE CONSUMO ELÉCTRICO EN LOS SECTORES RESIDENCIAL, INDUSTRIAL Y COMERCIAL, USANDO SERIES TEMPORALES SARIMA: CASO DE ESTUDIO EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A. (EERSA)- ECUADOR.

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: JOHANNA PAOLA RUALES MORALES
TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

Quito -Ecuador
2023

Johanna Paola Ruales Morales

PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED ELÉCTRICA A MEDIANO PLAZO MEDIANTE ANÁLISIS DE CONSUMO ELÉCTRICO EN LOS SECTORES RESIDENCIAL, INDUSTRIAL Y COMERCIAL, USANDO SERIES TEMPORALES SARIMA: CASO DE ESTUDIO EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A. (EERSA)- ECUADOR.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Johanna Paola Ruales Morales (Y' 1998). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa Santo Tomás Apóstol de la ciudad de Riobamba. Actualmente se encuentra cursando el décimo semestre de la carrera de Electricidad en la Universidad Politécnica Salesiana. jrualesm@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Manuel Dario Jaramillo Monge (Y' 1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, cursó estudios de posgrado en la Universidad de Newcastle, Reino Unido, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. mjaramillo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2023 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Johanna Paola Ruales Morales con documento de identificación N° 0604400887 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de octubre del año 2023

Atentamente,



Johanna Paola Ruales Morales
0604400887

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Johanna Paola Ruales Morales con documento de identificación No. 0604400887, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Planificación de la expansión de la red eléctrica a mediano plazo mediante análisis de consumo eléctrico en los sectores residencial, industrial y comercial, usando series temporales SARIMA: Caso de estudio Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA)-Ecuador”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de octubre del año 2023

Atentamente,



Johanna Paola Ruales Morales

0604400887

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación N° 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED ELÉCTRICA A MEDIANO PLAZO MEDIANTE ANÁLISIS DE CONSUMO ELÉCTRICO EN LOS SECTORES RESIDENCIAL, INDUSTRIAL Y COMERCIAL, USANDO SERIES TEMPORALES SARIMA: CASO DE ESTUDIO EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A. (EERSA)-ECUADOR, realizado por Johanna Paola Ruales Morales con documento de identificación N° 0604400887, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de octubre del año 2023

Atentamente,



Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc
1714298005

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
1.1	Estado del arte.	3
2	Marco teórico.....	4
2.1	Demanda Eléctrica.	4
2.1.1	Tipos de consumidores.	4
2.2	Situación de la demanda eléctrica en Ecuador.	5
2.3	Planificación de la red eléctrica.	6
2.3.1	Planificación considerando el horizonte de tiempo.....	6
2.3.2	Planificación considerando el grado de incertidumbre.....	6
2.3.3	Planificación mediante la predicción.	7
2.3.4	Criterios de confiabilidad	7
2.4	Series temporales.....	7
2.4.1	Modelo autorregresivo (AR).....	8
2.4.2	Modelo de media móvil (MA).....	8
2.4.3	Modelo autorregresivo de media móvil (ARMA).....	8
2.4.4	Modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA).....	8
2.4.5	Modelo estacional autorregresivo de media móvil (SARIMA).....	9
2.5	Predicción del consumo eléctrico.....	9
3	Metodología.....	10
3.1	Casos de estudio.	10
3.1.1	Caso de estudio: Sector Residencial	11
3.1.2	Caso de estudio: Sector Industrial	11
3.1.3	Caso de estudio: Sector Comercial	11
3.2	Descripción de la metodología.	12
3.2.1	Rangos máximos de los coeficientes de los modelos.....	13
3.2.2	Validación de datos, previo análisis de series temporales	13
3.2.3	Restricciones Modelo ARMA	14
3.2.4	Restricciones Modelo ARIMA.....	14
3.2.5	Restricciones Modelo SARIMA	14
3.2.6	Predicción de la demanda eléctrica.....	15
4	Análisis de resultados	15
4.1.1	Caso 1 residencial 2001-2016.....	15
4.1.2	Caso 5 residencial 2001-2020.....	17
4.1.3	Caso 1 industrial 2001-2016.....	18

4.1.4	Caso 5 industrial 2001-2020.....	20
4.1.5	Caso 1 comercial 2001-2016.....	21
4.1.6	Caso 5 comercial 2001-2020.....	23
4.1.7	Expansión de la red eléctrica.	25
5	Conclusiones.....	29
5.1	Trabajos futuros	30
6	Referencias.....	30
6.1	Matriz de Estado del Arte	33
6.2	Resumen de indicadores.....	36
	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Demanda eléctrica en el sector residencial.	11
Figura 2. Demanda eléctrica en el sector industrial.	11
Figura 3. Demanda eléctrica en el sector comercial.	12
Figura 4. Diagrama de flujo metodología.	12
Figura 5. Curva de normalidad sector residencial.	13
Figura 6. Curva de normalidad sector industrial.	13
Figura 7. Curva de normalidad sector comercial.	13
Figura 8. Diagrama de flujo SARIMA.	14
Figura 9. Modelo SARIMA aplicado al 2016 residencial.	16
Figura 10. Predicción residencial al año 2018.	16
Figura 11. Modelo SARIMA aplicado al 2020 residencial.	17
Figura 12. Predicción residencial al año 2022.	18
Figura 13. Modelo SARIMA aplicado al 2016 industrial.	19
Figura 14. Predicción industrial al año 2018.	19
Figura 15. Modelo SARIMA aplicado al 2020 industrial.	20
Figura 16. Predicción industrial al año 2022.	21
Figura 17. Modelo SARIMA aplicado al 2016 comercial.	22
Figura 18. Predicción comercial al año 2018.	23
Figura 19. Modelo SARIMA aplicado al 2020 comercial.	24
Figura 20. Predicción comercial al año 2022.	24
Figura 21. Predicción Residencial 2020-2021 26	26
Figura 22. Predicción Industrial 2020-2021 26	26
Figura 23. Predicción Comercial 2020-2021 26	26
Figura 24. Predicción Residencial 2021-2022 28	28
Figura 25. Predicción Industrial 2021-2022 28	28
Figura 26. Predicción Comercial 2021-2022 28	28
Figura 27. Generación vs Predicción Consumo Modelo 2021 29	29
Ilustración 28. Generación vs Predicción Consumo Modelo 2022 29	29
Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	
Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	36
Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte.	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Usuarios y crecimiento de consumo de energía en el sector residencial [22].	5
Tabla 2. Usuarios y crecimiento de consumo de energía en el sector comercial [22].	5
Tabla 3. Usuarios y crecimiento de consumo de energía en el sector industrial [22].	6
Tabla 4. Horizontes de tiempo para cada caso de estudio.	10
Tabla 5. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 1 residencial.	15
Tabla 6. Errores en los modelos estimados en el caso 1 residencial.	15
Tabla 7. Errores en la predicción en el caso 1 residencial.	16
Tabla 8. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 2 residencial.	17
Tabla 9. Errores en los modelos estimados en el caso 2 residencial.	17
Tabla 10. Errores en la predicción en el caso 2 residencial.	18
Tabla 11. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 1 industrial.	18
Tabla 12. Errores en los modelos estimados en el caso 1 industrial.	18
Tabla 13. Errores en la predicción en el caso 1 industrial.	19
Tabla 14. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 2 industrial.	20

Tabla 15. Errores en los modelos estimados en el caso 2 industrial.	20
Tabla 16. Errores en la predicción en el caso 2 industrial.....	21
Tabla 17. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 1 comercial.....	21
Tabla 18. Errores en los modelos estimados en el caso 1 comercial.	22
Tabla 19. Errores en la predicción en el caso 1 comercial.	22
Tabla 20. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 2 comercial.....	23
Tabla 21. Errores en los modelos estimados en el caso 2 comercial.	23
Tabla 22. Errores en la predicción en el caso 2 comercial.	24
Tabla 23. Predicción consumo (MWh) EERSA año 2020-2021 [39].....	25
Tabla 24. Predicción consumo (MWh) en base a los modelos obtenidos año 2020-2021.....	25
Tabla 25. Consumo real (MWh) 2020-2021	25
Tabla 26. Predicción consumo (MWh) EERSA año 2021-2022 [40].....	27
Tabla 27. Predicción consumo (MWh) en base a los modelos obtenidos año 2021-2022.....	27
Tabla 28. Consumo real (MWh) 2021-2022	27
Tabla 29. Generación (MW) 2021	28
Tabla 30. Predicción de consumo (MW) 2021	28
Tabla 31. Generación (MW) 2022	29
Tabla 32. Predicción de consumo (MW) 2022	29
Tabla 33. Matriz de estado del arte.	33

PLANIFICACIÓN DE LA EXPANSIÓN DE LA RED ELÉCTRICA A MEDIANO PLAZO MEDIANTE ANÁLISIS DE CONSUMO ELECTRICO EN LOS SECTORES RESIDENCIAL, INDUSTRIAL Y COMERCIAL, USANDO SERIES TEMPORALES SARIMA: CASO DE ESTUDIO EMPRESA ELÉCTRICA RIOBAMBA S.A. (EERSA)- ECUADOR.

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo realizar la planificación de expansión de la red eléctrica en la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA) en Ecuador bajo el criterio de confiabilidad nivel 1 en donde solo se considera la generación y la carga, con una probabilidad de servicio de 1. Para aplicar este criterio se utilizan técnicas de predicción basadas en series temporales se emplean modelos como ARMA, ARIMA y SARIMA para predecir el consumo eléctrico en los sectores residencial, industrial y comercial. Se utiliza el software Matlab para el diseño de los modelos y la predicción de la demanda. Los datos de consumo de energía eléctrica se obtuvieron de la información histórica que posee la EERSA, abarcando desde enero del 2001 hasta noviembre del 2022. La predicción de la demanda eléctrica muestra resultados cercanos a la realidad antes del año 2020, pero se observa una variación considerable en los últimos años debido a factores atípicos como la pandemia del COVID-19. En el sector industrial, la predicción se acerca a la demanda real antes de 2018, sin embargo, después de esta fecha, la demanda se ve afectada por la pandemia y por la presencia de un gran consumidor, la empresa Cemento Chimborazo, que entra y sale de los consumidores de la EERSA en lapsos de tiempo específicos, lo cual provoca una variación considerable en la demanda eléctrica en ese sector. Mientras que la expansión de la red en el consumo eléctrico indica que la predicción obtenida tiene una mayor aproximación a los datos reales de crecimiento de consumo en comparación a la predicción generada por la EERSA.

Palabras Clave: Consumo de energía, análisis de series temporales, predicción.

Abstract

The objective of this article is to carry out the expansion planning of the electrical network in the Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA) in Ecuador under the criterion of level 1 reliability, which considers only generation and load with a probability of service of 1. Prediction techniques based on time series are used, employing models such as ARMA, ARIMA, and SARIMA to forecast electricity consumption in residential, industrial, and commercial sectors. The Matlab software is used for model design and demand prediction. Energy consumption data was obtained from historical information held by EERSA, spanning from January 2001 to November 2022. The prediction of electricity demand shows results close to reality before the year 2020, but a considerable variation is observed in recent years due to atypical factors such as the COVID-19 pandemic. In the industrial sector, the prediction aligns with actual demand before 2018. However, after that date, the demand is affected by the pandemic and the presence of a major consumer, Cemento Chimborazo, which intermittently joins and leaves EERSA's consumers within specific time periods, causing significant variation in electricity demand in that sector. Moreover, the expansion of the network in electricity consumption indicates that the obtained prediction has a closer approximation to the actual consumption growth data compared to the prediction generated by EERSA.

Keywords: Energy consumption, time series analysis, forecasting.

1 Introducción

La demanda eléctrica es un concepto de gran interés, tomando en cuenta que es un dato variable que depende de diversos factores, por tanto es necesario plantear modelos que ayuden a la predicción del crecimiento del consumo eléctrico [1].

La expansión de la red eléctrica es una característica esencial para garantizar un suministro confiable de energía que satisfaga las demandas crecientes de los diferentes usuarios como lo son: residenciales, industriales y comerciales.

Es necesario realizar un análisis de consumo eléctrico para planificar la expansión de la red a corto, mediano o largo plazo [2]. Este análisis proporciona información fundamental para generar estrategias que puedan satisfacer la demanda creciente optimizando la asignación de recursos y reduciendo costos.

El objetivo principal de la planificación de expansión es determinar qué elementos se deben implementar o construir para cumplir con los requisitos de la demanda a fin de maximizar la confiabilidad del sistema con costos de inversión mínimos [3].

Existen varios modelos matemáticos que permiten realizar el análisis para la planificación de la red, entre ellos se encuentran: la planificación considerando el horizonte de tiempo, considerando el grado de incertidumbre y la planificación mediante la predicción en donde utiliza las series temporales como lo son ARMA, ARIMA y SARIMA [4].

Las series temporales son un conjunto de datos obtenidos a lo largo de un determinado intervalo de tiempo que representan el comportamiento de una variable, con la finalidad de analizar estos valores en el tiempo [5].

El realizar la predicción de consumo eléctrico puede brindar diversos beneficios tanto a las empresas distribuidoras, como a las generadoras permitiendo la toma de decisiones de manera estratégica y

optimizando sus operaciones siendo el beneficiario final los distintos tipos de consumidores [6].

El objetivo de este artículo es realizar la planificación de la red eléctrica a mediano plazo mediante el análisis de consumo de electricidad en los sectores residencial, industrial y comercial. Para el análisis se utilizarán series temporales las cuales realizarán un estudio de datos de consumo históricos de la EERSA para posteriormente desarrollar modelos precisos que permita pronosticar la demanda futura de energía eléctrica.

Los datos de demanda de energía eléctrica abarcan los años 2001-2022, estos fueron obtenidos mediante información histórica de la EERSA, para verificar que los datos no se encuentren manipulados se realizará un análisis estadístico mediante la curva de normalización, la cual nos garantizará que los datos pueden ser utilizados para la predicción de la demanda.

Con la información de la demanda real de la EERSA se propone realizar una predicción a mediano plazo, la cual consta de 2 años (24 meses).

El diseño de los modelos de series temporales y la predicción de la demanda se realizarán en el software Matlab en donde se determinará el mejor modelo en base al mínimo error cuadrático y mínimo error promedio.

Para realizar la planificación de expansión de la red se utiliza el criterio de confiabilidad nivel 1, con una probabilidad de servicio 1, lo cual indica que todos los generadores van a estar funcionando con una tasa de falla 0.

Este criterio no toma en consideración la capacidad de los sistemas de transmisión y distribución para llevar la energía a los puntos de consumo [7].

El presente documento consta de las siguientes secciones, la introducción y precedentes en la sección 1, el marco teórico en donde se definen los distintos

métodos de predicción de demanda eléctrica se encuentra en la sección 2.

La sección 3 consta de la metodología en donde se explica de manera detallada el proceso que se realizó para llegar a los resultados con los modelos de predicción, mientras que en la sección 4 se encuentran los análisis de la información resultante de los modelos implementados, así como las conclusiones y trabajos futuros.

1.1 Estado del arte.

En la investigación citada en [8] tiene como objetivo predecir el consumo de energía eléctrica en escenarios variables, haciendo un enfoque en la adaptabilidad a cambios inesperados de la demanda, utiliza los modelos de series temporales (ARMA, ARIMA y SARIMA) con el propósito de analizar el consumo de electricidad en la ciudad de Quito-Ecuador para predecir la demanda en los años 2019 y 2020, época afectada por la pandemia del COVID-19.

Mediante este método los investigadores obtienen un error del 2.5%, que inferior al error medio del 5.43%, representando un 50% de precisión del modelo para seguir la tendencia de la demanda eléctrica y adaptarse a cambios repentinos.

Los autores en [9] realizaron el análisis de previsión de la demanda de energía a largo plazo en Pakistán para diferentes sectores económicos, entre ellos electricidad, petróleo, gas natural, carbón y GLP; utilizaron el modelo ARIMA, el modelo Holt-Winter y el modelo de planificación alternativa de energía a largo plazo (LEAP), teniendo como resultado que el modelo de serie temporal ARIMA es el más adecuado para pronosticar la demanda de energía eléctrica, estimando que el sector industrial tendrá mayor demanda para el año 2035, seguido de los sectores residencial y de transporte.

El artículo [10] tiene como objetivo predecir la demanda de manera precisa en Assam-India, utilizando los modelos ARIMA y SARIMA, y determinando cual

tiene una mejor predicción con el menor error. Los investigadores establecieron que el modelo SARIMA es el que mejor se ajusta a los datos originales dando una predicción más certera con un intervalo de confianza del 95% aproximadamente.

En la investigación [11], los autores se plantean como objetivo realizar la predicción de la producción de energía eléctrica en Xinjiang-China, para esto implementaron el modelo SARIMA y el método Holt-Winters analizando datos desde enero del 2001 hasta agosto del 2020. Los resultados obtenidos concluyen que el modelo SARIMA encontrado mostró mayor precisión en la predicción comparado con el otro método, realizando una predicción mensual desde agosto del 2021 hasta agosto del 2022. Los errores utilizando el modelo SARIMA fueron pequeños en comparación a los valores reales, lo cual indica un buen rendimiento en la predicción del modelo.

En el artículo [12] propone realizar la predicción de carga eléctrica a corto plazo en Hanoi. La metodología utilizada se basa en la implementación del modelo SARIMA a los datos de 2019 a 2021, obteniendo como resultados la garantía de precisión de la predicción, además concluye que el modelo puede ser implementado para predicciones de carga en otras localidades de Vietnam, así como para predicciones de electricidad en general.

El documento [13] propone como objetivo evaluar dos técnicas de predicción del consumo de energía en una universidad ubicada en Brasil. Para esto utilizaron sensores inteligentes para recopilar los datos de consumo, a estos valores se probaron diferentes modelos de predicción, entre ellos el modelo SARIMA y redes neuronales autorregresivas (NARNET). Lo resultados muestran que ambos métodos tuvieron un buen desempeño en la predicción del consumo de energía, sin embargo, el modelo SARIMA fue más adecuado para realizar la predicción a largo plazo, mientras que el método NARNET

funciona de mejor manera para predicciones a corto plazo.

El artículo [14] habla sobre examinar el plan de expansión de generación eléctrica de Ghana y compararlo con propuestas de expansión con mayor penetración de energía renovable, para lo cual utiliza la metodología de escenarios de Schwartz para crear escenarios y analizarlos mediante el modelo de planificación de alternativas a largo plazo (LEAP), teniendo como resultados beneficios económicos y reducciones de gases invernadero en los escenarios de energía renovable propuestos en comparación al escenario base.

2 Marco teórico

Entre los principales problemas que presentan las empresas de energía eléctrica de generación y distribución están el abastecimiento, el consumo y la conservación de la energía [15].

2.1 Demanda Eléctrica.

La demanda de consumo eléctrico en kilovatios hora (kWh) es la cantidad de energía que necesita la carga conectada al sistema de distribución para su funcionamiento [1].

Al hablar de demanda se pueden definir los siguientes términos: la demanda punta o demanda máxima, es el valor más alto registrado en un determinado periodo de tiempo, y la demanda mínima es el valor más bajo registrado en un determinado periodo de tiempo [16].

Es importante saber que la demanda eléctrica es un dato variable, que depende de varios factores como pueden ser el tipo y cantidad de electrodomésticos que se utiliza, la hora del día, ya que existen horas específicas del día en donde se genera mayor consumo, los integrantes de una vivienda, así como las horas del día son un factor de igual manera lo son los días de la semana [1].

Otro factor que puede llegar a variar la demanda eléctrica son las estaciones del año, que conllevan el uso de

electrodomésticos para mantener una temperatura por debajo de 32°C durante el día y 24°C durante la noche [17] en de las viviendas [18].

A las empresas distribuidoras se les presenta una tarea desafiante, que es mantener un balance entre su requerimiento de energía y lo que consumen los usuarios finales, por lo tanto necesitan encontrar soluciones, especialmente para cubrir la demanda máxima [19].

La relación entre incremento poblacional y consumo energético es directamente proporcional, a un mayor aumento de habitantes se presenta la necesidad de un mayor consumo eléctrico, lo cual necesita fuentes de generación adicionales; mientras que por otro lado la generación y la entrega de energía van a paso lento. Por tal motivo, es imprescindible que para tener un bienestar grupal y mantener una buena calidad de vida se realice una gestión y uso más eficientes de la energía eléctrica [15].

2.1.1 Tipos de consumidores.

En el mercado eléctrico podemos encontrar tres tipos de consumidores:

- **Residenciales:** Engloba a la persona jurídica o natural, privada o pública, que consume energía eléctrica únicamente con el propósito de uso doméstico, es decir en hogares independientemente del valor de la carga de la carga conectada [20].
La demanda residencial se basa en el consumo que tienen las personas dentro de una vivienda, las cuales reciben un estrato definido según su consumo [21].
- **Comerciales:** Engloba a la persona jurídica o natural, privada o pública, que consume energía para uso de negocios o actividades con fines de lucro [20].

- Industriales: Engloba a la persona jurídica o natural, privada o pública, que consume energía eléctrica con el fin de fabricar o restaurar productos, entre estos están los productos de agricultura, ganadería y pesca [20].

2.2 Situación de la demanda eléctrica en Ecuador.

En la siguiente sección se presenta información acerca del consumo de energía eléctrica en Ecuador, en los sectores residencial, comercial e industrial.

Sector residencial:

En este sector hay una proyección para el periodo 2019-2027 con un crecimiento promedio anual del 2,45%, y la proyección de usuarios esperada para el año 2027 es de 5,66 millones [22].

Acerca del crecimiento de consumo de energía en el periodo 2019-2027 el valor promedio será aproximadamente de 3,7%, con un total del 10.256 [GWh] en el año 2027. El consumo promedio por usuario residencial en el 2027 deberá alcanzar 1,81 [MWh/año].

Sector comercial:

En el periodo 2019-2027 la proyección del número de usuarios comerciales tiene una tasa de crecimiento promedio de 3,27%, de tal manera que en el año 2027 habría un total de 649,555 usuarios [22].

En cuando a la proyección de consumo de energía tiene una tasa de crecimiento anual promedio de 5,74% con lo cual en el 2027 alcanzaría 6,322[GWh].

Sector industrial:

En el periodo 2019-2027 este sector tiene un crecimiento promedio anual de 3,10% llegando a 160.619 usuarios en el 2027. El crecimiento promedio anual de consumo de energía es de 8,38% con un total de 15.335[GWh] en el 2027 [22].

A continuación, se presenta un resumen de los datos de los diferentes tipos de consumidores obtenidos en el estudio de la demanda eléctrica del Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables:

Tabla 1. Usuarios y crecimiento de consumo de energía en el sector residencial [22].

Sector Residencial		
Año	N° Clientes	Energía [GWh]
2012	3.853	5.629
2013	4.011	5.881
2014	4.118	6.364
2015	4.224	6.928
2016	4.334	7.105
2017	4.468	7.298
2018	4.559	7.400
2019	4.725	7.894
2020	4.864	8.176
2021	4.695	8.463
2022	5.084	8.755
2023	5.203	9.053
2024	5.319	9.355
2025	5.438	9.665
2026	5.552	9.960
2027	5.667	10.256

Tabla 2. Usuarios y crecimiento de consumo de energía en el sector comercial [22].

Sector Comercial		
Año	N° Clientes	Energía [GWh]
2012	439	3.209
2013	446	3.486
2014	456	3.786
2015	466	3.981
2016	470	3.838
2017	482	3.843
2018	486	3.831
2019	505	4.219
2020	521	4.438
2021	538	4.668
2022	555	4.910
2023	573	5.165
2024	591	5.433
2025	610	5.714
2026	629	6.011
2027	650	6.322

Tabla 3. Usuarios y crecimiento de consumo de energía en el sector industrial [22].

Sector Industrial		
Año	Nº Clientes	Energía [GWh]
2012	106	6.097
2013	117	6.389
2014	120	6.790
2015	121	6.949
2016	120	6.827
2017	121	7.073
2018	122	7.455
2019	127	8.668
2020	131	9.305
2021	135	9.990
2022	139	10.728
2023	143	11.520
2024	147	12.373
2025	151	13.289
2026	156	14.275
2027	161	15.335

2.3 Planificación de la red eléctrica.

La planificación de expansión tiene como objetivo principal determinar la generación necesaria para poder atender los requerimientos de la demanda, con el propósito de incrementar la confiabilidad en el sistema al mínimo costo de inversión [3].

La planificación permite al sistema cubrir el adecuado abastecimiento de energía eléctrica entre los diferentes puntos del sistema de potencia en el que está inmerso el sistema de distribución. Una inadecuada planificación puede causar problemas como altos costos operativos y principalmente mantener a un sistema operando de manera ineficiente por un largo periodo de tiempo [23].

Existen varios métodos que se pueden utilizar para la planificación del sistema eléctrico, entre los cuales se encuentran:

- Planificación considerando el horizonte de tiempo.
- Planificación tomando en cuenta el grado de incertidumbre.
- Planificación mediante la predicción.

2.3.1 Planificación considerando el horizonte de tiempo.

A continuación, se hablará de las metodologías estática y multi-periodo también conocida como dinámica. [24]:

- **Estática.**

Analiza un periodo de tiempo único en periodo de la planificación, la inversión es al inicio de la expansión.

- **Multi-periodo o dinámica.**

Da a conocer cómo se debe modificar la red año tras año para obtener la óptima expansión, la inversión dependerá de cada periodo de tiempo.

2.3.2 Planificación considerando el grado de incertidumbre.

La incertidumbre hace referencia a la falta de conocimiento sobre cómo se desarrollarán factores o eventos en un futuro, por cual es una variable importante que se debe considerar al momento de realizar una planificación de expansión, ya que se involucra en factores eléctricos como el crecimiento de la demanda, y en factores económicos como los precios del mercado eléctrico [24].

Entre las variables que afectan a la incertidumbre se encuentran:

- Los cambios estacionales ya que es probable que afecte a la demanda debido al uso de sistemas de calefacción.
- Los cambios en el comportamiento del consumidor provocan incertidumbre cuando es difícil predecir cómo y cuándo adoptarán nuevos hábitos o nuevas tecnologías.
- Los cambios demográficos como el crecimiento o la migración de población.

Al hablar de generación se debe tomar en cuenta los factores ambientales como:

- La cantidad de lluvia para centrales hidroeléctricas.
- La velocidad de viento para centrales eólicas.
- La radiación solar para las centrales fotovoltaicas.

Estas variables pueden dificultar la precisión de las predicciones y afectar la capacidad de planificar la generación y distribución de energía eléctrica, provocando desequilibrios entre la oferta y la demanda.

Se han desarrollado varios métodos que, si bien no permiten controlar la incertidumbre, ayudan a minimizar las consecuencias que esta puede llegar a causar.

La cantidad de datos que se va a analizar es un factor importante, ya que a medida que se consideren más datos menor será la incertidumbre y mientras sean menos los datos mayor será la incertidumbre.

2.3.3 Planificación mediante la predicción.

Asegurar la confiabilidad, es decir, mantener un abastecimiento constante energía eléctrica en el sistema es uno de los principales objetivos de las empresas distribuidoras, para lo cual es necesario una correcta planificación [25].

La predicción de la demanda de energía eléctrica es un tema importante a considerar en la ingeniería, por tanto, es necesario escoger la metodología adecuada, ya que esta dará información para garantizar un constante suministro de energía eléctrica en las mejores condiciones técnico económicas [4].

Esta metodología puede ser utilizada para varios horizontes de tiempo, los cuales podrías ser: a muy corto plazo, a corto plazo, a mediano plazo y a largo plazo [2].

Los métodos que son utilizados para realizar la predicción se denominan series temporales, entre las cuales se encuentran los modelos: serie de tiempo promedio

móvil autorregresivo (ARMA), serie de tiempo autorregresivo integrado de promedio móvil (ARIMA) y la serie de tiempo de media móvil integrada autorregresiva estacional (SARIMA).

El pronóstico está vinculado a varios factores, entre los cuales están: incertidumbres, políticas, regulaciones, experiencias previas, la variabilidad del costo de la energía, entre otros [26].

2.3.4 Criterios de confiabilidad

La confiabilidad es la probabilidad de que un componente o sistema cumpla con su función en un determinado intervalo de tiempo ante condiciones de operación normales [7].

Existen tres niveles jerárquicos en los criterios de confiabilidad, los cuales se dividen según el área de aplicación en los sistemas de potencia, los cuales son:

- Nivel Jerárquico I

En este nivel interviene la generación y la carga, se omite el estudio de los sistemas de transmisión y distribución.

- Nivel Jerárquico II

El nivel II evalúa el conjunto de generación y transmisión para cumplir con los requerimientos de la demanda en los puntos de carga.

- Nivel Jerárquico III

Analiza el conjunto de generación, transmisión y distribución.

2.4 Series temporales.

Una serie temporal es una sucesión de datos tomados en un cierto intervalo de tiempo de una variable, con la finalidad de que estos valores estén ordenados en el tiempo. Las series temporales representan cual es el comportamiento que toma una variable específica a lo largo del tiempo [5].

Existen varios factores que llegan a afectar a las series temporales, entre estos se

encuentran los factores estacional, aleatorio, cíclico y tendencial.

El factor tendencial analiza datos del comportamiento de la serie a largo plazo, el factor estacional recolecta los datos repetitivos de ciclo corto, mientras que el factor cíclico permite recolectar datos repetitivos de ciclo largo, y el factor aleatorio ayuda a no tener modelos deterministas [27].

Las series temporales tienen la presencia concurrente de un factor cíclico y un factor tendencial [28]. Facilitan la predicción de datos futuros mediante un análisis de tendencia [29].

Entre los principales modelos de series temporales se encuentran los siguientes:

2.4.1 Modelo autorregresivo (AR).

El modelo AR es aquel que en función de su pasado puede generar el presente o futuro de una variable, cuenta con un coeficiente denominado p , el cual define el número de retardos que se debe considerar [5].

El coeficiente p en la serie temporal muestra el número de términos que se manejan para predecir el valor presente.

$$y_t = \delta + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + a_t \quad (1)$$

Donde:

y_t Serie de tiempo
 y_{t-1}, y_{t-2}, \dots Serie de tiempo en pasos anteriores
 δ Media del proceso
 a_t Término de error aleatorio
 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ Son los coeficientes desconocidos que relacionan a la serie de tiempo con sus pasos anteriores.

2.4.2 Modelo de media móvil (MA).

El modelo MA es estacionario con memoria limitada, los pronósticos que generan tienen variaciones hasta que llega a la predicción establecida por el coeficiente q [5].

El coeficiente q hace referencia al número de términos de retraso en el modelo

$$y_t = \delta + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} + a_t \quad (2)$$

Donde:

y_t Serie de tiempo
 δ Media del evento
 a_t Error aleatorio
 a_{t-1}, a_{t-2}, \dots Error aleatorio en pasos anteriores.
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ Son los coeficientes que relacionan a la serie de tiempo con sus errores pasados.

2.4.3 Modelo autorregresivo de media móvil (ARMA).

Este modelo es una combinación de AR y MA, ya que está definido por perturbaciones aleatorias y retardos [5].

$$y_t = \delta + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} + a_t \quad (3)$$

Donde:

y_t Serie de tiempo
 δ Media del evento
 a_t Error aleatorio
 a_{t-1}, a_{t-2}, \dots Error aleatorio en pasos anteriores.
 y_{t-1}, y_{t-2}, \dots Serie de tiempo en pasos anteriores
 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ Son los coeficientes desconocidos que relacionan a la serie de tiempo con sus pasos anteriores.
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p$ Son los coeficientes que relacionan a la serie de tiempo con sus errores pasados.

2.4.4 Modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA).

El modelo ARIMA se caracteriza por una diferenciación de la serie, cuyo coeficiente

está determinado por d , considerando p y q [5].

El coeficiente d en la serie temporal demuestra el grado de diferenciación aplicado con el objetivo de convertir esta serie en una forma estacionaria antes de aplicar los componentes de los modelos AR y MA.

$$z_t = \delta + \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} + a_t \quad (4)$$

Donde:

z_t Serie de tiempo diferenciada estacionaria.

z_{t-1}, z_{t-2}, \dots Serie de tiempo diferenciada estacionaria en pasos anteriores.

δ Media del evento.

a_t Error aleatorio.

a_{t-1}, a_{t-2}, \dots Error aleatorio en pasos anteriores.

ϕ, θ Coeficientes que relacionan los errores y el pasado.

2.4.5 Modelo estacional autorregresivo de media móvil (SARIMA).

El SARIMA es empleado en series con periódicas definidas como L que sean inferiores a 12 meses. Es decir, se toman en cuenta retardos regulares y estacionales [5].

$$z_t = \delta + \phi_1 z_{t-1} + \phi_2 z_{t-2} + \dots + \phi_p z_{t-p} + \phi_{1,L} z_{t-1L} + \phi_{2,L} z_{t-2L} + \dots + \phi_{p,L} z_{t-pL} + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} + \theta_1 a_{L-1} + \theta_2 a_{L-2} + \dots + \theta_Q a_{t-QL} + a_t \quad (5)$$

Donde:

z_t Serie de tiempo estacionaria.

$L, 2L, 3L, \dots$ Desfase de tipo estacional.

z_{t-1}, z_{t-2}, \dots Serie de tiempo diferenciada estacionaria en pasos anteriores.

a_{t-1}, a_{t-2}, \dots Error aleatorio en pasos anteriores.

$1, 2, 3, \dots$ Desfase de tipo regular

P Autorregresivo estacional.

p Autorregresivo regular.

Q Media móvil estacional.

q Media móvil regular.

L Periodicidad.

2.5 Predicción del consumo eléctrico

La dificultad de almacenar cantidades grandes de energía, al efecto perjudicial que provoca al medio ambiente el generar energía eléctrica de manera masiva y su elevado costo, es importante implementar modelos que permitan la predicción de consumo de energía a corto, mediano y largo plazo, con la finalidad de tener un pronóstico futuro cercano a la realidad [30].

La predicción de la demanda está relacionada con varios factores, como la volatilidad de los precios de energía, cargas no lineales, incertidumbre, normativa, entre otros [6]. La predicción se relaciona con factores medioambientales y económicos.

La predicción de consumo eléctrico puede brindar beneficios tanto a las empresas distribuidoras, a la generación, a los consumidores y a los grandes consumidores permitiendo tomar decisiones de estrategias y optimizar su operación [6].

Las entidades reguladoras como son la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR) solicitan que las empresas de distribución realicen el análisis anual para la tendencia de la demanda con la finalidad de tener una gestión eficiente en sus sistemas eléctricos, ahorrando recursos y manteniendo la estabilidad en los mercados [31].

El pronóstico de demanda eléctrica es una planificación que permite a todos los integrantes del sistema eléctrico de potencia cooperar para tener un mayor control en la conservación de los recursos naturales y por

lo tanto poder suministrar de energía eléctrica acorde a la demanda creciente [32].

La ventaja de implementar la predicción del consumo en los sistemas eléctricos es que permite una operación y planificación de manera segura. Las técnicas que se utilizan para la predicción dependen del horizonte de tiempo que se desee analizar;

Las técnicas aplicadas utilizan datos históricos para crear modelos matemáticos que permitan predecir crecimientos futuros, es decir se usan datos actuales para conocer lo que va a pasar en un horizonte futuro en el consumo de energía eléctrica [33].

En cada horizonte de predicción se deben considerar ciertos factores que pueden afectar a la formulación de las técnicas, entre ellos están los tipos de consumidores, el tiempo, el clima, costumbres de uso, etc. [34].

3 Metodología

La demanda eléctrica es variable a lo largo de los años, por lo tanto, es importante realizar una predicción para poder solventar con energía eléctrica la demanda que se presente a futuro.

Existen consecuencias negativas cuando se realizan planes de expansión errados, como el comprometer cantidades grandes de capital durante largos periodos, la necesidad de plazos largos para agregar la capacidad de producción, costos por sobredimensionamiento, entre otros; por este motivo es importante realizar planes de expansión más exactos [14].

Un buen proceso de predicción debe garantizar información más precisa y útil para el planificador.

Tomando en cuenta esto, se analizarán como caso de estudio los datos de demanda eléctrica de los sectores residencial, industrial y comercial de la EERSA.

Un buen proceso de predicción debe garantizar información más precisa y útil para el planificador.

3.1 Casos de estudio.

La demanda eléctrica por analizar se agrupará en tres sectores, los cuales son: residencial, comercial e industrial.

A continuación, se detallan los horizontes de tiempo que se van a analizar en cada caso de estudio:

Tabla 4. Horizontes de tiempo para cada caso de estudio.

Rango de tiempo para creación del modelo	Casos de estudio			Periodo de tiempo para predicción
2001-2016	Residencial 1	Comercial 1	Industrial 1	2017-2018
2001-2017	Residencial 2	Comercial 2	Industrial 2	2018-2019
2001-2018	Residencial 3	Comercial 3	Industrial 3	2019-2020
2001-2019	Residencial 4	Comercial 4	Industrial 4	2020-2021
2001-2020	Residencial 5	Comercial 5	Industrial 5	2021-2022

Como se puede observar en la tabla 4, existen cinco casos de estudio, sin embargo, para el análisis de resultados se considerarán únicamente el caso inicial y el caso final en casa sector (residencial, industrial y comercial). Se modelarán los

datos en los tiempos establecidos para posteriormente predecir un intervalo de 24 meses.

3.1.1 Caso de estudio: Sector Residencial

El sector residencial comprende instalaciones en diferentes tipos de viviendas.

La información de la demanda eléctrica del sector residencial fue adquirida mediante los datos históricos de la EERSA, los cuales se obtienen mediante el catastro mensual (desglose del consumo usuario por usuario), la agencia de regulación utiliza un sistema llamado SISDAT a nivel nacional en donde publican la recopilación de demanda de todas las empresas eléctricas, por lo tanto, es información pública.

Los datos por analizar abarcan desde enero del año 2001 hasta noviembre del año 2022 como se observa en la figura 1, en cuando al sector residencial se puede observar que la demanda va creciendo de forma normal, sin tener decaimientos de demanda visibles.

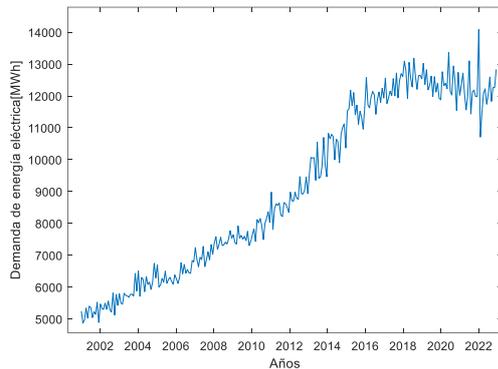


Figura 1. Demanda eléctrica en el sector residencial.

3.1.2 Caso de estudio: Sector Industrial

El sector industrial comprende instalaciones en diferentes tipos de industrias como pueden ser manufactura, gas, etc.

La información de la demanda eléctrica del sector industrial fue adquirida mediante los datos históricos de la EERSA, los cuales se obtienen mediante el catastro mensual (desglose del consumo usuario por usuario), la agencia de regulación utiliza un sistema llamado SISDAT a nivel nacional en donde publican la recopilación de demanda de todas las empresas eléctricas, por lo tanto, es información pública.

Los datos por analizar abarcan desde enero del año 2001 hasta noviembre del año 2022 como se observa en la figura 2, en cuando al sector industrial se puede observar que existen salidas de demanda en ciertos años, esto es causado por la Cemento Chimborazo, ya que esta institución suele comprar energía eléctrica a la EERSA, pero también suele tener su propia generadora. Cuando la Cemento Chimborazo consume energía eléctrica de su propia generación deja de ser cliente de la EERSA y por lo tanto el consumo de la demanda en el sector industrial decae.

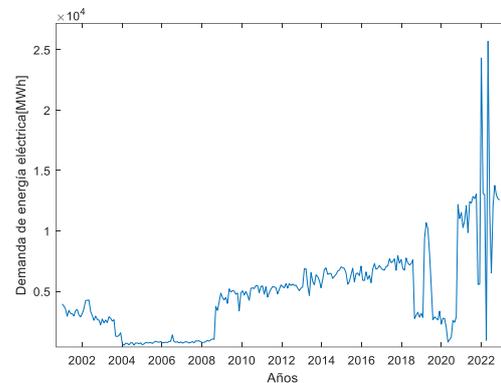


Figura 2. Demanda eléctrica en el sector industrial.

3.1.3 Caso de estudio: Sector Comercial

El sector comercial comprende instalaciones en diferentes tipos de establecimientos comerciales como hoteles, tiendas, restaurantes, etc.

La información de la demanda eléctrica del sector comercial fue adquirida mediante los datos históricos de la EERSA, los cuales se obtienen mediante el catastro mensual (desglose del consumo usuario por usuario), la agencia de regulación utiliza un sistema llamado SISDAT a nivel nacional en donde publican la recopilación de demanda de todas las empresas eléctricas, por lo tanto, es información pública.

Los datos por analizar abarcan desde enero del año 2001 hasta noviembre del año 2022 como se observa en la figura 3, se puede observar que en los años 2020 al 2022 decae la demanda en el sector comercial, lo cual puede ser causado por la pandemia que cruzó durante esos años.

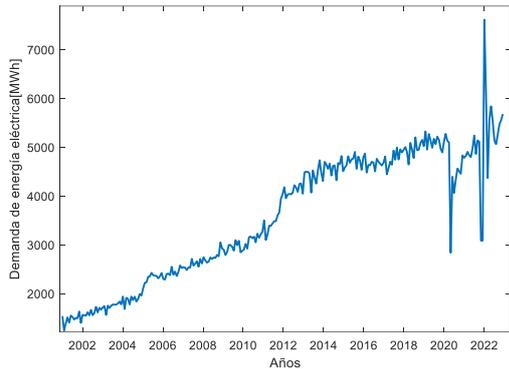


Figura 3. Demanda eléctrica en el sector comercial.

3.2 Descripción de la metodología.

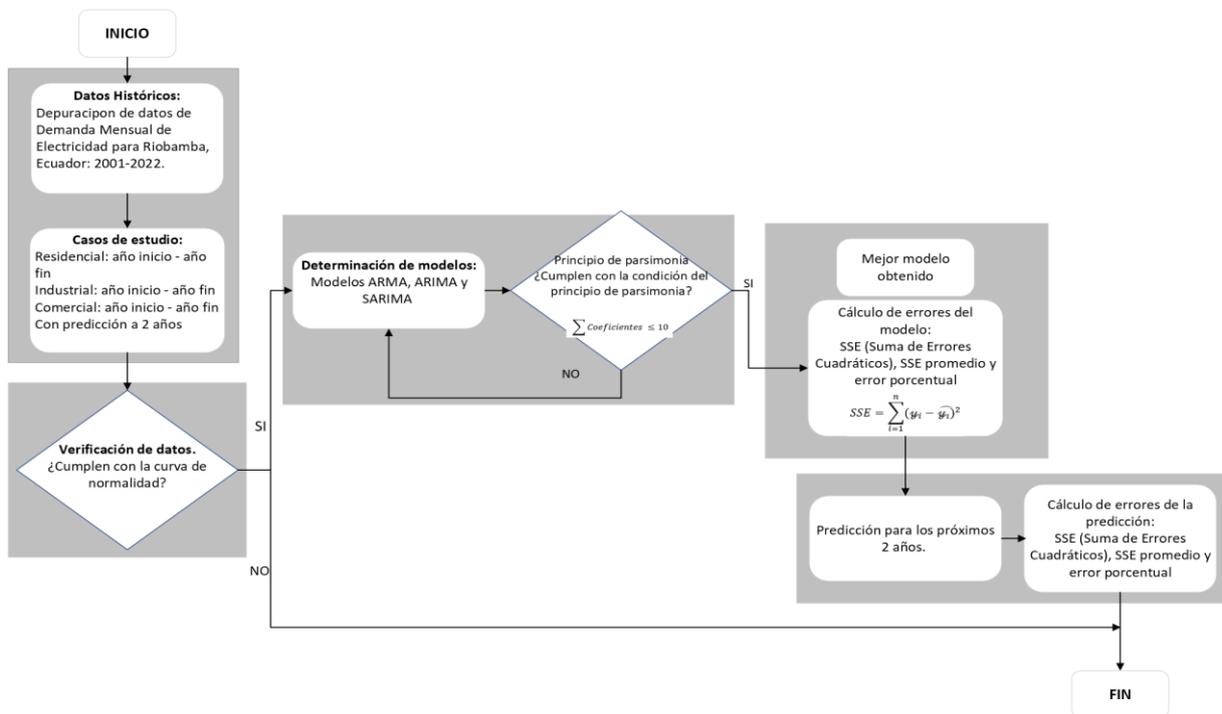


Figura 4. Diagrama de flujo metodología.

Se analizó cada caso de estudio con tres modelos de series temporales en el software Matlab, estos son: ARMA, ARIMA y SARIMA, seleccionando los mejores coeficientes en base a la medición del error cuadrático como se ve en la ecuación (6) y el error promedio; de igual manera se analizó la normalidad de los datos comprobando de manera estadística que los valores se pueden utilizar para la predicción sin ninguna manipulación externa.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{y}_i)^2 \quad (6)$$

En donde:

SSE Error cuadrático sumado.

y_i Valores observados.

\widehat{y}_i Valores predichos.

3.2.1 Rangos máximos de los coeficientes de los modelos.

Para los coeficientes de cada modelo se planteará una condición con una sumatoria máxima entre ellos.

La finalidad de tener esta condición se basa en el principio de parsimonia, la cual en términos generales establece que las entidades no deben multiplicarse más allá de la necesidad [35].

Al hablar de un modelo estadístico el principio de la parsimonia hace referencia a que es preferible tener un modelo más simple con menos parámetros a tener un modelo más complicado siempre y cuando este se ajuste a los datos de forma similar [36].

3.2.2 Validación de datos, previo análisis de series temporales

Toda serie temporal debe pasar por un proceso de análisis de datos para verificar que estos pueden ser utilizados.

La curva de normalidad es útil para identificar distribuciones que son simétricas, estas pueden ser más pesadas o ligeras que la distribución normal, al igual que pueden identificar distribuciones sesgadas [37].

Aplicar la curva de normalidad a la demanda eléctrica permite evaluar si los datos tienen o no una distribución normal. El análisis se realiza en base a los datos de la demanda, los cuales deben acercarse en un 95% a una línea recta para ajustarse a una distribución normal por lo cual los extremos pueden separarse mientras se mantenga este porcentaje, caso contrario pueden existir desviaciones sistemáticas lo cual indica que los datos no son adecuados para analizar.

A continuación, se presentan los gráficos de normalidad relacionados a los sectores residencial en la figura 4, comercial en la figura 5 e industrial en la figura 6:

● Residencial

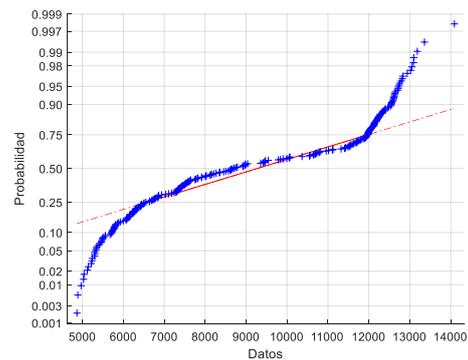


Figura 5. Curva de normalidad sector residencial.

En la figura 5 se puede observar que el 95% de los datos cumplen con el análisis de normalidad al variar entre 6000 a 12000 datos.

● Industrial

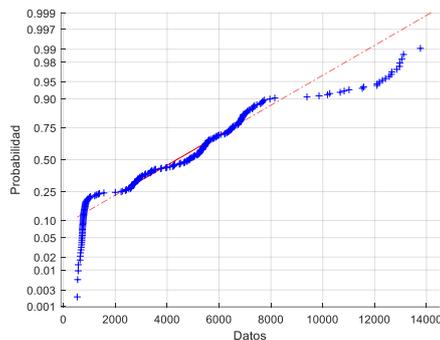


Figura 6. Curva de normalidad sector industrial.

En la figura 6 se puede observar que el 95% de los datos cumplen con el análisis de normalidad al variar entre 2000 a 8000 datos.

● Comercial

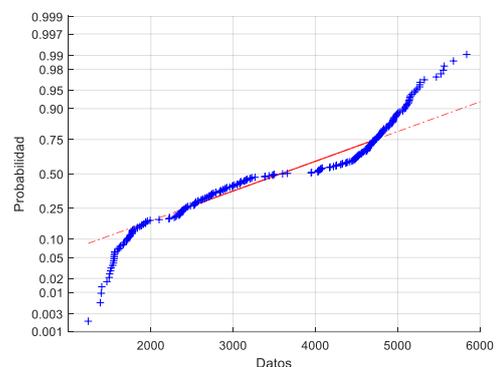


Figura 7. Curva de normalidad sector comercial.

En la figura 7 se puede observar que el 95% de los datos cumplen con el análisis de

normalidad al variar entre 2000 a 5000 datos.

3.2.3 Restricciones Modelo ARMA

El modelo se implementó en Matlab asignando valores a los coeficientes c , p , q y d . Se consideraron $c = 0$ y $d = 0$ debido a la naturaleza del modelo.

La suma de los coeficientes p y q tubo un límite máximo de 10, representando el componente autorregresivo y el componente de media móvil, respectivamente [8].

Se utilizó un bucle anidado con bucles FOR para evaluar todas las combinaciones posibles de los coeficientes, verificando la siguiente condición:

$$p + q \leq 10. \quad (7)$$

Se crea el modelo ARMA con los valores ingresados, se estima el modelo y se generan los residuos. Luego se calcula la predicción sumando los residuos a los valores originales. Para el cálculo del error se utilizan el error promedio y el método SSE [38].

3.2.4 Restricciones Modelo ARIMA

El modelo fue implementado en Matlab asignando valore a los coeficientes c , p , q y d . Se estableció un valor máximo de 10 para la suma de los coeficientes p y q , que representan el componente autorregresivo y la componente media móvil regular, respectivamente. Además, se introdujo un nuevo coeficiente llamado diferenciación, con valores posibles de $d = 1,2$ [8], para considerar la varianza y la media constantes de los datos. Se utilizó un bucle anidado con bucles FOR para analizar todas las combinaciones posibles de los coeficientes, verificando la siguiente condición:

$$p + q \leq 10. \quad (8)$$

Se crea el modelo ARIMA con los valores ingresados, se estima el modelo y se generan los residuos. Luego se calcula la predicción sumando los residuos a los valores originales. Para el cálculo del error se utilizan el error promedio y el método SSE [38].

3.2.5 Restricciones Modelo SARIMA

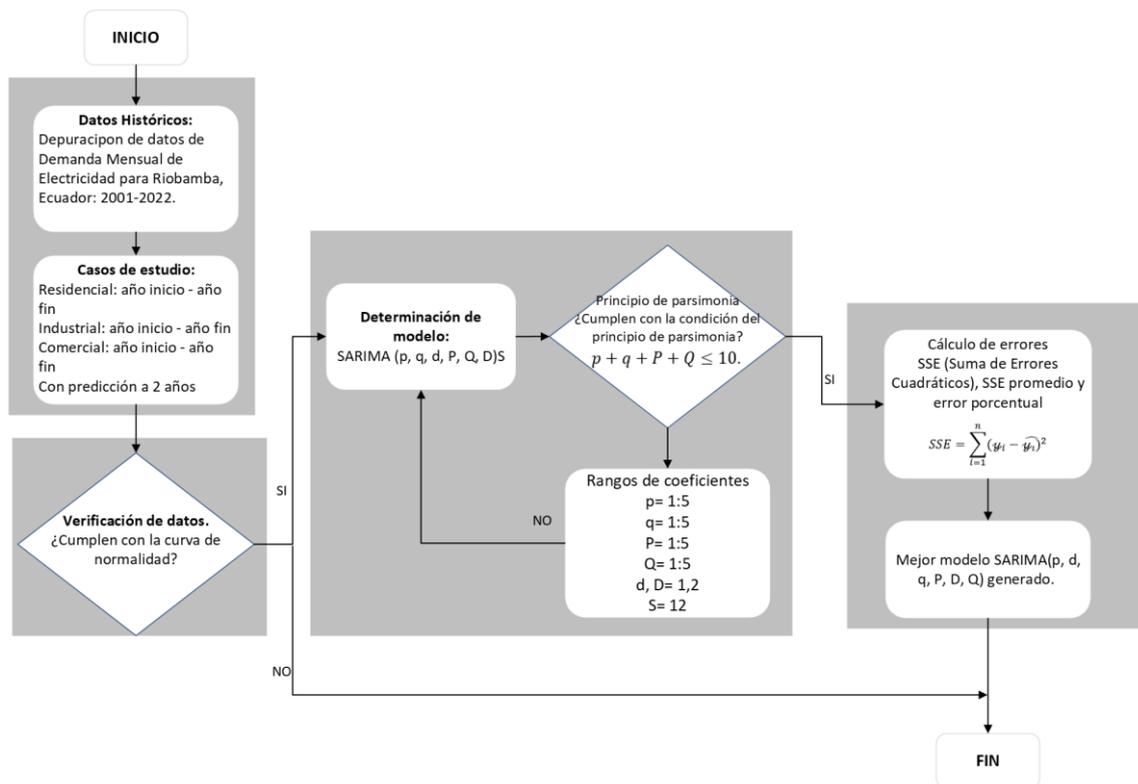


Figura 8. Diagrama de flujo SARIMA.

El modelo fue implementado en Matlab asignando valores en Matlab a los coeficientes c , p , q , d , P , Q , s y D . Se estableció un valor máximo de 10 para la suma de los coeficientes p , q , P y Q , que representan los componentes autorregresivo regular, media móvil regular, autorregresivo estacional y media móvil estacional, respectivamente. Se introdujeron nuevos coeficientes para considerar la diferenciación y la estacionalidad de los datos con valores posibles de $d = 1, 2$ y $s = 12$ [8] para analizar un año de datos. Se utilizó un bucle anidado con bucles FOR para analizar todas las combinaciones posibles de los coeficientes y verificando la condición:

$$p + q + P + Q \leq 10. \quad (9)$$

Se crea el modelo SARIMA con los valores ingresados, se estima el modelo y se generan los residuos. Luego se calcula la predicción sumando los residuos a los valores originales. Para el cálculo del error se utilizan el error promedio y el método SSE [38].

Es importante resaltar que los coeficientes seleccionados para cada modelo fueron en base al mínimo SSE y a los valores que mejor se ajusten a las condiciones presentadas en las ecuaciones 7, 8 y 9.

3.2.6 Predicción de la demanda eléctrica

Para la predicción de la demanda se implementó mediante programación en Matlab.

Teniendo definido el modelo de serie temporal óptimo se procede a definir el tiempo que se desee predecir, en este caso será un lapso de 24 meses, se crea la predicción, la cual toma en cuenta el modelo estimado, el tiempo que se desee predecir y los valores reales de la demanda, dando como resultados dos variables, la predicción de los datos en el tiempo

ingresado y el error cuadrático medio (SSE).

Con los datos obtenidos se procede a calcular los errores: SSE y el error promedio.

4 Análisis de resultados

Considerando dos modelos por caso de estudio (residencial, comercial e industrial), el primero modelo es del año 2001 al año 2016 con una predicción al año 2018 y el segundo modelo es del año 2001 al 2020 con una predicción al año 2022.

4.1.1 Caso 1 residencial 2001-2016

Este caso comprende los datos de demanda eléctrica desde el año 2001 hasta el año 2016. Para el cálculo del modelo estimado se implementaron los tres modelos de series temporales ARMA, ARIMA y SARIMA, teniendo como resultados los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 5. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 1 residencial.

Coeficientes						
Modelo	p	q	d	P	Q	D s
ARMA	1	1				
ARIMA	1	1	1			
SARIMA	4	1	1	1	1	1 12

Obteniendo el modelo SARIMA representado en la figura 7 y los siguientes valores como errores mínimos:

Tabla 6. Errores en los modelos estimados en el caso 1 residencial.

Errores			
Modelo	SSE del modelo	SSE Promedio del modelo	Error Porcentual del modelo
ARMA	$2.3166 \cdot 10^7$	$1.2066 \cdot 10^5$	3.2708%
ARIMA	$2.2695 \cdot 10^7$	$1.1820 \cdot 10^5$	3.1675%
SARIMA	$1.5998 \cdot 10^7$	$8.33 \cdot 10^4$	2.6554%

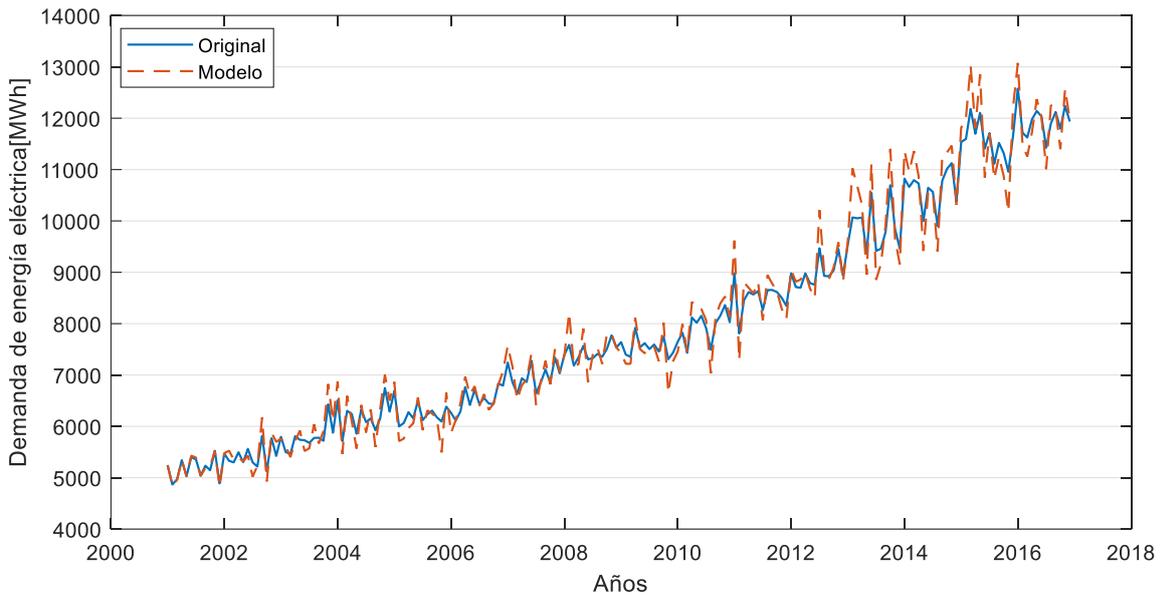


Figura 9. Modelo SARIMA aplicado al 2016 residencial.

Como se puede observar en la figura 7 se realizó un modelo para el caso residencial 1 (caso inicial), la gráfica en color azul representa los datos originales, mientras que la gráfica en color naranja punteada representa el modelo SARIMA $(4,1,1,1,1)_{12}$ que sigue la tendencia de los datos originales. El modelo SARIMA obtenido responde a un error porcentual del 2.6554% presentado en la tabla 5.

Los resultados de la predicción para 24 meses a futuro, es decir, una predicción del

año 2017 al año 2018 presentado en la figura 8, con los siguientes valores mínimos de error implementando el modelo SARIMA encontrado.

Tabla 7. Errores en la predicción en el caso 1 residencial.

Modelo	Errores Predicción		
	SSE	SSE Promedio	Error Porcentual
SARIMA	$9.11 \cdot 10^6$	$3.80 \cdot 10^5$	4.2214%

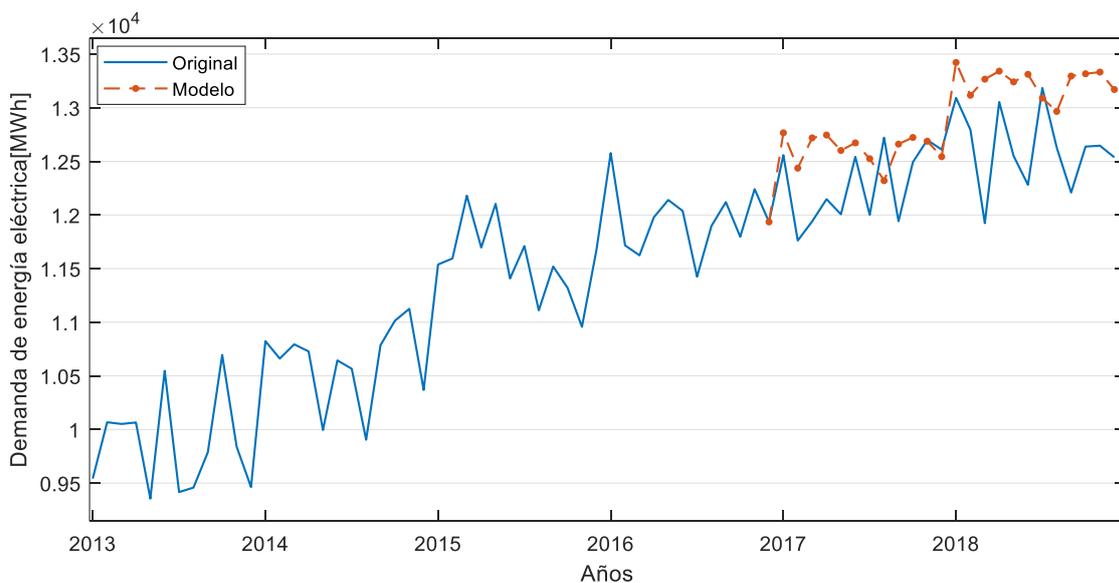


Figura 10. Predicción residencial al año 2018.

Como se puede observar en la figura 8, se realiza la predicción para el caso residencial 1 (caso inicial) para un periodo de 2 años (2017-2018), teniendo como resultado la gráfica en color naranja, con un error porcentual de predicción representado en la tabla 6 del 4.2214% al comparar con los datos conocidos de los años anteriores.

4.1.2 Caso 5 residencial 2001-2020

Este caso comprende los datos de demanda eléctrica desde el año 2001 hasta el año 2020. Para el cálculo del modelo estimado se implementaron los tres modelos de series temporales ARMA, ARIMA y SARIMA, teniendo como resultados los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 8. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 2 residencial.

Coeficientes							
Modelo	p	q	d	P	Q	D	s
ARMA	1	1					
ARIMA	1	1	1				
SARIMA	1	1	1	1	1	1	12

Obteniendo el modelo SARIMA representado en la figura 9 y los siguientes valores como errores mínimos:

Tabla 9. Errores en los modelos estimados en el caso 2 residencial.

Errores			
Modelo	SSE del modelo	SSE Promedio del modelo	Error Porcentual del modelo
ARMA	$3.2372 \cdot 10^7$	$1.3488 \cdot 10^5$	3.1790%
ARIMA	$3.1232 \cdot 10^7$	$1.3013 \cdot 10^5$	3.0635%
SARIMA	$2.5720 \cdot 10^7$	$1.07 \cdot 10^5$	2.6789%

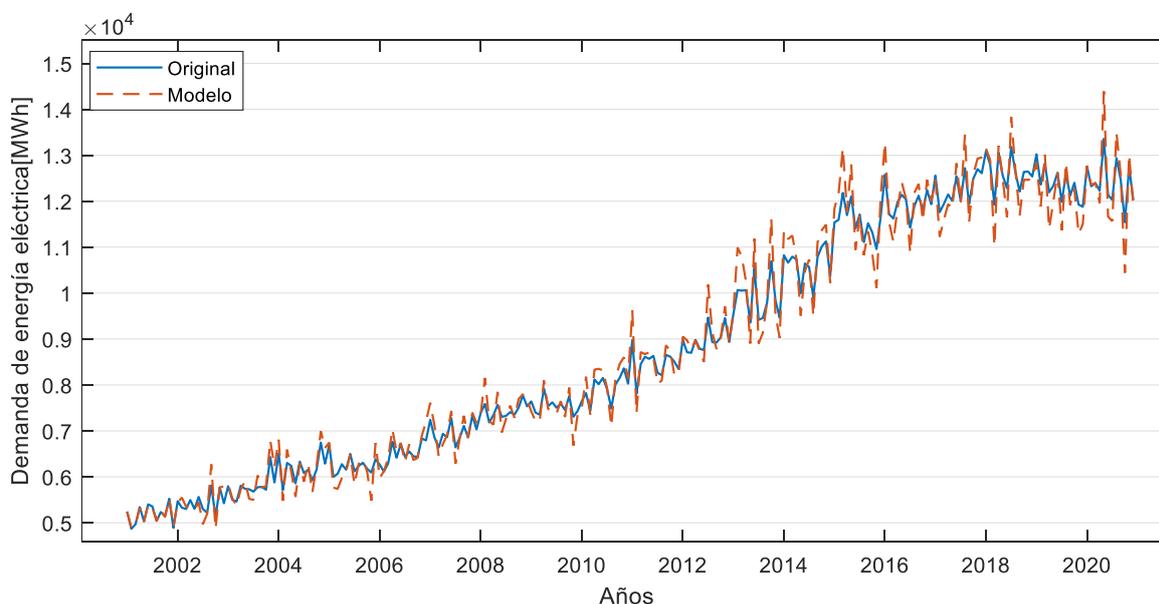


Figura 11. Modelo SARIMA aplicado al 2020 residencial.

Como se puede observar en la figura 9 se realizó un modelo para el caso residencial 5 (caso final), la gráfica en color azul representa los datos originales, mientras que la gráfica en color naranja punteada representa el modelo SARIMA

$(1,1,1,1,1)_{12}$ que sigue la tendencia de los datos originales. El modelo SARIMA obtenido responde a un error porcentual del 2.6789% presentado en la tabla 8.

Los resultados de la predicción para 24 meses a futuro, es decir, una predicción del año 2021 al año 2022 presentado en la figura 10, con los siguientes valores mínimos de error implementando el modelo SARIMA encontrado.

Tabla 10. Errores en la predicción en el caso 2 residencial.

Modelo	Errores Predicción		
	SSE	SSE	Error
		Promedio	Porcentual
SARIMA	2.0878×10^7	9.08×10^5	6.7634%

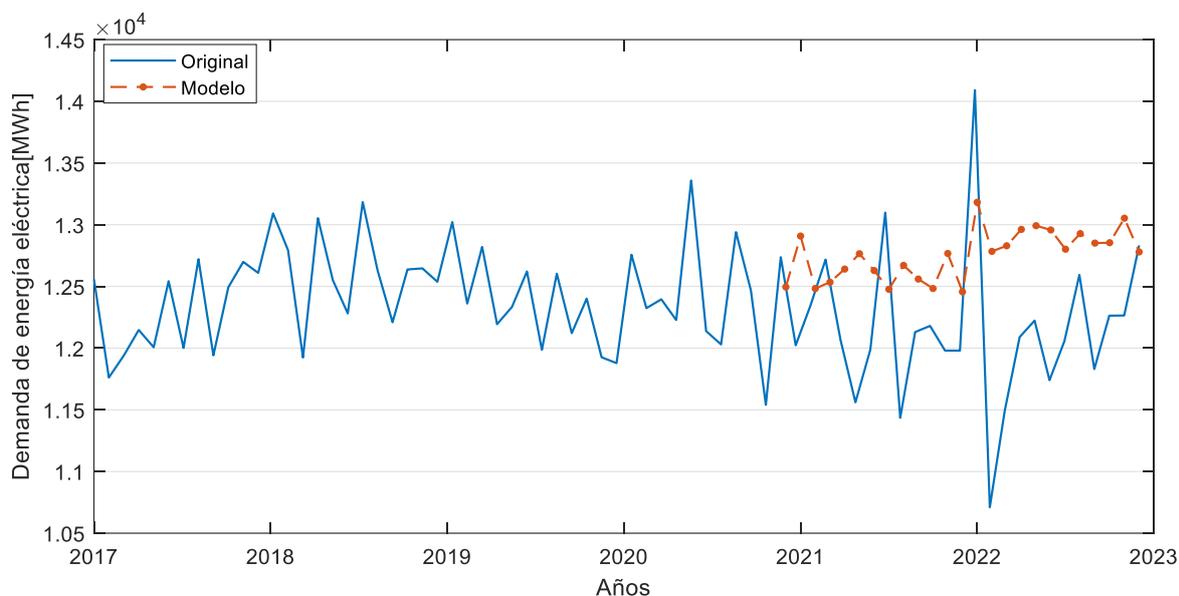


Figura 12. Predicción residencial al año 2022.

Como se puede observar en la figura 10, se realiza la predicción para el caso residencial 5 (caso final) para un periodo de 2 años (2017-2018), teniendo como resultado la gráfica en color naranja, con un error porcentual de predicción representado en la tabla 9 del 6.7624% al comparar con los datos conocidos de los años anteriores.

4.1.3 Caso 1 industrial 2001-2016

Este caso comprende los datos de demanda eléctrica desde el año 2001 hasta el año 2016. Para el cálculo del modelo estimado se implementaron los tres modelos de series temporales ARMA, ARIMA y SARIMA, teniendo como resultados los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 11. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 1 industrial.

Modelo	Coeficientes						
	p	q	d	P	Q	D	s
ARMA	1	1					
ARIMA	1	2	1				
SARIMA	2	1	1	1	1	1	12

Obteniendo el modelo SARIMA representado en la figura 11 y los siguientes valores como errores mínimos:

Tabla 12. Errores en los modelos estimados en el caso 1 industrial.

Modelo	Errores		
	SSE del modelo	SSE Promedio del modelo	Error Porcentual del modelo
ARMA	4.4804×10^7	2.3335×10^5	10.5088%
ARIMA	4.4227×10^7	2.3035×10^5	10.4493%
SARIMA	4.6839×10^7	2.44×10^5	14.3804%

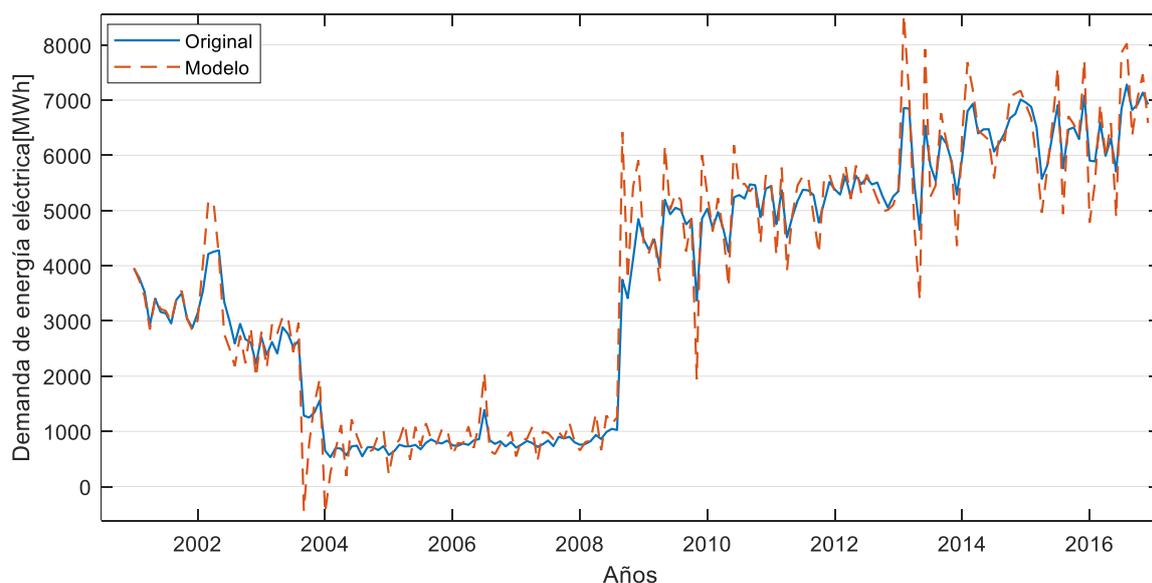


Figura 13. Modelo SARIMA aplicado al 2016 industrial.

Como se puede observar en la figura 11 se realizó un modelo para el caso industrial 1 (caso inicial), la gráfica en color azul representa los datos originales, mientras que la gráfica en color naranja punteada representa el modelo SARIMA (2,1,1,1,1)₁₂ que sigue la tendencia de los datos originales. El modelo SARIMA obtenido responde a un error porcentual del 14.3804% presentado en la tabla 12.

Los resultados de la predicción para 24 meses a futuro, es decir, una predicción del año 2017 al año 2018 presentado en la

figura 12, con los siguientes valores mínimos de error implementando el modelo SARIMA encontrado.

Tabla 13. Errores en la predicción en el caso 1 industrial.

Modelo	Errores Predicción		
	SSE	SSE Promedio	Error Promedio
SARIMA	1.0227*10 ⁸	4.26*10 ⁶	35.0092%

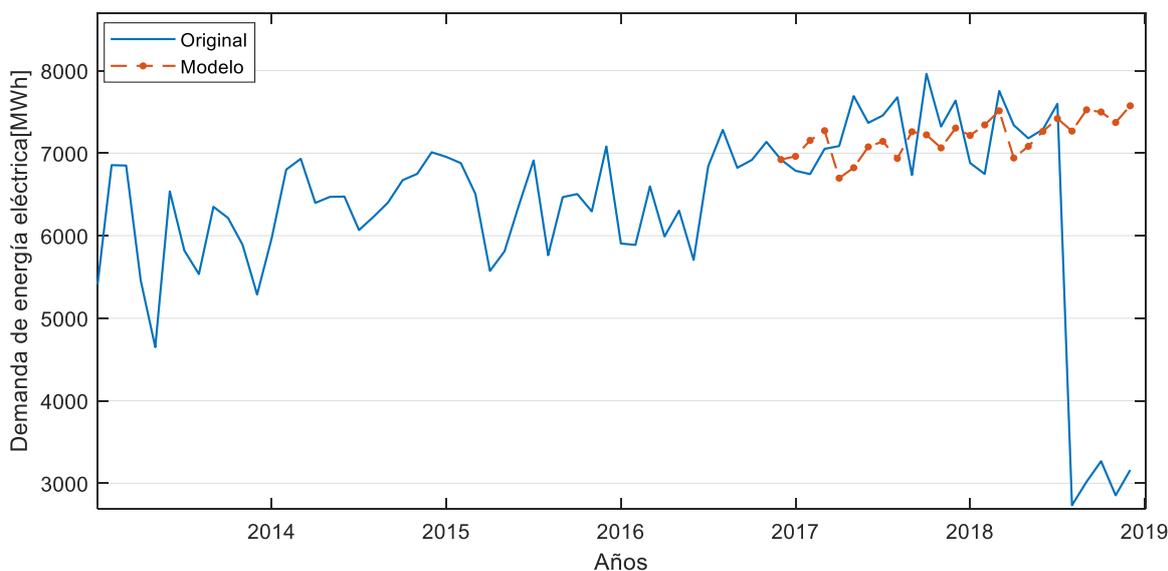


Figura 14. Predicción industrial al año 2018.

Como se puede observar en la figura 12, se realiza la predicción para el caso industrial 1 (caso inicial) para un periodo de 2 años (2017-2018), teniendo como resultado la gráfica en color naranja, con un error porcentual de predicción representado en la tabla 13 del 35.0092% al comparar con los datos conocidos de los años anteriores.

Se obtiene este error en la predicción del sector industrial por motivo de la variabilidad de datos de este sector, debido la salida de la empresa Cemento Chimborazo de los consumidores de la EERSA, ya que ellos cuentan con su propia generación.

4.1.4 Caso 5 industrial 2001-2020

Este caso comprende los datos de demanda eléctrica desde el año 2001 hasta el año 2020. Para el cálculo del modelo estimado se implementaron los tres modelos de series temporales ARMA, ARIMA y SARIMA, teniendo como resultados los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 14. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 2 industrial.

Coeficientes							
Modelo	p	q	d	P	Q	D	s
ARMA	1	4					
ARIMA	2	2	1				
SARIMA	4	3	1	1	1	1	12

Obteniendo el modelo SARIMA representado en la figura 13, con los siguientes valores como errores mínimos:

Tabla 15. Errores en los modelos estimados en el caso 2 industrial.

Errores			
Modelo	SSE del modelo	SSE Promedio del modelo	Error Promedio del modelo
ARMA	$2.3304 \cdot 10^8$	$9.7100 \cdot 10^5$	13.3632%
ARIMA	$2,2683 \cdot 10^8$	$9.4513 \cdot 10^5$	14.0729%
SARIMA	$2.2966 \cdot 10^8$	$9.57 \cdot 10^5$	17.4938%

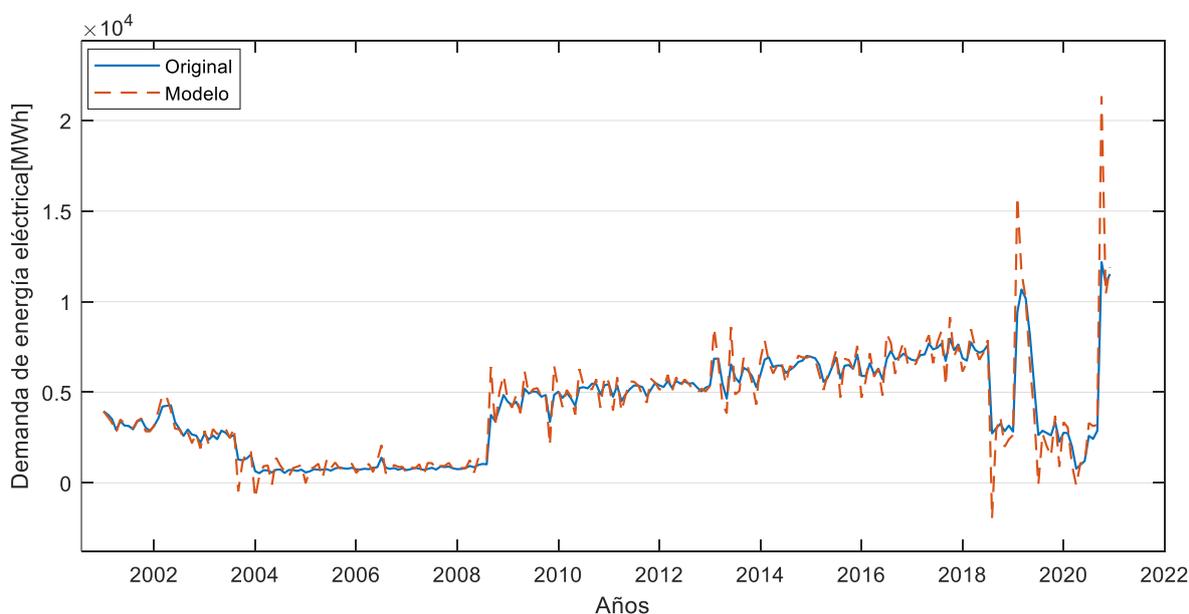


Figura 15. Modelo SARIMA aplicado al 2020 industrial.

Como se puede observar en la figura 13 se realizó un modelo para el caso industrial

5 (caso final), la gráfica en color azul representa los datos originales, mientras que la gráfica en color naranja punteada

representa el modelo SARIMA (4,3,1,1,1)₁₂ que sigue la tendencia de los datos originales. El modelo SARIMA obtenido responde a un error porcentual del 17.4938% presentado en la tabla 15.

Los resultados de la predicción para 24 meses a futuro, es decir, una predicción del año 2021 al año 2022 presentado en la figura 14, con los siguientes valores

mínimos de error implementando el modelo SARIMA encontrado.

Tabla 16. Errores en la predicción en el caso 2 industrial.

Modelo	Errores Predicción		
	SSE	SSE Promedio	Error Porcentual
SARIMA	8.3919*10 ⁸	3.65*10 ⁷	68.1927%

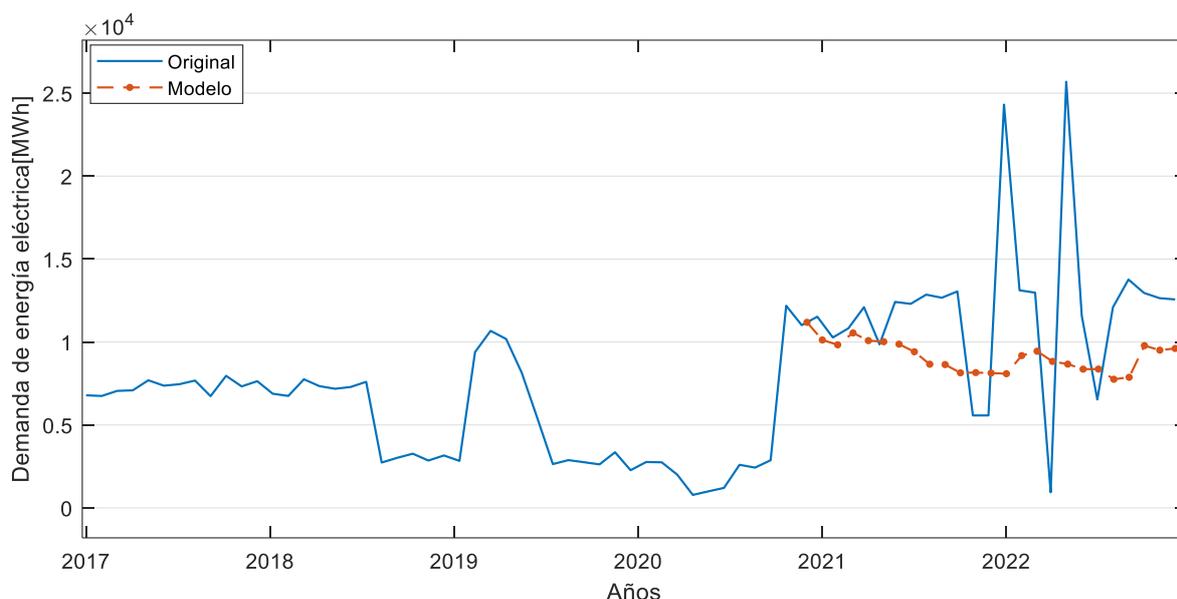


Figura 16. Predicción industrial al año 2022.

Como se puede observar en la figura 14, se realiza la predicción para el caso industrial 5 (caso final) para un periodo de 2 años (2017-2018), teniendo como resultado la gráfica en color naranja, con un error porcentual de predicción representado en la tabla 9 del 68.1927% al comparar con los datos conocidos de los años anteriores.

Se obtiene este error en la predicción del sector industrial por motivo de la variabilidad de datos de este sector, debido la salida de la empresa Cemento Chimborazo de los consumidores de la EERSA, ya que ellos cuentan con su propia generación, adicional se presentó la pandemia del COVID-19 lo cual limitó el funcionamiento normal de las industrias.

4.1.5 Caso 1 comercial 2001-2016

Este caso comprende los datos de demanda eléctrica desde el año 2001 hasta el año 2016. Para el cálculo del modelo estimado se implementaron los tres modelos de series temporales ARMA, ARIMA y SARIMA, teniendo como resultados los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 17. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 1 comercial.

Modelo	Coeficientes						
	p	q	d	P	Q	D	s
ARMA	1	1					
ARIMA	3	1	1				
SARIMA	2	1	1	1	1	1	12

Obteniendo el modelo SARIMA representado en la figura 15, con los siguientes valores como errores mínimos:

Tabla 18. Errores en los modelos estimados en el caso 1 comercial.

Errores			
Modelo	SSE del modelo	SSE Promedio del modelo	Error Porcentual del modelo
ARMA	$3.0229 \cdot 10^6$	$1.5744 \cdot 10^4$	3.2152%
ARIMA	$2.9304 \cdot 10^6$	$1.5263 \cdot 10^4$	3.1742%
SARIMA	$2.8513 \cdot 10^6$	$1.49 \cdot 10^4$	3.0006%

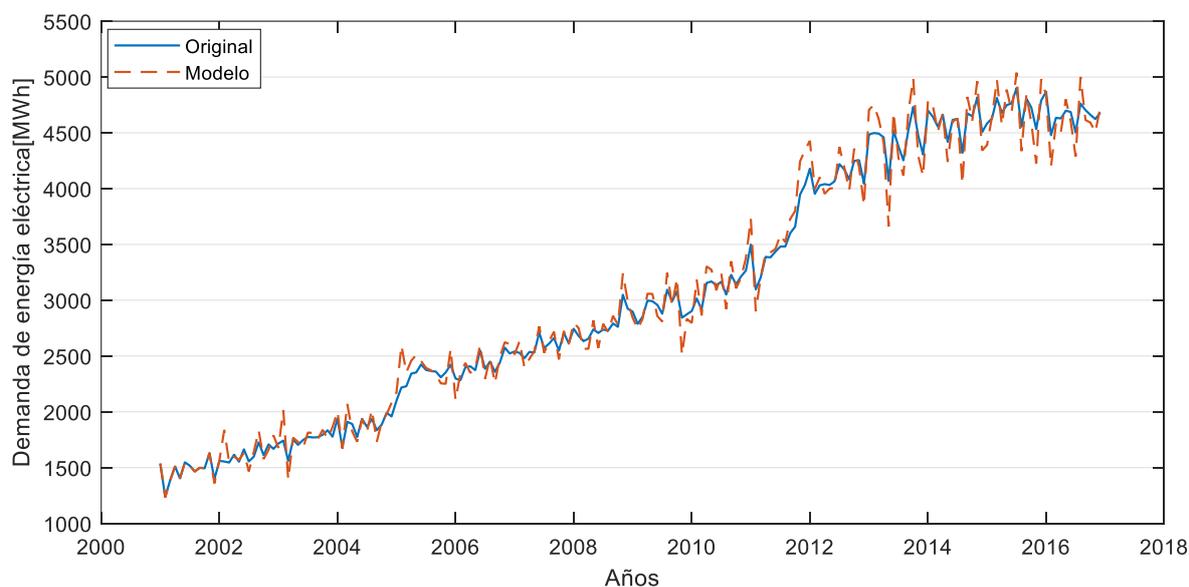


Figura 17. Modelo SARIMA aplicado al 2016 comercial.

Como se puede observar en la figura 15 se realizó un modelo para el caso comercial 1 (caso inicial), la gráfica en color azul representa los datos originales, mientras que la gráfica en color naranja punteada representa el modelo SARIMA $(2,1,1,1,1)_{12}$ que sigue la tendencia de los datos originales. El modelo SARIMA obtenido responde a un error porcentual del 3.0006% presentado en la tabla 18.

Los resultados de la predicción para 24 meses a futuro, es decir, una predicción del

año 2017 al año 2018 presentado en la figura 16, con los siguientes valores mínimos de error implementando el modelo SARIMA encontrado.

Tabla 19. Errores en la predicción en el caso 1 comercial.

Errores Predicción			
Modelo	SSE	SSE Promedio	Error Porcentual
SARIMA	$4.2878 \cdot 10^5$	$1.79 \cdot 10^4$	2.1910%

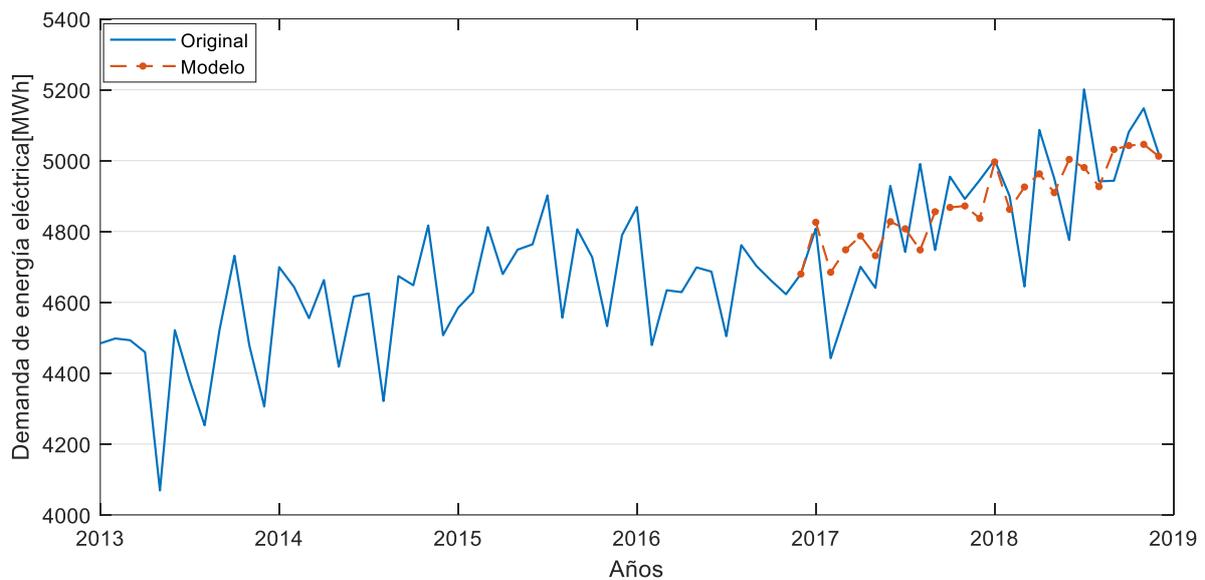


Figura 18. Predicción comercial al año 2018.

Como se puede observar en la figura 16, se realiza la predicción para el caso comercial 1 (caso inicial) para un periodo de 2 años (2017-2018), teniendo como resultado la gráfica en color naranja, con un error porcentual de predicción representado en la tabla 19 del 2.1910% al comparar con los datos conocidos de los años anteriores.

4.1.6 Caso 5 comercial 2001-2020

Este caso comprende los datos de demanda eléctrica desde el año 2001 hasta el año 2020. Para el cálculo del modelo estimado se implementaron los tres modelos de series temporales ARMA, ARIMA y SARIMA, teniendo como resultados los siguientes valores de coeficientes:

Tabla 20. Coeficientes de los modelos de series temporales en caso 2 comercial.

Coeficientes						
Modelo	p	q	d	P	Q	D
ARMA	1	1				
ARIMA	1	1	1			
SARIMA	1	1	1	1	1	12

Obteniendo el modelo SARIMA representado en la figura 17, con los siguientes valores como errores mínimos:

Tabla 21. Errores en los modelos estimados en el caso 2 comercial.

Errores			
Modelo	SSE del modelo	SSE Promedio del modelo	Error Porcentual del modelo
ARMA	$9.6667 \cdot 10^6$	$4.0278 \cdot 10^4$	3.5089%
ARIMA	$9.5851 \cdot 10^6$	$3.9938 \cdot 10^4$	3.4514%
SARIMA	$9.6949 \cdot 10^6$	$4.04 \cdot 10^4$	3.2605%

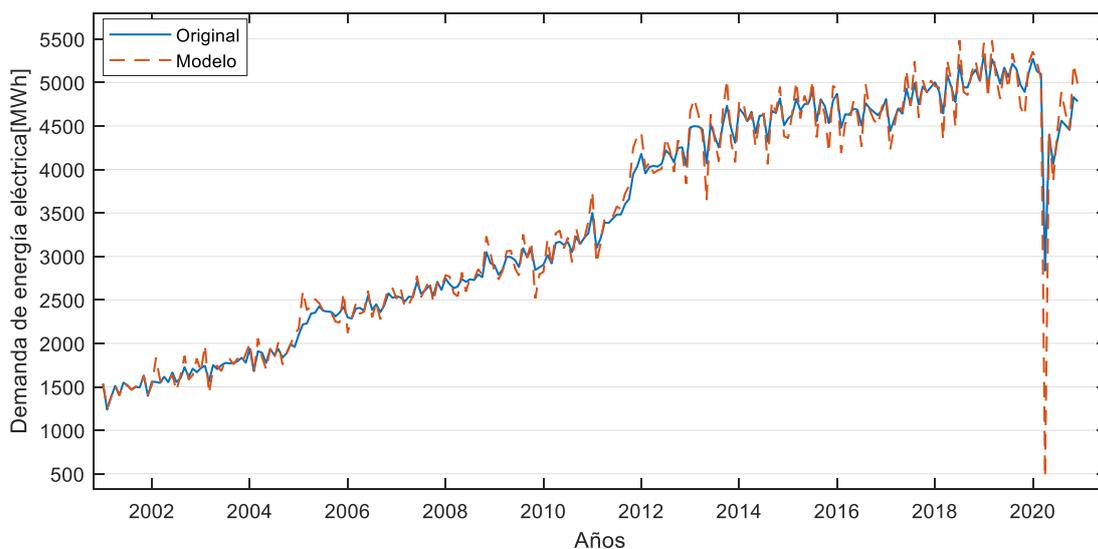


Figura 19. Modelo SARIMA aplicado al 2020 comercial.

Como se puede observar en la figura 17 se realizó un modelo para el caso comercial 5 (caso final), la gráfica en color azul representa los datos originales, mientras que la gráfica en color naranja punteada representa el modelo SARIMA $(1,1,1,1,1)_{12}$ que sigue la tendencia de los datos originales. El modelo SARIMA obtenido responde a un error porcentual del 3.2605% presentado en la tabla 21.

Los resultados de la predicción para 24 meses a futuro, es decir, una predicción del

año 2020 al año 2022 presentado en la figura 18, con los siguientes valores mínimos de error implementando el modelo SARIMA encontrado.

Tabla 22. Errores en la predicción en el caso 2 comercial.

Modelo	Errores Predicción		
	SSE	SSE Promedio	Error Porcentual
SARIMA	$2.1946 \cdot 10^7$	$9.54 \cdot 10^5$	15.1925%

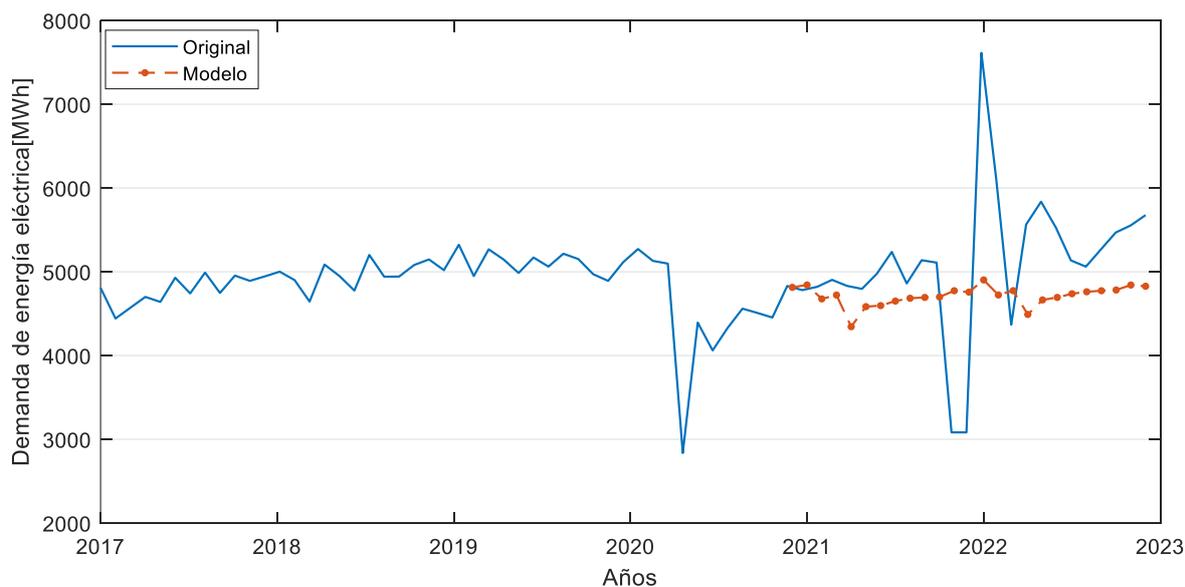


Figura 20. Predicción comercial al año 2022.

Como se puede observar en la figura 18, se realiza la predicción para el caso comercial 5 (caso final) para un periodo de 2 años (2017-2018), teniendo como resultado la gráfica en color naranja, con un error porcentual de predicción representado en la tabla 22 del 15.1925% al comparar con los datos conocidos de los años anteriores.

Por la presencia de la pandemia del COVID-19 el sector comercial tuvo una disminución de consumo provocando que este salga de su tendencia normal.

4.1.7 Expansión de la red eléctrica.

Para la planificación de expansión de la red eléctrica se realizó la comparación entre los

datos obtenidos en la predicción y los datos originales de demanda de consumo eléctrico en casa sector (residencial, industrial y comercial) en el último caso de estudio 2001-2020 con predicción al 2022. Para el estudio de resultados para la expansión se analizará la predicción de los años 2021 y 2022 vs los datos originales de los años 2020 y 2021, obteniendo cuánto será la variación de consumo de un año a otro y comparándolo con la predicción que realiza la EERSA año tras año en el plan de negocios [39] [40].

Tabla 23. Predicción consumo (MWh) EERSA año 2020-2021 [39]

Sectores	Consumo real 2020 (MWh)	Predicción de consumo 2021(MWh)	Variación de consumo (MWh)	Porcentaje de variación de consumo
Residencial	112637,44	155997,32	43359,88	38,50%
Industrial	18391,56	31245,1	12853,54	69,89%
Comercial	40189,01	52038,1	11849,09	29,48%

Tabla 24. Predicción consumo (MWh) en base a los modelos obtenidos año 2020-2021

Sectores	Consumo real 2020 (MWh)	Predicción de consumo 2021(MWh)	Variación de consumo (MWh)	Porcentaje de variación de consumo
Residencial	148937,895	151373,751	2435,8556	1,63%
Industrial	53112,828	111600,024	58487,1958	110,11%
Comercial	54255,08	56025,8558	1770,77577	3,26%

Tabla 25. Consumo real (MWh) 2020-2021

Sectores	Consumo real 2020 (MWh)	Consumo real 2021 (MWh)	Variación de consumo (MWh)	Porcentaje de variación de consumo
Residencial	148937,895	147578,859	-1359,036	-0,9124%
Industrial	53112,828	141791,441	88678,6125	166,96%
Comercial	54255,08	58454,5798	4199,4998	7,74%

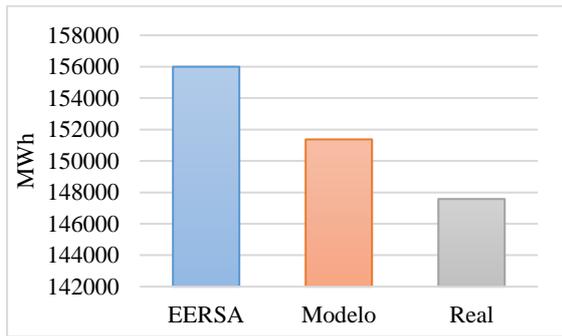


Figura 21. Predicción Residencial 2020-2021

La gráfica 21 representa un diagrama de barras, el cual indica la predicción de consumo de la EERSA, del modelo y el consumo real en el sector residencial para el año 2020-2021.

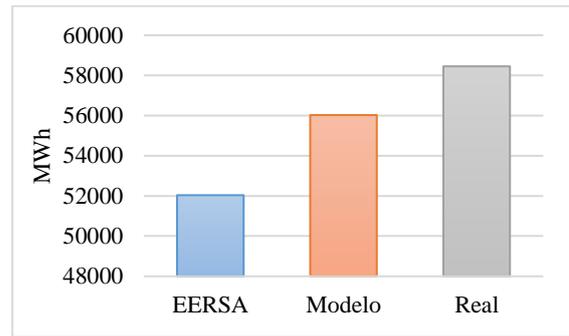


Figura 23. Predicción Comercial 2020-2021

La gráfica 23 representa un diagrama de barras, el cual indica la predicción de consumo de la EERSA, del modelo y el consumo real en el sector comercial para el año 2020-2021.

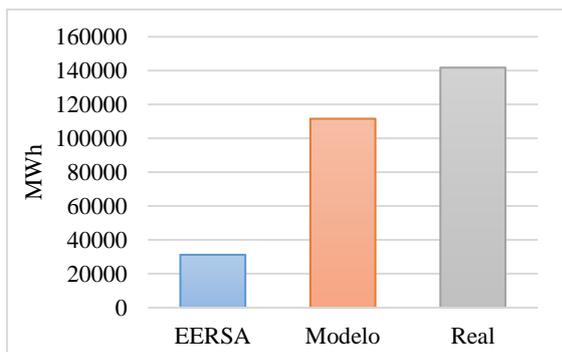


Figura 22. Predicción Industrial 2020-2021

La gráfica 22 representa un diagrama de barras, el cual indica la predicción de consumo de la EERSA, del modelo y el consumo real en el sector industrial para el año 2020-2021.

Como se puede observar en las tablas 23 y 24, se encuentran los porcentajes de variación de consumo del año 2020 al año 2021 en los tres sectores de interés. En el caso residencial la empresa predice un crecimiento del 38.50% mientras que el modelo obtenido predice un crecimiento del 2.63%, en el caso industrial la empresa predice un crecimiento del 69.89% mientras que el modelo predice un crecimiento del 110.11%, por último, en el caso comercial la empresa predice un crecimiento del 29.48% mientras que el modelo predice un crecimiento del 3.26%.

La tabla 25 muestra el crecimiento real de la demanda eléctrica en los sectores de la EERSA, teniendo para el sector residencial una reducción de consumo del -0.9124%, en el sector industrial un crecimiento del 166.96% y en el sector comercial un crecimiento del 7.74%.

Tabla 26. Predicción consumo (MWh) EERSA año 2021-2022 [40]

Sectores	Consumo real 2021 (MWh)	Predicción de consumo 2022 (MWh)	Variación de consumo (MWh)	Porcentaje de variación de consumo
Residencial	109528,18	155118,91	45590,73	41,62%
Industrial	106334,56	32757,18	-73577,38	-69,19%
Comercial	44675,03	60178,98	15503,95	34,70%

Tabla 27. Predicción consumo (MWh) en base a los modelos obtenidos año 2021-2022

Sectores	Consumo real 2021 (MWh)	Predicción de consumo 2022 (MWh)	Variación de consumo (MWh)	Porcentaje de variación de consumo
Residencial	147578,859	142194,551	-5384,3082	-3,64%
Industrial	141791,441	95851,2713	-45940,169	-32,39%
Comercial	58454,5798	47305,6595	-11148,92	-19,07%

Tabla 28. Consumo real (MWh) 2021-2022

Sectores	Consumo real 2021 (MWh)	Consumo real hasta noviembre 2022 (MWh)	Variación de consumo (MWh)	Porcentaje de variación de consumo
Residencial	147578,859	132097,22	-15481,639	-10,49%
Industrial	141791,441	134848,638	-6942,8027	-4,89%
Comercial	58454,5798	59556,6065	1102,02673	1,88%

Como se puede observar en las tablas 26 y 27, se encuentran los porcentajes de variación de consumo del año 2021 al año 2022 en los tres sectores de interés. En el caso residencial la empresa predice un crecimiento del 41.62% mientras que el modelo obtenido predice una reducción de consumo del -3.64%, en el caso industrial la empresa predice una reducción de consumo del -69.19% mientras que el modelo predice una reducción del consumo del -32.39%, por último, en el caso comercial la empresa predice un crecimiento del 34.70% mientras

que el modelo predice una reducción del consumo del -19.07%.

La tabla 26 muestra el crecimiento real de la demanda eléctrica en los sectores de la EERSA, teniendo para el sector residencial una reducción del consumo del -10.49%, en el sector industrial una reducción de consumo del -4,89% y en el sector comercial un crecimiento del 1.88%.

La EERSA cuenta con tres centrales de generación: La central Alao con una capacidad total de 10.4 MW, la central Rio Blanco con una capacidad de 3 MW y la central Nizag con una capacidad de 0.8 MW

[40]. Actualmente la EERSA no tiene ningún plan de expansión en el área de generación, por lo cual las centrales mantendrán su capacidad actual [41].

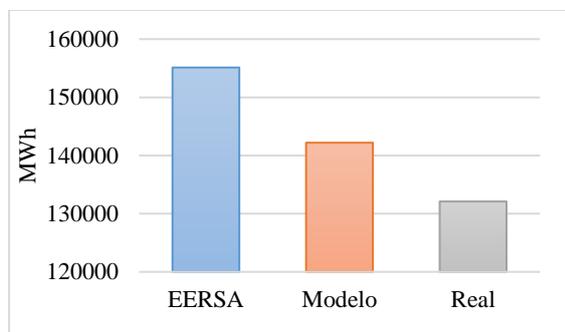


Figura 24. Predicción Residencial 2021-2022

La gráfica 24 representa un diagrama de barras, el cual indica la predicción de consumo de la EERSA, del modelo y el consumo real en el sector residencial para el año 2021-2022.

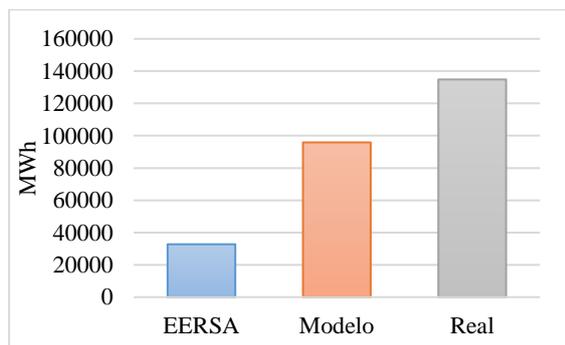


Figura 25. Predicción Industrial 2021-2022

La gráfica 25 representa un diagrama de barras, el cual indica la predicción de consumo de la EERSA, del modelo y el consumo real en el sector industrial para el año 2021-2022.

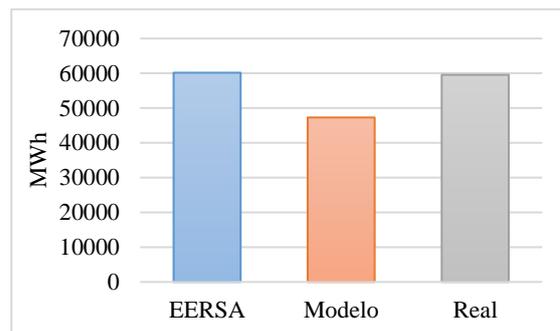


Figura 26. Predicción Comercial 2021-2022

La gráfica 26 representa un diagrama de barras, el cual indica la predicción de consumo de la EERSA, del modelo y el consumo real en el sector comercial para el año 2021-2022.

Tabla 29. Generación (MW) 2021

Generación (MW) 2021	
C. Alao	10,4
C. Rio Blanco	3
Nizag	0,8
Total, Generación Propia	14,2
Energía comprada al Mercado eléctrico	50,492
Total	64,692

Tabla 30. Predicción de consumo (MW) 2021

Predicción de consumo (MW) 2021 mediante modelo	
Residencial	17,280
Industrial	12,739
Comercial	6,395
Total	36,415

Como se puede observar en la tabla 29, la EERSA cuenta con generación propia de 14,2 MW al año, con lo cual por sí sola no cubriría la demanda predicha por el modelo. Es importante recalcar que la empresa distribuidora compra energía mercado eléctrico, en el año 2021 la compra fue de 50,492 MW, por lo cual la generación total que provee la EERSA es de 64,692 MW cubriendo la demanda total (residencial,

comercial e industrial) predicha para el año 2021 indicada en la tabla 30 de 36,415 MW.

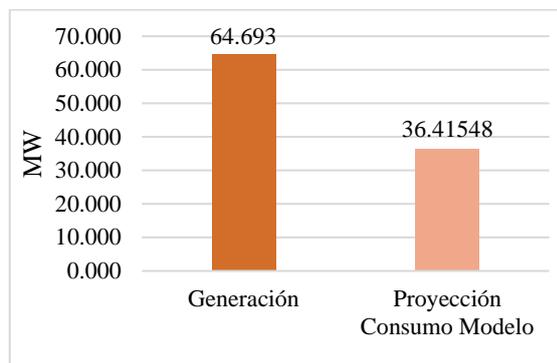


Figura 27. Generación vs Predicción Consumo Modelo 2021

Tabla 31. Generación (MW) 2022

Generación (MW) 2022 EERSA	
C. Alao	10,4
C. Rio Blanco	3
Nizag	0,8
Total, Generación Propia	14,2
Energía comprada al Mercado eléctrico	52,244
Total	66,444

Tabla 32. Predicción de consumo (MW) 2022

Predicción de consumo (MW) 2022 mediante modelo	
Residencial	16,232
Industrial	10,941
Comercial	5,400
Total	32,574

Como se puede observar en la tabla 31, la EERSA cuenta con generación propia de 14,2 MW al año, con lo cual por sí sola no cubriría la demanda predicha por el modelo. Es importante recalcar que la empresa distribuidora compra energía mercado eléctrico, en el año 2022 la compra fue de 52,244 MW, por lo cual la generación total que provee la EERSA es de 66,444 MW cubriendo la demanda total (residencial,

comercial e industrial) predicha para el año 2021 indicada en la tabla 32 de 32,574 MW.

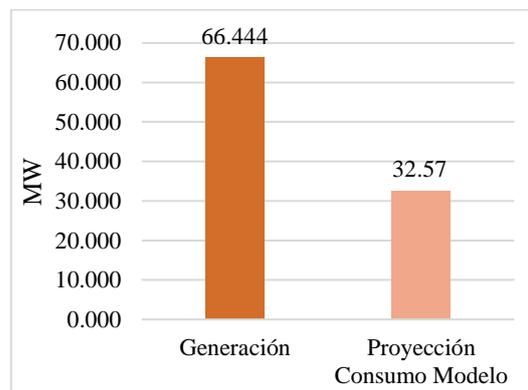


Ilustración 28. Generación vs Predicción Consumo Modelo 2022

5 Conclusiones

En el primer objetivo se plantea realizar un análisis estadístico, para lo cual se utilizó la curva de normalidad en los datos de los sectores residencial, comercial e industrial, verificando la ausencia valores atípicos con relación a la distribución esperada, lo que permite verificar que estos datos puedan ser utilizados en series temporales.

El segundo objetivo propone generar un modelo de serie temporal, por lo que se desarrolló un modelo SARIMA para cada sector. Para el año 2001-2020 en el sector residencial, el modelo tuvo un error del 2.6789%, en el sector industrial, el modelo presentó un error del 17.4938%, en el sector comercial, el modelo tuvo un error del 3.2605%. Se observó un cambio significativo en el sector industrial a partir de 2017 debido a la salida y entrada recurrente de empresa Cemento Chimborazo a los consumidores de la EERSA, mientras que el sector comercial experimentó una disminución en el consumo de energía debido a las restricciones del COVID-19.

El tercer objetivo propone realizar la predicción en los sectores de interés, donde se obtuvo para el año 2022 en el sector residencial la EERSA predice un crecimiento de consumo del 41.62%, mientras que el modelo propuesto predice

una reducción de consumo del -3.64%, en el sector industrial la EERSA predice una reducción de consumo del -69.19%, mientras que el modelo propuesto predice una reducción de consumo del -32.39%, y para el sector comercial la EERSA predice un aumento de consumo del 34.37%, mientras que el modelo propuesto predice una reducción de consumo del -19.07%.

La predicción de consumo de energía que se obtuvo de los modelos comparado con la generación real que existió en los años 2021 y 2022 es menor en ambos años, con lo cual podemos concluir que la generación actual de la EERSA abastece por completo a la demanda que se predice.

5.1 Trabajos futuros

A fin de mejorar la predicción de la demanda, es necesario realizar un análisis cada cierto tiempo del crecimiento de la demanda eléctrica. Para obtener una predicción más precisa es necesario tomar en cuenta en los modelos de series temporales los factores externos y atípicos que afectan a la demanda.

6 Referencias

- [1] H. Rafiq, P. Manandhar, E. Rodriguez-Ubinas, J. D. Barbosa, y O. A. Qureshi, «Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study», *Energy Build.*, vol. 291, p. 113103, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113103>.
- [2] E. J. Mejía Vásquez y S. Gonzales Chávez, «Predicción del consumo de energía eléctrica residencial de la Región Cajamarca mediante modelos Holt-Winters.», *Ing. Energética*, vol. 40, n.º 3, p. 191, 2019.
- [3] C. A. León Henao, «Esquema de planificación de expansión de la red de distribución considerando generación distribuida», *Univ. Nac. Colomb.*, p. 161, 2017.
- [4] K. Yotov, S. Hadzhikoleva, E. Hadzhikolev, y D. Orozova, «Forecasting Electricity Consumption in a National Power System», en *2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)*, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIELA54794.2022.9845743.
- [5] R. Hyndman y G. Athanaspoulos, *Forecasting Principles and Practice*, 2.ª edició. OTextos: Melbourne, Australia, 2018.
- [6] V. D. Gil Vera, «MONTHLY FORECAST OF ELECTRICITY DEMAND WITH TIME SERIES», *Universidad EIA*, vol. 13, n.º December 2016, p. 120, 2018.
- [7] J. A. Arteaga Quinto y A. R. Bazán Zurita, «PROGRAMACIÓN CUÁNTICA PARA ESTUDIO DE CONFIABILIDAD A NIVEL JERÁRQUICO I POR MÉTODO MONTE CARLO», *Esc. Super. POLITÉCNICA DEL LITORAL*, 2022.
- [8] M. Jaramillo y D. Carrión, «An Adaptive Strategy for Medium-Term Electricity Consumption Forecasting for Highly Unpredictable Scenarios: Case Study Quito, Ecuador during the Two First Years of COVID-19», *Energies*, vol. 15, n.º 22, 2022, doi: 10.3390/en15228380.
- [9] S. A. Ur Rehman, Y. Cai, R. Fazal, G. Das Walasai, y N. H. Mirjat, «An integrated modeling approach for forecasting long-term energy demand in Pakistan», *Energies*, vol. 10, n.º 11, pp. 1-23, 2017, doi: 10.3390/en10111868.
- [10] K. Goswami y A. B. Kandali, «Electricity Demand Prediction using Data Driven Forecasting

- Scheme: ARIMA and SARIMA for Real-Time Load Data of Assam», *2020 Int. Conf. Comput. Perform. Eval. ComPE 2020*, pp. 570-574, 2020, doi: 10.1109/ComPE49325.2020.9200031.
- [11] X. Zhu, Z. Song, G. Sen, M. Tian, Y. Zheng, y B. Zhu, «Prediction study of electric energy production in important power production base, China», *Sci. Rep.*, vol. 12, n.º 1, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-25885-w.
- [12] D. T. Kien, P. D. Huong, y N. D. Minh, «Application of Sarima Model in Load Forecasting in Hanoi City», *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 13, n.º 3, pp. 164 – 170, 2023, doi: 10.32479/ijeeep.14121.
- [13] J. A. Zancanaro, O. L. dos Santos, L. F. Ugarte, M. Giesbrecht, y M. C. de Almeida, «Energy Consumption Forecasting Using SARIMA and NARNET: An Actual Case Study at University Campus», en *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895323.
- [14] A. K. Awopone, A. F. Zobaa, y W. Banuenumah, «Techno-economic and environmental analysis of power generation expansion plan of Ghana», *Energy Policy*, vol. 104, pp. 13-22, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.01.034>.
- [15] A. F. Zobaa, S. N. Afifi, y A. Vaccaro, *Demand Response and Energy Efficiency in Electric Systems*. CRC Press, 2017.
- [16] Z. Zhou, *Demand Response: Fundamentals, Technologies, and Strategies*. Springer., 2019.
- [17] Organization World Health, «Heat and Health». <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health> (accedido jul. 03, 2023).
- [18] J. A. Ortiz-Velázquez, G. Bueno, y J. J. Arana-Coronado, «Análisis de la demanda residencial de electricidad en el Estado de México», *Econ. Soc. y Territ.*, p. 199, 2017, doi: 10.22136/est002017644.
- [19] A. Faria, «Demand Response Strategies for Enhancing the Integration of Renewable Energy Sources: A Review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2018.
- [20] ARCERNNR, «Pliego-Tarifario-Servicio-Publico-de-Energia-Elctrica_-Ano-2022.pdf». p. 39, 2022.
- [21] C. Díaz Rodríguez, *Producción y demanda residencial de energía eléctrica en Colombia: más allá ... - Carlos, Díaz Rodríguez - Google Libros*. 2019.
- [22] Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, «Estudio de la Demanda Eléctrica», *Balance Energético Nacional*, 2019. <https://www.recursoyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2020/01/CAPITULO-3-DEMANDA-ELÉCTRICA.pdf> (accedido ene. 05, 2023).
- [23] P. P. Cárdenas Alzate, «Planeamiento de la expansión de redes de transmisión a largo plazo usando una formulación basada en ciclos.», *Univ. Tecnología Pereira*, p. 86, 2020.
- [24] V. H. Reséndiz Estrada, «Métodos deterministas para planear la expansión de sistemas de transmisión», *Inst. Politécnico Nac.*, p. 224, 2017.
- [25] H. Tao y Y. Qin, «Electric Load Forecasting: A Review», *IEEE Trans. Smart Grid*, 2017.

- [26] V. D. Gil Vera, «Pronóstico De La Demanda Mensual De Electricidad Con Series De Tiempo», *Rev. EIA*, vol. 13, n.º 26, pp. 111-120, 2017, doi: 10.24050/reia.v13i26.749.
- [27] A. Carrión García, «Análisis de series temporales, técnicas de previsión.», *Depto. Estadística e I. O. U.P.V.*, p. 80, 2017.
- [28] C. Choi, «Time Series Forecasting with Recurrent Neural Networks in Presence of Missing Data», *Artic Univ. Norw.*, n.º November, 2018.
- [29] A. A. Mir, M. Alghassab, K. Ullah, Z. A. Khan, Y. Lu, y M. Imran, «A Review of Electricity Demand Forecasting in Low and Middle Income Countries : The Demand Determinants and Horizons», *sustainability*, p. 35, 2020, doi: doi:10.3390/su12155931.
- [30] E. J. M. Vásquez y S. G. Chávez, «Predicción del consumo de energía eléctrica residencial de la Región Cajamarca mediante modelos Holt - Winters/Prediction of residential electric power consumption in the Cajamarca Region through Holt - Winters models», *Ing. Energética*, vol. 40, n.º 3, pp. 181-191, 2019.
- [31] M. D. Mariño, A. Arango, L. Lotero, y M. Jiménez, «Modelos de series temporales para pronóstico de la demanda eléctrica del sector de explotación de minas y canteras en Colombia.», *Univ. Pontif. Boliv.*, vol. 18, p. 23, 2021, doi: 10.24050/reia. v18i35.1458.
- [32] A. Toapanta Lema *et al.*, «Comparación de modelos de regresión para la eficiencia en el consumo de electricidad en las escuelas ecuatorianas: un caso de estudio», pp. 1-11, 2019.
- [33] J. Abraham, C. Peña, A. Elena, y S. Ávila, «Implementación de las técnicas de predicción en la generación de energía eléctrica en el sector industrial», *RITI SEICIT*, vol. 8, p. 26, 2020, doi: 10.36825/RITI.08.15.003.
- [34] A. Zuluaga Cajiao, «Predicción de demanda eléctrica a corto plazo para la operación de microrredes aisladas», *Univ. los Andes*, p. 36, 2019.
- [35] M. Gori, «Chapter 2 - Learning Principles», en *Machine Learning*, M. Gori, Ed. Morgan Kaufmann, 2018, pp. 60-121.
- [36] Club Vita, «Parsimony principle». <https://www.clubvita.net/glossary/parsimony-principle#:~:text=The parsimony principle for a,fit the data similarly well.> (accedido jul. 03, 2023).
- [37] S. J. Milton y J. C. Arnold, *Introduction to Probability and Statistics: Principles and Applications for Engineering and the Computing Sciences*, 4th ed. McGraw-Hill, 2017.
- [38] M. Kuhn y K. Johnson, *Applied Predictive Modeling*, 1st editio. Springer., 2018.
- [39] EERSA, «Plan de negocios 2021», 2020.
- [40] EERSA, «Plan de negocios 2022», 2021.
- [41] EERSA, «Plan De Negocios 2023», p. 34, 2022.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 33. Matriz de estado del arte.

Planificación de la expansión de la red eléctrica a mediano plazo mediante análisis de consumo eléctrico en los sectores residencial, industrial y comercial, usando series temporales SARIMA: Caso de estudio Empresa Eléctrica Riobamba S.A. (EERSA)-Ecuador.																						
DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Demanda eléctrica	Situación de la demanda eléctrica en Ecuador	Métodos de planificación de la red eléctrica	Series temporales	Predicción del consumo eléctrico	Series ARMA	Series ARIMA	Series SARIMA	Valores de generación	Topología de la red	Líneas de distribución	Predicción con series temporales	Análisis de normalidad en series temporales	Análisis de temporalidad en datos de demanda eléctrica	Cálculo de error en predicción de datos	Predicción mediante modelos SARIMA	Plan de expansión para la red eléctrica	Identificación de tendencias para el consumo	
1	2023	Analysis of residential electricity consumption patterns utilizing smart-meter data: Dubai as a case study	0	☒								☒					☒					
2	2019	Predicción del consumo de energía eléctrica residencial de la Región Cajamarca mediante modelos Holt-Winters.	11			☒		☒									☒					
3	2017	Esquema de planificación de expansión de la red de distribución considerando generación distribuida	0			☒						☒										
4	2022	Forecasting Electricity Consumption in a National Power System	0			☒		☒														
5	2018	Forecasting Principles and Practice	6330			☒											☒					
6	2018	MONTHLY FORECAST OF ELECTRICITY DEMAND WITH TIME SERIES	5			☒		☒						☒								

6.2 Resumen de indicadores.

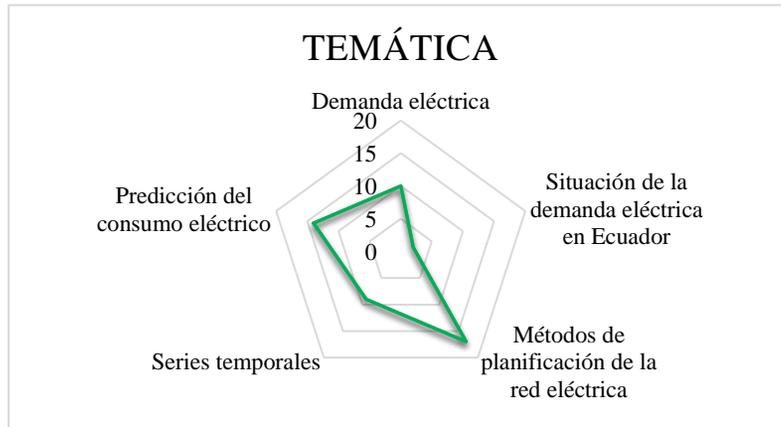


Figura 29. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

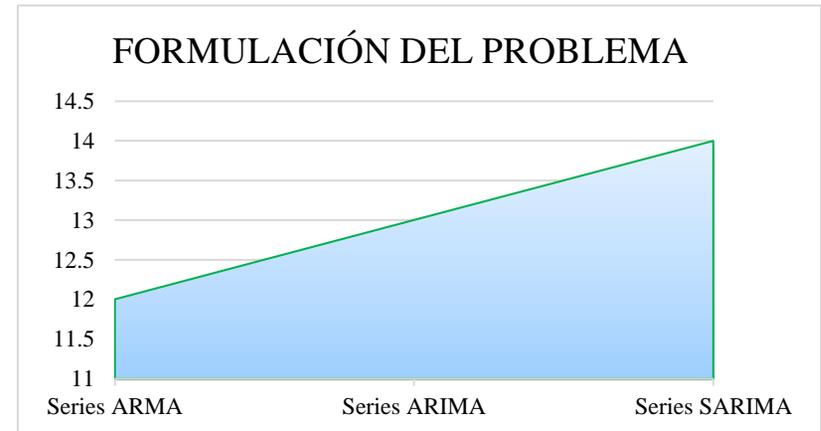


Figura 30. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

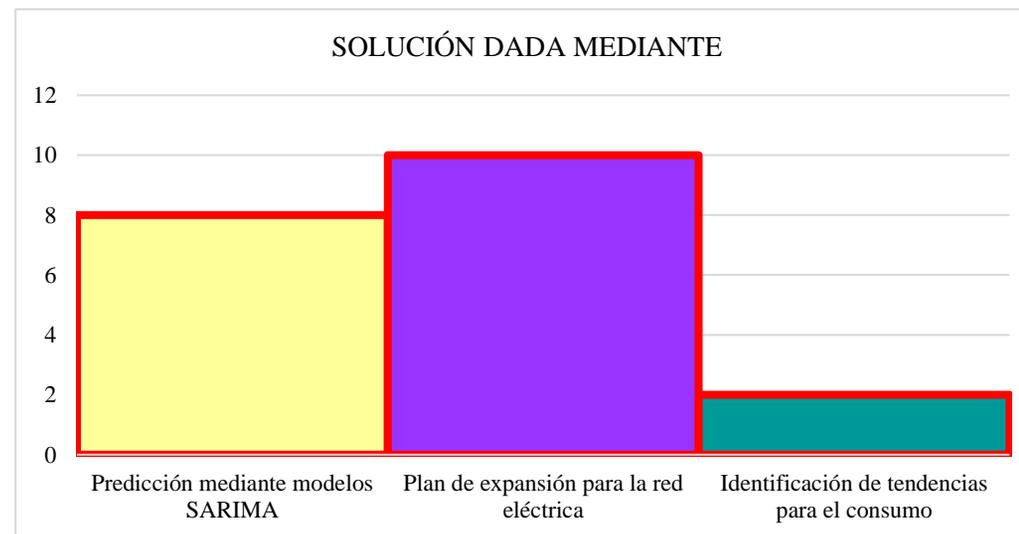


Figura 31. Indicador de solución - Estado del arte.