

CRITERIO FISICOMATEMÁTICO PARA OPTIMIZACION DEL FUNCIONAMIENTO DE SISTEMAS CON ENERGÍA SOLAR

Pablo N Konverski¹, Raúl G Ortega¹, Héctor J Fasoli^{1, 2}

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad Nacional de Catamarca

² Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias, Pontificia Universidad Católica Argentina

e-mail: pnkonverski@exactas.unca.edu.ar

RESUMEN: La provisión previsible de energía eléctrica mediante plantas híbridas en sitios estratégicos del territorio nacional constituye un desafío en los sistemas energéticos verdes. En ellos se debe considerar la disponibilidad y variabilidad de las fuentes primarias, junto con el empleo de desarrollos tecnológicos para almacenar energía. En este estudio se propone un modelo fisicomatemático correlacionado con el comportamiento estadístico observable en series de irradiancia, con utilidad como herramienta de cálculo de máximos y mínimos proporcionales a la generación de potencia. Esto permite optimizar el dimensionamiento de los constituyentes del sistema energético considerando recursos locales, empleando información de acceso libre, sin requerimiento de extensas mediciones de campo. Como consecuencia, los recursos secundarios empleados para almacenamiento energético (p.ej., hidrógeno), emergen como elementos estabilizadores para abordar la necesidad de previsibilidad en la producción de energía.

PALABRAS CLAVE: Irradiancia, Modelo, sistemas de energía, planificación.

1 Introducción

La provisión de energía eléctrica mediante sistemas híbridos aislados es una opción fuerte dentro de los sistemas de energía (SE) renovable [1]. Al combinar energía solar y eólica con hidrógeno, es crucial considerar la disponibilidad y variabilidad de las fuentes primarias [2], ya que esto afecta la capacidad de satisfacer la demanda energética [3]. Se sugiere que los desarrollos tecnológicos se enfoquen en predecir los recursos primarios [4] y en almacenar la energía de parques solares y eólicos, facilitando su planificación. Existen modelos fisicomatemáticos para la descripción de la energía captada por sistemas fotovoltaicos [5], la cual depende principalmente de la dinámica planetaria y de fenómenos atmosféricos. Entre los disponibles, se prefieren modelos simples para predicción a mediano o largo plazo, como el oscilador armónico, que puede modelar fenómenos en campos como el de la Electrónica [6], Biología [7], Física [8] [9] y Química [10]. Dicho modelo aún no se ha aplicado a la predicción de la radiación solar considerando coordenadas temporales y geográficas a escala planetaria que faciliten procesos de planificación de SE. Para sistemas con conversión

solar directa, modelar la irradiación local [11] ayuda a establecer parámetros de funcionamiento y capacidades de captación. Como se sugiere con la figura 1, incorporando componentes de generación y almacenamiento se obtiene un recurso energético secundario $E_{FC}(t)$ para cubrir periodos de carencia o de variabilidad del recurso primario, estableciendo la autonomía del SE y un criterio con el que obtener los requerimientos de generación del recurso secundario en formas estables de energía, como el dihidrógeno; un vector energético limpio y versátil [12], incluso en regiones remotas [13]. El pronóstico de la energía solar facilita el cálculo de la energía disponible E_d [14], permitiendo determinar la capacidad de almacenamiento energético necesaria y tecnologías asociadas para satisfacer demandas de energía.

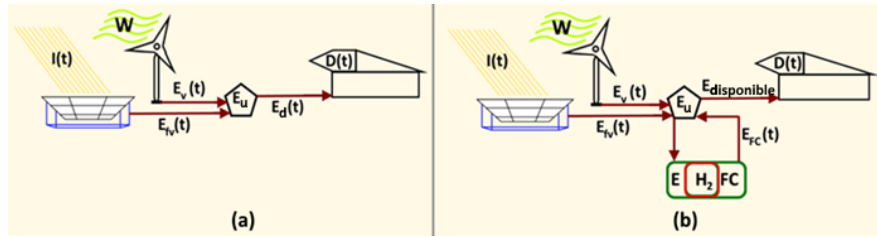


Fig. 1. Configuraciones de SSEE. (a) Sistema dependiente de disponibilidad de recursos primarios y con energía E_u variable. (b) Sistema con disponibilidad de energía E_u estable.

En este trabajo proponemos un modelo fisicomatemático para predecir la irradiación mensual promedio, útil para calcular límites de generación energética y planificación a mediano plazo con marcos teóricos existentes aún no aplicados para optimizar los SSEE.

2 Marco Teórico

2.1 Irradiancia Global

Se han propuesto diferentes modelos para determinar la irradiancia sobre la atmósfera y la superficie terrestre [15]. Considerando el movimiento terrestre, la irradiancia diaria en una superficie esférica ideal se obtiene con la expresión [16]:

$$\sum I' = \frac{I_0}{\rho^2} \int_{-t_0}^{t_0} K_T [\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos (\omega t)] dt \quad (1)$$

Utilizando factores como la latitud φ , declinación solar δ , constante solar I_0 , distancia normalizada Planeta-Sol ρ (sobre el ecuador y que requiere ajustes según la altura de la locación donde instalar dispositivos de medición [17]) y t_0 tiempo entre el mediodía solar y su salida u ocultamiento, influyen en el cálculo, junto con el índice de transparencia atmosférica (K_T), siendo esta una función dependiente de propiedades ópticas y químicas (entre otras, absorción por variación de densidad de contaminantes

químicos, en el espectro de longitudes de onda incidente) y la nubosidad, que introducen aleatoriedad en las series medibles. Este índice puede considerarse unitario al calcular la irradiancia en una superficie esférica ideal sin atmósfera. Tomando dicho valor e integrando anualmente la ecuación (1) se obtienen imágenes (figura 2, izquierda) que muestran el máximo nivel de irradiación, determinando la energía total incidente en las capas superiores de la atmósfera, que luego se filtra al atravesar cada una de sus capas hasta la superficie de captación; generando en la superficie de la Tierra series como la presentada en figura 2 (derecha), evidenciando la variación mensual y latitudinal observable en las series de irradiancia para la zona del meridiano ($168 \pm 0,5^\circ\text{O}$), elegido por poseer mínimas alteraciones atmosféricas originadas en perturbaciones geográficas continentales. Dicha imagen contiene la disponibilidad de energía por unidad de área sobre la superficie terrestre, de enero a diciembre y desde el polo sur al polo norte, basados en datos del proyecto Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) [18] del archivo CERES SYN1deg Edition 4.1 para el parámetro “All Sky Surface Shortwave Downward Irradiance”.

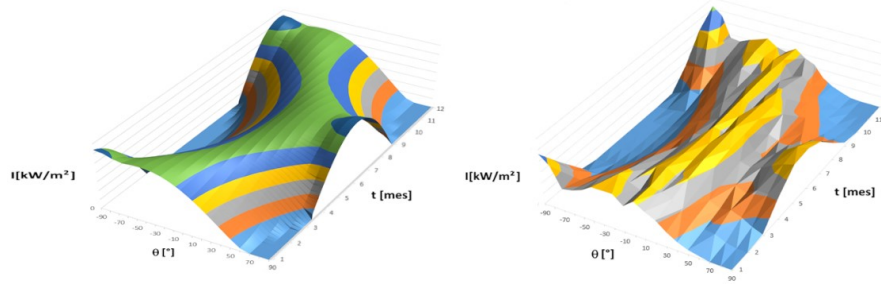


Fig. 2. Variación mensual de los totales diarios de irradiancia solar a diferentes latitudes con $K_T = 1$ (izquierda). Lo mismo, considerando su atenuación por fenómenos atmosféricos para el año 2020 en la zona con longitud terrestre 168°O (derecha).

Estos datos se ajustan y validan mediante mediciones satelitales [19] [20], comparándolas con mediciones en superficie en diversas locaciones globales [21]. Aunque estas series pueden mostrar variabilidad interanual [22], los valores medios mensuales son cíclicos debido a la variación estacional de la irradiancia máxima, causada por el movimiento planetario alrededor del Sol y la inclinación de su eje de rotación. En la superficie indicada en la figura 2 (derecha) se representa el recurso energético solar que impacta sobre dicha zona longitudinal, la cual queda descrita por una función de difícil obtención según K_T en la ecuación (1) y una serie temporal con estacionalidad.

2.2 Comportamiento Esperado en los SE

Los SE deben caracterizarse por una prestación de energía estable, predecible y confiable, que garantice la seguridad energética. Dichas características son obtenibles mediante la incorporación de tecnologías que produzcan un comportamiento que, en términos matemáticos, cumplan con una ecuación diferencial en la cual la potencia

generada sea una función del tipo $F(x)$ sin depender explícitamente del tiempo, permitiendo un comportamiento periódico y escalable. Como es bien sabido, esto conduce a resultados vinculados al oscilador armónico como la ecuación (2), expuesta en el diagrama de fase de la figura 3, en trazo continuo de color negro [23].

$$\dot{x} = \pm \sqrt{\frac{2}{mr^2} [E_m + mr^2 \omega_0^2 \cos(x)]} . \quad (2)$$

Por ello, el retrato de fase de este tipo de sistemas solo muestra trayectorias estáticas (figura 4 izquierda, donde las flechas indican el sentido de evolución). Cada punto en el diagrama es un estado del sistema y cada línea es una trayectoria de fase que refleja la dinámica de sus estados. Así, la condición inicial representa la energía E_m y desde allí se define la trayectoria posible.

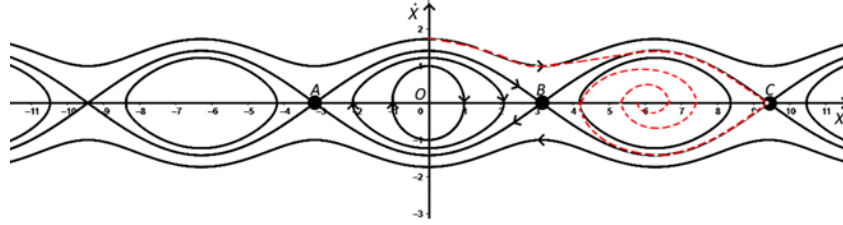


Fig. 3. Superposición de diagramas de Fase para el oscilador armónico y una trayectoria (línea roja, culminando en espiral) de fase en un oscilador con perturbación constante arbitraria.

Según E_m en la ecuación (2) se evidencian las posibles trayectorias con la secuencia de estados, siendo determinante el factor $mr^2 \omega_0^2$ para el cual se alcanza el ciclo límite y determina dos dinámicas observables en el sistema; quedando además establecida su autonomía por el principio de conservación de la energía. Por compensarse en cada instante según los valores de \dot{x} y x .

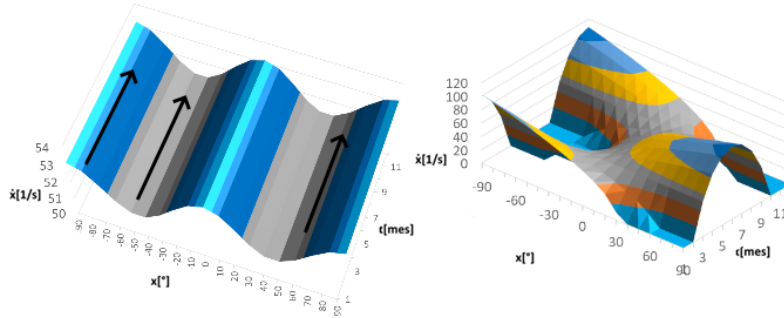


Fig. 4. Retrato de fase de un oscilador armónico simple, sin perturbación temporal, para una condición inicial con $E_m > |mr^2 \omega_0^2|$, con valores de x en el intervalo $[-90^\circ; 90^\circ]$ (izquierda). Retrato de fase de un oscilador armónico perturbado para la misma condición inicial de energía, igual a la constante solar (derecha).

3 Modelo Propuesto y Resultados

3.1 Relación de energías dentro de un sistema de energía

En el caso de sistemas que obedecen la ecuación (2), por causa de la interconversión energética al evolucionar entre estados durante una rotación, manteniendo la energía total constante conforme transcurre la variable temporal t , la relación de energías depende de la condición inicial para el ángulo latitudinal, tal que la energía disponible es:

$$E_d(x) = E_{m\acute{a}xima}(x) = E_{inicial}(\theta) \quad (3)$$

como ocurre en sistemas como el péndulo simple, donde $x = \theta$. Los SE con un comportamiento similar al de la figura 4 (izquierda) garantizan su autonomía en períodos ideales, como en misiones espaciales helio-estacionarias que no experimenten ocultamientos solares. Para sistemas en superficie terrestre expuestos a una fuente de energía como la de la figura 2 (derecha), planteamos la ecuación (4), como expresión alternativa con la que describir la variación de las observaciones al considerar términos de energía promedio máxima ($\bar{E}_{m\acute{a}x\ solar}$) y su variación estacional ($\bar{E}_{var\ est}$):

$$E_{solar\ disponible}(\theta; t) = \bar{E}_{m\acute{a}x\ solar}(\theta) - E_{var\ est}(\theta; t) . \quad (4)$$

En dicha expresión, el perfil cíclico de la variación mensual de la energía solar sugiere aplicar correcciones estacionales con variación temporal armónica y fase inicial dependiente del ángulo latitudinal, permitiendo usar modelos preexistentes para describir el fenómeno solar local.

Para que la dinámica de la ecuación (3) sea observable en los SE en superficie terrestre actuales que convierten fuentes variables como la solar (figura 2, derecha), es necesario incorporar un aporte energético secundario que contrarreste la inconstancia indicada por $E_{var\ est}(\theta; t)$ en la ecuación (4). Así, su autonomía dependerá de la vida útil y capacidad de almacenamiento de sus componentes. Por ello, proponemos que estos sistemas cumplan la siguiente relación:

$$E_{disponible}(\theta) = E_{solar\ disponible}(\theta; t) + E_{almacenada}(t) . \quad (5)$$

$E_{disponible}$ es la energía disponible para satisfacer la demanda energética de los usuarios del SE, determinada en la etapa de diseño según las capacidades de conversión y almacenamiento; $E_{solar\ disponible}$ es la energía eléctrica útil obtenida directamente del recurso solar mediante tecnología de conversión; $E_{almacenada}$ es la energía convertida en vectores energéticos para su almacenamiento y posterior reconversión en energía útil con la que estabilizar la generación de potencia.

3.2 La Irradiancia Solar Descripta como Fenómeno Pendular

Debido a la excentricidad de la órbita terrestre, la inclinación del eje planetario y la presencia de atmósfera, la herramienta descriptiva para la irradiancia en superficie debe

ser establecida para poder predecir el recurso disponible y obtener los requerimientos de capacidad de generación y de almacenamiento necesarios con los que contrarrestar $E_{var\ est}$. A diferencia del comportamiento mencionado en la sección 2.2, el recurso solar disponible determina que los SE actuales respondan a una ecuación en la cual la potencia es una función $F(x, t)$. Como es el caso del oscilador armónico perturbado; si la perturbación es del tipo $f(x) + f(t)$, el fenómeno pendular sigue la ecuación:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, t) \quad (6)$$

Donde el término $f(t)$ representa la perturbación temporal con trayectorias en el espacio de fases, regidas por la ecuación (7):

$$\dot{x}_{perturbado} = \pm \sqrt{\frac{2}{mr^2} [E_m - mr^2 f(t)x + mr^2 \omega^2 \cos(x)]} \quad (7)$$

A diferencia de la ecuación (2), la (7) es una derivada temporal dependiente del tiempo, resultando en trayectorias variables en “ t ”. Si $f(t)$ es constante, la trayectoria en el espacio de fases es descendente con rotaciones sucesivas, conocidas como contracciones del espacio fásico [26]. Al superar el ciclo límite, se convierte en una espiral (línea entrecortada, roja) entre dos estados de equilibrio inestable (puntos B y C en la figura 3). La relación de energías en este sistema es:

$$E_{mecánica} - E_{pérdida} = E_{cinética} + E_{potencial} \quad (8)$$

Con $E_{pérdida}$ representando la variación o disminución de energía. Si la perturbación sigue una ley diferente el diagrama de fase muestra escenarios útiles. Por ejemplo, con $f(t) = A \cos(\omega t)$, el retrato de fase varía respecto al del oscilador armónico, figura 4 (derecha), donde tras una rotación completa, el sistema renueva su prestación en forma cíclica. La variación en la primera oscilación es similar a las series de irradiación en superficie, con (x) representando el ángulo de latitud terrestre. Además, puede usarse como herramienta descriptiva de la energía disponible en los SE que, como se indica en la ecuación (4), es proporcional a la energía aprovechable, equivalente a la diferencia entre la energía máxima y la energía perdida o disminución estacional de irradiación en un ciclo interanual [27]. La relación de energías así establecida refleja la dependencia temporal del recurso o su uso, al aplicarla a los SE. La energía almacenada debe suplementar tal variabilidad para mantener constante la energía disponible, garantizando con ello el valor nominal de potencia definido en la construcción del SE. Así, se debe cumplir:

$$E_{almacenada} = E_{variación}(t) \cdot \quad (9)$$

Tal que el término $f(t)$ en la ecuación (6) sea compensado para todo t y se cumpla el comportamiento esperable en sistemas fotovoltaicos que incorporen tecnologías para generación y uso de almacenamiento energético [28].

3.3 Análisis de Correlación entre Datos Experimentales y el Modelo Físico-matemático Propuesto

Para validar el modelo de irradiación como fenómeno pendular, con una perturbación armónica $f(t) = A \cos(\omega t)$, se correlaciona su comportamiento en x y t con el observable en las series de irradiancia en superficie, tanto físico-teóricas como por determinación de la misión POWER-CERES (figuras 2). Se utilizan los elementos de las diferentes series según latitud y por un año completo, con valores mensuales promedio, resultando en el gráfico de correlación en la figura 5.

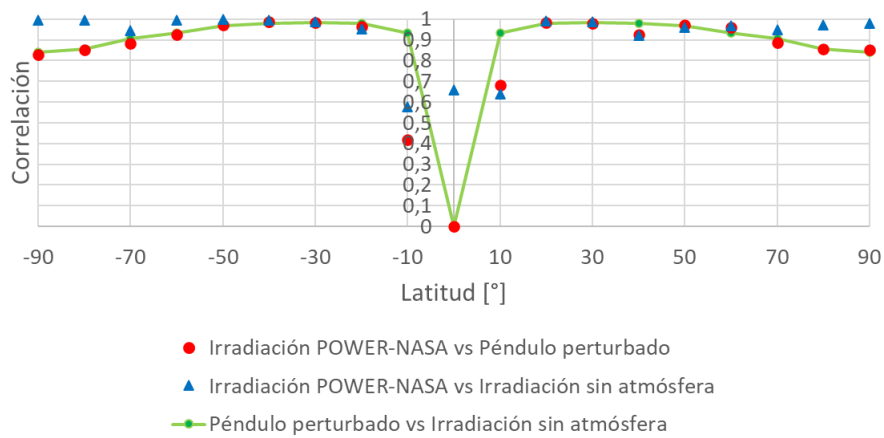


Fig. 5. Correlación entre series temporales para meridiano terrestre 168°O.

Ambas series de datos del recurso solar en superficie terrestre muestran que:

- El modelo físico-teórico tiene mejor correlación con la serie empírica que el modelo pendular.
- La correlación es menor en la zona ecuatorial.
- Los perfiles de correlación son similares y simétricos en todas las series latitudinales, a pesar del componente caótico de la dinámica atmosférica.
- Las correlaciones son positivas, excepto en la latitud 0°, donde no hay correlación entre el modelo de oscilador perturbado y las series de irradiación.
- La correlación es superior al 96% en los intervalos de latitud [-50; -20]° y [20; 50]°, disminuyendo al 84,1% en los polos.

Extendiendo el análisis a otras coordenadas espaciales, se pueden obtener perfiles de irradiancia para diferentes longitudes geográficas. La figura 6 muestra estos resultados, georreferenciados con el espacio de correlaciones, utilizando valores de latitud y longitud espaciados cada 10°, en escala sinóptica. La intensidad de tonalidad roja indica correlación negativa o nula en la región ecuatorial y positiva en vastas regiones del planeta, cercana a la unidad entre los trópicos y la zona polar.

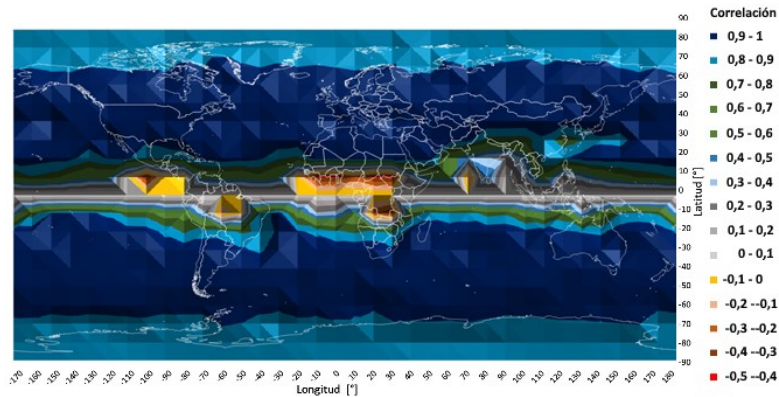


Fig. 6. Superficie de niveles de correlación entre series temporales de irradiancia POWER-NASA (2020) con espacio de fase generado para el oscilador con perturbación temporal de tipo armónica.

Al comparar los resultados de ambos modelos para describir los valores de irradiancia, se observa que fallan en la zona intertropical. Sin embargo, en las regiones polares, el término adicional relacionado con la declinación corrige los valores modelizados. El modelo de oscilador con perturbación armónica describe con precisión similar la serie temporal basada en datos satelitales en las regiones entre los paralelos $(-60; -20)^\circ$ y $(20; 60)^\circ$. Adicionalmente, las correlaciones referidas al año 2020 son válidas para periodos más amplios, aún mayores que 20 años [29], en línea con el Ciclo de Schwabe de 11 años [20], que muestra una variación del 0,1% en la irradiancia solar extraterrestre, conocida como constante solar [31]. Las tablas de datos utilizados con las correlaciones referidas pueden consultarse en:

<https://drive.google.com/drive/folders/1UwCm5ZnCzZb1DX7Qc1oRJYF0g5DCwI9j>

4 Conclusiones

Los modelos físicos teóricos de la ecuación 1 requieren el conocimiento de gran cantidad de variables, a diferencia del modelo pendular que usa una función armónica basada en irradiación promedio con correcciones de fase y período anual. Esto muestra que el recurso solar en muchas regiones puede calcularse con una expresión matemática sencilla, útil para predecir la generación fotovoltaica a mediano plazo y planificar SE solares. El modelo pendular de oscilación armónica perturbada tiene alta correlación con los datos (84,1% en zonas polares y 98,4% en latitudes tropicales), pero falla en la zona ecuatorial debido a la variabilidad atmosférica [32]. El retrato de fase del oscilador armónico, característico de un SE autónomo, se altera con perturbaciones armónicas, similar a lo observable en la irradiación mensual media en la superficie terrestre. Por esta razón el modelo de la ecuación (6) ayuda a determinar el requerimiento de capacidad de generación y de almacenamiento en un SE híbrido que se sirve de recursos

primarios variables eliminando la intermitencia en la generación de potencia, que en el caso de los sistemas fotovoltaicos es provocada por la dinámica planetaria y atmosférica, restringiéndola a la capacidad de generación y almacenamiento del recurso secundario. Así, los SE quedan descriptos como un sistema físico con dinámica similar a la de un oscilador armónico, sugiriendo la utilidad del modelo como herramienta de cálculo en el proceso de planificación y como criterio de optimización de su dimensionamiento.

5 Bibliografía

- [1] Anoune, K., Bouya, M., Ghazouani, M., Astito, A., & Abdellah, A. B. (2016). Hybrid renewable energy system to maximize the electrical power production. *International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, pp. 533-539. Marrakech, Morocco.
- [2] World Bank. (2019). *Energy Sector Management Assistance Program*. 2019. Grid Integration Requirements for Variable Renewable Energy.
- [3] Safari, S., Ardehali, M., & Sirizi, M. (2013). Particle swarm optimization based fuzzy logic controller for autonomous. *Energy Conversion and Management*, 41-49.
- [4] Karamov, D. N., Minarchenko, I. M., Kolosnitsyn, A. V., & Pavlov, N. V. (2021). Installed capacity optimization of autonomous photovoltaic systems under. *Energy Conversion and Management*.
- [5] Guanghui Huang, Zhanqing Li, Xin Li, Shunlin Liang, Kun Yang, Dongdong Wang, Yi Zhang, Estimating surface solar irradiance from satellites: Past, present, and future perspectives, *Remote Sensing of Environment*, Volume 233, 2019, 111371, ISSN 0034-4257.
- [6] Ying, L., Yong-xiang, Y., Bo, L., Qian, T., & Jia-kuan, R. (2022). An improved method of phase-locked loop grid-connected inverter based on capacitor voltage full feedforward. *Energy Reports*, 1341-1349.
- [7] Chirico, N, Van Laake, L. W, Sluijter, J.P, Van Mil, A, & Dierick, P. (2021). Cardiac circadian rhythms in time and space: The future is in 4D. *Current Opinion in Pharmacology*, 57, 49-59.
- [8] Benedetti, A., Wenbiao, H., Ruffini, R., & Vereshchagin, G. V. (2011). On the frequency of oscillations in the pair plasma generated by a strong electric field. *Physics Letters B*, 75-79.
- [9] Newrock, R S; Lobb, C J; Geigenmüller, U; Octavio, M; (2000). The Two-Dimensional Physics of Josephson Junction Arrays. *Solid State Physics*, 263-512.
- [10] Owolabi, K. M., & Hammouch, Z. (2019). Spatiotemporal patterns in the Belousov–Zhabotinskii reaction systems with Atangana–Baleanu fractional order derivative. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1072-1090.
- [11] Iradukunda, C., & Chiteka, K. (2023). Angstrom Prescott Type Models for Predicting Solar Irradiation for Different Locations in Zimbabwe. *Strojniški Vestnik. J. Mech.Eng*; 69, 32–48.
- [12] Hasan, T., Emami, K., Shah, R., Hassan, N. M., Anderson, J., Thomas, D., & Louis, A. (2022). A study on green hydrogen-based isolated microgrid. *Energy Reports*, 8(15), 259-267.
- [13] Lin, S., Chen, N., Zhou, Q., Lin, T., & Lin, H. (2022). A Scheme for Quickly Simulating Extraterrestrial Solar Radiation over Complex Terrain on a Large Spatial-Temporal Span—A Case Study over the Entirety of China. *Remote Sensing*, 14, 1753.
- [14] Amin, M., Shah, H. H., Fareed, A. G., Khan, W. U., Chung, E., Zia, A., Farooqi, Z. U. R., & Lee, C. (2022). Hydrogen production through renewable and non-renewable energy processes and their impact on climate change. *J. Hyd. Energy*, 47(77), 33112-33134. Retrieved 2023.
- [15] Kondratyev, K. Y. (1969). *Radiation in the Atmosphere*. Elsevier.

- [16] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. Wiley.
- [17] C. Raichijk. (2009). Comparación de valores satelitales de irradiación solar global con datos de tierra en la república argentina. *Revista "Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente"*, Vol. 13, Páginas: 7-10. ISSN 0329-5184. (<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/98371>)
- [18] NASA Earth Science/Applied Science Program. (18 de Agosto de 2022). POWER | Data Access Viewer. Obtenido de Prediction of Worldwide Energy Resource: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [19] Wielicki, B. A., B. R. Barkstrom, E. F. Harrison, R. B. Lee III, G. L. Smith, and J. E. Cooper, 1996: Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An Earth Observing System Experiment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 853-868.
- [20] Doelling, D. R., Loeb, N. G., Keyes, D. F., Nordeen, M. L., Morstad, D., Nguyen, C., Wielicki, B. A., Young, D. F., & Sun, M. (2013). Geostationary Enhanced Temporal Interpolation for CERES Flux Products, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(6), 1072-1090.
- [21] Ohmura, A., Dutton, E. G., Forgan, B., Fröhlich, C., Gilgen, H., Hegner, H., Heimo, A., König-Langlo, G., McArthur, B., Müller, G., Philipona, R., Pinker, R., Whitlock, C. H., Dehne, K., & Wild, M. (1998). Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New Precision Radiometry for Climate Research, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10), 2115-2136.
- [22] Fernández, M., Campo, A. M. & Gentili, J. O. (2015). Comportamiento temporal de la radiación solar global en la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. *Revista de Climatología*, 51-64.
- [23] Jordan, D. W., & Smith, P. (2007). *Nonlinear Ordinary Differential Equations*. Oxford University Press.
- [24] Jouni K. Juntunen, Mari Martiskainen, Improving understanding of energy autonomy: A systematic review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 141, 2021, 110797, ISSN 1364-0321,
- [25] H.P. Garg, Gouri Datta, Fundamentals and characteristics of solar radiation, *Renewable Energy*, Volume 3, Issues 4–5, 1993, Pages 305-319, ISSN 0960-1481,
- [26] E. G. D. Cohen, Rockefeller University, New York, New York 10021. L. Rondoni, Dipartimento di Matematica, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, I-10129 Torino, Italy, "Note on phase space contraction and entropy production in thermostatted Hamiltonian systems", *Chaos* 8, 357-365 (1998)
- [27] Tomson, T., Russak, V., & Kallis, A. (2008). Dynamic Behavior of Solar Radiation. En T. Tomson, V. Russak, & A. Kallis, *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface* (págs. 257-281). Springer.
- [28] Frano Barbir, Chapter Ten - Fuel Cell Applications, Editor(s): Frano Barbir, *PEM Fuel Cells* (Second Edition), Academic Press, 2013, Pages 373-434, ISBN 9780123877109,
- [29] Grossi Gallegos, H., Coquet, E., & Spreafichi, M. (2014). Análisis de las series temporales de irradiación solar global en vista de la utilización del sol como una fuente de energía. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 7-14.
- [30] Bonfili, O., Maglione, D., & Soto, J. (2018). Modelación y correlación entre series temporales de ciclos solares y series pluviométricas del extremo sur patagónico. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 10(3), 44–59. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v10i3.286>
- [31] Shapiro, A. V; Shapiro, A. I., Gizon, L; Krivova, N. A. & Solanki, S. K. (2020). Solar cycle irradiance variations over the last four billion years. *Astronomy & Astrophysics*, 636, A83.
- [32] Chapin, F. S., Matson, P. A., & Money, H. A. (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. En F. S. Chapin, P. A. Matson, & H. A. Money. Springer-Verlag.