

Evaluación económica de un sistema fotovoltaico basado en pronóstico de consumo eléctrico mediante el modelo SARIMA en un edificio de oficinas en Singapur

Economic evaluation of a photovoltaic system based on electricity consumption forecasting using the SARIMA model in an office building in Singapore

Paula Zharick Granada Chuscano¹, Laura Valentina Leguizamón Linares²,
Laura Valentina Ortiz Tello³ y José Nicolás Valbuena Godoy⁴

Resumen

El uso de fuentes de energía renovables reduce la dependencia de combustibles fósiles y disminuye la emisión de gases de efecto invernadero. La instalación de sistemas fotovoltaicos en edificaciones contribuye a mitigar el cambio climático y proteger el medio ambiente. En este estudio se abordó el desafío de reducir la dependencia de fuentes de energías convencionales y minimizar los costos eléctricos de un edificio compuesto por oficinas en Singapur. Para lograrlo, se utilizó un modelo estadístico SARIMA para predecir el consumo eléctrico de la edificación hasta más de 7 años en el futuro. Después de evaluar 17 combinaciones, se determinó que el SARIMA (0,0,0) (1,0,0) [168] fue el modelo de mejor ajuste para los datos. Esta predicción se utilizó para realizar un análisis económico de la instalación de paneles fotovoltaicos para reducir la factura eléctrica y recuperar la inversión en un tiempo determinado. Los resultados obtenidos demostraron que la instalación de paneles fotovoltaicos es rentable y deja un precedente para establecer futuros sistemas en edificaciones con características geográficas similares a Singapur.

Palabras clave: SARIMA, consumo eléctrico, sistemas fotovoltaicos, análisis económico, gestión energética.

Créditos

¹ Estudiante de décimo semestre de Ingeniería Industrial, Universidad Central. Forma parte del semillero Modelado de Sistemas.
pgranadac@ucentral.edu.co

² Estudiante de décimo semestre de Ingeniería Industrial, Universidad Central. Forma parte del semillero Modelado de Sistemas.
lleguizamon1@ucentral.edu.co

³ Estudiante de décimo semestre de Ingeniería Industrial, Universidad Central. Forma parte del semillero Modelado de Sistemas.
lortitz2@ucentral.edu.co

⁴ Profesor de la facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central. Líder del semillero Modelado de Sistemas.
jvalbuenag1@ucentral.edu.co

Abstract

The use of renewable energy sources reduces dependence on fossil fuels and reduces greenhouse gas emissions. Installing photovoltaic systems in buildings contributes to mitigating climate change and protecting the environment. This study addressed the challenge of reducing dependence on conventional energy sources and minimizing electricity costs in an office building in Singapore. To achieve this, a SARIMA statistical model was used to predict the building's electricity consumption up to 7 years into the future. After evaluating 17 combinations, it was determined that SARIMA (0,0,0) (1,0,0) [168] was the best-fitting model for the data. This prediction was used to perform an economic analysis of installing photovoltaic panels to reduce the electric bill and recover the investment in a given time. The results showed that installing photovoltaic panels is cost-effective and leaves a precedent for establishing future systems in buildings with similar geographical characteristics to Singapore.

Keywords: SARIMA, electricity consumption, photovoltaic systems, economic analysis, energy management.

Cómo citar:

Granada, P., Leguizamón, L., Ortiz, L. & Valbuena, J. (2023). Evaluación económica de un sistema fotovoltaico basado en pronóstico de consumo eléctrico mediante el modelo SARIMA en un edificio de oficinas en Singapur. *Ingesciencia*, 8, 18-29.

1. Introducción

En la actualidad, la creciente demanda de energía eléctrica ha llevado al mundo y a la industria a buscar formas de generar energía limpia, sostenible y renovable. En este contexto, los sistemas fotovoltaicos, también conocidos como paneles solares, se han convertido en una alternativa prometedora para la generación de energía, especialmente en edificios (Dolezal *et al.*, 2013). Mediante la instalación de estos sistemas se aprovecha la energía solar para generar electricidad, lo que produce un ahorro de costos en electricidad y una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo (Sanabria, 2016). Dicha demanda energética debe tener una buena planificación para contrarrestar fluctuaciones y distintas condiciones mundiales; para esto se han introducido nuevos modelos de previsión precisa del consumo y la generación de energía, como los modelos SARIMA (*Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average*).

El modelo SARIMA (p,d,q) (P,D,Q) [S] incorpora el aprendizaje de comportamientos estacionales característicos en la demanda energética de edificios. Este modelo incluye factores estacionales autorregresivos (P), diferenciación (d), diferenciación estacional (D) y promedio móvil estacional (Q), incluye una serie estacional con [S] períodos. La ecuación del modelo SARIMA se representa de la siguiente manera:

$$\Phi(B) (1-B)^d (1-B^s)^D Y_t = \theta(B)(1-\Theta B^s)\varepsilon_t \quad (1)$$

Donde:

- $\Phi(B)$ y $\theta(B)$ son los polinomios autorregresivos y de media móvil, respectivamente, que involucran los parámetros p y q .
- B es el operador de rezago o retraso y B^s representa el rezago estacional con la longitud de estacionalidad S .
- Y_t es el valor de la serie de tiempo en el tiempo t .
- ε_t son los errores o residuos de la serie de tiempo.

En el campo de la gestión de la demanda estacional de bienes y servicios, las investigaciones sobre modelos para pronósticos han sido objeto de creciente interés y estudio. Es así que una investigación se llevó a cabo para desarrollar modelos SARIMA con el fin de predecir las ventas de las verduras más compradas en un periodo específico. Los resultados indicaron que este modelo resulta ser el más adecuado para productos con demanda estacional (Falatouri *et al.*, 2022). Así mismo, en otro estudio se emplearon series temporales para predecir la demanda de electricidad. En este caso se utilizó un modelo SARIMA con variables exógenas (SARIMAX) que incorporó tanto variables meteorológicas como variables con efectos cruzados (estacionalidad diaria, semanal y anual). Este enfoque permitió reducir los errores de predicción y mejorar el criterio de información de Akaike (Elamin & Fukushige, 2018).

La implementación de sistemas fotovoltaicos involucra una evaluación integral que abarca la consideración de modelos de pronóstico, factores meteorológicos y las especificaciones físicas de los paneles a instalar (Ho *et al.*, 2019). Actualmente, diversos proyectos se han llevado a cabo con el objetivo de reducir el consumo de energía aprovechando la radiación solar. Por ejemplo, en Camerún se ha conseguido reducir el consumo a $65,94 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ al año; mientras que, en Singapur, con una radiación solar anual promedio de $1580 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$ al año, se vislumbra la posibilidad de reducciones aún más significativas (Zhijian *et al.*, 2021). Por otro lado, Haghigat *et al.* (2016) señala que la combinación óptima en términos de costos totales, incluyendo instalación, mantenimiento, reemplazo y otros factores, para un sistema fotovoltaico y sus componentes implica la integración de diésel, energía solar fotovoltaica y aerogeneradores, lo que requiere una inversión inicial de USD \$521,078. Adicionalmente, investigaciones realizadas por Yan *et al.* (2019) y Castilho *et al.* (2021) introducen el concepto de autoconsumo y autofinanciación en sistemas fotovoltaicos, donde la energía generada por los paneles solares se emplea directamente en el edificio, prescindiendo de una conexión externa. Esta práctica conlleva el potencial de ahorros en la factura de electricidad a lo largo del tiempo y la generación de ingresos suficientes a través de la venta de electricidad para cubrir los costos de inversión y operación. Por último, Vinardell (2022) destaca la propuesta de valor que supone la instalación de paneles

solares en residencias y enfatiza su impacto positivo tanto desde una perspectiva económica como en la reducción de la huella de carbono.

En el presente documento se evalúa una propuesta para implementar un sistema fotovoltaico en un edificio de oficinas de Singapur, a partir de la base de datos del CEA (City Energy Analyst) adquiridos por la Universidad Tecnológica de Nanyang (NTU) y el trabajo realizado por Bello (2021) en su tesis de maestría en la Universidad Central y en la Universidad Jorge Tadeo Lozano. En este sentido, se realizó una caracterización de los datos de la serie de tiempo de la demanda energética del edificio y se procedió a entrenar un modelo SARIMA con transformación BoxCox. Además, se llevó a cabo un análisis económico para esta instalación. Finalmente, se discutieron los resultados obtenidos y se identificaron las posibles aplicaciones futuras del trabajo realizado.

2. Materiales y métodos

2.1 Caracterización de la serie de tiempo

Inicialmente se verificó la continuidad horaria de la serie de tiempo mediante la representación gráfica de los datos y se aplicaron técnicas de estadística descriptiva y el diagrama de caja para identificar información atípica. Luego, se procedió a dividir los datos en grupos de entrenamiento y prueba. Mediante gráficas de tendencia, gráficos de caja de frecuencia y la prueba de DickeyFuller, se evaluaron los supuestos de tendencia, estacionalidad (S) y estacionariedad, respectivamente, en ambos conjuntos de datos. Finalmente, se verificó que estos supuestos fueran similares y concordaran en su comportamiento.

2.2 Modelo SARIMA

Cumpliendo los supuestos del modelo SARIMA, se realizó una transformación Box-Cox con el grupo de entrenamiento con el objetivo de reducir la heterocedasticidad de los datos. Así, se evaluaron diferentes combinaciones de los parámetros (p,d,q) (P,D,Q) del modelo SARIMA y se identificó la combinación con mejor ajuste al grupo de entrenamiento. Finalmente, se pronosticaron los datos respectivos al grupo de prueba y se evaluó el ajuste del pronóstico de forma gráfica y con el estadístico MAPE (Mean Absolute Percentage Error).

2.3 Evaluación económica de la propuesta del sistema fotovoltaico

Una vez validado el modelo, se procedió a pronosticar los datos futuros de demanda energética de forma horaria y, posteriormente, se estimó la demanda mensual del sistema para los próximos años. Teniendo en cuenta la demanda proyectada, se determinó la cantidad de paneles solares que se instalarían y la cantidad de energía que

se generaría mensualmente, de tal forma en que no se supere el área total del edificio. Además, se identificó el costo total de instalación del sistema y el ahorro energético en dólares por kW al mes. Finalmente, se evaluó el retorno de la inversión, teniendo en cuenta el ahorro energético, la tasa de interés bancaria del Banco Central de Singapur y los costos de mantenimiento.

3. Resultados y discusión

Los resultados encontrados en el análisis de la serie de tiempo proporcionan una visión de las tendencias, patrones y variaciones presentes en los datos. La serie de tiempo consistió en 8760 registros de demanda energética en kWh, con un rango que va desde 12,86 kWh hasta 76,19 kWh. La media es de 29,7 kWh y la desviación estándar es de 14,22 kWh. Al examinar el histograma y el diagrama de cajas y bigotes (figura 1), se observó que la frecuencia más alta de demanda se encuentra entre 12,86 kWh y aproximadamente 25 kWh, con una mediana en torno a 24 kWh y sin evidencia de datos atípicos. Así mismo, el histograma da razón al realizar una transformación a los datos para acercarse a un comportamiento normal. Además, se observó un comportamiento multimodal en la edificación, lo que sugiere que el consumo eléctrico puede estar relacionado con variables externas, como la hora del día durante la jornada laboral, de manera periódica.

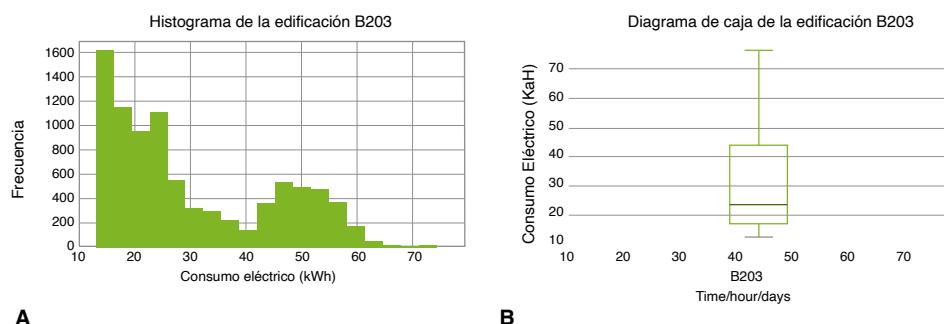


Figura 1. (a) Histograma de la demanda energética.
(b) Diagrama de caja de la demanda energética

Fuente: elaboración propia.

Se construyó un conjunto de entrenamiento y otro de prueba de la serie de tiempo en porcentajes 80 y 20, respectivamente, y, mediante las gráficas de las series de tiempo y tendencia (figura 2), se identificó visualmente que ambos grupos presentan una tendencia lineal constante (la línea de tendencia se mantiene alrededor de los 30 kWh, con una pendiente aproximada de -0,0001) y además presentan una periodicidad semanal de 168 horas.

Para confirmar la estacionalidad de los datos en ambos grupos, se generaron diagramas de caja de las series de tiempo con agrupamientos de cada 168 horas (figura 3). En ambos diagramas no se encontraron datos atípicos, lo que respalda la presencia

del comportamiento estacional en los datos. Además, se realizó la prueba de hipótesis de DickeyFuller en ambos conjuntos para determinar si existía dependencia temporal y la no convergencia a una media constante, lo que podría indicar que la serie de tiempo no es estacionaria.

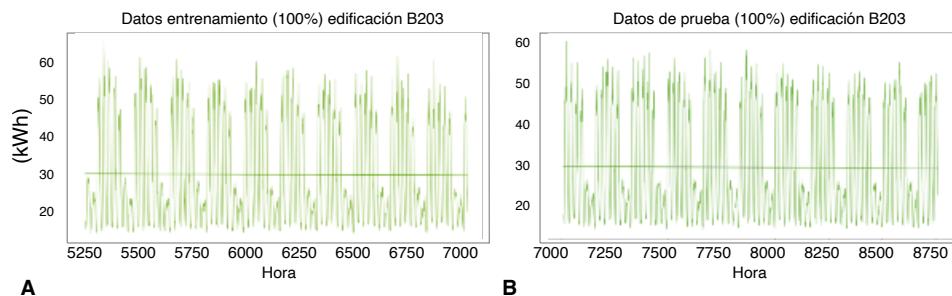


Figura 2. Gráficas de las series de tiempo y tendencia: (a) Entrenamiento y (b) Prueba
Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las pruebas de DickeyFuller respaldaron el supuesto de estacionariedad en los conjuntos de entrenamiento y prueba. En el conjunto de entrenamiento, se obtuvo un valor del estadístico ADF de -10,879975 con un valor-*p* de 0,000000, y en el conjunto de prueba se obtuvo un valor del estadístico ADF de -5,842044 con un valor-*p* de 0,000000. Al comparar estos valores con los valores críticos para diferentes niveles de significancia (1 %, 5 %, 10 %), se encontró que el valor del estadístico ADF está por debajo de los valores críticos en todos los casos. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis de presencia de raíces unitarias que impiden el comportamiento de estacionariedad en ambos conjuntos.

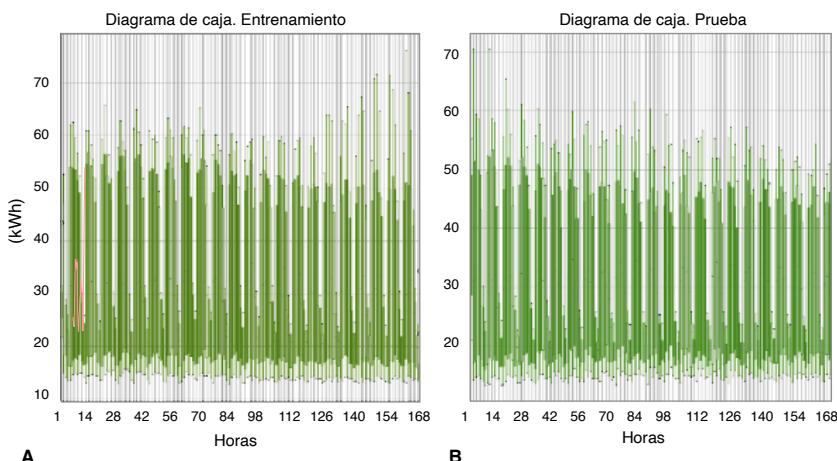


Figura 3. Diagramas de caja de estacionalidad: (a) Entrenamiento y (b) Prueba
Fuente: elaboración propia.

Se realizó una transformación BoxCox a los datos de entrenamiento para reducir la heterocedasticidad y acercarse a un comportamiento de distribución normal.

Mediante funciones y librerías en el lenguaje de programación Python, se encontró que el valor λ con mejor ajuste es de -0,5262. De esta manera, la transformación de la serie de tiempo de entrenamiento quedó de la siguiente forma:

$$Y_t(\lambda) = \frac{Y_{t-1}}{\lambda} \quad (2)$$

Donde Y_t es igual a los datos de la serie de tiempo y λ es el parámetro determinado.

Una vez efectuada la transformación de la serie de tiempo, se procedió a evaluar 17 combinaciones de modelos SARIMA (tabla 1), con el objetivo de encontrar la combinación $(p,d,q)(P,D,Q)[S]$ que mejor se ajustara a los datos visualmente y con un valor del criterio de información de Akaike (AIC) más cercano a 0 en comparación a los otros modelos.

Tabla 1. Resultados de combinaciones de modelos SARIMA

P	d	q	P	D	Q	S	Resultado AIC
0	0	0	1	0	0	168	-8621,08
1	0	1	1	0	0	168	-10781,05
1	0	1	2	0	0	168	-11117,177
1	0	2	1	0	0	168	-10831,874
1	0	2	2	0	0	168	-10961,554
2	0	1	1	0	0	168	-10854,424
2	0	1	2	0	0	168	-11188,112
2	0	2	1	0	0	168	-10806,874
2	0	2	2	0	0	168	-11062,987
3	0	1	1	0	0	168	-10171,372
3	0	1	2	0	0	168	-11103,108
3	0	2	1	0	0	168	-10867,155
3	0	2	2	0	0	168	-11023,500
4	0	1	1	0	0	168	-10741,468
4	0	1	2	0	0	168	-11093,392
4	0	2	1	0	0	168	-10829,738
4	0	2	2	0	0	168	-11149,338

Fuente: elaboración propia.

De esta manera, el modelo SARIMA $(0,0,0)(1,0,0)[168]$ fue el que presentó mejor ajuste óptimo. Así, considerando la transformación BoxCox aplicada, la ecuación del modelo se establece de la siguiente manera:

$$y_t = \lambda \sqrt{(\mu + A_t + \Phi_1 * (\frac{(Y_{t-168})^{\lambda-1}}{\lambda}))^{\lambda-1}} \quad (3)$$

Donde $\Phi_1 = 1000$, $\mu = 28,8287$, $\lambda = -0,5262$ y A_t = ruido blanco

Teniendo en cuenta la formulación, se realizaron pronósticos para los siguientes 1751 períodos correspondientes al conjunto de prueba del modelo. Luego, se llevó a cabo una transformación inversa BoxCox para expresar la serie de tiempo en unidades de kWh y se graficaron los datos de prueba junto con la serie pronosticada, lo que evidencia un comportamiento similar (figura 4). Finalmente, el error de pronóstico MAPE fue de 10,62 %.

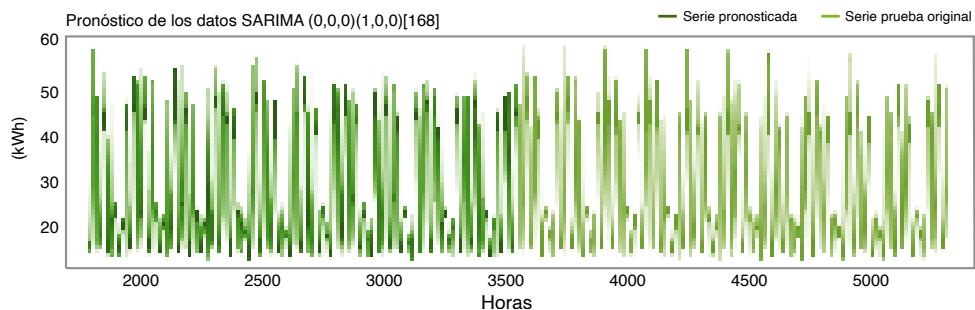


Figura 4. Gráfica de la serie de prueba y la serie pronosticada
Fuente: elaboración propia.

Una vez evaluado el modelo, se procedió a pronosticar la demanda eléctrica para los próximos 10 años con el fin de determinar el nivel de energía necesario para satisfacer el sistema. Tras tener en cuenta el comportamiento de tendencia constante y estacionalidad, se obtuvo un consumo promedio de 15 976 kW al mes. Así, teniendo en cuenta la investigación de Perpiñán (2023), la cual sugiere que los valores de pérdida esperados al instalar un sistema fotovoltaico se encuentran entre el 70 % y el 90 %, se optó por proponer la instalación de un sistema fotovoltaico que permitiera ahorrar un 80 % de la energía, lo que equivale a 12 781 kW al mes o a 426 kW al día. De esta manera, considerando la demanda de energía a cubrir, se procedió a determinar la cantidad de paneles solares necesarios a instalar, con tal de que no se superara el área total del edificio, 22 651,3 m₂. De igual manera, se determinaron los costos asociados, tanto del sistema como de sus componentes para su instalación.

Se llevó a cabo una investigación en la empresa AutoSolar, con el objetivo de determinar el costo de inversión necesario para implementar el sistema fotovoltaico. Durante el estudio, se obtuvo información detallada sobre los materiales requeridos para establecer una instalación solar, ya sea independiente de la red eléctrica o conectada a ella. Para lograr un ahorro energético diario de 14,4 kW, se consideró un kit de tipo aislado con 8 paneles solares como referencia. Sin embargo, dado que la demanda diaria requería alcanzar los 426 kW, se determinó que sería necesario contar con 240 paneles solares de 550 W cada uno, lo que resultaría en una producción diaria de 432 kW, los paneles ocuparían un área total de 619,48 m₂. Asimismo, se identificó que se necesitarían al menos 24 inversores Growatt SPF 6000T DVM, distribuidos en grupos de 10 paneles por inversor, para cubrir la capacidad total, considerando que el inversor de batería estacionaria Gel 600 Ah tiene una capacidad

de entrada fotovoltaica máxima de 6 kW (AutoSolar, s. f.). En la tabla 2 se presenta un resumen detallado del presupuesto necesario en dólares para la implementación del sistema fotovoltaico.

Tabla 2. Resumen de estimación del costo de la inversión

	Concepto	Costo (\$)
	Costos de inversión	\$246 931
1	Costos de mantenimiento	\$687
1.1.1	Limpieza de paneles (1 técnico auxiliar)	
1.1.2	Limpieza de terreno	
1.1.3	Repuestos generales	\$687
1.1.4	Mantenimiento inversor	
1.1.5	Monitoreo	
2	Costos de instalación	\$33 411
2.1.1	Cable de Interconexión de Baterías	
2.1.2	Cable Unifilar 50 mm ² POWERFLEX RV-K Negro	
2.1.3	Cable Unifilar 50 mm ² POWERFLEX RZ-1K Verde	
2.1.4	Terminal de Ojo Cable 50mm - Ojo 8mm	
2.1.5	Cable Unifilar 6 mm ² SOLAR PV ZZ-F Negro	
2.1.6	Cable Unifilar 6 mm ² SOLAR PV ZZ-F Rojo	
2.1.7	Cable Unifilar 16 mm ² SOLAR PV ZZ-F Negro	
2.1.8	Cable Unifilar 16 mm ² SOLAR PV ZZ-F Rojo	
2.1.9	Repartidor LEGRAND Bornera 160A 750V	
2.1.10	Caja Estanca 200X100X70 PVC LGM	
2.1.11	Conectores RETIE MC4	
2.1.12	Kit Material Eléctrico 5000W 80A MPPT	
2.1.13	Protector Baterías GEL Rojo y Negro	
2.1.14	Estructura de Cubierta Metálica	
3	Costos de componentes principales	\$213 520
3.1.1	Placas solares	
3.1.2	Invertor	\$213 520
3.1.3	Batería Estacionaria Gel 600Ah 6V Ultracell UZV600-6	

Fuente: elaboración propia.

La tabla refleja el costo estimado del mantenimiento periódico, el cual es fundamental para prolongar la vida útil del sistema, como lo recomienda el fabricante, este sugiere realizar esa limpieza entre 3 o 4 veces al año, o con mayor frecuencia en zonas con alto nivel de polvo y suciedad (AutoSolar, s. f.). Posteriormente, considerando el monto de la deuda de USD \$246 931 con una tasa de interés del 0,31% mensual en el Banco Central de Singapur, se elaboró una tabla de amortización. Esta tabla tuvo en cuenta un ahorro mensual de USD \$3578, que representa el abono a capital que el edificio ahorraría en comparación con el pago de la factura de luz (USD \$0,28 por

kWh), así como los costos de mantenimiento y reparaciones de USD \$687 cada 3 meses (ver Anexo). De acuerdo con el análisis, se proyectó que la deuda será saldada en su totalidad para el año 7 (mes 84).

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran un panorama alentador tanto desde una perspectiva económica como en términos del error de pronóstico. Dado que la demanda energética presenta similitudes en diversos edificios de oficinas, el modelo SARIMA logra capturar eficazmente los patrones de tendencia y estacionalidad en las series de tiempo. Por otro lado, el ahorro energético en la factura eléctrica (USD \$3578 mensuales) posibilita la liquidación de la deuda en un período de 7 años, una situación ventajosa considerando que la mayoría de los contratos de adquisición de energía se establecen por 10 años o más. Sin embargo, la inclusión de una cuota fija mensual, además del ahorro generado, acelera la amortización de la inversión en la instalación.

Como perspectiva de investigación futura, se plantea la evaluación de diferentes tipos de modelos de pronóstico, así como la ampliación de aspectos considerados en el análisis económico. Aunque este estudio abarcó 17 combinaciones de modelos SARIMA, existe la posibilidad de explorar otras combinaciones, tomando en cuenta la experiencia adquirida en la identificación de factores autorregresivos, tendencia y estacionalidad. Además, se contempla la posibilidad de analizar el conjunto de datos con una frecuencia temporal distinta a la horaria, con el fin de reducir la cantidad de registros y no limitar la capacidad computacional en la construcción del modelo. Por otro lado, se plantea la inclusión de modelos SARIMAX, que consideran variables externas, así como la exploración de enfoques basados en el aprendizaje profundo, como las Redes Neuronales Recurrentes, para potenciar la precisión en los pronósticos. También, se sugiere evaluar los costos de instalación directamente en el edificio de Singapur y realizar un análisis comparativo con contratos de compraventa de energía. Esto permitiría determinar la opción que brinde los mayores beneficios en términos de rentabilidad y cumplimiento legal para los propietarios del edificio.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Central por proporcionarnos los recursos necesarios y el entorno propicio dentro del semillero de Modelado de Sistemas para llevar a cabo esta investigación. Extendemos nuestro agradecimiento a nuestro profesor José Nicolás Valbuena, cuya orientación experta, valiosos conocimientos y retroalimentación constructiva han sido fundamentales para la elaboración de este estudio. También deseamos agradecer a nuestras familias y seres queridos por su apoyo durante el proceso de investigación.

Referencias

- AutoSolar. (s. f.). *Mantenimiento de placas solares*. Recuperado el 7 de agosto de 2023 de <https://bit.ly/46Lu0XL>
- Bello, J. (2021). *Neural network model for building electric energy consumption forecasting in densely populated tropical areas* [Tesis de Maestría, Universidad Jorge Tadeo Lozano y Universidad Central]. <https://bit.ly/4nVhUlK>
- Castilho, C., Torres, J., Fernandes, C. & Lameirinhas, R. (2021). Study on the Implementation of a Solar Photovoltaic System with Self-Consumption in an Educational Building. *Energies*, 14(8), 2214. <https://doi.org/10.3390/en14082214>
- Dolezal, A., Majano, A., Ochs, A. & Palencia, R. (2013). *La Ruta hacia el Futuro para la Energía Renovable en Centroamérica*. Climate and Development Knowledge Network.
- Elamin, N. & Fukushige, M. (2018). Modeling and forecasting hourly electricity demand by SARIMAX with interactions. *Energy*, 165, 257-268.
- Falatouri, T., Darbanian, F., Brandtner, P., & Udoekwu, C. (2022). Predictive analytics for demand forecasting—a comparison of sarima and lstm in retail scm. *Procedia Computer Science*, 200, 993-1003.
- Haghigat, A., Avella, S., Najafi, B., Shirazi, A. & Rinaldi, F. (2016). Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind, diesel and hybrid electrification systems for off-grid rural electrification in Colombia. *Renewable Energy*, 97, 293–305. DOI: 10.1016/j.renene.2016.05.086
- Ho, S., Lomi, A., Okoroigwe, E. & Urrego, L. (2019). Investigation of solar energy: The case study in Malaysia, Indonesia, Colombia and Nigeria. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(1). <https://bit.ly/478JztV>
- Perpiñán, O. (2023). *Energía solar fotovoltaica*. <http://oscarperpinan.github.io/esf/>
- Sanabria, O. (2016). *Ánalisis costo/beneficio de la implementación de tecnologías de energía con paneles solares en la ese hospital San Cristóbal*. Repositorio Universidad Militar Nueva Granada. <http://hdl.handle.net/10654/14931>
- Vinardell, A. (2022). *Plan de negocio de una empresa de instalación de paneles solares para residencias unifamiliares* [Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/371673>
- Yan, J., Yang, Y., Campana, P. & He, J. (2019). City-level analysis of subsidy-free solar photovoltaic electricity price, profits and grid parity in China. *Nature Energy*, 4(8), 709-717. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0441-z>
- Zhijian, L., Yulong, Z., Xitao, Y., Yuanwei, L., Jinliang, X., Shicong, Z. & Bao-jie, H. (2021). A comprehensive study of feasibility and applicability of building integrated photovoltaic (BIPV) systems in regions with high solar irradiance. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127-240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.1272>

Anexo

Amortización de la inversión

Mes	Ahorro/ mes	Costos/mes	Abono a capital/mes	Interés	Deuda	Mes	Ahorro/ mes	Costos/mes	Abono a capital/mes	Interés	Deuda
0	\$ 3.578				\$ 246.931	43	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 394	\$ 127.551
1	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 754	\$ 244.107	44	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 394	\$ 124.741
2	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 746	\$ 241.275	45	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 377	\$ 121.843
3	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 739	\$ 238.436	46	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 368	\$ 118.933
4	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 730	\$ 236.275	47	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 360	\$ 116.011
5	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 721	\$ 233.503	48	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 352	\$ 113.078
6	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 715	\$ 231.242	49	\$ 3.578		\$ 2.891	\$ 339	\$ 110.529
7	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 707	\$ 228.371	50	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 330	\$ 107.281
8	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 699	\$ 225.488	51	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 321	\$ 104.053
9	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 690	\$ 222.605	52	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 310	\$ 101.064
10	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 681	\$ 219.708	53	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 301	\$ 97.264
11	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 673	\$ 217.484	54	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 291	\$ 94.254
12	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 665	\$ 215.259	55	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 282	\$ 91.370
13	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 657	\$ 212.337	56	\$ 3.578		\$ 2.891	\$ 273	\$ 88.479
14	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 647	\$ 209.406	57	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 264	\$ 85.413
15	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 639	\$ 206.467	58	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 254	\$ 82.413
16	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 631	\$ 204.205	59	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 243	\$ 79.578
17	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 623	\$ 201.252	60	\$ 3.578		\$ 2.891	\$ 233	\$ 76.700
18	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 615	\$ 198.976	61	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 223	\$ 73.793
19	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 606	\$ 196.003	62	\$ 3.578		\$ 2.891	\$ 214	\$ 70.902
20	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 597	\$ 193.022	63	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 204	\$ 68.004
21	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 590	\$ 190.720	64	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 195	\$ 65.020
22	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 580	\$ 187.722	65	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 185	\$ 62.041
23	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 571	\$ 184.735	66	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 176	\$ 59.054
24	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 564	\$ 182.368	67	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 166	\$ 56.053
25	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 555	\$ 179.364	68	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 156	\$ 53.050
26	\$ 3.578		\$ 2.891	\$ 545	\$ 176.341	69	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 145	\$ 50.042
27	\$ 3.578	\$ 687	\$ 3.578	\$ 536	\$ 173.378	70	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 137	\$ 44.905
28	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 528	\$ 170.926	71	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 126	\$ 40.752
29	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 519	\$ 167.869	72	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 117	\$ 37.174
30	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 511	\$ 165.469	73	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 107	\$ 34.000
31	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 502	\$ 162.413	74	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 97	\$ 31.002
32	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 492	\$ 159.921	75	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 85	\$ 27.529
33	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 483	\$ 156.921	76	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 75	\$ 24.054
34	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 475	\$ 153.818	77	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 65	\$ 21.202
35	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 465	\$ 150.705	78	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 56	\$ 18.260
36	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 456	\$ 148.273	79	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 46	\$ 14.834
37	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 449	\$ 145.141	80	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 36	\$ 12.000
38	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 439	\$ 142.005	81	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 25	\$ 8.000
39	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 431	\$ 139.548	82	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 15	\$ 5.486
40	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 421	\$ 136.435	83	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 5	\$ 1.286
41	\$ 3.578		\$ 3.578	\$ 421	\$ 136.435	84	\$ 3.578		\$ 1.286	\$ 0	\$ 0
42	\$ 3.578	\$ 687	\$ 2.891	\$ 404	\$ 130.735						

Fuente: elaboración propia.