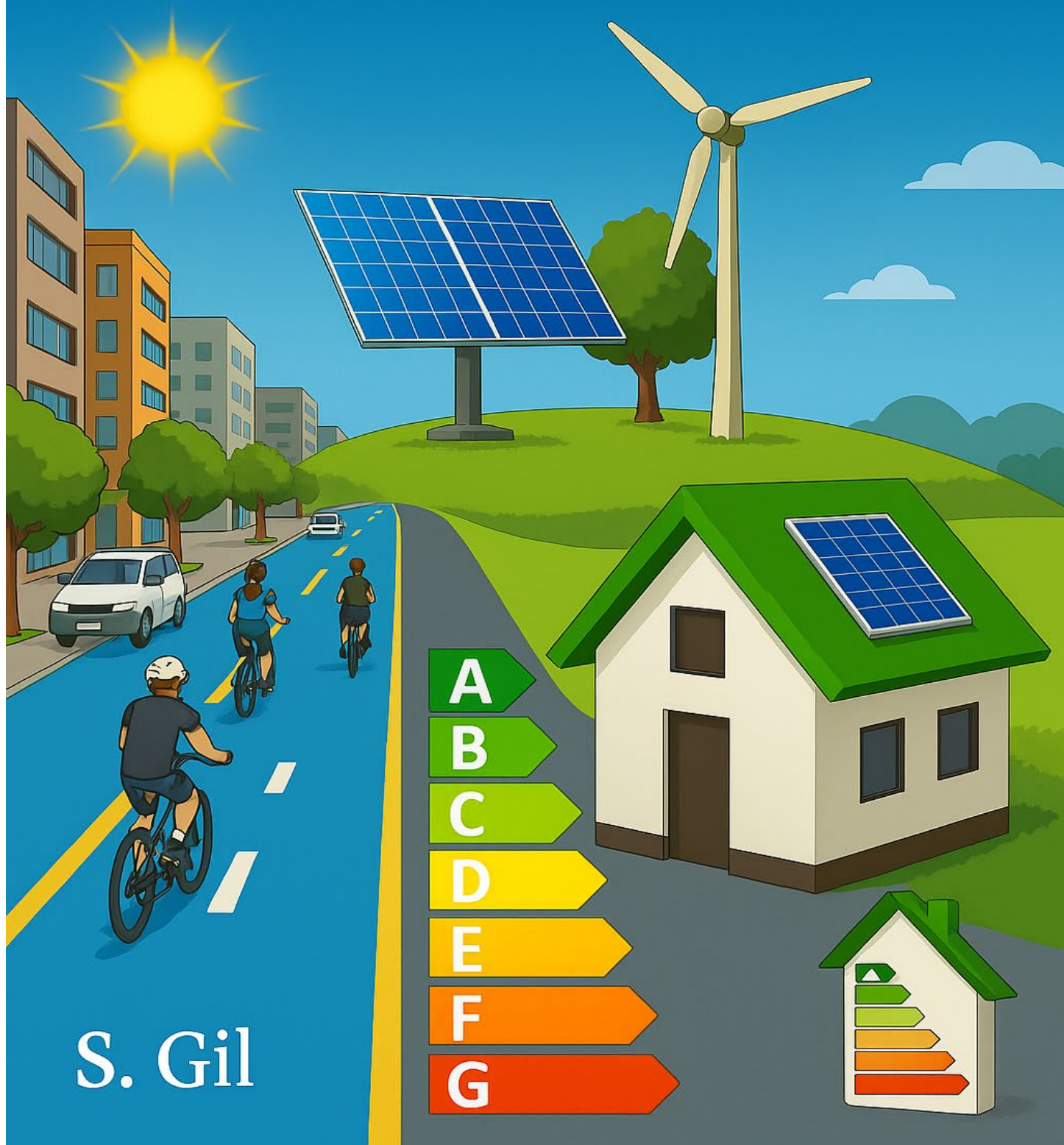


El desafío energético del siglo XXI

Energía sustentable para un nuevo siglo



S. Gil

Prólogo

La supervivencia humana depende de un suministro continuo de energía. Sin embargo, el aumento constante de la demanda plantea desafíos fundamentales: **¿cómo acceder a recursos energéticos de manera segura y asequible, minimizando su impacto ambiental y social? ¿Cómo encontrar fuentes sostenibles y utilizar la energía de forma más eficiente?**

Este libro está dirigido a lectores curiosos y estudiantes interesados en comprender el complejo panorama energético del nuevo milenio. Nuestro objetivo es presentar un enfoque accesible para quienes no poseen formación técnica específica, pero también ofrecer un análisis cuantitativo en capítulos señalados con un símbolo especial (♣), donde se abordarán ciertos temas con mayor rigor técnico.

Las decisiones que tomemos —o evitemos tomar— en los próximos años definirán el mundo que heredarán las futuras generaciones. Es imperativo que dichas decisiones sean consideradas, racionales y bien fundamentadas, alejándonos de debates emocionales que suelen confundir el panorama. Preguntas como “*¿Deberíamos seguir usando combustibles fósiles?*”, “*¿Es segura la energía nuclear?*” o “*¿Debemos permitir la minería a gran escala?*” requieren ser abordadas con datos fiables y argumentos sólidos.

El siglo XXI inició con temores sobre el agotamiento de combustibles fósiles, pero el desafío actual es aún mayor: **no nos preocupa tanto la escasez de energía, sino las devastadoras consecuencias de su uso desmedido.** El cambio climático, impulsado por esta explotación excesiva, se ha convertido en la principal amenaza. Nuestra sociedad se asemeja a Tántalo, el personaje mitológico condenado a padecer hambre y sed rodeado de frutos y agua inalcanzables. Hoy, disponemos de más recursos energéticos que nunca, pero debemos gestionarlos con extrema cautela para evitar nuestra propia autodestrucción.

La eficiencia energética se presenta como una solución clave: **reducir el consumo, ahorrar costos y mitigar el impacto ambiental**, mientras se mejora el acceso a servicios energéticos esenciales. Este libro explora cómo gestionar racionalmente nuestras fuentes de energía en distintos sectores: doméstico, industrial y de transporte, con el fin de construir un modelo más sostenible y equitativo.

En este sentido, el texto analiza exhaustivamente diversas medidas necesarias para estabilizar las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera, principal responsable del calentamiento global. Una parte del CO₂ emitido es absorbida por los océanos y la biosfera terrestre -los llamados “sumideros naturales”-, mientras que el resto permanece en la atmósfera durante siglos o incluso milenios. Para equilibrar este proceso, es imprescindible reducir las emisiones al nivel en que coincidan con la capacidad de absorción de los sumideros. Esto es posible, y en gran medida alcanzable, mediante un *uso racional y eficiente de la energía* (UREE), junto con la progresiva sustitución de los combustibles fósiles por fuentes de *energía renovables* (ER).

Sin embargo, aún enfrentamos desafíos como la **intermitencia** de las ER como la solar y la eólica. Las ER, en combinación con sistemas de almacenamiento, ofrecen una oportunidad única para lograr una transición energética sostenible, facilitando la

electrificación y la descarbonización de la sociedad y la economía. Hasta que las tecnologías de almacenamiento sean más accesibles, dependeremos de soluciones complementarias, como el gas natural, la energía nuclear y la hidroeléctrica.

Si bien la fisión nuclear no emite carbono, plantea desafíos en términos de seguridad, gestión de residuos y costos. Por su parte, la energía hidroeléctrica, aunque crucial en la matriz energética, también tiene impactos ambientales significativos que deben ser gestionados cuidadosamente. Todas estas formas de energía, junto con el uso racional y eficiente de los recursos, son herramientas fundamentales para satisfacer la creciente demanda energética sin comprometer el futuro.

El siglo XXI también trae consigo transformaciones significativas, como la electrificación de servicios, la expansión del transporte eléctrico y el avance de tecnologías como la *inteligencia artificial* (IA) y el creciente uso de *criptomonedas*. Estas tecnologías demandan grandes cantidades de energía. Asimismo, las nuevas tecnologías asociadas a la transición energética en curso, demanda de nuevos materiales estratégicos, como litio, cobre y tierras raras, cuya extracción plantea nuevos retos ambientales y sociales.

En particular, la revolución de la IA requiere grandes cantidades de energía. En ese sentido, se puede trazar una analogía con la fiebre del oro en California, los mayores beneficiarios de aquel suceso fueron los comerciantes que vendían bienes y servicios, no los mineros. Aunque algunos buscadores de oro tuvieron éxito, pocos conservaron sus riquezas debido a los altos costos de vida y distracciones como el juego y el alcohol, pero personajes asociados a otros oficios hicieron fortunas. Ejemplos destacados son Levi Strauss, quien creó los famosos pantalones Levi's y los comerciantes que revendían equipos para mineros con enormes ganancias. De allí la máxima: “durante la fiebre del oro, vende palas”. Quizás hoy la energía sea una de las “palas” de la IA.

Otro desafío crítico es estudiar y resolver es la **inclusión energética**. Actualmente, el 10% de la población mundial carece de acceso a la electricidad y cerca del 35% depende de combustibles sólidos para cocinar y calentar, lo que provoca millones de muertes anuales por contaminación del aire en interiores, afectando principalmente a mujeres y niños. Además, los sectores más vulnerables suelen destinar una mayor proporción de sus ingresos a energía y enfrentan dificultades para acceder a tecnologías más eficientes. Una transición energética justa debe, por lo tanto, **reducir las desigualdades y facilitar el acceso a los beneficios energéticos para todos**.

Finalmente, un aspecto crucial de la transición energética es la **educación**. La *transición energética* en ciernes excede por mucho a sólo un desafío tecnológico. Este emprendimiento, es también una *transformación cultural*, que requiere de un abordaje, *social, político, económico y cultural*. La sociedad debe ser consciente de las ventajas de las energías renovables y la eficiencia energética, permitiendo a los ciudadanos tomar decisiones informadas y responsables. La colaboración entre gobiernos, empresas y entidades educativas será clave para construir un futuro energético más justo, equitativo y sostenible.

Este libro es, en última instancia, una invitación a pensar y actuar con responsabilidad. La sostenibilidad energética no es una opción; es una necesidad apremiante que nos convoca a todos. Con estas páginas, esperamos no solo informar, sino también inspirar a cada lector a ser protagonista activo de un cambio imprescindible: **un**

mundo donde la energía sea un recurso accesible para todos, sin comprometer el equilibrio delicado y vital del planeta que llamamos nuestro hogar.

Solo a través de un compromiso colectivo podremos enfrentar los desafíos energéticos del nuevo milenio y asegurar un planeta habitable para las próximas generaciones.

En la mitología, Prometeo robó el fuego divino y lo entregó a los hombres, abriendo el camino de la civilización. Ese fuego no era solo calor y luz: era energía, la capacidad de transformar el mundo. Gracias a él, la humanidad pudo forjar metales, levantar ciudades e impulsar industrias. Hoy, seguimos frente al dilema prometéico: *la energía puede ser libertad, bienestar y justicia social si la usamos con responsabilidad y en armonía con la naturaleza, pero también una pesadilla si la explotamos sin conciencia.*

Ese es quizás el desafío energético del siglo XXI: honrar el legado de Prometeo, usando el fuego no para nuestra perdición, sino como herramienta de ***vida sustentable y bienestar para todos.***

Agradecimientos

Este libro es el resultado de numerosos encuentros, preguntas y aprendizajes compartidos. Si bien lleva una sola firma, es el resultado de un camino recorrido junto a muchas personas. Los estudiantes, con su curiosidad, sus dudas y su entusiasmo, fueron una fuente constante de inspiración y el verdadero motor de este proyecto.

Quiero agradecer profundamente a colegas y amigos con quienes tuve el privilegio de trabajar, debatir y aprender a lo largo de los años. El intercambio intelectual y humano con Leila Iannelli, Diana Mielnicki, Roberto Prieto, Silvina Carrizo, Damián Strier, Carlos Tanides, Raúl Zavalía, Raúl García, Italo Bove, Jorge Fiora, entre muchos otros colegas y muchísimos estudiantes que a lo largo de los años me enseñaron mucho más de lo que les puede dar. Todos ellos fueron un apoyo esencial para que este libro tomara forma.

Nada de esto habría sido posible sin mi familia. Su paciencia, acompañamiento y comprensión sostuvieron este trabajo en los momentos en que el tiempo y la energía parecían insuficientes. Muchas horas que podríamos haber compartido quedaron absorbidas por este esfuerzo. Por ello, agradezco su presencia, su compañía y su comprensión. A ellos va mi gratitud más profunda y mis disculpas por el tiempo que este libro restó a nuestra vida juntos.

Por todo ello, dedico este libro a mis queridos estudiantes y colegas, quienes me ayudaron y motivaron a escribirlo, y a mi familia, que me apoyó para lograrlo.

En especial, a

Mandy, Rodrigo y Eugenio

El desafío Energético del Siglo XXI

El desafío Energetico del Siglo XXI

Capítulo 1. La Energía a Través de la Historia	1
Capítulo 2. Panorama Energético – La Matriz Energética	21
Capítulo 3. Herramientas para Entender la Energía	45
Capítulo 4. Calorimetría y Transmisión del Calor	77
Capítulo 5. Introducción a la física térmica	101
Capítulo 6- ¿Qué es el Calentamiento Global?	143
Capítulo 7. Historia térmica de la Tierra	165
Capítulo 8. Eficiencia energética I: Acondicionamiento térmico de una vivienda	203
Capítulo 9. Eficiencia energética II – Sector Doméstico	231
Capítulo 10. Eficiencia energética III – UREE y Política Pública	293
Capítulo 11. Acceso a la Energía y Pobreza Energética	321
Capítulo 12. Movilidad Sustentable	335
Capítulo 13. Combustibles fósiles	381
Capítulo 14. Introducción a la Energía Solar	411
Capítulo 15. Introducción a la Energía Eólica	463
Capítulo 16. Introducción a la Energía Hidroeléctrica	491
Capítulo 17. Energía Nuclear	513
Capítulo 18. Biocombustibles	539
Capítulo 19. Geotermia, energía del mar y captura de carbono	573
Capítulo 20. Hidrógeno - Potencial como vector energético y almacenamiento	605
Capítulo 21. Transporte y Distribución de la energía	619
Capítulo 22. Modelo simple de proyección de la demanda de gas natural	641
Capítulo 23. Sistemas de Almacenamiento de Energía	661
Capítulo 24. Data Centers	673
Apéndice A. El Futuro de la Población	677
Apéndice B. Auditorias energética	689
Apéndice C. Densidad de Energía y Densidad de Potencia	699
Índice Alfabético	711

Foreword

Human survival depends on a continuous supply of energy. However, the ever-increasing demand poses fundamental challenges: how can we access energy resources safely and affordably, minimizing their environmental and social impact? How can we develop sustainable sources and, above all, learn to use energy more efficiently?

This book is intended for curious readers and students who wish to understand the complex energy landscape of the new millennium. It is written to be accessible to those without formal technical training, while also offering a more quantitative treatment in chapters marked with a special symbol (♣), where selected topics are addressed with greater technical rigor.

The decisions we make—or fail to make—in the coming years will shape the world that future generations inherit. These decisions must be thoughtful, rational, and grounded in evidence, rather than driven by emotion or ideology, which too often obscure the real issues. Questions such as *Should we continue using fossil fuels? Is nuclear energy safe? Should large-scale mining be allowed?* cannot be answered with slogans; they demand reliable data and well-founded arguments.

At the beginning of the 21st century, concerns focused on the eventual *depletion of fossil fuels*. Today, the challenge is even more serious: the problem is not so much energy scarcity as the profound *consequences of its excessive use*. *Climate change*, driven by this overexploitation, has become the dominant global threat. In this sense, our society resembles Tantalus, the mythological figure condemned to hunger and thirst while surrounded by unreachable fruit and water. We now possess more energy resources than ever before yet must manage them with extreme care to avoid self-inflicted harm.

Energy efficiency emerges as a central component of the solution: reducing consumption, lowering costs, and mitigating environmental impacts, while improving access to essential energy services. This book explores how energy can be managed rationally and efficiently across key sectors—households, industry, and transportation—to build a more sustainable and equitable energy system.

Accordingly, the text analyzes in detail the measures required to stabilize atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentrations, the main driver of global warming. A portion of emitted CO₂ is absorbed by oceans and terrestrial ecosystems—the so-called *natural sinks*—while the remainder persists in the atmosphere for centuries, or even millennia. Stabilization requires reducing emissions to levels compatible with the absorption capacity of these sinks. This goal could be largely achievable through rational and efficient energy use (UREE), combined with the gradual replacement of fossil fuels by renewable energy sources (RE).

Renewable energy sources such as solar and wind, however, face the challenge of *intermittency*. When combined with *energy storage systems*, they offer a unique opportunity to advance a sustainable energy transition, enabling electrification and deep decarbonization of both society and the economy. Until storage technologies become widely available and affordable, complementary sources—such as natural gas, nuclear power, and hydropower—will continue to play an important role.

Nuclear fission, while virtually carbon-free in operation, raises concerns related to safety, waste management, and cost. *Hydropower*, although a cornerstone of many energy systems, can also have significant environmental and social impacts that require careful management. All these sources, together with rational and efficient energy use, constitute essential tools for meeting growing demand without compromising the future.

The 21st century is also marked by profound technological transformations: the *electrification of services*, the expansion of electric mobility, and the rapid development of technologies such as artificial intelligence (AI) and cryptocurrencies. These advances demand enormous amounts of energy. At the same time, the energy transition itself relies on new strategic materials—lithium, copper, and rare earth elements—whose extraction introduces new environmental, economic, and social challenges.

The *AI revolution* is extraordinarily *energy intensive*. In this respect, a parallel can be drawn with the California Gold Rush: the greatest fortunes were not made by most of the miners, but by those who supplied tools, services, and infrastructure. While a few prospectors struck it rich, many were undone by high costs and distractions, whereas those supporting the system accumulated lasting wealth. Energy, once again, lies quietly at the center of the story.

The Energy Challenge of the 21st Century

- Chapter 1. Energy Through History
- Chapter 2. Energy Overview – The Energy Matrix
- Chapter 3. Energy Indicators –Energy Systems
- Chapter 4. Calorimetry and Heat Transfer
- Chapter 5. Introduction to Thermal Physics
- Chapter 6. What is Global Warming?
- Chapter 6. What is Global Warming?
- Chapter 7. Earth's Thermal History
- Chapter 8. Energy Efficiency II: The Necessary Change
- Chapter 9. Thermal Conditioning of a Home
- Chapter 10. Access to Energy and Energy Poverty
- Chapter 11. Sustainable Mobility
- Chapter 12. Fossil Fuels
- Chapter 13. Introduction to Solar Energy
- Chapter 14. Introduction to Wind Energy
- Chapter 15. Introduction to Hydroelectric Energy
- Chapter 16. Nuclear Energy

Chapter 17. Energy Transmission and Distribution
Chapter 18. Simple Model for Projecting Natural Gas Demand
Chapter 19. Energy Storage Systems
Chapter 20. Geothermal Energy, Ocean Energy, and Carbon Capture
Chapter 21. Hydrogen - Potential as an Energy Carrier and Storage
Chapter 22. Data Centers
Appendix A. The Future of the Population
Appendix B. Energy Audits
Appendix C. Energy Density and Power Density



Prometeo, después de robar el fuego divino se lo hizo conocer a los humanos. En castigo Zeus lo encadenó en una montaña del Cáucaso donde diariamente un buitre le devoraba el hígado, que luego volvía a crecerle.