
Modelo de Proyección de Demanda de Potencia y Energía del Sistema Eléctrico Paraguayo

A. Giménez, A. Arce

Universidad Nacional del Este – Facultad Politécnica

Paraguay

RESUMEN

La energía eléctrica desempeña un papel fundamental en el desarrollo de la sociedad, y es la forma más común del uso final de la energía para todos los sectores económicos. Sin embargo, como la electricidad debe producirse, transmitirse y distribuirse en el momento en que se genera, es importante para la planificación energética pronosticar la demanda de electricidad.

El pronóstico de la demanda de electricidad a largo plazo juega un papel importante en el planeamiento de los sistemas eléctricos de potencia, permite evaluar los planes de expansión de los sistemas de generación, de transmisión, el costo futuro de la energía eléctrica, establecer políticas energéticas para atender la demanda, incentivo al uso eficiente, etc. En este trabajo fue analizado el comportamiento de la demanda máxima de potencia y del consumo de energía eléctrica del sistema eléctrico paraguayo utilizando modelos basados en series de tiempo. Se desarrollaron tres modelos de series de tiempo, modelando el componente estacional como una variable ficticia, para el efecto fueron utilizados los registros mensuales de demanda máxima de potencia y de consumo de energía mensual correspondiente a un periodo de treinta años. Los resultados se compararon con los registros de la ANDE (Administración Nacional de Electricidad) para evaluar el método de mejor ajuste. A las estimaciones de demanda máxima de potencia mensual fueron ajustadas curvas de cargas típicas mensuales, diferentes estacionalidades durante el año, plantean un perfil de curva distinto, para las cuales fueron utilizados los registros horarios del día de mayor demanda de potencia verificado en el mes, y la forma de la curva de carga fue obtenida por técnicas de optimización basadas en mínimos cuadrados, con restricciones de atendimento al valor máximo de demanda potencia, estimado para el mes. Los resultados obtenidos comparados con los registros históricos mostraron que los modelos propuestos se ajustaron satisfactoriamente a la evolución de la demanda de potencia y de energía, bien como la propuesta del modelado de la curva característica como aplicación de estas proyecciones, de mucha importancia para el planeamiento de la operación de medio y corto plazo.

PALABRAS CLAVES

Palabras claves: 1. Curva de Carga, 2. Pronóstico a Largo Plazo 3. Series temporales.

1. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica para atender la demanda de consumo debe atender criterios de calidad relacionadas a la continuidad y economicidad. La continuidad presupone el atendimento de toda la demanda, sin cortes aun en las peores condiciones hidrológicas, en el caso de sistema predominantemente hidroeléctricos, en situaciones de fallas en el sistema de generación, transmisión o de distribución, o ante escenarios de aumento importante de la demanda. La economicidad presupone el atendimento de la demanda a un mínimo costo, lo cual incluye despachos de generación que minimice del costo de operación, que minimice las pérdidas en el sistema de transmisión y de distribución.

Los criterios de calidad mencionados requieren inicialmente de una buena proyección del comportamiento de la demanda, de su evolución en el futuro. Las compañías de distribución de energía eléctrica deben hacer una buena predicción del comportamiento de su demanda de modo establecer las mejores estrategias de contratos de compra de energía para atender esta demanda.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE 23 y 24 de Junio 2022

Una estimación subestimada puede resultar en cortes en el suministro a los usuarios o el atendimento de la demanda con un costo mayor. La sobreestimación de la demanda puede resultar en contratos de compras excesivas y de costo también mayor. La previsión de la demanda eléctrica debe llevar en cuenta el volumen de la demanda o energía, medida en MWh, y la intensidad de la demanda, o potencia, medida en MW. La evolución de la demanda de consumo de energía eléctrica es tratada en estudios y análisis de corto, medio y largo plazo.

La previsión a corto plazo es requerida para las tomas de decisiones diarias en la operación, ya que incluye predecir eventos para las próximas, horas, días o incluso semanas. Se utiliza para la programación del despacho económico de las unidades de generación, realizar análisis de seguridad y calidad y para la programación de mantenimientos menores de las unidades generadoras, líneas, transformadores, etc. La previsión a mediano plazo se extiende desde algunos meses hasta unos pocos años. Son necesarios para la planificación de la reserva de combustible, programación del mantenimiento y para establecer los contratos de compra o venta de energía. La previsión a largo plazo se extiende por varios años, es necesaria para la planificación de la expansión de la generación y transmisión, reserva de combustible para varios años y la planificación de políticas de regulación de precios.

El análisis de previsión del comportamiento de la carga a largo plazo requiere la integración de aspectos exógenos a la electricidad, tales como crecimiento económico, evolución del Producto Interno Bruto y análisis de escenarios con fuerte característica estocástica. Sin embargo, el estudio de la evolución de la carga a largo plazo, a través del registro histórico es válido, y constituye un aporte importante, cuando el sistema eléctrico en estudio es caracterizado con recursos limitados que no le permite soportar una demanda que supere el crecimiento vegetativo, como es el Sistema Eléctrico Paraguayo. De esta forma, las predicciones se hacen a partir de la dinámica propia de la demanda en lugar de relacionarlo con otras variables exógenas a la electricidad, identificando los componentes de la tendencia, la estacionalidad y eventuales ciclos que pudiera tener.

2. SERIE TEMPORAL

Una serie temporal se puede definir como una sucesión de observaciones cuantitativas cronológicamente ordenadas, en la cual una de las componentes es el tiempo y la otra la propia variable en estudio [1]. Matemáticamente, una serie de tiempo se define por los valores Y_1, Y_2, \dots, Y_n de una variable Y_t en tiempos t_1, t_2, \dots, t_n . Estas series se definen como distribuciones de pares ordenados (t, Y) en el plano cartesiano, siendo Y una función de t ; esto se denota por:

$$Y = f(t) \quad (1)$$

El estudio descriptivo de series temporales se basa en la descomposición de la serie en varios componentes. Tradicionalmente, en la mayoría de las series temporales se representan cuatro componentes al menos en parte: el componente tendencial (T) estacional (E), cíclico (C) y aleatoria (A) [2].

2.1. Componente tendencial (T)

Es el componente que recoge el comportamiento de la serie a largo plazo, para detectarse se requiere que la serie conste de un elevado número de observaciones, de esta forma apreciar un movimiento creciente o decreciente [2].

2.2. Componente estacional (E)

Son movimientos ascendentes y descendentes de la serie que se repiten periódicamente. Al tiempo entre dos picos consecutivos se le denomina periodo estacional, y puede ser diario, semanal, mensual, anual, etc. Estos periodos se pueden determinar con la aplicación de la transformada rápida de Fourier (FFT), o bien por medio de la función de auto correlación [2].

**XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022**

2.3. Componente cíclico (C)

El efecto cíclico se define como la fluctuación en forma de onda alrededor de la tendencia, son curvas de largo período, estos patrones cíclicos tienden a repetirse en los datos cada dos, tres o más períodos [2].

2.4. Componente Aleatorio (A)

Estas variaciones no responden a ningún patrón de comportamiento, más bien son consecuencia de la presencia de factores aleatorios que inciden de manera aislada y no permanente en la serie; una característica principal es que su correlación es cero [2]. La Figura 1: Componentes de una serie de tiempo., muestra las componentes de una serie de tiempo.

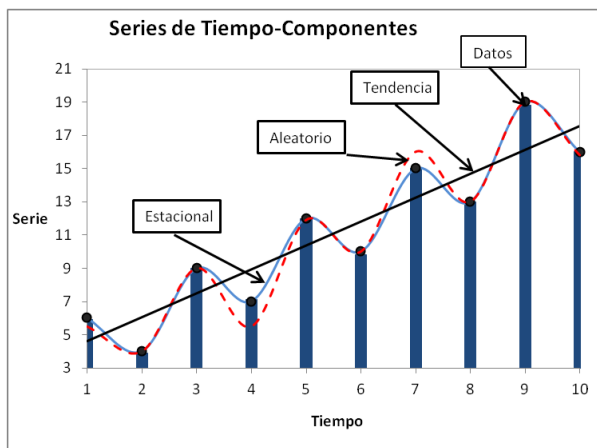
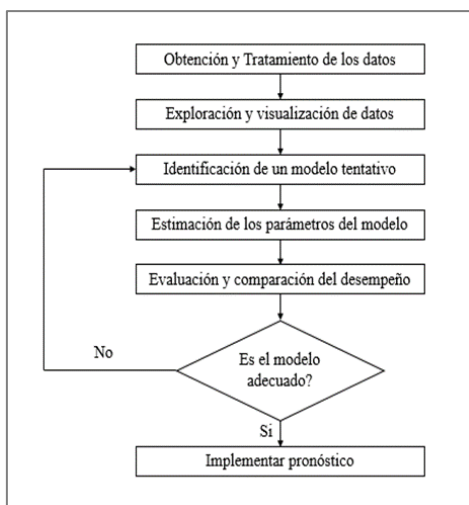


Figura 1: Componentes de una serie de tiempo.

3. METODOLOGIA PARA LA ESTIMACION DE LA DEMANDA DEL SEP

En el presente trabajo de investigación se opta por el uso del aplicativo R (The R Project for Statistical), software libre, de código abierto popular en la comunidad estadística y lo suficientemente flexible y potente para analizar y predecir el comportamiento de las variables a ser analizadas [3]. En la Figura 2, se ilustra el proceso seguido para elaborar los modelos de pronósticos [4].



XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Figura 2: Proceso para la realización de pronóstico.

Se emplearon los registros de la demanda máxima mensual de potencia en MW del sistema eléctrico paraguayo, así como los valores del consumo de energía en MWh. Se trabajó con dos muestras de 396 datos mensuales que comprenden datos recopilados desde el año 1985 hasta el 2018. Se dividieron ambas series en dos segmentos: un período de entrenamiento y un período de validación.

Las series de la demanda máxima de potencia y del consumo de energía se trazaron contra el tiempo, para su observación y revelaron características que fueron incorporados en el modelo. De manera a capturar la tendencia y la estacionalidad de las series temporales analizadas, se utilizaron modelos de regresión lineal que modelan la tendencia y para el ajuste del componente estacional en el modelo de regresión, se estableció una nueva variable que denote la temporada para cada observación. Se desarrollaron tres modelos de series de tiempo con diferentes tendencias: lineal, cuadrática y cubica, modelando el componente estacional como una variable ficticia. Los parámetros de los modelos de fueron estimados utilizando el método de mínimos cuadrados aplicados para una regresión lineal. Una vez calculados los coeficientes, se procedió a la generación de los puntos a través de los respectivos modelos. Los puntos obtenidos a través de los respectivos modelos fueron evaluados y comparados con los registros históricos a través de gráficos.

Después de implementar los diferentes modelos de regresión y elegir el modelo que sería utilizado para la elaboración del pronóstico se procedió a recombinar los períodos de entrenamiento y validación en una sola serie de datos, el modelo elegido se volvió a ejecutar hasta el horizonte seleccionado. Al obtener los valores del pronóstico se examinaron las medidas de precisión como, el error porcentual absoluto medio (MAPE) y el error cuadrático medio (MSE).

A continuación, se presentan las respectivas ecuaciones de los criterios mencionados:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t} \quad (2)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2 \quad (3)$$

Donde:

Y_t es el valor real de la serie.

\hat{Y}_t es el valor del pronóstico.

4. MODELADO DE LA CURVA DE CARGA TÍPICA

La curva de carga horaria con horizonte de un día del sistema eléctrico paraguayo muestra características bien marcadas tanto para el verano como para el invierno. La curva de carga del verano muestra dos periodos de carga máxima uno entre las 12 h hasta las 15h y la otra punta se da entre las 20h y las 22h, en cambio la del invierno solo un periodo de punta entre las 18h y las 22h. En la Figura 3 se observan las curvas de carga del sistema eléctrico paraguayo, correspondientes al día más frío y más caluroso del 2017.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

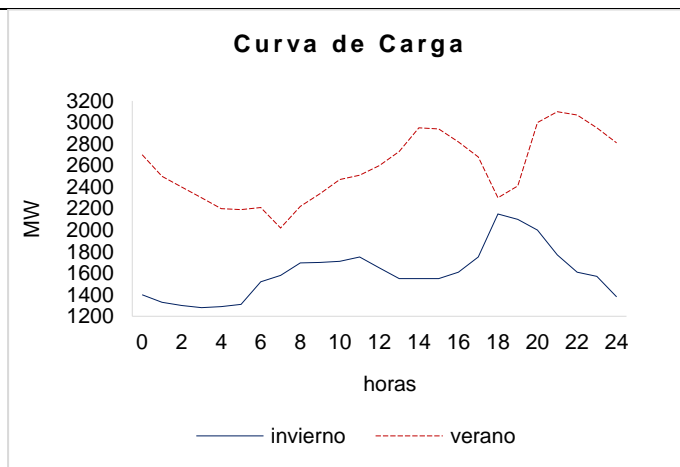


Figura 3: Curva de Carga Típica del Sistema Eléctrico Paraguayo.

En este trabajo el ajuste de la Curva de Carga Típica resulta como una aplicación de las previsiones realizadas para la demanda máxima de potencia, y de consumo de energía mensual, obtenida a través de las técnicas mencionadas. De esta forma, fueron utilizadas como referencia la curva de carga, con los mayores registrados en invierno y en verano, de manera a obtener la forma de la curva de carga. El ajuste fue realizado a través de técnicas de mínimos cuadrados con restricciones de valores máximo horario y de consumo de energía, obtenidas en las proyecciones de demanda de potencia y de energía, con discretización mensual. Se consideraron como meses de invierno desde abril a agosto y los meses de verano de septiembre a marzo.

La formulación matemática para obtener la Curva de Carga Típica para los meses considerados de invierno es dada por:

$$\text{Minimizar } S = \sum_{i=1}^m (P_i - f(x))^2 \quad (4)$$

s.a

$$P(18) = \widehat{P}_{18} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{24} P_k = E_i \quad (6)$$

La ecuación (5), se refiere a la restricción de cumplimiento del valor máximo de la carga prevista a las 18h, y la restricción (6), se refiere a la restricción de valor de la energía, ambas previstas a través del modelo de series de tiempo con valores mensuales. Se aplica este modelo para todas las estimaciones de potencia desde el año de 2018 hasta el año de 2023.

La formulación matemática para obtener la Curva de Carga Típica para los meses considerados de verano es dada por:

$$\text{Minimizar } S = \sum_{i=1}^m (P_i - f(x))^2 \quad (7)$$

s.a.

$$P(15) = \widehat{P}_{15} \quad (8)$$

$$P(22) = \widehat{P}_{22} \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^{24} P_k = E_i \quad (10)$$

Donde las ecuaciones (8) y (9) se refieren a los valores máximos de las 15 y 22 horas previstas, mientras que la ecuación (10) se refieren a la restricción del valor de la energía.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Para el modelado de la Curva de Carga de Verano fue llevado en consideración los picos de consumo en el día, uno a la siesta y otro a la tarde noche. Se aplica este modelo para todas las estimaciones de potencia desde el año de 2019 hasta el año de 2023. Para realizar el ajuste de curva propuesto se optó por modelos polinómicos debido a la característica no lineal de la curva de carga tanto como para verano e invierno. Para la Curva Típica de Invierno, se escogió un polinomio de cuarto orden y para la del verano de séptimo orden.

5. RESULTADOS

En Figura 4 se observan en azul los datos de la serie y en rojo los puntos arrojados por el modelo propuesto. Se comprueba que los componentes de la tendencia y la estacionalidad fueron ajustados satisfactoriamente.

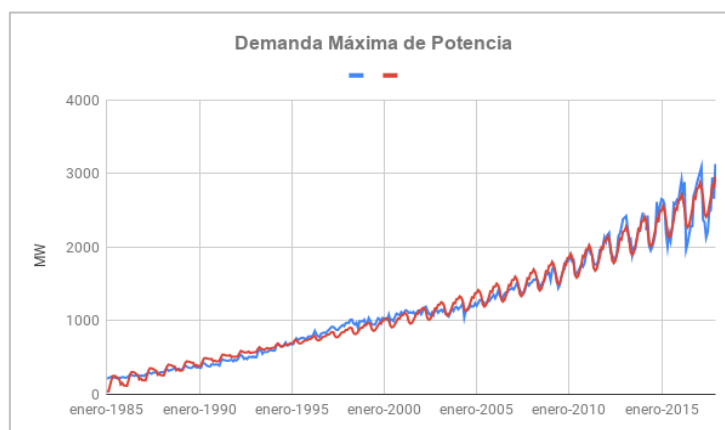


Figura 4: Demanda Máxima de Potencia

Para la validación del modelo se tomó como base la demanda máxima mensual registrada en el año 2018. Para cada mes se calculó la potencia según los componentes del modelo y el porcentaje de error. En la Figura 5 se compara de forma gráfica los resultados del modelo de de la serie de demanda máxima de potencia, con los valores registrados reales, que corresponden a datos del 2018, la curva de color rojo corresponde a los valores reales y la curva de color azul corresponde a los valores arrojados por el modelo.

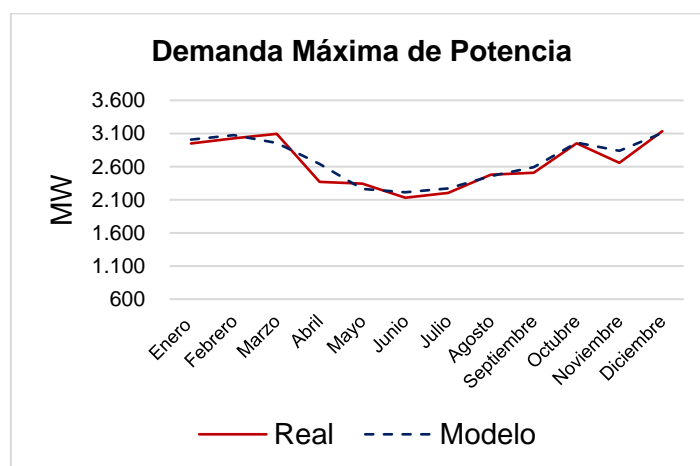


Figura 5: Demanda Máxima de Potencia

La Tabla I, presenta el error porcentual, se puede observar que el mayor error se encuentra en el mes de abril con 11,3% de error porcentual.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Tabla I: Error porcentual de la demanda

Demanda Máxima de Potencia			
Mes	Real (MW)	Modelo (MW)	Error (%)
Enero	2.950	3.006,598	1,919
Febrero	3.026	3.076,184	1,658
Marzo	3.095	2.956,477	4,476
Abril	2.371	2.640,432	11,364
Mayo	2.343	2.262,575	3,433
Junio	2.131	2.212,806	3,839
Julio	2.204	2.269,797	2,985
Agosto	2.478	2.456,708	0,859
Septiembre	2.508	2.591,646	3,335
Octubre	2.951	2.962,125	0,377
Noviembre	2.658	2.837,443	6,751
Diciembre	3.135	3.108,412	0,848

Es de esperar el porcentaje de error significativo en este mes debido principalmente a la dispersión de los registros históricos, a consecuencia de que en algunos años hubo cambios entre el horario de verano e invierno. En la Figura 6 se observa en azul los datos de la serie, en rojo los puntos obtenidos por el modelo. Se comprueba que los componentes de la tendencia y la estacionalidad fueron ajustados satisfactoriamente.

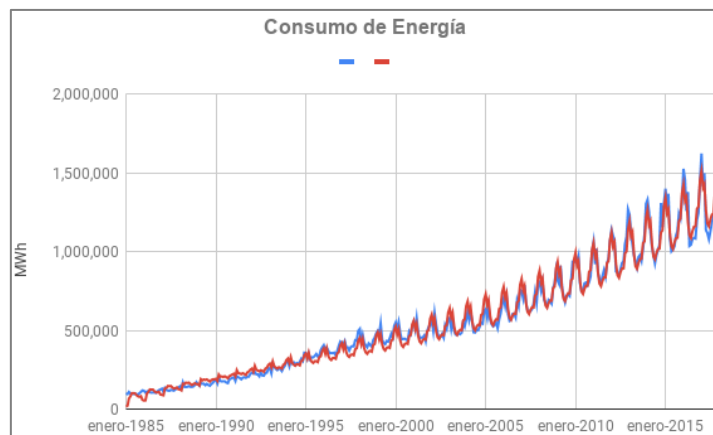


Figura 6: Consumo de Energía

En la Figura 7 se compara de forma gráfica los valores obtenidos del modelo de la serie de consumo de energía con los valores registrados reales, que corresponden a datos del 2018. La curva de color rojo corresponde a los valores reales y la curva de color azul corresponde a los valores arrojados por el modelo.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

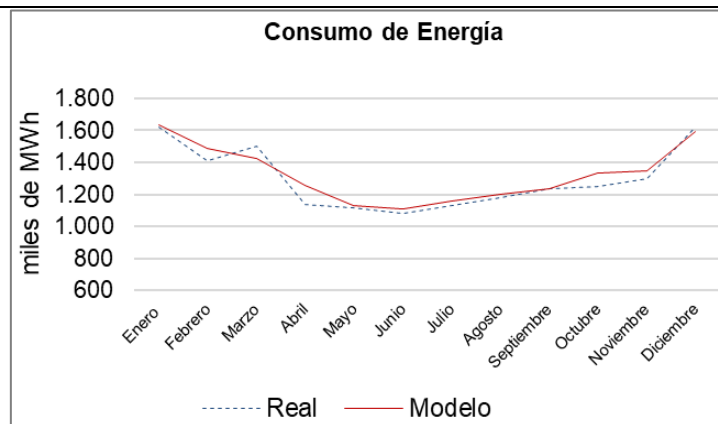


Figura 7: Consumo de Energía-Tendencia

La Tabla II presenta el error porcentual. Se puede observar que el mayor error se encuentra en el mes de abril con 10,5%, este puede ser observado claramente en la gráfica anterior.

Tabla II: Error porcentual de la energía

Consumo de Energía			
Mes	Real (MWh)	Modelo (MWh)	Error (%)
Enero	2.950	3.006,598	1,919
Febrero	3.026	3.076,184	1,658
Marzo	3.095	2.956,477	4,476
Abril	2.371	2.640,432	11,364
Mayo	2.343	2.262,575	3,433
Junio	2.131	2.212,806	3,839
Julio	2.204	2.269,797	2,985
Agosto	2.478	2.456,708	0,859
Septiembre	2.508	2.591,646	3,335
Octubre	2.951	2.962,125	0,377
Noviembre	2.658	2.837,443	6,751
Diciembre	3.135	3.108,412	0,848

Con el modelo que presentó un mejor ajuste a la serie de datos, se realizó el pronóstico hasta el año 2023. Las medidas de precisión del pronóstico de la demanda máxima de potencia fueron los siguientes: MSE (7845.735), MAPE (8,033139). Las medidas de precisión del pronóstico del consumo de energía fueron los siguientes: MSE (1680,0686), MAPE (7,774283). Estas estimaciones fueron utilizadas para realizar el ajuste de la curva de carga tanto para invierno como para verano.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del modelado de la curva de carga del sistema eléctrico paraguayo para los años 2018 al 2023 con discretización mensual, utilizando modelos polinómicos. Los parámetros de los modelos fueron estimados mediante el método de mínimos cuadrados con restricciones lineales. En la Figura 8 se compara de forma gráfica los resultados del modelo de la curva de carga del verano del mes de noviembre. Se visualiza que se presentan dos picos característicos.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

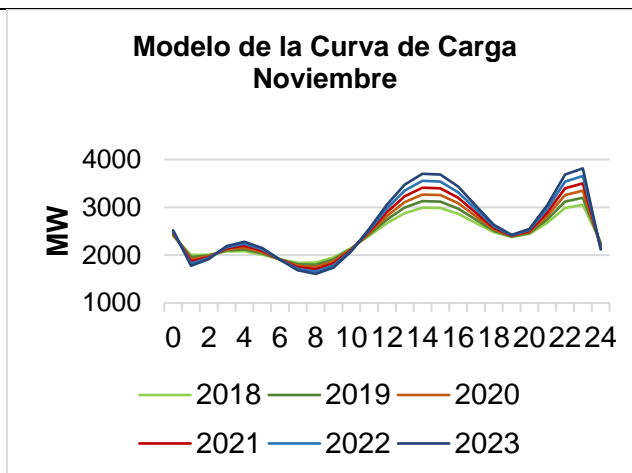


Figura 8: Modelo de la Curva de Carga-Noviembre.

En la figura 9 se realiza la comparación de la curva de carga del verano, correspondiente al mes de noviembre. Se compara los registros del 2017 con el modelo arrojado correspondiente al año 2018.

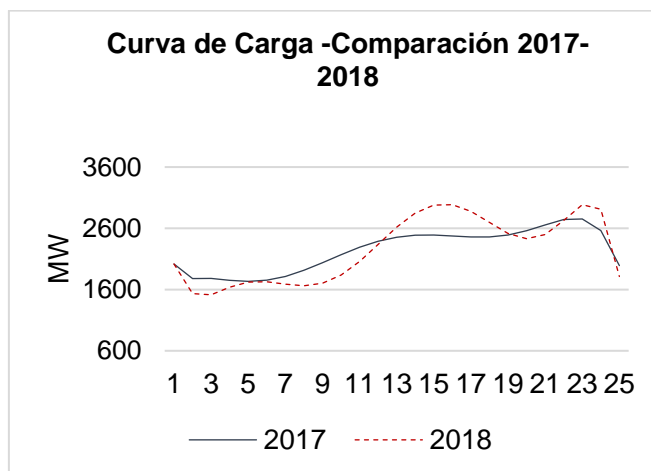


Figura 9: Comparación-Curva de Carga

A continuación, en Figura 10 se presenta el modelo de la Curva de Carga correspondiente al mes de Julio, se observa que presenta un solo pico característico.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

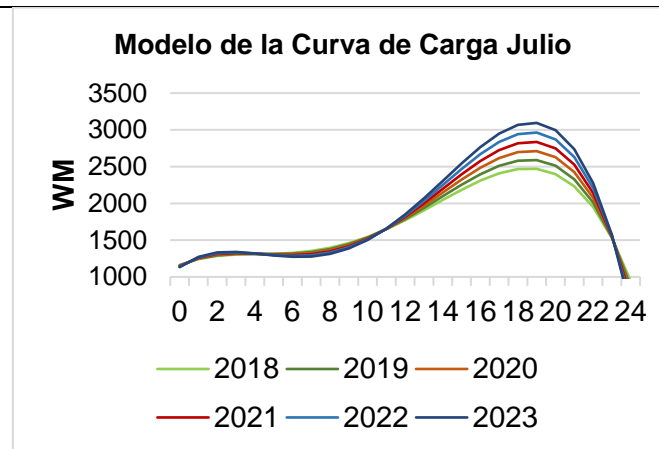


Figura 10: Modelo de la Curva de Carga-Julio

En la Figura 11 se compara los registros del 2017 con los valores arrojados por el modelo correspondiente al año 2018. Se observa que la curva modelada posee un comportamiento similar a los registros.

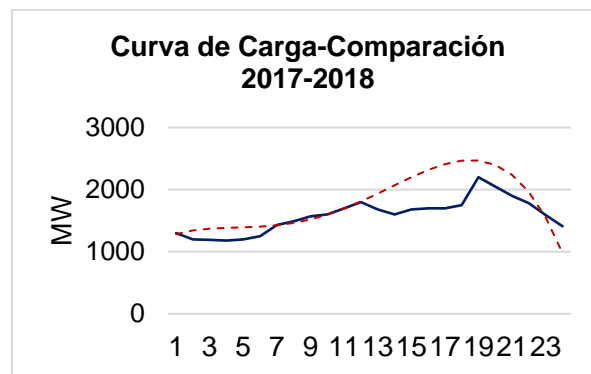


Figura 11: Comparación-Curva de Carga

6. CONCLUSIÓN

Pronosticar la demanda de máxima de potencia y consumo de energía es una tarea de gran importancia para la planificación de los sistemas de potencia. Entre los diferentes métodos y técnicas utilizadas para pronosticar la demanda de electricidad, las series de tiempo permiten obtener predicciones con un alto grado de exactitud. En el presente trabajo de investigación basado en los registros históricos mensuales de demanda máxima de potencia y de consumo de energía, fueron ajustados modelos basados en análisis de series de tiempo, de modo a identificar los patrones de tendencia, estacionalidad y eventuales ciclos, de modo a proyectar su comportamiento para los próximos cinco años del sistema eléctrico paraguayo.

Utilizando los datos obtenidos de las proyecciones de la demanda máxima de potencia, de consumo energía mensual y los registros máximos diarios, fueron ajustados modelos de curvas de cargas típicas, a través de técnicas de optimización de mínimos cuadrados con restricciones de atendimento de la demanda máxima y de consumo de energía, para los meses de verano y de invierno.

Los resultados obtenidos fueron buenos, aun cuando requiera mejoras en el modelado.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Montgomery, C. Jennings, M. Kulahci, *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015., pagina 2
- [2] C. Chatfield, *The analysis of time series: an introduction*, Chapman & Hall/CRC, 2004. paginas 10-12
- [3] R. Hyndman, G. Athanasopoulos, *Forecasting: principles and practice*, Otexts, 2018.
- [4] G. Box, G. Jenkins, G. Reinsel, G. Ljung, *Time series Analysis: Forecasting and Control*, Wiley, 2015, paginas 19-20