



# **ANÁLISIS DE MERCADOS DE ELECTRICIDAD**

**Alfredo Trespalacios Carrasquilla**  
**Javier Orlando Pantoja Robayo**  
**Óscar Alonso Fernández Taborda**

**ESCUELA DE ECONOMÍA Y FINANZAS**

**Colección ACADÉMICA**

## Análisis de mercados de electricidad

---

Alfredo Trespalacios Carrasquilla

Javier Orlando Pantoja Robayo

Óscar Alonso Fernández Taborda



Trespalacios Carrasquilla, Alfredo

Análisis de mercados de electricidad / Alfredo Trespalacios Carrasquilla, Javier Orlando Pantoja Robayo, Óscar Alonso Fernández Taborda. -- Medellín: Editorial EAFIT, 2017.

276 p.; 24 cm. -- (Colección Académica)

ISBN 978-958-720-467-4

1. Sector eléctrico. 2. Sector eléctrico - Colombia. I. Pantoja Robayo, Javier Orlando. II. Fernández Taborda, Óscar Alonso. III. Trespalacios Carrasquilla, Alfredo. IV. Tít. V. Serie

333.7932 cd 23 ed.

T798

Universidad EAFIT- Centro Cultural Biblioteca Luis Echavarría Villegas

## Análisis de mercados de electricidad

Primera edición: noviembre de 2017

© Alfredo Trespalacios Carrasquilla, Javier Orlando Pantoja Robayo y Óscar Alonso Fernández Taborda.

© Editorial EAFIT

Carrera 49 No. 7 sur - 50

Tel.: 261 95 23, Medellín

<http://www.eafit.edu.co/fondoeditorial>

Correo electrónico: [fonedit@eafit.edu.co](mailto:fonedit@eafit.edu.co)

ISBN: 978-958-720-467-4

Editora: Carmiña Cadavid Cano

Diseño: Alina Giraldo Yepes

Diagramación: Artes y Letras S.A.S.

Imagen de carátula: 20576279, ©shutterstock.com

Universidad EAFIT | Vigilada Mineducación Reconocimiento como Universidad:  
Decreto Número 759, del 6 de mayo de 1971, de la Presidencia de la República

de Colombia. Reconocimiento personería jurídica: Número 75, del 28 de junio de 1960, expedida por la Gobernación de Antioquia. Acreditada institucionalmente por el Ministerio de Educación Nacional, mediante Resolución 1680 del 16 de marzo de 2010.

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o con cualquier propósito, sin la autorización escrita de la editorial.

Editado en Medellín, Colombia

**Diseño epub:**

Hipertexto - Netizen Digital Solutions

Alfredo

*A David, Santiago, Marta, Diego, Odín.*

*Bárbara, Samuel, Ofelia, Gabriel.*

*Samuel, Andrés*

Javier

*A Sebas, fuente de mi inspiración*

Óscar

*A mis dos hijos que ganan casta como la buena energía*

# Contenido

---

Agradecimientos

Prólogo

Energía

Algunas nociones sobre electricidad

- Generación de electricidad

- Cadena de suministro

- Unidades de medida

- Precios de electricidad a nivel mundial

Mercado eléctrico en Colombia

Interacción económica

- Diferencia entre electricidad y otros activos transables

- Función de oferta

- Función de demanda

- Competencia perfecta

- El monopolio

Modelos de administración de mercados

- El modelo estatista

- El modelo competitivo

- Elementos de diseño para mercados competitivos

La crisis de California

El poder de mercado

Modelación de mercados de electricidad

Tendencias de modelamiento de mercados eléctricos

La demanda por electricidad

Determinantes de la demanda de electricidad

Elasticidad de la demanda

Formación del precio spot

Contratos de largo plazo o forward

Beneficio

Cobertura

Negocio de oportunidad

Modalidades de contratación

Riesgo de crédito

Prima de riesgo de mercado

Riesgo de contraparte

Pérdida esperada

Proceso de crédito

Contratos de futuros

Licitaciones para el suministro de energía

Tipos de subastas

Mecanismos de contratación en diferentes mercados

## Pagos por firmeza

- Cargo por capacidad

- Los mercados de confiabilidad

## Despacho hidrotérmico

### Despacho económico y condiciones de red

- El problema del despacho económico sin red

- Flujo de potencia a través de las líneas de transmisión

- Despacho económico con restricciones de línea

- Código para flujo de potencia DC

- Código para DE con restricciones de red

## Evaluación financiera de proyectos

### Costo nivelado

- Desarrollo algebraico

- Riesgo, rentabilidad exigida y tiempo ( $\kappa$ )

## Índice climático

### Algunos tópicos asociados al cambio climático

- Elementos del enfoque sectorial

- Emisiones por quema de combustibles fósiles para generación de electricidad

- Energía solar como generación distribuida

- Beneficios sociales por la adopción de fuentes renovables

## Riesgo de mercado

- Volatilidad

- Medidas de ubicación
- Medidas de dispersión
- El efecto de la correlación

## Cobertura con contratos forward

- Flujo de caja por venta de energía
- Flujo de caja por compra de energía
- Función para toma de decisiones

## Efecto del VaR

## Opciones financieras

- Opciones de compra call
- Opciones de venta put
- Valoración de opciones
- Estrategias con opciones

## Administración de riesgo

- Identificación del riesgo
- Elementos para la cuantificación
- Elecciones para el tratamiento
- Seguimiento y reporte

## Modelos estocásticos

- Conceptos iniciales
- Movimiento browniano
- Integral estocástica
- Lema de Itô
- Proceso de reversión a la media
- Código para generar trayectorias con reversión a la media
- Modelo de spot de un factor
- Modelo de spot de un factor con saltos

Modelo de dos factores de Pilipovic  
Estimación de precio spot para Colombia  
Precio forward  
Precio forward en tiempo discreto  
Precio forward para acciones

Algunos sitios web de interés

Referencias

Notas al pie

Los autores

# Lista de figuras

---

Figura 1. Artilugio que transforma energía potencial en cinética

Figura 2. Dispositivos que transforman energía potencial en cinética o cinética en potencial

Figura 3. Fuentes primarias de energía a nivel mundial

Figura 4. Fuentes primarias de energía a nivel mundial en 1973 y 2015

Figura 5. Fuentes primarias de energía en los países OCDE en 1973 y 2016

Figura 6. Mapa de burbujas por producción de energía a nivel mundial a 2012

Figura 7. Interacción entre corriente, voltaje y resistencia

Figura 8. Esquema básico de un circuito eléctrico

Figura 9. Cadena de suministro de la electricidad

Figura 10. Generación hidráulica y térmica en Colombia (MWh). Periodo normal y de escasez

Figura 11. Demanda de electricidad del MNR por tipo de actividad económica en Colombia

Figura 12. Transacciones en contratos y bolsa en mercado eléctrico colombiano

Figura 13. Cruce oferta y demanda

Figura 14. Objetivos comunes para la modelación en mercados

Figura 15. Número de artículos y revistas anuales sobre mercados de electricidad en Scopus

Figura 16. Formación de precio spot

Figura 17. Formación de precio en cada nodo en un sistema multinodal

Figura 18. Sistema de potencia radial y enmallado

Figura 19. Momentos en la negociación de contratos de largo plazo

Figura 20. Esquema de beneficio positivo y negativo para quien tiene posición larga

Figura 21. Esquema de beneficio positivo y negativo para quien tiene posición corta

Figura 22. Beneficio de agente con posición larga

Figura 23. Condiciones de contrato forward muy costoso y muy barato

Figura 24. Esquema de contrato forward en la modalidad PLC

Figura 25. Esquema de contrato forward en la modalidad PLD con techo

Figura 26. Esquema de contrato forward en la modalidad PLD con piso

Figura 27. Esquema de contrato forward en la modalidad PLD con piso y con techo

Figura 28. Riesgo de pago de la firma

Figura 29. Función de pérdida en cartera y algunos parámetros

Figura 30. Actividades del proceso de crédito

Figura 31. De contrato forward a contrato futuro

Figura 32. Anillos de seguridad implementados por la cámara de riesgo de contraparte

Figura 33. Administración de cuenta de margen en contrato de futuros

Figura 34. Esquema de rondas en subasta de reloj descendente

Figura 35. Regla básica de operación de embalses en sistema hidrotérmico

Figura 36. Operación de sistema para escenarios posibles de demanda e hidrológicos

Figura 37. Esquema general del modelo para la estimación de efecto de red eléctrica sobre los ingresos de un generador de electricidad

Figura 38. Esquema de sistema de potencia general

Figura 39. Modelo Pi de línea de transmisión

Figura 40. Ilustración de elementos del VPN

Figura 41. Valor de kappa en función de tasa de interés y años de vida útil para proyectos de inversión

Figura 42. Histograma de aportes hidrológicos diarios a las plantas del sistema eléctrico colombiano

Figura 43. SHI

Figura 44. Relación de movimientos del SHI y el ONI

Figura 45. Correlaciones entre el SHI y el ONI

Figura 46. Incorporación de energía solar a un sistema de distribución local

Figura 47. LCOE por unidad de generación para energía solar, en función de la generación esperada

Figura 48. Volatilidad de precios de energía

Figura 49. Proceso para estimación de volatilidad

Figura 50. Estadísticos en distribución de probabilidad

Figura 51. Forma de VaR y CVaR en simulación Montecarlo

Figura 52. Explicación de diagrama xy para dos variables aleatorias con correlación positiva

Figura 53. Diagrama de dispersión xy para variables aleatorias correlacionadas

Figura 54. Función de utilidad y distribución de probabilidad de riqueza y utilidad

Figura 55. Ubicación de portafolios spot y forward en plano riesgo-recompensa

Figura 56. Función de utilidad y de varianza del agente con  $\lambda$  igual a 1 en función de  $\eta$

Figura 57. Conjunto de curvas eficientes del portafolio para diferentes momentos de negociación ( $\tau$ )

Figura 58. Tablas de cobertura con contratos forward para mercado eléctrico colombiano

Figura 59. VaR en función de  $\eta$  para varios niveles de correlación entre el precio spot y la cantidad de energía

Figura 60. Regiones para la toma de decisiones que incluyen restricción de tipo  $VaR \leq VaR^*$

Figura 61. Condiciones de precio spot en las cuales es conveniente ejercer la opción call

Figura 62. Pago y utilidad de la opción call al momento del vencimiento para posición larga

Figura 63. Condiciones de precio spot en las cuales es conveniente ejercer la opción put

Figura 64. Pago y utilidad opción put al momento del vencimiento para posición larga

Figura 65. Perfil de utilidad de estrategia bull spread con opciones put

Figura 66. Perfil de utilidad de estrategia bear spread con opciones call

Figura 67. Ciclo básico de la administración de riesgos

Figura 68. Matriz de riesgos para visualización de efecto y probabilidad

Figura 69. Probabilidad condicionada

Figura 70. Siguiendo los pasos de un movimiento browniano

Figura 71. Simulación de proceso estocástico con reversión a la media por 3 años

Figura 72. Simulación de proceso estocástico con reversión a la media por 30 años

Figura 73. Simulación de un proceso Ornstein Uhlenbeck con una trayectoria

Figura 74. Precio de bolsa para Colombia estimado y ocurrido

Figura 75. Trayectorias e histograma de curva forward para mercados de electricidad

# Lista de tablas

---

Tabla 1. Producción mundial de electricidad

Tabla 2. Precios de energía en países OCDE, primer trimestre de 2015

Tabla 3. Entidades y roles en el mercado eléctrico colombiano

Tabla 4. Elasticidad de la demanda de energía al precio

Tabla 5. Conjunto de ofertas enviadas por los generadores a la bolsa (nombres ficticios)

Tabla 6. Curva de oferta a partir de datos entregados por generadores

Tabla 7. Posibles pagos de ConsumoEnergía si mantiene exposición a spot

Tabla 8. Posibles pagos de ConsumoEnergía si mantiene exposición a spot y adiciona cobertura con contrato de largo plazo

Tabla 9. Posibles ingresos de GeneroEnergía si mantiene exposición a spot

Tabla 10. Posibles pagos de ConsumoEnergía si mantiene exposición a spot y adiciona cobertura con contrato de largo plazo

Tabla 11. Transacciones a realizar para especular con contratos forward

Tabla 12. FRP para Colombia

Tabla 13. Calificación del riesgo de crédito de las compañías

Tabla 14. Probabilidad acumulada promedio de default en función de calificación crediticia

Tabla 15. Manejo de cuenta de margen para posición larga en contrato de futuros

Tabla 16. Especificación de parámetros para licitaciones de diferentes mercados de electricidad

Tabla 17. Del flujo de caja del proyecto al del inversionista

Tabla 18. Flujo de caja del proyecto

Tabla 19. Flujo de caja del inversionista

Tabla 20. Valores de beta para negocios de energía

Tabla 21. Costo nivelado para diferentes tecnologías

Tabla 22. Estadísticos descriptivos de promedio de aportes a las plantas del sistema eléctrico colombiano

Tabla 23. Correlaciones entre el SHI y el ONI

Tabla 24. Comportamiento típico del índice

Tabla 25. Componentes de estrategia bull spread con opciones put

Tabla 26. Componentes de estrategia bear spread con opciones call

Tabla 27. Regla para diferenciación estocástica

## Agradecimientos

---

Los tres autores de este texto queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a Linsi Sánchez Alarcón, quien de forma desinteresada realizó muchas de las figuras de este libro. También a todas aquellas personas que participaron en su construcción, con aportes tan diversos como la recopilación de información, la redacción de algunas líneas, la reestructuración de todo el texto, la revisión y reformulación de ecuaciones, las preguntas incisivas, las palabras de aliento y hasta la estimación de modelos. Entre ellos se destacan el físico Nicolás Fernández; el abogado Santiago Trespalacios; el maestro de tantos economistas, doctor Luis Guillermo Vélez; el doctor en Ingeniería y director-fundador de ECSIM, Diego Gómez; la doctora en Finanzas y fundadora de la Maestría en Finanzas de la Universidad EAFIT, Cecilia Maya; la decana de Economía del Instituto Tecnológico Metropolitano, Yudy Giraldo; el consultor y profesor de muchos ingenieros electricistas, Jaime Alberto Blandón Díaz; el presidente de Derivex, Rodrigo Castellanos; los especialistas en mercados de electricidad, Gisleny García Naranjo, Francisco Javier Bedoya, Carlos Alberto Londoño Tobón, Germán Alberto Caicedo, David Andrés Galeano y Ángela María Mendoza; el director del Clúster de Energía de la Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, Jaime Alberto Arenas Plata; el estudiante de la Maestría en Finanzas Juan Pablo Pérez Monsalve; los estadísticos Estefanía Gaviria y

Giovanny Soto; el ingeniero financiero y estudiante de Estadística, Jonathan Cano Bedoya; los estudiantes de Economía y Administración de la Universidad EAFIT, Mariana Ortiz Echavarría y Nicolás Londoño Aristizábal; y, finalmente, los econométricos Juan Fernando Rendón García y David Rodríguez Guevara. A todos ellos, en forma y fondo, mil y mil gracias.

En párrafo aparte y para lograr el impacto que merece, agradecemos enormemente a la Editorial EAFIT, quien desde el principio le apostó a este proyecto y nos acompañó en todo lo que se necesita para que el lector reciba un proyecto con toda la calidad que representa este sello. Así mismo a los evaluadores de esta propuesta, que lograron identificar puntos críticos para lograr un mejor contenido en esta edición.

Agradecemos también todos los comentarios y recomendaciones que los lectores de este proyecto nos puedan hacer, conforme adelanten su lectura, para eventuales futuras ediciones; por favor no duden en enviarnos un correo electrónico.

# Prólogo

---

La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma: es la idea elemental con la que somos iniciados en la física básica. A esto le haríamos una modificación desde nuestra condición humana: la energía no se crea ni se destruye, solo intentamos aprovecharla. Y es que nuestro planeta, tal cual lo conocemos, es una casi infinita concentración de energía. ¿Conocemos algo que nos brinde una menor impresión de ser fuente de energía que una rígida roca? Siempre acudimos al ejemplo de este objeto -la roca- para significar lo inerte, estático, ausente de cualquier energía; sin embargo, nos sorprendería la cantidad de energía que esta tiene; de un lado, podría aprovecharse químicamente con los medios adecuados, de otro, cuando algún niño, por verla rodar, la arroja por una colina, la roca genera grandes cantidades de energía cinética en el trayecto.

El acceso a la energía constituye un factor esencial para la calidad de vida del ser humano; es tan básico en nuestro tiempo como el acceso al agua potable, al saneamiento o a la alimentación. Sin embargo, cuando se habla de energía se hace con poca claridad y sin una definición precisa, solo la percibimos directamente en nuestra relación más cercana: la electricidad, el gas y la gasolina. La primera nos da el insumo para iluminarnos y para el disfrute de nuestras comodidades tecnológicas, la segunda está en la cocción de los alimentos y el calentamiento del agua y la

tercera se asocia con el desplazamiento, ya sea en carro, en moto o en bus, que nos lleva al trabajo o a nuestro hogar.

Mientras el planeta en su acepción física es energía, el mundo, en su matiz humano, es financiero, económico y siempre fijado por valores de cambio y productividad. Por ejemplo, el carpintero de Belén, cuyo nombre partió la historia de la humanidad en dos, según Mateo 25 del 14 al 30, hubo de comparar el juicio final con el balance hecho por un hombre a sus tres ciervos, a quienes después de entregarles 5, 3 y 1 talento, los llamó a cuentas. Constató entonces que los dos primeros habían duplicado sus recursos mientras que el tercero había traído lo mismo con lo que había sido dotado, poniéndolo en su historia como un ejemplo de quien no sería merecedor de las gracias prometidas. He aquí, en la Biblia, un buen ejemplo de lo que es el mundo, un constante flujo de utilidades, riesgos, pérdidas y aprovechamiento de las capacidades propias y del entorno. No es para nada distante esta situación de la actividad empresarial de nuestros tiempos cuando, al principio del segundo trimestre de cada año, los accionistas de las compañías realizan sus asambleas para identificar cuánto ha quedado de sus buenas obras y cuánta es la recompensa (dividendos) que ellos merecen.

De la conjugación del planeta y el mundo, aspecto físico versus aspecto social, es que nace este libro, que combina, de un lado, los elementos básicos del movimiento de electrones a través de un medio conductor, y, por otro, la interacción de los mercados de energía dentro de un modelo regido por la libertad y la competencia y a la vez reglado por completo y centralmente controlado. Es paradójico en este contexto, que de un bien físico de un planeta finito las empresas pretendan una a una lograr crecimiento económico sostenido incluso por encima del

crecimiento de la población; claramente esta situación no se presentará de forma natural y a medida que todos crezcan utilizando los mismos recursos, los retos que atañen a la competencia serán cada vez mayores.

La necesidad de las industrias de lograr utilidades y los niveles de apalancamiento (relación deuda-patrimonio) que tienen para lograrlo, han llevado a que la renta financiera sea mayor que la renta real, las diferencias sociales sean pronunciadas, los mercados globales sean cada vez más volátiles, las probabilidades de quiebra sean más altas y el análisis cuantitativo de los riesgos más necesario. Las inestabilidades sociales, políticas, económicas y financieras vienen acompañadas así mismo, en este empeño de la humanidad por encontrar los fines del crecimiento, de una crisis ambiental que es producto, entre otras cosas, de las emisiones de gases invernadero debido a la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles. Esta situación exige la adaptación de la estructura de producción de las naciones que incluye la modificación de la canasta energética a favor de fuentes renovables no convencionales, con los cambios técnicos y regulatorios que estas merecen. Si este libro hubiera sido escrito hace diez años posiblemente en su contenido no tendría el capítulo de cambio climático y si lo tuviera, parecería el aporte de un escritor apocalíptico; hoy, los hallazgos empíricos y teóricos en la materia hacen que su aparición en este texto sea pertinente.

A esta altura del prólogo quisiéramos confesar que cumplir el reto de completar las páginas que cubren este libro fue más arduo de lo esperado, no solo por nuestra formación principal en ramas cuantitativas y por el hecho de llevar unos años en el tema, lo que en ocasiones no permite diferenciar el sentido común del conocimiento

adquirido, sino también por la dificultad que implicó dar orden a un sinnúmero de ideas que brotan incesantemente cada que se aborda alguna de las temáticas relacionadas con el objeto de esta libro. Ahora con seguridad valoramos mucho más cada texto de nuestras bibliotecas y sabemos que es muy probable que hayamos cometido errores, por los cuales nos disculpamos desde ahora, declarando que cualquiera de ellos fue cometido sin intención alguna.

Nuestra experiencia en tópicos de mercados de electricidad, que incluye la participación directa en la operación de compra y venta de energía, la evaluación de grandes proyectos de infraestructura, la realización de varias investigaciones publicadas en revistas indexadas a nivel nacional (Colombia) e internacional, la participación en grupos de investigación en Europa y Colombia, y la dirección de proyectos en innovación y desarrollo, nos ha posibilitado descubrir que ni el triple del tiempo que hemos dedicado a estas labores ni diez veces la dedicación que hemos puesto nos entregaría material suficiente para escribir todo lo que se requiere para comprender aquello que motiva el comportamiento de los agentes en los mercados de electricidad, prever las necesidades futuras a la que se enfrenta la humanidad y saber con exactitud cómo el responsable de tomar decisiones deberá actuar ante cada circunstancia. Así, con este libro tan solo queremos aportar con un diferencial para que el lector lo agregue a su integral de conocimiento.

Nuestros interés es presentar un panorama general de los mercados eléctricos y entregar al lector elementos que serán de utilidad en diferentes contextos. Por eso, en algunos de los apartes incluimos casos particulares del mercado de electricidad en Colombia, mercado donde hemos aplicado la mayor parte de nuestros conocimientos

tanto en el campo académico como en el práctico, y que por sus características se convierte en un caso de estudio interesante.

Este libro está dirigido a un amplio público. Con el lenguaje sencillo y la generalización de los conceptos pretendemos llegar a aquellos que apenas inician su carrera profesional inmersos en un mercado de electricidad. Así mismo, utilizamos conceptos básicos que harán más fácil el camino para aquellos que arrancan un proyecto de investigación alrededor de estos tópicos; no en vano el libro empieza describiendo el concepto de energía, sigue con algunos elementos de la electricidad y presenta varios enfoques utilizados para la modelación. De la misma forma, hay capítulos que son de utilidad para quienes ya tienen una experiencia tanto académica como profesional en mercados de electricidad, como es el caso de los capítulos sobre las estrategias de cobertura y los modelos estocásticos, por ejemplo. Además, es nuestra intención que el texto sirva para acompañar cursos de formación de profesionales analistas en proyectos de energía y que acompañe a su dueño durante una buena cantidad de años en su biblioteca para que eventualmente lo ojee con la intención de refinar una idea o exposición.

En atención de lo que se describe en el párrafo anterior, anticipamos que el lector encontrará capítulos con elementos didácticos que hacen fácil la incorporación de conceptos nuevos; sin embargo, a partir del capítulo “Despacho hidrotérmico” el lenguaje se hace un poco más complejo, en la misma línea de los libros técnicos, como los de ingeniería financiera o los de investigación de operaciones.

# Energía

---

*El viaje de mil leguas comienza por un paso*

*Lao Tse, Tao Te Ching*

Una ley, que hasta el día de hoy no tiene excepción, establece que existe una cantidad escalar (esto es que se puede medir con un número) que llamamos energía. Nunca cambia, sin importar cómo evolucione un sistema, no se crea ni se destruye, como tantas veces hemos escuchado y hasta leído en el prólogo de este libro; solo se transforma.

Si bien su número es invariante y único, el concepto de energía varía de persona a persona y de contexto en contexto, haciéndolo ambiguo incluso cuando lo usamos a diario. Cierra por un segundo los ojos y pregúntate: ¿qué es energía? Luego fórmulale a dos o tres personas que estén a tu lado la misma inquietud. ¿Has encontrado coherencia entre las respuestas? No te preocupes, nosotros tampoco.

La energía en sus diferentes manifestaciones no solo está presente en todos los sucesos de nuestra vida: lo está desde el lejano pasado, cuando la humanidad cocinaba y se calentaba con leña (la fuente energética primaria por excelencia), hasta el momento actual, donde todas las acciones de nuestra cotidianidad están permeadas por la energía y su consumo, sin la cual nuestra existencia y el desarrollo cultural y tecnológico no sería posible; como lo

fue al principio de la historia humana y lo es ahora, seguirá siendo fundamental para nuestro futuro como civilización.

Un ingeniero o un físico, hombres de números en práctica con permiso social para hacer aseveraciones de lo tangible y la transformación del entorno material al que pertenecemos, posiblemente habrán contestado que la energía viene en diferentes formas: cinética, potencial, térmica, nuclear, química y eléctrica. Pero esta respuesta es solo una lista. El concepto de energía es más abstracto de lo que podemos imaginarnos; si queremos comprenderlo en todo su trasfondo, tendremos que manejar el lenguaje de las matemáticas, única forma de comprender las leyes del universo en su complejidad, y por supuesto no estamos en capacidad de formularlo en estas páginas. Esta respuesta por parte nuestra es un poco desalentadora, pero no todo está perdido.

Afortunadamente el famoso físico estadounidense Richard Feynman -premio Nobel de física en 1965-, Robert Leighton y Matthew Sands (2005), nos dotaron de algunas de las mejores analogías sobre la energía, una de las cuales retomamos a continuación: imagina que un niño tiene 28 bloques que son absolutamente indestructibles y no pueden ser divididos en trozos. Cada bloque es exactamente idéntico al otro. Su madre lo deja con sus 28 bloques en una habitación al inicio de la jornada. Al final del día, por curiosidad, ella cuenta los bloques con mucho cuidado, y descubre una ley; no importa lo que el niño haga con los bloques, ¡siempre hay 28 bloques! Esto continúa durante varios días, hasta que un día solo hay 27 bloques al final de la jornada, pero un poco de búsqueda por parte de la madre muestra que hay uno debajo de la alfombra, ella debe mirar en todas partes para asegurarse de que el número de bloques no haya cambiado.

Un día, sin embargo, el número parece cambiar, solo hay 26 bloques. Luego de utilizar por varios minutos su intuición de madre protectora descubre un poco de viento que roza su mejilla y enfría su pecho: la ventana está abierta, y al mirar hacia afuera, se encuentran los dos bloques faltantes. Otro día, un cuidadoso conteo indica que hay 30 bloques, esto causa una gran consternación que amerita toda una reunión familiar: Juan, el hijo de nuestros vecinos, dejó unos bloques -solucionado el problema y todos respiran-.

Esta analogía nos ayuda a entender que la energía siempre se conserva, no importa la manera en que manipulemos los bloques, pero tenemos que ser muy cuidadosos a la hora de rastrearlos.

Aunque en cualquier proceso la cantidad de energía se conserva, su "calidad" no se mantiene porque tiende a transformarse en formas de energía menos útiles, pierde su calidad. El físico alemán, y uno de los fundadores de la termodinámica moderna, Rudolf Clausius (1850), fue el primero en percatarse de esto: "*Die Energie der Welt ist konstant; Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu*" ("La energía del mundo es constante; la entropía del mundo tiende a un máximo"). Y fue el concepto de entropía el gran aporte de Clausius, porque nos enseñó una manera de cuantificar la degradación de la energía durante estas transformaciones.

Imaginemos ahora una montaña rusa, sin fricción alguna. Cuando el coche con tres niños impacientes se encuentra justo en el punto más alto, la ansiedad de los infantes y la energía potencial del carro están listos para, en menos de lo que dura un parpadeo, convertirse en adrenalina y energía cinética. Estas dos últimas llegarán a su punto más alto en el punto más bajo de la montaña rusa.

Si no hay pérdida de energía por otras causas, como sonido, deformación de los rieles, vibraciones, etc., el vagón podrá transformar toda su energía potencial en cinética y viceversa, por lo que la adrenalina y la ansiedad serán la constante en la sensación de los viajeros de nuestro ejemplo.

En el momento en que haya fricción entre la ruedas y los rieles, el vagón no podrá alcanzar el punto más alto luego de haber llegado al punto más bajo y en consecuencia, junto con la diversión de los niños, se irá deteniendo. La energía seguirá siendo constante ya que la energía potencial y cinética se habrán transformado en calor en los rieles, pero este calor no lo podremos utilizar para empujar de nuevo el vagón. La entropía de la montaña rusa habrá aumentado, lo que quiere decir que la energía se ha deteriorado, ha perdido "calidad". Esta energía térmica es la forma más degradada de energía, porque solo una pequeña parte puede transformarse en otras formas de energía.

Siguiendo desde acá por el camino del ingeniero (no olvidemos que los tres autores lo somos), y luego de haber caminado en la descripción de un físico, la energía en su forma elemental se encuentra en condición potencial o cinética. En la condición potencial, la naturaleza tiene la energía almacenada y dispuesta para ser utilizada en la producción de trabajo, como en el caso de la energía gravitacional, química o nuclear. La condición cinética corresponde a la energía en movimiento: un automóvil que se desplaza, un electrón que viaja de un punto a otro, una onda, un martillo que se dirige a un clavo en manos de un experto carpintero, una piedra recién lanzada por una catapulta, una cuchara llena de sopa que viaja haciendo