

LA ENERGÍA, EL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL LENGUAJE DEL COSMOS: UNA APROXIMACIÓN AL DISEÑO DE MECANISMOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DESDE UNA PERSPECTIVA EINSTENIANA

*ENERGY, CLIMATE CHANGE AND THE LANGUAGE OF THE COSMOS:
AN APPROACH TO THE DESIGN OF ENERGY EFFICIENCY MECHANISMS
FROM AN EINSTEINIAN PERSPECTIVE*

Maximiliano Franco Camarda ¹

Recibido: 15/04/2022 y Aceptado: 22/12/2022
ENERLAC. Volumen VI. Número 2. Diciembre, 2022 (72 - 93)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Slidebean de Unsplash.

1 Comisión de Eficiencia Energética del Comité de Energías Córdoba (CEC), Centro de Investigaciones y Estudios sobre Cultura y Sociedad (CIECS) - CONICET y Universidad Nacional de Córdoba (UNC). República Argentina

maxi_camarda@hotmail.com

Código de orcid.org: 0000-0002-3496-3193



RESUMEN

Hace más de cien años, la Teoría de la Relatividad General del notable científico Albert Einstein significó una revolución conceptual y una nueva cosmovisión del Universo. Por otro lado, luego de las revoluciones industriales la humanidad se encuentra sometida a los efectos adversos del cambio climático, producto del avance indiscriminado de las actividades antropogénicas y las emisiones de carbono atmosférico.

Desde antaño, los modelos económicos y energéticos han sido guiados a través de enfoques eminentemente técnicos, que ignoran parcial o totalmente la presencia de las fuerzas del Universo. De acuerdo a la Relatividad, la energía sigue un trayecto curvilíneo en el espacio-tiempo, en este sentido, la presencia de un enfoque holístico que contemple la influencia de la gravedad y sus implicancias sobre los sistemas de gestión de la energía es una necesidad genuina, tan genuina como la luz de las estrellas que se curva al pasar alrededor del sol.

Se presenta una aproximación de un Enfoque Einsteiniano que permita indagar en la búsqueda de nuevos paradigmas científicos que incluyan el análisis cosmológico en el diseño de mecanismos de eficiencia energética. Las conclusiones demuestran que, gravedad, espacio-tiempo, energía, clima y gestión energética, de alguna manera se encuentran enraizados con el Cosmos.

Palabras clave: Relatividad General, Enfoques Cosmológicos, Eficiencia Energética, Sistemas de Gestión de la Energía, Cambio Climático, Desarrollo Económico Sostenible.

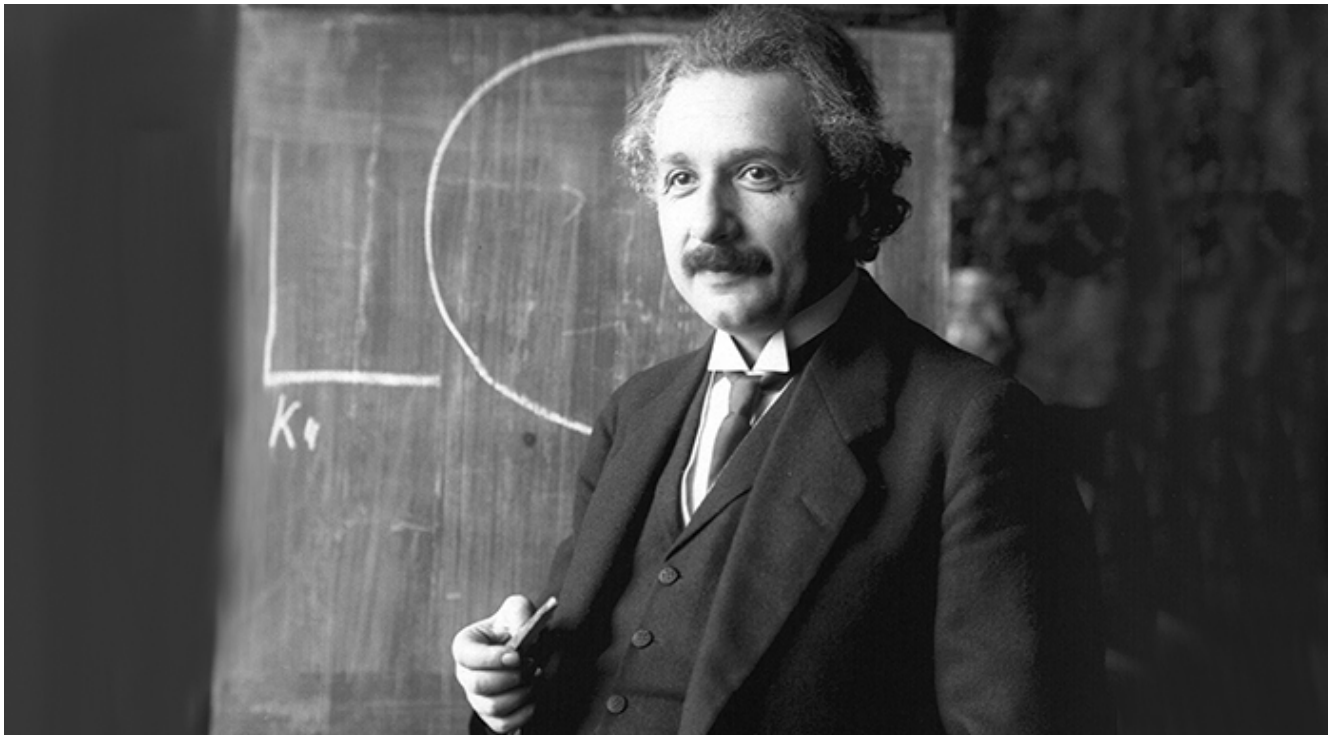
ABSTRACT

More than one hundred years ago, the Theory of General Relativity of the remarkable scientist Albert Einstein meant a conceptual revolution and a new worldview of the Universe. Besides, after the industrial revolutions, humanity is subdued to the adverse effects of climate change, caused by the indiscriminate advance of anthropogenic activities and atmospheric carbon emissions.

Since ancient times, economic and energy models have been led mostly by technical approaches, which partly or totally ignore the presence of the forces of the Universe. According to Relativity, energy follows a curvilinear path in space-time. In this sense, the presence of a holistic approach contemplating the influence of gravity and its implications on energy management systems is a genuine need, as genuine as starlight that deflects when passing near the edge of the sun.

Is presented an approximation of an Einsteinian Approach that allows us to investigate the search for new scientific paradigms that include cosmological analysis in the design of energy efficiency mechanisms. The conclusions show that gravity, space-time, energy, climate and energy management are somehow entrenched in the Cosmos.

Keywords: General Relativity, Cosmological Approaches, Energy Efficiency, Energy Management Systems, Climate Change, Sustainable Economic Development.



INTRODUCCIÓN

Hace más de ciento cincuenta años que las emisiones de carbono atmosférico vienen creciendo y el cambio climático se encuentra cada vez más presente en los diversos efectos nocivos sobre la biodiversidad, los ecosistemas terrestres, de agua dulce y oceánicos (IPCC, 2022). Según Canadell et al. (2007), la tasa de crecimiento del dióxido de carbono atmosférico (CO₂) se está incrementando rápidamente producto de tres procesos: i) el crecimiento de la economía mundial; ii) El crecimiento en la intensidad del carbono desde el año 2000; y iii) el aumento de la fracción del aire de las emisiones de CO₂ en un horizonte a cincuenta años, a causa de una menor eficiencia en la capacidad de absorción de gases a través de sumideros naturales, tales como, la tierra, los océanos y los bosques.

De un total de un billón de toneladas de carbono de emisiones antropogénicas, donde aproximadamente la mitad se ha emitido desde los inicios de la industrialización, los resultados demuestran un calentamiento inducido por el dióxido de carbono máximo de 2°C por encima de las temperaturas preindustriales (Allen et al., 2009; Knutti y Hegerl, 2008).


La situación climática actual, no sólo merece especial atención por parte de la comunidad política internacional, sino además requiere del diseño de mecanismos de cooperación climática que fomenten políticas de Estados genuinas y acordes a la situación de cada país y región. El surgimiento de acuerdos ambientales a nivel global que permita desarrollar instrumentos, mecanismos y políticas de mitigación y adaptación al cambio climático, es tanto una necesidad como una obligación soberana.

En los últimos siete años, desde el 12 de diciembre de 2015 en la 21^a Conferencia de las Partes (COP 21) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) celebrada en París, se ha logrado un acuerdo

trascendente en la lucha contra el cambio climático (AUTOR, 2021). En este sentido, el Acuerdo de París posee como objetivo a largo plazo mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2°C respecto a los niveles preindustriales y realizar los esfuerzos necesarios para limitar el aumento a 1,5°C.

Para lograr los objetivos planteados, cada país a desarrollado un conjunto de acciones que integran sus Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional (NDC). Los cambios que deberán realizar cada uno de los países no son simples y requieren de grandes inversiones en infraestructura económica, energética y tecnológica.

Según Clarke, Edmonds, Krey, Richels, Rose y Tavoni (2009), el cambio en la arquitectura de políticas climáticas a nivel global requiere reformas trascendentes en los sectores energéticos y productivos, y la implementación de un abordaje holístico y multidisciplinario que contemple la universalidad de actores, sistemas de preferencias, necesidades, riesgos, beneficios y oportunidades intersectoriales inmersas en dicha transición energética.



**Los cambios que
deberán realizar cada
uno de los países
no son simples y requieren
de grandes inversiones en
infraestructura económica,
energética y tecnológica.**

Sin embargo, otros autores como Nordhaus (2018), sostienen que no se han registrado mejoras en las tendencias de las emisiones y advierte que existen datos concretos sobre la aceleración que tendrá el cambio climático en el próximo siglo si los gobiernos no cambian la tendencia de las políticas mínimas de acción climática. Además, Nordhaus considera poco probable el cumplimiento de los 2°C, incluso con políticas ambiciosas en un horizonte de corto plazo, debido a que las políticas se encuentran en una senda normal de políticas mínimas para reducir el nivel de emisiones. Si bien se pueden obtener mejoras que favorecen el interés socioeconómico nacional, se encuentran distantes de fomentar el interés global a través de políticas genuinas de cooperación.

En este contexto, las estrategias basadas en producción baja en carbono constituyen propuestas concretas para reducir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero. Dos propuestas tangibles en este escenario climático que pueden fusionarse, hacen referencia al diseño de mecanismos de eficiencia energética y al diseño de mecanismos de energías renovables. Ambas estrategias deben integrarse a los efectos de potenciar los rendimientos energéticos y reducir al máximo las emisiones de carbono, colaborando con el proceso de transición energética.

El desarrollo de sistemas de gestión de la energía que permita a una organización acercarse a su óptimo energético, implica no sólo conocer las variables claves que afectan el rendimiento energético sino un conjunto de variables que, de manera directa o indirecta, afectan en pequeñas o grandes proporciones la capacidad de ahorro energético.

El concepto de eficiencia energética si bien empezó a tomar repercusión con la crisis del petróleo en 1973, donde se inicia un período de mayor consciencia sobre las limitaciones físicas en torno a los recursos fósiles, es a partir de la exposición del físico James Hansen en el

Congreso de EE. UU. en la década de 1980 donde se abrió el debate público sobre la cuestión climática (AUTOR, 2021). Si bien han pasado aproximadamente cinco décadas desde la aparición de estos nuevos paradigmas, la literatura sobre Eficiencia Energética (EE) carece de un enfoque holístico e integrado que comprenda la universalidad de variables que afectan a un modelo de gestión energética, en especial las variables cosmológicas. Algunos indicios pueden observarse en las medidas de irradiancia solar y en el análisis de los movimientos solares en el campo de las energías renovables, y en eficiencia energética en el sector de la construcción.

Gran parte de la literatura considera como principales restricciones dentro de los sistemas de gestión de la energía la influencia de las instituciones, el sistema de gobernanza, el sistema de políticas, y la capacidad local para identificar oportunidades de EE entre otras (AIE, 2015; AUTOR, 2020; Carpio y Coviello, 2014; Delgado, 2019). Por otro lado, enfoques técnico-económicos consideran al ahorro de energía como una variable dependiente del precio de la energía y la tecnología, el sistema impositivo y de subsidios, las características del mercado y el contexto económico en general (Bouille, 1999).

No obstante, existen otros grupos de variables inherentes a las fuerzas de la naturaleza y el universo que son omitidas, parcial o totalmente, y que sin embargo ejercen continuamente su influencia sobre la energía generada y utilizada en el planeta Tierra.

Desde esta perspectiva, podemos decir que el objetivo del presente trabajo es realizar una breve aproximación de las implicaciones que posee la Teoría de la Relatividad en el diseño de mecanismos de eficiencia energética (que muy bien podrían aplicarse al campo de las energías renovables y a los mercados de bienes y servicios). Este objetivo implica, introducir las ideas fundamentales de la Relatividad Especial y General, la noción de espacio-tiempo,

ondas gravitacionales, y fundamentalmente la incidencia de la gravedad en el ejido espacio-tiempo. Se contempla la relación existente entre el cambio climático, el geomagnetismo, la fuerza de gravedad y las estructuras espacio-tiempo que modifican el recorrido que ha de seguir la energía. La principal variable de análisis en el trabajo es la gravedad, lo que no implica el desconocimiento de otras fuerzas como el geomagnetismo, que pueden servir como objeto de investigación de futuros trabajos.

El análisis de las implicaciones sobre los mecanismos de eficiencia energética dentro de un sistema de gestión de la energía, desde un Enfoque Einsteiniano o Relativista de la Energía, nos invita a repensar la influencia de las fuerzas del Cosmos y los efectos que ellas poseen sobre la Tierra.

Un Enfoque Einsteiniano o Relativista de la Energía, implica considerar un abordaje holístico de la gestión energética, donde confluyen las variables asociadas a las fuerzas de la naturaleza, el Cosmos y las variables propiamente dichas de un sistema de gestión de la energía que ya conocemos a través de la literatura sobre EE.

EL SOL, EL GEOMAGNETISMO Y LAS TECNOLOGIAS DE LA TIERRA

Nada de lo que sucede en la Tierra es ajeno a lo que acontece en el Cosmos, y todos aquellos sucesos que se generan en la vastedad del Cosmos, de alguna u otra manera repercuten en la Tierra. Un claro ejemplo de ello lo constituyen la generación de ondas gravitacionales producto de explosiones estelares, supernovas, estrellas de neutrones, colisiones de objetos supermasivos como las fusiones de agujeros negros, formaciones de portales cósmicos interdimensionales (agujeros de gusano), etc.

El sol de nuestra galaxia, la Vía Láctea, es una estrella brillante llena de luz situada aproximadamente a 150 millones de km de la Tierra. Los fotones de luz solares, permiten el desarrollo

de la vida en la Tierra, de las especies vegetales, animales y el ser humano. El sol es la única estrella del sistema solar, que es la principal fuente de energía externa para el sistema climático de la Tierra. Se cree que la variabilidad solar, a través de la actividad magnética intrínseca del sol es uno de los factores impulsores naturales importantes para el cambio climático de la Tierra (Baker, 2000; Zhao, Soon y Velasco Herrera, 2021). Adviértase sobre ciertas contradicciones en el debate sobre la incidencia de la variabilidad solar en el siglo XIX en Soon, Connolly y Connolly (2015).

Dentro del conjunto de incertidumbres que afectan la modelización de los efectos del clima, los cambios en la irradiancia solar no dejan de ser irrelevantes. Por ejemplo, en Haigh (1996), se utilizó un modelo de circulación general para simular los cambios en la radiación solar y el ozono estratosférico, a los efectos de indagar en la respuesta de la atmósfera al ciclo de actividad solar de 11 años. Según Nesmeribes, Ferreira, Sadourny, Le Treut y Li (1993), el estudio y comprensión de los efectos del sol permite construir escenarios que relacionen los intercambios de energía a nivel magnético, térmico, gravitacional y cinético en la Tierra.

Además, la actividad geomagnética de la Tierra muestra cierta dependencia de los ciclos solares. En este proceso la fuerza de gravedad no es ajena a este fenómeno natural entre el sol y el campo magnético de la Tierra. Una tormenta geomagnética es una perturbación significativa en el campo magnético de la Tierra (Haines, Owens, Barnard, Lockwood y Ruffenach, 2019). Para un mayor análisis de la incidencia de las corrientes magnetosféricas sobre la Tierra puede consultarse el trabajo de Iyemori (1990).

Por otro lado, ya que la magnetósfera y la ionósfera de la Tierra tienen su propio clima espacial, las tormentas del clima espacial pueden causar problemas tecnológicos, así como daños en las redes eléctricas e interrupciones en los sistemas satelitales (Bergin,

Chapman, Moloney y Watkins, 2022). Aquí se presenta un caso sobre la importancia del análisis integrado entre geomagnetismo, gravedad, clima espacial y la eficiencia y vulnerabilidad de la tecnología terrestre y aeroespacial.

Siguiendo el trabajo de González, Tsurutani y Clúa de González (1999), las nubes magnéticas con campos magnéticos centrales muy intensos tienden a tener grandes velocidades, lo que implica campos eléctricos interplanetarios de gran amplitud que pueden provocar tormentas muy intensas. En este sentido, la variabilidad en las condiciones del viento solar cercano a la Tierra puede afectar negativamente a una serie de tecnologías terrestres y espaciales. Se espera que el impacto del clima espacial en la infraestructura terrestre aumente principalmente con la intensidad de la tormenta geomagnética, pero también con la duración de la tormenta.

El análisis de estos fenómenos y las actividades relacionadas con la pronóstico de la duración de una tormenta, son necesarias para programar un conjunto de acciones que permitan la reanudación del funcionamiento, la seguridad y la eficiencia de la infraestructura tecnológica afectada.

TEORIA ESPECIAL DE LA RELATIVIDAD

La Teoría Especial de la Relatividad (TER) fue formulada por el célebre científico Albert Einstein en el año 1905. Esta teoría tuvo grandes repercusiones en la forma de comprender los fenómenos físicos, generando una nueva manera de pensar e interpretar la física conocida hasta aquel momento. Conceptos trascendentes como el espacio, el tiempo, la materia y la energía formaban parte de una nueva cosmología del Universo que empezaba a surgir.

En el campo de la Relatividad, existen dos importantes postulados:

1. El Principio de Relatividad: La formulación de las leyes de la física debe ser invariante bajo transformaciones de coordenadas entre sistemas inerciales.

2. El Principio de constancia de la velocidad de la luz: La velocidad de la luz es constante en todos los sistemas de referencia inerciales. La velocidad de la luz es aproximadamente 300,000 km/s.



Foto de Raychel Sanner de Unsplash.

Algunos acontecimientos previos al año 1905, condujeron a Einstein a repensar los conceptos newtonianos de espacio-tiempo, considerados hasta entonces como variables de carácter absolutas. Uno de ellos, fue el experimento Michelson-Morley realizado en el año 1887 para detectar la velocidad con que se movía la Tierra respecto al hipotético éter lumínico. El hipotético éter lumínico, es un concepto que en Kardec (2017) se denomina fluido energético universal o materia cósmica primitiva. Son inherentes al éter las fuerzas que han presidido la metamorfosis de la materia, las leyes inmutables y necesarias que rigen al mundo. Este fluido etéreo colma e impregna el espacio penetrando en cada partícula de todos los elementos presentes en la vastedad del Cosmos.

Según González, Valcárcel y Cristancho (2009), en la mecánica clásica los conceptos de espacio y tiempo son independientes, de tal manera que las transformaciones cinemáticas entre observadores inerciales (transformaciones de Galileo), dan una escala universal de tiempo que es igual para todos los observadores inerciales.

Para demostrar las inconsistencias entre los resultados del experimento de Michelson-Morley, las transformaciones de Galileo y las leyes del electromagnetismo, Einstein estableció la invalidez de las transformaciones de Galileo, declaró la invariancia de las leyes de la física y la invariancia en la velocidad de la propagación de la luz para todos los observadores inerciales.

Desde una perspectiva Einsteniana, las implicaciones en el campo de la física y la cosmología condujeron a la sustitución del espacio tiempo absoluto por un espacio-tiempo continuo, el denominado espacio-tiempo de Minkowski y el reemplazo de las transformaciones de Galileo por las transformaciones de Lorentz. En palabras de Kardec (2017), el tiempo sólo es una medida relativa de una sucesión de eventos transitorios. Por ejemplo, desde su génesis la Tierra al girar sobre su

propio eje, determina el día y la noche con una duración aproximada de 24 horas; al trasladarse sobre la órbita alrededor del sol, determina el conteo de los 365 días. Cada mundo, en cada galaxia, posee su propia mecánica. En este sentido, el tiempo es sólo una medida relativa de una sucesión concatenada de eventos perfectamente diagramados en una determinada realidad del Cosmos.

En un espacio de cuatro dimensiones (espacio-tiempo de Minkowski), Einstein predijo algunos efectos de la relatividad especial cuando se aplicaban las transformaciones al mismo espacio-tiempo. Uno de esos efectos, es que los observadores que se encuentran en movimiento podrán identificar y medir distintos intervalos de espacio (longitudes), y diferentes intervalos de tiempos (duración de los eventos).

Por ejemplo, con respecto a los intervalos de espacio, si un observador en estado estacionario sostiene un objeto cuya medida es un metro de extensión, este objeto tendrá una longitud inferior respecto a un observador que posee el mismo objeto, pero en movimiento a una velocidad de $0,90c$ (c : velocidad de la luz). Este efecto es conocido con el nombre de contracción de la longitud.

Por otro lado, los intervalos de tiempo y la duración de los eventos resultarán más extensos para observadores en movimiento relativo con respecto a un observador en estado estacionario. Este efecto cinemático se denomina dilatación de los intervalos temporales. Los diferentes observadores inerciales tienen escalas de tiempo diferentes cuando se comparan las mediciones en cada uno de sus relojes. Este efecto de dilatación del tiempo ha sido corroborado experimentalmente a través de distintas pruebas, una de ellas son los viajes alrededor de la Tierra comparando un reloj fijo en la superficie terrestre, con un reloj en movimiento dentro de una nave espacial (González, Valcárcel y Cristancho, 2009).

La teoría especial de la relatividad, es una teoría que permitió comprender que el espacio y el tiempo no son variables independientes, sino por el contrario, se trata de variables eminentemente entrelazadas (Maldacena, 2005).

Equivalencia Masa Energía

Una de las consecuencias de la TER fue el descubrimiento de la ecuación más famosa de Einstein, denominada Equivalencia Masa-Energía (1). A partir de esta ecuación, es posible convertir masa en energía y viceversa.

$$E = m c^2 \quad (1)$$

Donde:

E: Niveles de energía de un sistema.

m: Niveles de masa de un sistema.

c^2 : Velocidad de la luz elevada al exponente número dos.

En la relatividad especial, el aumento de la velocidad de un objeto y por lo tanto de su energía cinética genera como resultado un incremento en los niveles de masa de dicho objeto. Para Einstein, un aumento en la energía de un objeto o sistema produce un aumento en los niveles de masa, y dicho efecto por más pequeño que sea puede cuantificarse.

Por lo tanto, como consecuencia de la equivalencia masa-energía, un cambio en los niveles de energía es equivalente a un cambio en los niveles de masa y viceversa. Un aumento o disminución de la energía de un objeto o un sistema genera un aumento o disminución en sus correspondientes niveles de masa; y un aumento o disminución en los niveles de masa se corresponde con un aumento o disminución en los niveles de energía de dicho objeto o sistema. En otras palabras, los niveles de masa constituyen una medida de una cierta cantidad

equivalente de energía que se encuentra contenida en un objeto o sistema; y por complementariedad, dado un cierto nivel de energía que posee un objeto o sistema podemos identificar los niveles de masa asociados.

Desde esta perspectiva, para ciertos cambios en E y m, dado que la velocidad de la luz es una constante universal obtenemos la siguiente expresión (2):

$$\Delta E = \Delta m c^2 \quad (2)$$

Donde:

ΔE : Variaciones en los niveles de energía de un objeto o sistema.

Δm : Variaciones en los niveles de masa de un objeto o sistema.

En el proceso de construcción de la relatividad general, transcurrieron diez años a partir de la creación de la relatividad especial. Antes de describir brevemente la relatividad general en la página 84, es necesario indagar en el concepto de fuerza de gravedad, en los efectos del clima sobre la misma y en el concepto de ondas gravitatorias, para comprender la importancia de esta variable dentro del modelo cosmológico Einsteiniano.

LA GRAVEDAD: UNA FUERZA DE EQUILIBRIO UNIVERSAL

De acuerdo a la Teoría Newtoniana de la gravedad, dos cuerpos masivos se atraen mutuamente mediante la fuerza gravitacional. Según Maldacena (2005), en la teoría de Newton las fuerzas gravitacionales son instantáneas. Por ejemplo, si lográramos mover y alejar al Sol de la Tierra en este preciso momento, sentiríamos el cambio de la fuerza gravitacional de dicho astro inmediatamente aquí en nuestro planeta. Si ello ocurriera, al acrecentar las

distancias entre la Tierra y el Sol las intensidades de los efectos gravitatorios se reducirían, y la traslación de la Tierra extendería su plazo de 365 días para dar la vuelta completa alrededor del Sol. Sin lugar a dudas cambiaría la reciprocidad gravitatoria entre el Sol y la Tierra, con todos los efectos correspondientes sobre radiación solar, magnetismo, ciclos de vida, etc.

Por otro lado, la relatividad Einsteiniana afirma que la información no puede viajar más rápido que la velocidad de la luz. Por lo tanto, siguiendo a Maldacena (2005), si movemos al sol sólo podríamos sentir el efecto en la Tierra después de ocho minutos, que es el tiempo que demora la luz en viajar del Sol a la Tierra. Aunque si alejáramos al Sol, seguramente esta duración sería mayor.

Para Einstein, la Gravedad (G) es una fuerza de equilibrio universal existente en todos los elementos del Cosmos. Es una fuerza eminentemente ligada al éter cósmico, que permite una armonía perfecta entre todos sus elementos.

La gravedad existe desde los inicios del universo, es una fuerza eterna, por lo tanto, podríamos afirmar que su trazabilidad espacio-temporal es infinita. A medida que el universo se fue desarrollando, una gran cantidad de materia y energía fue tomando la forma de estrellas, constelaciones, planetas, galaxias, agujeros negros, portales cósmicos interdimensionales (PCI) o “agujeros de gusano”, etc. El fluido energético es lo que permite unir esa materia y energía para dar origen a nuevos fenómenos y elementos del Cosmos, y la gravedad es la fuerza que otorga la capacidad energética necesaria para que estos elementos puedan alcanzar un equilibrio armónico y sistémico a través de diferentes mecanismos de reciprocidad. Por ejemplo, la gravedad permite que los planetas se encuentren en órbita alrededor de las estrellas, tal es el caso de la Tierra que gira alrededor del sol. También la gravedad permite la unión de conjuntos de estrellas para formar grandes galaxias giratorias.

De acuerdo a la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), la gravedad es la fuerza que determina el peso de un objeto en la Tierra y se encuentra condicionada por los distintos materiales existentes y la forma en que estos se distribuyen en la Tierra. En este sentido, debido a que el planeta se encuentra estratificado en capas de diversa composición y estructuras, la Tierra no es una esfera uniforme. Esta heterogeneidad del planeta conlleva a que su densidad tampoco sea uniforme. Estas son algunas de las razones, por las que el campo gravitatorio de la Tierra es distinto en cada punto de georreferenciación. Bajo estas condiciones, dada la presencia de distintas medidas de gravedad sobre la Tierra, podemos decir que el peso de los cuerpos, el movimiento de los objetos y la estructura espacio-tiempo adquieren también diversos matices.

La gravedad refleja perfectamente la topografía de la Tierra tales como, cadenas montañosas, mesetas, llanuras, bosques, islas volcánicas, fosas oceánicas, etc. La fisonomía de la Tierra condiciona la gravedad a través de sus baches, protuberancias, pendientes y depresiones, observados en los diferentes períodos de formaciones geológicas. Las formaciones más densas como las cadenas montañosas y las cordilleras ejercerán una atracción gravitacional más grande que los lugares compuestos por materiales menos densos como el agua. Por ejemplo, las cuencas de los océanos profundos se corresponden con las depresiones del campo gravitacional, ya que el agua de mar es menos densa que la roca, y en los océanos las profundidades son diversas.

En contraposición a lo enunciado, si suponemos que la Tierra se mantiene estática, no ejerce su capacidad de rotación, los materiales bajo sus capas son todos iguales con una distribución perfectamente simétrica, y si la Tierra fuese una esfera perfecta, pues entonces, la fuerza de gravedad se distribuiría de manera homogénea en todo el planeta. Ya que la densidad y el tipo de material cambian

en cada parte de la Tierra, por ejemplo, sabemos que la corteza oceánica es más densa que la corteza continental. De esta manera, las personas que viven en la superficie terrestre donde debajo existe corteza oceánica experimentarán una gravedad más intensa que las personas que viven en una superficie terrestre donde debajo predomina la corteza continental.

En este sentido, hay ciertas regiones del planeta donde el campo gravitacional es más intenso que en otras, y esto depende de los siguientes factores entre otros: i) La relación de reciprocidad gravitatoria existentes entre los planetas; ii) La distancia de un punto de la superficie respecto al centro de la Tierra; iii) La densidad del material existente debajo de la corteza terrestre, con su respectiva distribución; y iv) La fuerza centrífuga existente en cada punto georreferencial.

Otros efectos gravitatorios pueden considerarse con respecto a la densidad del manto de la Tierra. El calor del núcleo de la Tierra calienta la base del manto y el material en contacto comienza a ascender a la superficie. Esas masas de material caliente son menos densas que las rocas frías y, por lo tanto, su fuerza gravitatoria posee menor intensidad. Existen regiones del manto terrestre con distinta densidad y temperatura, donde la gravedad allí es volátil. Un trabajo interesante sobre el campo potencial de gravedad y la temperatura en el manto en el penacho de Islandia y el Atlántico Norte a partir de tomografía, puede observarse en Marquart y Schmeling (2004).

La observación de la gravedad terrestre constituye también una herramienta científica para descifrar la estructura geológica del subsuelo que representa su configuración tectónica y sus relaciones con la actividad sísmica. Dos áreas de estudio importantes en este campo junto al estudio de la gravedad, lo encontramos en la litoestratigrafía y la bioestratigrafía. En Fathy, Zahran, Radwan, Sabet y Hamed (2013) se realiza un estudio de esta índole en la península de Sinaí.

Otro punto interesante, son las modificaciones de la gravedad en las cercanías a la línea del Ecuador o los polos de la Tierra. A medida que nos alejamos del Ecuador y nos acercamos a los polos la gravedad tiende a aumentar. Además, dentro cada región se pueden presentar distintas áreas donde la gravedad varía.

La evolución que ha tenido el planeta desde sus orígenes ha dado origen a diferentes períodos geológicos con diversas formaciones, tanto en la estructura interna de la Tierra como en la superficie aérea, terrestre y acuífera. En todo este proceso de morfogénesis, la gravedad ha ido mutando conforme la Tierra cambiaba en los diferentes períodos geológicos (Kardec, 2017). Desde esta perspectiva, la evidencia empírica demuestra que la gravedad es un componente eminentemente dinámico. Comprobamos, de acuerdo a Maldacena (2005), que la estructura espacio-tiempo también es dinámica, no es rígida, y son variables entrelazadas naturalmente con la gravedad.

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU RELACIÓN CON LA GRAVEDAD

Uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, es el desarrollo de una gestión eficiente y equitativa del cambio climático (CEPAL, 2015; IPCC, 2022). Los cambios acontecidos en el clima, producto de más de un siglo de emisiones antropogénicas han incrementado la temperatura de la Tierra generando grandes y complejos cambios.

Las mediciones directas y la teledetección desde satélites y otras plataformas indica que el cambio climático posee diversas manifestaciones ambientales, entre ellas podemos mencionar las siguientes: i) aumento de la temperatura atmosférica y oceánica, ii) cambios en los patrones de precipitaciones, iii) decrecimiento de los volúmenes de hielo y nieve, iv) incremento del nivel del mar y, v) modificaciones de los patrones de fenómenos climáticos extremos.

Las sequías, el proceso de evaporación del agua, y la transformación del agua del estado sólido a líquido y/o gaseoso, genera cambios en el estado de la materia. En este sentido, las regiones expuestas a sequías e inundaciones sufrirán alteraciones en los niveles de reservorio de agua, modificando los niveles de masa y energía de dichos reservorios generando efectos cuantificables sobre el campo gravitacional asociado.

El proceso de deforestación cambia el estado de la materia y la energía en los bosques, deteriorando el proceso de captación de CO₂ del aire y la capacidad de absorción de agua que realizan las especies arbóreas.

El proceso de deforestación cambia el estado de la materia y la energía en los bosques, deteriorando el proceso de captación de CO₂ del aire y la capacidad de absorción de agua que realizan las especies arbóreas. Una de las graves consecuencias de este proceso de deforestación son las inundaciones, por lo general, en época de lluvias.

Aunque los cambios sean extremadamente pequeños, imperceptibles para el ojo humano, existen diferencias en el grado de intensidad de la fuerza gravitacional, y dicha diferencia a través de la tecnología adecuada puede identificarse, evaluarse y medirse. Un ejemplo concreto, es el derretimiento de la superficie de hielo en el Ártico y la Antártida, lo que ha generado una disminución progresiva de los

niveles de masa de agua en estado sólido y, por consiguiente, ha incrementado los niveles de masa de agua en estado líquido. En Chen, Wilson, Blankenship y Tapley (2009) puede observarse una cuantificación para la realización de un balance sobre la masa de la capa de hielo polar a partir de los datos de GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*). Los cambios en la masa de hielo, también a partir de GRACE, en la región sureste de Groenlandia entre abril de 2002 y noviembre de 2005 sugiere un derretimiento acelerado desde el verano de 2004 (Chen, Wilson y Tapley, 2006)

Tal como plantean Abdelmalik y Abdelmohsen (2019), la comprensión de los cambios espacio-temporales en el comportamiento de la masa total de agua terrestre resulta un tema de vital importancia en el análisis y evaluación de las cuencas y reservorios hidrológicos. El estudio de estos autores se centra en la cuenca del Río Nilo.

En el trabajo de Mendoza (2021), puede observarse la variación espacio-temporal de las anomalías en el campo gravitacional que se encuentran asociadas al cambio total de agua almacenada y la precipitación en la región Lima-Callao en Perú. De acuerdo a este autor, estas investigaciones permiten comprender mejor las variaciones del agua total almacenada, incluyendo fundamentalmente el agua subterránea, y su relación con eventos hidrológicos extremos como el fenómeno denominado El Niño - Oscilación Sur (ENOS). El conocimiento del almacenamiento de agua subterránea ayuda a comprender el ciclo hidrológico de manera integral en relación al cambio climático (Chen, Li, Zhang y Ni, 2014).

Si bien la medición de este tipo de fenómenos es compleja por la gran cantidad de variables que intervienen en el proceso, gracias a la misión GRACE, la medición de la gravedad a través de gravimetría satelital se ha convertido en una herramienta exitosa para cuantificar cambios en el almacenamiento de agua terrestre a gran escala.

Los procesos antropogénicos y los procesos naturales como los cambios de estación, el estado del tiempo y los reajustes de la Tierra, pueden modificar el estado, los niveles y el curso del agua, y con ello alterar la intensidad de los campos gravitatorios.

Las implicancias de este tipo de análisis, no sólo sirven como herramienta en la gestión global del cambio climático, sino que además posee ventajas en el análisis de la incidencia económica y ambiental sobre los sectores económicos, por ejemplo, el sector agropecuario (Mohamed, 2020) y las comunidades rurales que necesitan de tan preciado recurso, vital para la subsistencia humana y de las especies vegetales y animales.

Implicaciones de los cambios en el Clima y la Gravedad sobre los Sectores Energéticos

En el campo de la energía, podemos observar cómo influyen las variaciones espacio-temporales del campo gravitacional sobre la gestión energética de represas hidroeléctricas o centrales de energía mareomotriz. El análisis en el manto de la Tierra, y cómo se distribuye la gravedad intraterrena en las profundidades de la tierra podría servirnos para indagar en las posibilidades de generación de energía geotérmica.

Además, los cambios acontecidos en el sector agropecuario como consecuencia de fenómenos climáticos, también influyen en la oferta de recursos destinados a la producción de biocombustibles, tales como, biodiesel, bioalcoholes (bioetanol, biometanol, biobutanol), biogás, gas de síntesis, biocombustibles sólidos (madera, carbón vegetal y aserrín). Los cambios en el clima y las mediciones de la gravedad nos brindan información sobre la capacidad de generación de energía en los sectores involucrados y en el precio de los recursos y derivados energéticos.

El cambio climático genera cambios en la morfología del planeta Tierra, y dichos cambios pueden observarse en la modificación de la

intensidad gravitatoria. En consecuencia, tanto los cambios naturales como los cambios producidos por actividades antropogénicas, generan perturbaciones en la gravedad y en la estructura espacio-tiempo de la Tierra.

El análisis de la gravedad permite desarrollar sistemas de gestión de la energía más integrales y eficientes compatibles con el clima de la Tierra, así como también mejorar la asignación de recursos en los distintos sectores económicos.

TEORÍA DE LA RELATIVIDAD GENERAL

En 1915, Einstein a través de la Teoría de la Relatividad General (TRG) sembró la semilla de un gran árbol de conocimientos que nunca dejó de crecer con cada constatación científica, cual capullo de una flor que nace y renace en cada primavera. La TRG cambió la forma de concebir el Cosmos, pero no sólo eso, sino también cambió la forma de concebir la relación entre la Tierra y los elementos que habitan en la vastedad del Cosmos (Romero, 2015). Nuevamente, Einstein introdujo cambios notables en la interpretación del tiempo, el espacio, los cuerpos, la gravedad y la energía (Bernal y Sánchez Caja, 2015). La TRG conecta la curva espacio-tiempo con la distribución de materia y energía existente en él.

Para Einstein, los objetos del cosmos que contienen materia y energía generan un campo electromagnético y gravitatorio a su alrededor, lo que genera modificaciones en lo que conocemos como estructura espacio-tiempo. Cuanto mayor es la cantidad de materia y energía que contiene y libera dicho objeto, tanto mayor es la intensidad del campo gravitatorio, en consecuencia, tanto mayor es la deformación de la curvatura espacio-tiempo alrededor del objeto.

Al aplicar el principio de equivalencia, la luz se desvía de la trayectoria recta ante la presencia de la gravedad. La luz sigue un camino determinado por líneas geodésicas. Por ejemplo, las trayectorias elípticas que poseen los planetas en su proceso de traslación alrededor del sol, son

rutas geodésicas compatibles con un espacio-tiempo curvo. Desde esta perspectiva Einsteiniana, la geometría del Cosmos no es compatible con la geometría Euclidiana. En este sentido, la geometría del espacio-tiempo no se encuentra fija, por el contrario, es un ejido con cierto grado de flexibilidad y elasticidad asociado con la distribución de materia y energía que poseen los distintos sistemas físicos (Maldacena, 2005).

Para resumir, la ecuación de Einstein se trata de un sistema de diez ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales, que pueden sintetizarse a través de la siguiente expresión (3):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = T_{\mu\nu} \quad (3)$$

Donde, el término de la derecha $T_{\mu\nu}$ contiene una expresión matemática del contenido de energía e impulso de cualquier sistema material cuyos efectos gravitacionales se quieren conocer. El lado izquierdo de la fórmula, contiene la representación de la gravedad como un campo, el campo métrico g , y complejas relaciones entre las variaciones de ese campo codificadas a través de R , el denominado tensor de Ricci.

Einstein, ante las críticas de sus colegas, defensores de la teoría newtoniana, afirmaba que la gravedad es una fuerza que distorsiona el ejido espacio-tiempo introducido por Hermann Minkowski en 1907. Esa distorsión es causada por cualquier sistema físico con energía.

En la Teoría Especial de la Relatividad, Einstein había demostrado que el espacio-tiempo no es absoluto, y que depende de factores como el estado del movimiento del sistema físico u objeto en estudio. No obstante, en la TRG se amplía y completa la TER afirmando que no sólo el movimiento afecta el espacio-tiempo, sino el mero hecho que exista un cuerpo o sistema con energía.

Einstein, luego de publicar sus ecuaciones básicas demostró que, si el campo gravitacional se perturba, la perturbación se propaga a la velocidad de luz en forma de onda. Como la gravitación es el campo métrico que determina la separación de eventos o sucesos en el espacio-tiempo, la onda es una onda de espacio-tiempo que contrae y dilata longitudes e intervalos a su paso.

De acuerdo a Galindo Tixaire (2006), numerosos experimentos y observaciones astrofísicas comprueban la RG, entre ellos podemos mencionar los siguientes:

- i) La producción de partículas elementales en los grandes aceleradores y su fenomenología de alta precisión a través del modelo estándar.
- ii) La desviación y retraso de la luz en campos gravitatorios.
- iii) El avance de periastrós.
- iv) La dilatación gravitacional del tiempo.
- v) Estallidos de rayos gamma, cuásares, supernovas, agujeros negros, etc.

ONDAS GRAVITACIONALES

Las Ondas Gravitacionales (OG) constituyen una de las predicciones más importantes de la Teoría de la Relatividad General. La constatación de este fenómeno, no sólo ha sido un resultado trascendente en el campo de la física y la cosmología, sino que además constituye una certeza para la humanidad que comprueba que las causas de determinados eventos a millones de años luz en el Cosmos, de una u otra manera, repercuten en el planeta Tierra. Desde una perspectiva Einsteiniana, nada de lo que sucede en el Cosmos es ajeno a lo que sucede en la Tierra, y nada de lo que sucede en la Tierra es

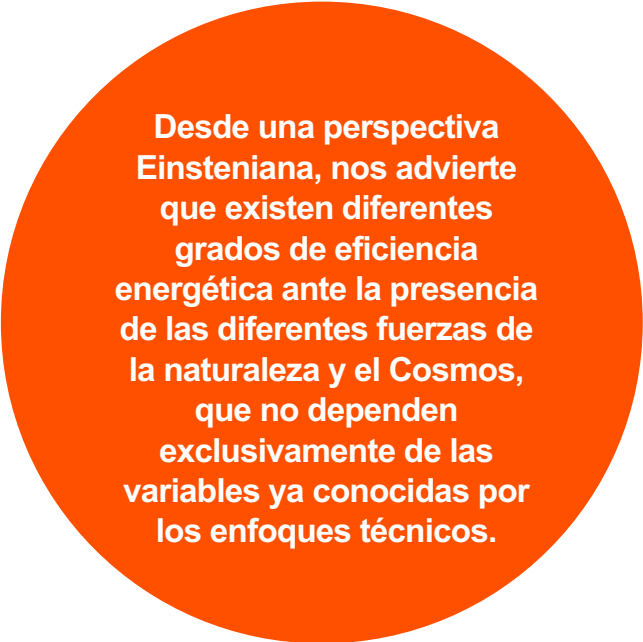
ajeno a lo que sucede en el Cosmos. Existe, de alguna manera y con cierto grado de reciprocidad entre los elementos del Cosmos una relación dinámica que se encuentra impregnada a través del fluido energético universal o materia cósmica.

En el campo de la física una onda consiste en la propagación de una perturbación de alguna propiedad del espacio, por ejemplo, la densidad, la presión, el campo eléctrico, y el campo magnético, desde un punto del espacio-tiempo hacia otro punto del espacio-tiempo. Según Moreno, García, Lara y Ramírez (2008), el movimiento ondulatorio se manifiesta en casi todas las ramas de la física, por ejemplo, en la mecánica, el electromagnetismo, la gravitación y la mecánica cuántica.

Las OG son producidas por masas en movimiento, de manera similar a las ondas electromagnéticas que se generan por cargas en movimiento. De las cuatro interacciones fundamentales, la electromagnética, la fuerza débil y la fuerte, la gravedad es la más débil de todas, por lo que las ondas gravitacionales son muy pequeñas. De ahí, que la identificación de las mismas llevó prácticamente un siglo, hasta que la mente humana y la tecnología estuvieron en condiciones de hacerlo. En términos físicos, una OG intensa produciría desplazamientos del orden de 10-18 metros, una cantidad mil veces más pequeña al diámetro de un protón.

Para Einstein los fenómenos más intensos del Cosmos, como la explosión de una supernova, de una estrella de neutrones, o el colapso o fusiones de agujeros negros, liberan gran cantidad de energía en forma de ondas gravitacionales que se propagan en el espacio-tiempo a la velocidad de la luz (Baker, Centrella, Choi, Koppitz y van Meter, 2006; Sotani y Dohi, 2022; Suvorova, Powel y Melatos, 2019). Dado que este descubrimiento fue hace más de cien años, no existía la tecnología para captar dichas señales que llegaban a la Tierra en forma muy débil.

En el año 1992 el físico Kip Thorne y Ronald Drever de Caltech, junto a Rainer Weiss del MIT, fundaron un nuevo experimento destinado a detectar y medir ondas gravitacionales. El proyecto se llamó LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Es un instrumento en forma de "L", que consta de dos interferómetros situados a 3000 km de distancia uno de otro, uno ubicado en Hanford (Washington) y el otro en Livingston (Louisiana). Cada brazo posee 4 km de distancia. Dado que las ondas gravitacionales cuando interactúan con la materia comprimen los objetos en una dirección, y lo estiran en una dirección perpendicular, los brazos tienen forma de "L".



Desde una perspectiva Einsteiniana, nos advierte que existen diferentes grados de eficiencia energética ante la presencia de las diferentes fuerzas de la naturaleza y el Cosmos, que no dependen exclusivamente de las variables ya conocidas por los enfoques técnicos.

El 14 de septiembre de 2015, los detectores de LIGO captaron la primera señal de una OG producida por la colisión de dos agujeros negros decenas de veces más grandes que el sol. La onda expansiva viajó 1300 millones de años luz hasta ser captada. El tamaño de la señal era aproximadamente 1000 veces más pequeño que el diámetro de un protón. Este hallazgo, significó un esfuerzo de casi medio siglo con la participación de 1200 científicos e ingenieros de la colaboración LIGO/Virgo (Thorne, 2018).

Tal es la importancia de este acontecimiento, que en 2017 la Real Academia de Suecia otorgó el Premio Nobel de Física a Rainer Weiss, Barry Barish y Kip Thorne, por la observación y detección de ondas gravitacionales.

La detección de OG, es un claro fenómeno asociado a las fuerzas del universo que se manifiestan en la Tierra a pesar de las distancias siderales; constituye sólo un mero ejemplo que pone al descubierto que el evento más desconocido para el vulgo, es una consecuencia plausible de la interacción recíproca entre los diferentes elementos del Cosmos. Dicho hallazgo científico, concebido intelectualmente por Einstein y corroborado un siglo después, nos invita a repensar los enfoques de gestión existentes en nuestro planeta que consideran una Tierra aislada del Cosmos, fundamentalmente en el campo de la gestión energética.

IMPLICACIONES DE LA RELATIVIDAD DE EINSTEIN SOBRE EL DISEÑO DE MECANISMOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Actualmente, vestigios del espacio tiempo absoluto e independientes pueden observarse en la literatura académica en numerosos trabajos de investigación. El análisis de los sectores económicos y energéticos no es la excepción. Por ejemplo, si observamos cualquier gráfico donde se pretende representar la producción de energía, el consumo energético, la evolución de la intensidad energética, etc. se notará que, en el eje de abscisas de un sistema de coordenadas cartesiano, siempre se representa el tiempo con el símbolo t , mientras que la energía, como cualquier indicador resultante de ella, se tratan de variables que fluyen en una cierta dimensión espacio-tiempo. Existe una clara disociación del espacio y el tiempo por medio del cual fluye la energía. La nomenclatura más acertada sería aquella que considera que cualquier manifestación de energía, ya sea que haya sido generada por recursos fósiles, energía solar, eólica, hidroeléctrica, mareo-

motriz, geotermia, etc., transita en una cierta dimensión espacio-tiempo entrelazada y continua, a la que podríamos denotar con la expresión $d_i (e_i - t_i)$.

Esta simple pero evidente situación, demuestra claramente que gran parte de la medición de indicadores energéticos y/o construcción de escenarios energéticos, omiten conceptos fundamentales provenientes de otras disciplinas científicas que tratan de representar el verdadero comportamiento de los elementos de la naturaleza y el Cosmos.

Otro aspecto fundamental, es la ausencia del análisis de la gravedad y sus correspondientes implicancias sobre los modelos de optimización energéticos y los mecanismos de eficiencia energética (y/o energías renovables), que pretenden minimizar el consumo de energía y las emisiones de carbono en entornos dinámicos afectados por el cambio climático. No se contempla la incidencia de la fuerza de gravedad y sus respectivas variaciones, como consecuencia del calentamiento global, sobre la energía que producimos, transportamos, distribuimos y consumimos en cada punto georreferencial de la Tierra.

Desde un enfoque Einsteniano, si la fuerza de gravedad genera distorsiones en el ejido espacio-temporal, y además sabemos que la gravedad en la Tierra no se distribuye de manera uniforme, pues entonces estamos en condiciones de afirmar que la energía creada por el hombre en la Tierra fluye con diversos grados de intensidad sujetos a ciertas condiciones. Esas condiciones, se relacionan con la intensidad de los campos gravitatorios, las características topográficas de la superficie terrestre, los materiales o minerales intraterrenos, los niveles de magnetismo, la profundidad respecto al núcleo de la Tierra y los movimientos de la Tierra en su proceso de rotación y traslación en relación a otros planetas y cuerpos celestes de la/s galaxia/s, entre otros factores.

Una primera aproximación al diseño de mecanismos de eficiencia energética desde una perspectiva Einsteiniana, nos advierte que existen diferentes grados de eficiencia energética ante la presencia de las diferentes fuerzas de la naturaleza y el Cosmos, que no dependen exclusivamente de las variables ya conocidas por los enfoques técnicos, como los precios de la energía y la tecnología, los impuestos y subsidios energéticos, los avances técnicos, los niveles de educación y capacitación, las redes de aprendizaje, etc.

Un enfoque Einsteiniano o Relativista de la energía nos permite construir en cada punto de georreferenciación de la Tierra, distintos escenarios energéticos donde se manifiesten diferentes niveles de eficiencia energética gravitatoria. La eficiencia energética gravitatoria es una condición natural inherente a la morfología del planeta Tierra en su relación intrínseca con los elementos del Cosmos.

Recordemos, que esta eficiencia energética gravitatoria si bien es una condición natural bajo estrictas condiciones morfológicas asociadas a la evolución del planeta, puede muy bien mutar, debido a las actividades antropogénicas y a las implicaciones procedentes del cambio climático.

De acuerdo al trabajo de Martínez Naveira (2007), el mundo en el que vivimos y los modelos matemáticos que se construyeron para describir ciertos objetos geométricos y físicos, no pueden explicarse a través de modelos y teorías lineales. Este hecho es de suma importancia en la mecánica relativista del universo, dado que la energía no sigue recorridos lineales ante la presencia de la fuerza de gravedad. De acuerdo a Einstein, el movimiento de un cuerpo, así como la trayectoria de un haz de luz en un campo gravitacional, puede identificarse y medirse a través de la curvatura del espacio-tiempo. En este sentido, para Osserman (1990), el análisis de la curvatura se trata de un concepto trascendental en el campo de la geometría diferencial. Desde esta perspectiva,

podremos observar diferentes matices en cada una de las regiones, donde la energía sufrirá una mayor o menor distorsión. Dentro de cada región, a su vez existirán subregiones, segmentos, puntos georreferenciales donde dicho fenómeno se manifestará con diversos grados de intensidad, ante una distribución heterogénea de la gravedad y una Tierra en constante movilidad y reciprocidad con el Cosmos.

El Dilema del Espacio-Tiempo Energético y las Tecnologías de Eficiencia Energética

En esta instancia, sabemos que la gravedad, el tiempo y la energía son variables entrelazadas. A partir de estas relaciones, se presenta un ejemplo para analizar las implicaciones teóricas del espacio-tiempo energético sobre la medición del consumo energético y la construcción de indicadores y escenarios energéticos a través de las tecnologías de eficiencia energética. Dado que el tiempo fluye más lentamente en los campos gravitatorios más intensos, podemos afirmar que cuanto mayor sea el grado de intensidad del campo gravitatorio, tanto mayor será la lentitud del tiempo (Galindo Tixaire, 2006). A mayor gravedad, mayor distorsión del espacio-tiempo energético.

En estas condiciones, supongamos que queremos controlar el tiempo que transcurre en la generación de un cierto nivel de energía solar bajo criterios de eficiencia económica y energética en tres regiones distintas de Chile. A partir de estos datos se construyen indicadores que permiten analizar la capacidad de generación, los costes económicos, las ganancias y pérdidas energéticas por unidad de tiempo, entre otros indicadores.

Las mediciones se realizan en la Región de Coquimbo (R_1), a una altitud promedio de 380 metros sobre el nivel del mar; en la Región de Atacama (R_2), a una altitud promedio de 1800 metros sobre el nivel del mar; y en la Región de Antofagasta (R_3), a una altitud promedio de 2500 metros sobre el nivel del mar.

En términos generales, la gravedad en Coquimbo (g_1) es mayor que la gravedad en Atacama (g_2), y esta a su vez es superior a la gravedad en Antofagasta (g_3). De forma tal que $g_1 > g_2 > g_3$. Supongamos además que el coste económico de generación (CEG₁) en R₁ es igual al (CEG₂) en R₂ y al (CEG₃) en R₃. Además, el grado de eficiencia energética de los equipos (GEE₁) en R₁, es exactamente igual a GEE₂ en R₂ y GEE₃ en R₃.

Ahora bien, imaginemos que nos situamos en Atacama con tres relojes sincronizados a la perfección r_1 , r_2 y r_3 respectivamente, a los efectos de realizar dos pruebas. En la primera prueba, llevamos a r_3 a la región de Antofagasta donde la gravedad es menor respecto a Atacama, por lo tanto, el ritmo del reloj se avivará, razón por la cual cuando luego de un cierto tiempo regresemos al punto de partida y comparemos nuevamente los relojes observaremos que r_3 se habrá adelantado respecto a r_2 . En la segunda prueba, ahora trasladamos r_1 hacia la región de Coquimbo donde la gravedad es mayor, en esta nueva situación el ritmo del reloj se lentificará y cuando lo traslademos nuevamente hasta Atacama y lo comparemos con r_2 , los resultados demostrarán que r_1 se habrá atrasado respecto a r_2 .

Esta situación plantea una controversia a la hora de construir indicadores económicos y energéticos por unidad de tiempo, que permitan diseñar un sistema de información destinado al proceso de toma de decisiones. Podríamos denominar a esta situación el dilema del espacio-tiempo energético en la actividad energética. Cabe mencionar, que las diferencias, aunque extremadamente pequeñas, existen, pueden observarse y cuantificarse. El efecto sin lugar a dudas será más visible, si consideramos todas las actividades económicas y energéticas que se realizan en la Tierra en un horizonte espacio-temporal extenso. Cualquier afirmación basada en auditorías de un sistema de gestión de la energía, donde se concluye que una determi-

nada región, organización o proyecto se encuentra en un óptimo energético donde se maximiza el rendimiento energético pero que se abstiene de considerar los efectos de las fuerzas de la naturaleza y el universo constituye una afirmación incompleta y perfectamente revocable, ya que no se encuentra sometida al examen de un enfoque holístico de la gestión energética del cual existen pruebas científicas irrefutables que confirman la influencia de la gravedad sobre el espacio-tiempo, la materia y la energía.

Bondades del Enfoque Einsteniano en el Diseño de Mecanismos de Eficiencia Energética

Las bondades del enfoque Einsteniano en el contexto de los sistemas de gestión de la energía, puede aplicarse tanto al diseño de mecanismos de eficiencia energética como al diseño de mecanismos de energías renovables. Además, se puede integrar en un análisis sobre la competitividad natural de los mercados de bienes y servicios.

A continuación, se presentan una serie de bondades cuya enumeración no es taxativa:

i) Comprensión Holística: Permite una comprensión abarcativa del conjunto de variables que afectan a un sistema de gestión de la energía, ya que el análisis de las fuerzas de la naturaleza y el universo no excluye al resto de variables tradicionales.

ii) Integración Cosmológica: Partiendo de la premisa que la Tierra es un planeta en constante interacción y reciprocidad con el resto de elementos del Cosmos, el análisis cosmológico permite diseñar una metodología de trabajo que integre nuevas variables que inciden en la energía de la Tierra.

iii) Mecanismos de Inclusión Relativista: La inclusión de la mecánica relativista, aporta un contenido más amplio sobre el verdadero comportamiento de la energía no

sólo en la Tierra sino en el espacio. La mecánica relativista nos brinda un gran conocimiento sobre el diseño de mecanismos de eficiencia energética en varios sectores, por ejemplo, el sector aeroespacial y el sector de telecomunicaciones.

iv) Geografía Energética Gravitatoria: El análisis relativista de la gestión energética permite identificar regiones, subregiones, puntos georreferenciales donde existen diferentes grados de intensidad de eficiencia energética gravitatoria. La geografía energética gravitatoria, es un instrumento útil para diseñar una hoja de ruta de la eficiencia energética gravitatoria. A través de esta herramienta de gestión identificaríamos lugares más o menos aptos para la instalación de parques de energía solar, eólica, geotermia, mareomotriz, reservas hidroeléctricas, parques industriales, puertos, aeropuertos, rutas comerciales, y cualquier tipo de actividad económica, ya sea de producción, transporte y/o distribución.

v) Adaptabilidad Tecnológica: La medición de la actividad energética cualquiera sea su objeto, en los distintos puntos de georreferenciación necesita contar con las herramientas tecnológicas necesarias para subsanar las diferencias espacio-temporales.

vi) Variables Energéticas Ocultas: La incorporación de nuevas variables que antes permanecían ocultas (o inexistentes) en los modelos o enfoques técnicos sobre gestión energética, pueden conducirnos a identificar posibles pérdidas de energía (antes no contempladas o bien contempladas equivocadamente bajo diagnósticos energéticos incorrectos) en distintas etapas de la cadena de valor energética.

vii) Efectividad Energética: El enfoque Einsteiniano permite una gestión más adecuada y efectiva de la energía, logrando mejorar las decisiones tendientes a incremen-

tar la eficiencia económica y energética en distintos puntos de la cadena de valor energética.

CONCLUSIONES

A través del desarrollo del trabajo se han presentado brevemente las principales variables asociadas a la Relatividad de Einstein (especial y general) y a la relación que la gravedad posee con el cambio climático. Existe abundante evidencia empírica, presentada aquí sólo parcialmente, que explica cómo los cambios en el clima de la Tierra, ya sea por factores naturales o principalmente antropogénicos, condicionan la gravedad. A partir de la constatación de las ondas gravitacionales, se concluye que las fuerzas del Cosmos, las fuerzas de la naturaleza, la energía, el espacio-tiempo, el clima de la Tierra y los mecanismos destinados a reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono de alguna manera se encuentran entrelazados.

Un enfoque de la gestión energética que sólo contemple variables de índole técnica, considerando parcialmente las fuerzas del Cosmos o de la naturaleza, o peor aún, ante la ausencia de las mismas, puede considerarse un enfoque cerrado que supone que cualquier manifestación de energía es completamente independiente de lo que sucede en el Cosmos.

Por el contrario, un enfoque Einsteiniano o Relativista de la energía considera que la energía creada y utilizada por el hombre para múltiples usos y fines energéticos, no sólo es afectada por variables de índole técnica, sino por otras fuerzas invisibles para el ojo humano, pero que sin lugar a dudas se encuentran tan presentes como cualquier otra y generan repercusiones con efectos plausibles y cuantificables.

Se cumple con el objetivo de presentar un enfoque holístico de la gestión de la energía, donde se demuestra la importancia de contemplar las

relaciones entre el clima de la Tierra, la gravedad, el espacio-tiempo y la energía brindando una primera aproximación al diseño de mecanismos de eficiencia energética desde una perspectiva Einsteiniana.

Cuando el hombre conozca verdaderamente su lugar en la Tierra y el Cosmos, y los mecanismos inherentes a la diversidad de fuerzas que operan entre ellos, las políticas de Estado y los modelos de gestión tanto energéticos como climáticos serán más próximos a la realidad. ■

REFERENCIAS

- Agencia Internacional de Energía (AIE) (2015). Recomendaciones de Políticas de Eficiencia Energética Regionales. AIE, 1-12.
- Allen, M. R. et al. (2009). Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. *Nature*, 458 (7242), 1163-1166. DOI: 10.1038/naturaleza08019
- Abdelmalik, K. W. y Abdelmohsen, K. (2019). GRACE and TRMM mission: The role of remote sensing techniques for monitoring spatio-temporal change in total water mass, Nile basin. *Journal of African Earth Sciences*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103596>
- AUTOR (2020). La Gobernanza de la Eficiencia Energética: una Política Pública efectiva para fortalecer la Transición Energética hacia modelos de Desarrollo Económico Sustentable. *Administración Pública y Sociedad*, 9, 153-180. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/APyS/article/view/25184>
- AUTOR (2021). El Rol de las Políticas de Eficiencia Energética en la República Argentina y su importancia en el Proceso de Descarbonización del Acuerdo de París. *Actualidad Económica*, 31(105), 23-36. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/acteconómica/article/view/36496>
- Baker, D. (2000). Effects of the Sun on the Earth's environment. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(17-18), 1669-1681. [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(00\)00119-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(00)00119-X)
- Baker, J. G., Centrella, J., Choi, D., Koppitz, M. y van Meter, J. (2006). Gravitational-Wave Extraction from an Inspiral Configuration of Merging Black Holes. *Physical Review Letters*, 96. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.111102>
- Bergin, A., Chapman, S. C., Moloney, N. R. y Watkins, N. W. (2022). Variation of Geomagnetic Index Empirical Distribution and Burst Statistics Across Successive Solar Cycles. *JGR Space Physics*, 127(1), 1-19. <https://doi.org/10.1029/2021JA029986>
- Bernal, A. N. y Sánchez Caja, M. (2015). Un paseo por las geometrías del espaciotiempo en el centenario de la Relatividad General. *La Gaceta de la RSME*, 18(3), 1111-11132.
- Bouille, D. (1999). Lineamientos para la regulación del uso eficiente de la energía en Argentina. *Serie Medio Ambiente y Desarrollo, CEPAL*, 16, 1-71.
- Canadell, J. G. et al. (2007). Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(47), 18866-18870. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702737104>
- Carpio, C. y Coviello, M. F. (2014). Eficiencia Energética en América Latina y el Caribe: avances y desafíos del último quinquenio. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*, 1-12
- Chen, J. L., Li, J., Zhang, Z. y Ni, S. (2014). Long-term groundwater variations in Northwest India from satellite gravity measurements. *Global and Planetary Change*, 116, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.02.007>
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Blankenship, D. y Tapley, B. D. (2009). Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nature Geoscience*, 2, 859-862. <https://doi.org/10.1038/ngeo694>

- Chen, J. L., Wilson, C. R. y Tapley, B. D. (2006). Satellite gravity measurements confirm accelerated melting of Greenland ice sheet. *Science*, 313(5795), 1958-1960. DOI: 10.1126/science.1129007
- Clarke, L., Edmonds, J., Krey, V., Richels, R., Rose, S. y Tavoni, M. (2009). International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics*, 31, S2, S64-S81. 10.1016/j.eneco.2009.10.013
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (2015). La economía del cambio climático en América Latina y el Caribe. Paradojas y desafíos del desarrollo sostenible. CEPAL, Santiago de Chile, 1-95.
- Delgado Noboa, D. (2019). Barómetro de la Energía de América latina y el Caribe 2019: Energía Renovable y Eficiencia Energética. Las Perspectivas del Desarrollo Energético en la Región. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), 1-15.
- Fathy, K., Zahran, K. H., Radwan, A. H., Sabet, H. S. y Hamed, D. (2013). Gravity observations at Sinai Peninsula and its geophysical and geodetic applications. *Journal of Astronomy and Geophysics*, 2(2), 223-233. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2013.12.003>
- Galindo Tixaire, A. (2006). Relatividad, Tiempo y Asuntos de Gravedad. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 100(1), 141-155.
- González, W. D., Tsurutani, B. T., Clúa de González, A. L. (1999). Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, 88(3), 529-562. <https://doi.org/10.1023/a:1005160129098>
- González Sierra, H., Valcárcel Montañez, J. P. y Cristancho Fierro, J. M. (2009). Procesos de Interacción Materia-Energía a partir de la masa equivalente de los fotones. *Entornos*, 22, 151-158. <https://doi.org/10.25054/01247905.421>
- Haigh, J. D. (1996). The Impact of Solar Variability on Climate. *Science*, 272(5264), 981-984. DOI: 10.1126/science.272.5264.981
- Haines, C., Owens, M. J., Barnard, L., Lockwood, M. y Ruffenach, A. (2019). The Variation of Geomagnetic Storm Duration with Intensity. *Solar Physics*, 294(11), 154. <https://doi.org/10.1007/s11207-019-1546-z>
- Iyemori, T. (1990). Storm-Time Magnetospheric Currents Inferred from Mid-Latitude Geomagnetic Field Variations. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 42(11), 1249-1265. <https://doi.org/10.5636/jgg.42.1249>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022). Climate Change 2022. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers. Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1-35.
- Kardec, A. (2017). La Génesis. Los Milagros y las Predicciones según el espiritismo. En Gustavo N. Martínez (trad.), Confederación Espírita Argentina (CEA), Buenos Aires, Argentina.
- Knutti, R. y Hegerl, G. C. (2008). The Equilibrium sensitivity of the Earth's temperature to radiation changes. *Nature Geoscience*, 1, 735-743. DOI: 10.1038/ngeo337
- Maldacena, J. M. (2005). Agujeros negros, cuerdas y gravedad cuántica. *Revista de Enseñanza de la Física*, 18(1), 105-110.
- Marquart, G. y Schmeling, H. (2004). A dynamic model for the Iceland Plume and the North Atlantic based on tomography and gravity data. *Geophysical Journal International*, 159(1), 40-52. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02398.x>
- Martínez Naveira, A. (2007). La curvatura de Riemann a través de la historia. *Miscelánea Matemática*, 44, 29-52.
- Mendoza Nolorbe, J. N. (2021). Anomalías del campo gravitacional en la Región Lima y Callao. Informe Final del Proyecto de Investigación, Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú, 1-59.

- Mohamed, A. (2020). Gravity based estimates of modern recharge of the Sudanese area. *Journal of African Earth Sciences*, 163. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103740>
- Moreno, C., García-Salcedo, R., Lara, A. y Ramírez, J. (2008). Introducción a las Ondas Gravitacionales. *Revista Latinoamericana de Educación Física*, 2(3), 311-319.
- Nesme-Ribes, E., Ferreira, E. N., Sadourny, R., Le Treut, H. y Li, Z. X. (1993). Solar dynamics and its impact on solar irradiance and the terrestrial climate. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 98(A11), 18923-18935. <https://doi.org/10.1029/93JA00305>
- Nordhaus, W. (2018). Projections and Uncertainties about Climate Change in an Era of Minimal Climate Policies. *American Economic Journal: Economic Policy*, 10(3), 333-360. DOI: 10.1257/pol.20170046
- Osserman, R. (1990). Curvature in the Eighties. *The American Mathematical Monthly*, 97(8), 731-756.
- Romero, G. E. (2015). Un siglo de Relatividad General. *Boletín de Divulgación Científica y Tecnológica del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR)*, 14(51), 1-9.
- Soon, W., Connolly, R. y Connolly, M. (2015). Re-evaluating the role of solar variability on Northern Hemisphere temperature trends since the 19th century. *Earth-Science Reviews*, 150, 409-452. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.08.010>
- Sotani, H. y Dohi, A. (2022). Gravitational wave asteroseismology on cooling neutron stars. *Physical Review D*, 105(2). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.105.023007>
- Suvorova, S., Powel, J. y Melatos, A. (2019). Reconstructing gravitational wave core-collapse supernova signals with dynamic time warping. *Physical Review D*, 99(12). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.123012>
- Thorne, K. S. (2018). Nobel Lecture: LIGO and gravitational waves III. *Reviews of Modern Physics*, 90(4), 040503-1 - 040503-20. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.90.040503>
- Zhao, X., Soon, W. y Velasco Herrera, V. M. (2021). Holocene Millennial-Scale Solar Variability and the Climatic Responses on Earth. *Universe*, 7(2), 1-11. <https://doi.org/10.3390/universe7020036>