

Termodinámica de la Conversión de Energía en Argentina

Dr. Pablo S. Gauna

Índice general

Prólogo	1
El Enfoque Pedagógico de Este Libro	3
I Generación de potencia y conceptos fundamentales	7
1. Introducción a la generación de potencia	9
1.1. Sobre la generación de potencia	9
1.2. Contexto histórico y evolución tecnológica	10
1.3. Cómo se produce la energía eléctrica	10
1.4. Centrales alternativas y energías renovables	11
1.5. Generación de potencia en Argentina y el mundo	12
1.6. Termodinámica e Ingeniería de Proceso	15
2. Conceptos Fundamentales	17
2.1. Objetivos de este capítulo	17
2.2. Introducción: Central Térmica	17
2.3. Sistema abierto o volumen de control	18
2.3.1. Lo que tenés que saber sobre los sistemas abiertos	19
2.3.2. Otros sistemas	20

2.4. Balance de materia	20
2.4.1. Estado transitorio: fase de llenado	20
2.4.2. Estado estacionario: operación en régimen permanente	21
2.4.3. Necesidad de una descripción en términos de flujo	21
2.4.4. Caudal másico	21
2.4.5. Planteo general del balance de materia	22
2.4.6. Formalismo matemático del balance de materia	22
2.5. Balances de energía	24
2.5.1. El Primer Principio	24
2.5.2. La ecuación del Primer Principio para sistemas abiertos	25
2.5.3. Ejemplo: Balance de materia y energía en la Central Térmica Güemes	26

Prólogo

Prólogo

Si bien en ingeniería la Termodinámica no es una herramienta específica de diseño, abarca los conceptos indispensables para comprender, optimizar y mejorar cualquier sistema energético o industrial. Desde la generación de potencia hasta el diseño de procesos químicos, refrigeración, climatización y almacenamiento de energía, la Termodinámica actúa como el lenguaje universal que conecta las leyes fundamentales de la naturaleza con aplicaciones prácticas en el mundo real.

En un mundo globalizado, donde las soluciones tecnológicas y energéticas suelen diseñarse bajo estándares internacionales, es fácil perder de vista la importancia de adaptar estos conocimientos a las realidades locales. Este libro nace con la convicción de que la Termodinámica no es solo *la rama de la Física que estudia la energía y sus transformaciones*, sino también una herramienta poderosa para abordar desafíos concretos en nuestro entorno inmediato. Más allá de ser una ciencia abstracta, la Termodinámica nos permite interpretar fenómenos cotidianos y complejos, desde el funcionamiento de una simple cafetera hasta el diseño de centrales eléctricas que alimentan ciudades enteras.

El enfoque local escogido para este texto es más que una estrategia pedagógica: es una declaración de principios. Al centrar este libro en ejemplos, casos de estudio y aplicaciones relevantes para nuestra región, buscamos resaltar cómo los ingenieros, técnicos y científicos pueden convertirse en *agentes críticos y transformadores* de su entorno. Aquí no se trata de aplicar fórmulas aprendidas de memoria, sino de *leer el mundo energético* para luego transformarlo. Esta idea —central en la pedagogía de Paulo Freire— guía nuestro propósito: la educación no debe depositar conocimientos en mentes pasivas, sino despertar la capacidad de cuestionar, crear y actuar con autonomía.

La soberanía energética, por ejemplo, no es solo un tema político, sino también técnico. Depender de tecnologías importadas o de combustibles externos limita nuestra capacidad de decisión como Nación. Por ello, este libro invita a reflexionar: ¿cómo podemos diseñar, optimizar y gestionar sistemas que aprovechen los recursos disponibles localmente, promoviendo así una mayor independencia energética y económica? La respuesta no está en manuales extranjeros, sino en la articulación entre conocimiento científico riguroso y

saberes arraigados en nuestra tierra.

Además, la Termodinámica ofrece un marco conceptual que permite evaluar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas existentes, identificando oportunidades para innovar y reducir dependencias externas. En este sentido, el uso de fuentes renovables como la energía solar, eólica o hidráulica no solo se justifica por su menor impacto ambiental, sino también por su potencial para democratizar el acceso a la energía, especialmente en comunidades rurales o remotas donde las infraestructuras tradicionales son insuficientes o inexistentes. Así, la técnica se vuelve política: no se trata solo de eficiencia, sino de justicia energética.

La profesión de Ingeniero de Procesos —con la Termodinámica como una de sus herramientas fundamentales— tiene un rol crucial en la generación de empleo y el fortalecimiento de las economías locales. Las centrales térmicas, hidroeléctricas y nucleares, así como las plantas de tratamiento de aire y los sistemas frigoríficos, son infraestructuras que requieren mano de obra calificada, pensamiento crítico y compromiso con el entorno. Al formar profesionales capaces de entender y mejorar estos sistemas desde una perspectiva local y crítica, no solo creamos oportunidades laborales, sino que fomentamos una cultura de innovación, autosuficiencia y dignidad técnica.

Finalmente, este libro no pretende ser un mero compendio de ecuaciones y gráficos. Más bien, busca inspirar a los lectores a asumir su rol como sujetos activos del cambio. La ciencia, cuando se ejerce con conciencia social y ambiental, se convierte en una fuerza poderosa para el bien común. Desde la reducción de emisiones contaminantes hasta la implementación de tecnologías limpias y renovables, cada paso hacia una mayor eficiencia energética es, también, un paso hacia un mundo más justo y equitativo.

Este texto es, en suma, una invitación a mirar más allá de las fórmulas: a ver en ellas no solo leyes físicas, sino posibilidades de construcción colectiva. Arraigado en nuestras raíces locales, pero con la mirada puesta en el horizonte global, este libro aspira a formar no solo ingenieros competentes, sino ciudadanos conscientes, capaces de transformar la realidad desde la ética del trabajo técnico y la solidaridad social.

El Enfoque Pedagógico

Cómo Aprende el Cerebro

El cerebro humano no aprende de manera lineal, como si estuviera siguiendo una receta paso a paso. Más bien, funciona de forma asociativa e integradora, conectando nuevas ideas con conocimientos previos y estableciendo redes de significado. Este proceso natural de aprendizaje nos lleva a comprender mejor los conceptos cuando podemos ver “el panorama completo” antes de profundizar en los detalles.

Por desgracia, muchos libros de texto tradicionales adoptan un enfoque opuesto: comienzan con definiciones formales y conceptos específicos, dejando al lector sin un marco general que le permita entender por qué esos detalles son importantes. Este método puede resultar frustrante, especialmente para estudiantes que están dando sus primeros pasos en una disciplina compleja como la Termodinámica.

Este libro se diferencia precisamente en este aspecto: *comienza con lo general y avanza hacia lo particular*, siguiendo un patrón que responde al modo natural en que el cerebro aprende. Al presentar primero una visión global de los temas, se proporciona un contexto claro y motivador. Luego, gradualmente, se profundiza en los detalles técnicos, permitiendo que cada nuevo concepto se integre de manera fluida en el marco conceptual ya establecido.

La Analogía del Rompecabezas

Imaginate que te entregan un rompecabezas sin la imagen de referencia en la caja. Podrías comenzar a armarlo pieza por pieza, pero sin conocer el resultado final: el proceso sería, cuanto menos, frustrante. Ahora pensá qué pasaría si vieras primero la imagen completa: inmediatamente podés identificar patrones, colores y formas que te ayudan a conectar las piezas más fácilmente.

De la misma manera, este libro comienza mostrándote la imagen completa del tema prin-

cipal (Plantas de generación de potencia) antes de profundizar en los detalles científicos rigurosos como conceptos abstractos y deducciones matemáticas. Esto permite que cada nuevo concepto se integre fluidamente en el marco conceptual ya establecido, facilitando un aprendizaje más profundo y significativo.

La Analogía del Mapa

Otra forma de entender este enfoque es imaginar que estás explorando una ciudad desconocida. Si lo haces sin una guía o referencia, podrías perderte fácilmente en callejones sin salida o dar vueltas innecesarias. Sin embargo, contar con una visión general de la ciudad —sus calles principales, puntos de referencia y conexiones clave— te permite planificar tu ruta, identificar destinos importantes y avanzar con confianza hacia tu objetivo. Del mismo modo, este libro te ofrece una visión panorámica de los temas termodinámicos, actuando como una brújula que orienta tu aprendizaje y asegura que siempre tengas presente el rumbo hacia el objetivo final.

El Cerebro como Red Neuronal

Desde una perspectiva neurocientífica, el aprendizaje ocurre gracias a la plasticidad cerebral, es decir, la capacidad del cerebro para reorganizar sus conexiones neuronales en respuesta a nuevas experiencias Kandel et al., 2013. Cuando aprendemos algo nuevo, las neuronas forman nuevas sinapsis o refuerzan las existentes, creando redes neuronales más robustas. Estas redes no son lineales; están interconectadas y dependen de contextos previos.

Por ejemplo, cuando estudias un concepto complejo como la Segunda Ley de la Termodinámica, tu cerebro lo relaciona automáticamente con ideas previas sobre energía, calor y entropía. Este proceso de conexión es más efectivo cuando tienes un marco general que te permita contextualizar esos detalles. Este libro aprovecha esta característica del cerebro al proporcionar una visión panorámica desde el principio.

El Papel de la Memoria Semántica

La memoria semántica, que almacena conocimientos generales y conceptuales, juega un papel crucial en el aprendizaje. Según Baddeley, 2000, esta memoria organiza la información en categorías y jerarquías, facilitando su recuperación cuando es necesaria. Al presentar primero los conceptos generales de la Termodinámica, este libro apoya el desarrollo

de una memoria semántica sólida, lo que permite a los estudiantes acceder rápidamente a los detalles específicos cuando sea necesario.

El Error como Herramienta de Aprendizaje

Las neurociencias también han demostrado que los errores son fundamentales para el aprendizaje. Cuando cometemos un error, nuestro cerebro activa mecanismos de corrección que fortalecen las conexiones neuronales involucradas (Dweck, 2006). Este libro fomenta un enfoque basado en el ensayo y el error, invitando a los lectores a formular preguntas, explorar conceptos y aprender de sus equivocaciones. Así, el proceso de aprendizaje se convierte en una experiencia dinámica y enriquecedora.

El Aprendizaje como Proceso Activo

Es importante destacar que el aprendizaje no es un proceso pasivo. No basta con leer este libro o cualquier otro texto para adquirir conocimientos profundos. El aprendizaje es un proceso activo que requiere compromiso tanto por parte del estudiante como del docente. Por más que un texto esté cuidadosamente estructurado, con analogías claras, ejemplos prácticos y un enfoque pedagógico basado en cómo aprende el cerebro, el éxito del aprendizaje depende en gran medida del esfuerzo personal.

Para los estudiantes, esto significa dedicar tiempo a reflexionar sobre los conceptos, hacer preguntas críticas y aplicar lo aprendido en problemas del mundo real. Para los docentes, implica guiar a los estudiantes a través de este proceso, proporcionando herramientas y oportunidades para que exploren y construyan su propio entendimiento.

Sin estudio activo, sin curiosidad genuina y sin un compromiso constante con el aprendizaje, incluso el libro mejor diseñado no logrará su propósito. El aprendizaje no es algo que se "recibe", sino algo que se "construye". Este libro está aquí para acompañarte en ese proceso, pero el trabajo principal depende de vos.

Por Qué Este Libro Es Diferente

Este libro está diseñado no solo para enseñar Termodinámica, sino para acompañarte en tu proceso de aprendizaje imitando la forma en que el cerebro realmente aprende: **de manera no lineal, integradora y contextual**. Al invertir tiempo en mostrar primero el

bosque antes de adentrarnos en los árboles, esperamos que este texto sea una herramienta más efectiva y amigable para quienes buscan dominar esta fascinante disciplina.

Este enfoque tiene varias ventajas:

- ****Facilita la conexión entre conceptos**:** Al partir de ideas amplias, los lectores pueden relacionar fácilmente los detalles específicos con el objetivo final, lo que refuerza la comprensión.
- ****Promueve el pensamiento crítico**:** Cuando los estudiantes comprenden el "para qué." antes del "cómo", están mejor equipados para cuestionar y reflexionar sobre lo que están aprendiendo.
- ****Reduce la sobrecarga cognitiva**:** Presentar demasiados detalles técnicos desde el principio puede abrumar al lector. Empezar con una visión general ayuda a organizar la información de manera más accesible.
- ****Fomenta la curiosidad**:** Mostrar el "final del viaje" desde el principio invita a los lectores a hacer preguntas y buscar respuestas a medida que avanzan.

En resumen, este libro busca ser más que un simple manual técnico. Es una guía que acompaña al lector en un viaje de descubrimiento, utilizando analogías, ejemplos prácticos y un enfoque pedagógico basado en cómo aprende realmente el cerebro. Al priorizar el contexto y la conexión entre conceptos, esperamos que este texto inspire tanto a estudiantes como a docentes a abordar la Termodinámica con una mentalidad crítica, curiosa y creativa.

Parte I

Generación de potencia y conceptos fundamentales

Capítulo 1

Introducción a la generación de potencia

1.1. Sobre la generación de potencia

Cuando hablamos de generación de potencia en este libro, nos referimos específicamente a la **generación de potencia eléctrica**, un elemento esencial para las actividades industriales, el transporte, las comunicaciones y la vida cotidiana. Casi nada funciona sin ella, lo que la convierte en uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico y social de una región.

En el ámbito industrial, la generación de potencia eléctrica es crucial para procesos productivos que requieren grandes cantidades de energía. Por ejemplo, industrias como la fabricación de productos químicos, la refinación de petróleo y la producción de acero dependen directamente de un suministro confiable y eficiente de electricidad. Estas actividades no solo impulsan la economía, sino que también son vitales para mantener la infraestructura moderna.

Por otro lado, en el contexto social, la electricidad es indispensable para garantizar la calidad de vida. Proporciona iluminación, calefacción, refrigeración y acceso a tecnologías modernas que mejoran el bienestar de las personas. Desde el hogar hasta las instituciones educativas y de salud, la electricidad es un recurso básico que sustenta prácticamente todos los aspectos de la vida contemporánea.

1.2. Contexto histórico y evolución tecnológica

La historia de la generación de potencia está íntimamente ligada al desarrollo de la humanidad. Durante la Revolución Industrial, la invención de la máquina de vapor marcó un hito fundamental, permitiendo la mecanización de procesos que antes dependían de la fuerza humana o animal. Este avance sentó las bases para la creación de las primeras centrales eléctricas a finales del siglo XIX, que utilizaban carbón como combustible principal.

A lo largo del siglo XX, la tecnología de generación de potencia evolucionó rápidamente. Se desarrollaron centrales hidroeléctricas, que aprovechan la energía potencial del agua, y centrales térmicas, que utilizan combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural. En la segunda mitad del siglo, la energía nuclear emergió como una fuente de potencia capaz de generar grandes cantidades de energía con un bajo costo de combustible, aunque con desafíos significativos en términos de seguridad y gestión de residuos (Smith et al., 2020).

En las últimas décadas, el enfoque se ha desplazado hacia las energías renovables, como la eólica, la solar y la geotérmica, en respuesta a la creciente preocupación por el cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Pérez y López, 2021). Estas tecnologías representan el futuro de la generación de potencia, prometiendo un suministro energético más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

1.3. Cómo se produce la energía eléctrica

La generación de electricidad se lleva a cabo mediante un dispositivo conocido como *generador eléctrico*, cuyo funcionamiento se basa en el principio de inducción electromagnética. Este fenómeno, descubierto por Michael Faraday en el siglo XIX, establece que cuando existe un movimiento relativo entre un conductor y un campo magnético, se induce una corriente eléctrica en dicho conductor.

En términos prácticos, un generador eléctrico está compuesto por un conjunto de bobinas de alambre, llamadas espiras, que actúan como conductores. Estas espiras giran dentro de un campo magnético generado por imanes permanentes o electroimanes. El movimiento relativo entre el campo magnético y las espiras genera una diferencia de potencial (voltaje) en los extremos del conductor, lo que permite el flujo de electrones y, consecuentemente, la producción de electricidad.

Ahora bien, ¿qué relación tiene este fenómeno electromagnético con la Ingeniería de Pro-

cesos? La conexión surge al analizar cómo se genera el movimiento relativo necesario entre el conductor y el campo magnético. En las plantas generadoras de electricidad, este movimiento es proporcionado por una turbina, que es un dispositivo mecánico que actúa como un "motor" para el generador.

Las turbinas pueden ser impulsadas por diferentes medios lo que define el tipo de central eléctrica:

- **Centrales hidroeléctricas:** En estas instalaciones, el agua fluye a través de la turbina en estado líquido, aprovechando la energía potencial gravitatoria del agua almacenada en embalses.
- **Centrales térmicas:** Aquí, el agua se convierte en vapor mediante calor generado por la combustión de combustibles fósiles (como carbón, petróleo o gas natural). El vapor resultante impulsa la turbina.
- **Centrales nucleares:** En este caso, el calor necesario para vaporizar el agua proviene de reacciones nucleares en un reactor, donde se libera energía mediante fisión atómica.
- **Turbina de gas:** En estas centrales, los gases producto de una combustión (principalmente aire caliente) son los responsables de mover la turbina. Este tipo de tecnología es común en aplicaciones industriales y aeroespaciales.

En resumen, el proceso de generación de electricidad combina principios fundamentales de la física (inducción electromagnética) con ingeniería aplicada (turbinas y sistemas de conversión de energía). Cada tipo de central eléctrica utiliza una fuente de energía primaria distinta para impulsar la turbina, lo que determina su diseño, eficiencia y impacto ambiental.

1.4. Centrales alternativas y energías renovables

En contraste con las centrales térmicas previamente descriptas (llamadas *convencionales*), que dependen de combustibles fósiles o nucleares, las **centrales alternativas** utilizan fuentes de energía renovable para generar electricidad, reduciendo significativamente el impacto ambiental (con otros problemas asociados, por supuesto). Entre las más destacadas se encuentran las centrales eólicas, solares fotovoltaicas, solares termoeléctricas y las centrales geotérmicas.

En una central eólica, la energía cinética del viento mueve las aspas de un aerogenerador, cuyo eje está conectado a un generador eléctrico. Por su parte, las centrales solares

fotovoltaicas convierten directamente la luz solar en electricidad mediante paneles compuestos de células fotovoltaicas, mientras que las solares termoeléctricas utilizan espejos o lentes para concentrar la radiación solar y calentar un fluido, generando vapor que impulsa una turbina. Finalmente, las centrales geotérmicas aprovechan el calor proveniente del interior de la Tierra para producir vapor que activa un generador. Estas tecnologías no solo son sostenibles, sino que también representan una transición hacia un modelo energético más limpio y eficiente, aunque presentan desafíos como la intermitencia de la fuente (en el caso del viento y el sol) o los altos costos iniciales de instalación.

1.5. Generación de potencia en Argentina y el mundo

En Argentina, la matriz energética es diversa y refleja tanto las riquezas naturales del país como las decisiones políticas y económicas que han guiado su desarrollo. Según datos recientes de la Secretaría de Energía de la Nación (Energía de la Nación Argentina, 2022), la potencia instalada total en Argentina es de aproximadamente 42.000 MW, distribuida de la siguiente manera:

- **Energía térmica:** Representa alrededor del 60 % de la capacidad instalada, con una potencia de aproximadamente 25.200 MW. Las centrales térmicas utilizan principalmente gas natural, carbón y combustibles líquidos.
- **Energía hidroeléctrica:** Contribuye con aproximadamente el 25 % de la capacidad, con una potencia de 10,500 MW. Centrales como Yacyretá y El Chocón son ejemplos destacados.
- **Energía nuclear:** Representa cerca del 5 % de la capacidad, con una potencia de 1.800 MW, proveniente de las centrales Atucha I, Atucha II y Embalse.
- **Energías renovables:** Aportan alrededor del 10 % de la capacidad, con una potencia de 4.200 MW. Esto incluye energía eólica, solar, biomasa y pequeñas centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas, como Yacyretá y El Chocón, han sido históricamente una fuente importante de energía, aprovechando los recursos hídricos del país. Las centrales térmicas, que utilizan gas natural y combustibles líquidos, también juegan un papel crucial, especialmente en regiones donde no es viable la generación hidroeléctrica (Energía de la Nación Argentina, 2022).

En los últimos años, Argentina ha dado pasos significativos hacia la incorporación de energías renovables. Proyectos como el Parque Eólico Rawson y el Parque Solar Caucharí

han demostrado el potencial del país para generar energía limpia y reducir su dependencia de los combustibles fósiles (Energías Renovables (CADER), 2023). Además, las centrales nucleares de Atucha I, Atucha II y Embalse continúan siendo una parte importante de la matriz energética, proporcionando una fuente estable y confiable de energía (Argentina, 2023). Más detalles sobre las plantas generadoras de potencia se encuentran en las Tablas 1.1, 1.2, 1.3, 1.4.

A nivel mundial, la generación de potencia está experimentando una transformación sin precedentes. Países como Alemania, China y Estados Unidos están invirtiendo fuertemente en energías renovables, mientras que otros, como Francia, mantienen un enfoque significativo en la energía nuclear ((IEA), 2023). La transición hacia una economía baja en carbono es un desafío global que requiere innovación, cooperación internacional y políticas públicas efectivas.

Tabla 1.1: Tabla de centrales térmicas

Nombre	Ubicación	Combustible	Tipo de ciclo	Potencia (MW)
Central Termoeléctrica Manuel Belgrano	Campana (Bs. As.)	Gas natural	Combinado	830
Central Térmica Güemes	Güemes (Salta)	Gas natural	Turbina de gas	120
Central Térmica Brigadier López	Santa Fe	Gas natural	Rankine	540
Central Térmica San Nicolás	San Nicolás (Bs. As.)	Carbón	Rankine	650
Central Térmica Luján de Cuyo	Mendoza	Gas natural	Combinado	520
Central Costanera	Buenos Aires	Gas natural	Combinado	1,260
Central Térmica Genelba	Buenos Aires	Gas natural	Combinado	700
Central Térmica Piedra Buena	Río Negro	Gas natural	Turbina de gas	240

Tabla 1.2: Principales centrales hidroeléctricas en Argentina

Nombre	Ubicación	Tipo	Potencia (MW)
Yacyretá	Corrientes/Misiones	Embalse	3,100
El Chocón	Neuquén	Embalse	1,200
Salto Grande	Entre Ríos	Embalse	1,890
Piedra del Águila	Neuquén	Embalse	1,400
Alicurá	Neuquén	Embalse	1,050
Embalse Río Tercero	Córdoba	Embalse	350
Los Reyunos	Mendoza	Embalse	200

Tabla 1.3: Principales centrales nucleares en Argentina

Nombre	Ubicación	Tipo de reactor	Tipo de ciclo	Potencia (MW)
Atucha I	Lima, Buenos Aires	PHWR	Ciclo Rankine	362
Atucha II	Lima, Buenos Aires	PHWR	Ciclo Rankine	745
Embalse	Embalse, Córdoba	PHWR	Ciclo Rankine	683

Tabla 1.4: Principales plantas de energías renovables en Argentina

Nombre	Ubicación	Tipo	Potencia (MW)
Parque Eólico Rawson	Chubut	Eólica	108
Parque Eólico Arauco	La Rioja	Eólica	100
Parque Solar Caucharí	Jujuy	Solar	300
Parque Solar Ullum	San Juan	Solar	5
Central Térmica Biomasa	Villa María, Córdoba	Biomasa	12
Parque Eólico Pomona	Chubut	Eólica	200
Parque Solar Pilar	Buenos Aires	Solar	50

1.6. Termodinámica e Ingeniería de Proceso

En el contexto arriba descripto, la Termodinámica juega un papel fundamental, especialmente para los **ingenieros de proceso**, quienes son responsables de diseñar, optimizar, operar y supervisar los sistemas de generación de potencia. Estos profesionales deben comprender en profundidad los principios termodinámicos que rigen la conversión de energía, ya que su trabajo implica desde la selección de tecnologías y combustibles hasta la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones contaminantes (Moran et al., 2018).

Para los ingenieros de proceso, la termodinámica no es solo una disciplina teórica, sino una herramienta práctica que les permite:

- **Diseñar ciclos termodinámicos eficientes:** Como los ciclos Rankine en centrales térmicas y nucleares, o los ciclos combinados en plantas de cogeneración (Cengel y Boles, 2019).
- **Optimizar el uso de recursos:** Maximizando la eficiencia de los procesos y minimizando el desperdicio de energía.
- **Evaluar el impacto ambiental:** Analizando las emisiones de gases de efecto invernadero y proponiendo soluciones sostenibles.
- **Integrar nuevas tecnologías:** Como la captura de CO₂, el hidrógeno verde y el almacenamiento de energía, que son clave para la transición energética (Jones y Taylor, 2019).

Este libro está dirigido específicamente a los ingenieros de proceso, ofreciendo un enfoque práctico y aplicado de la termodinámica en el ámbito de la generación de potencia. A través de ejemplos concretos, casos de estudio y problemas resueltos, se busca proporcionar las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos actuales y futuros de la industria energética, con un énfasis especial en las realidades locales de Argentina.

Capítulo 2

Conceptos Fundamentales

2.1. Objetivos de este capítulo

En este capítulo, abordaremos los conceptos fundamentales de **sistema**, **balance de materia** y **balance de energía**, aplicándolos al funcionamiento de una central térmica. En lugar de presentar definiciones abstractas desde el inicio, analizaremos cómo estos principios se aplican en la generación de electricidad, para finalmente formalizar los conceptos clave.

2.2. Introducción: Central Térmica

En capítulos previos **¿CUAL?**, mencionamos que una central térmica es aquella que impulsa la turbina con vapor de agua, el cual se produce gracias al calor generado al quemarse (oxidarse) un combustible fósil como gas, petróleo, carbón. Veamos entonces las etapas básicas de una central térmica, como se muestra en la Figura 2.1:

- **Vaporización del agua:** Una corriente de agua se vaporiza gracias al calor producido por la combustión. El agua circula por un conjunto de cañerías que atraviesan una caldera, donde ocurre la combustión.
- **Expansión del vapor:** El vapor generado en la caldera (que tiene alta temperatura y presión) se dirige mediante cañerías a la turbina. Allí, el vapor mueve los álabes de este dispositivo, transformando la energía acumulada en el fluido en energía mecánica (de movimiento).
- **Condensación del vapor:** El vapor que abandona la turbina (con baja presión y

temperatura) se dirige a un intercambiador de calor, donde se condensa por completo al retirarle parte de su energía, mediante una corriente de refrigerante provista por una torre de enfriamiento o tomada de un cauce de agua natural directamente).

- **Bombeo del agua:** El agua en estado líquido se bombea a alta presión para reingresar a la caldera, continuando así el ciclo de manera cíclica.

El agua que circula a través de los dispositivos (caldera, turbina, condensador y bomba) es la encargada de realizar el transporte de la energía (se lleva la energía de la combustión y la deja en la turbina). En este caso, el agua recibe el nombre de *fluído de trabajo* o *fluído intermediario*

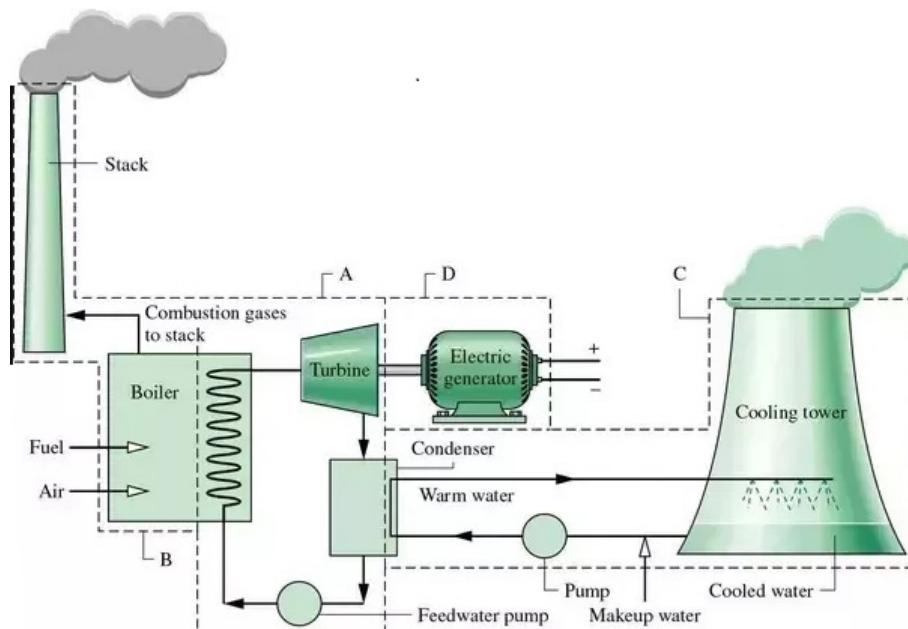


Figura 2.1: Procesos básicos involucrados en una central térmica.

2.3. Sistema abierto o volumen de control

Teniendo en mente el funcionamiento de una central térmica, supongamos que queremos analizar termodinámicamente el agua que circula por una cañería dentro de la caldera. Para ello, tracemos una línea imaginaria que abarque esa cañería, como se muestra en la Figura 2.2 (recuadro rojo). Esta elección nos permite definir tres regiones:

- La región dentro del recuadro, que es el objeto de nuestro análisis y recibirá el nombre de **sistema**.
- La región fuera del recuadro, que interactúa con el sistema que llamaremos **medio** o **entorno**

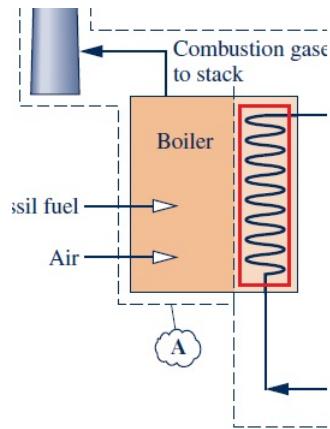


Figura 2.2: Elección de un sistema.

- La línea que delimita el recuadro, que separa el sistema del medio llamad **límite o frontera**.

Si observamos el recuadro rojo (el límite del sistema), notaremos que hay una corriente de agua que entra y sale de él, lo que significa que la región es atravesada por una cantidad determinada de materia. A este tipo de sistema se lo conoce como **sistema abierto** o **volumen de control**. Además, dado que el agua se vaporiza gracias al calor de la combustión, el sistema también intercambia energía con el medio.

Podemos entonces establecer la siguiente definición:

Sistema Abierto

Un sistema abierto o **volumen de control** es una región del espacio seleccionada para su análisis, a través de cuya frontera puede existir flujo de masa además de energía.

2.3.1. Lo que tenés que saber sobre los sistemas abiertos

Las definiciones académicas son importantes, pero lo esencial es aprender a aplicar estos conceptos en la resolución de problemas. Para ello, tené en cuenta lo siguiente:

1. En términos matemáticos, al definir un sistema termodinámico estamos definiendo un sistema de ecuaciones que nos permita (o no) resolver un problema. En otras palabras, si el sistema termodinámico no está bien definido, probablemente tendremos más incógnitas que ecuaciones.
2. La selección del sistema es clave en el análisis termodinámico; desarrollar criterio para elegirlo es parte fundamental del aprendizaje.

3. Inicialmente, este criterio se adquiere mediante prueba y error.
4. La elección del sistema no tiene que coincidir con algo físico: en este caso, elegimos la cañería dentro de la caldera, pero podríamos haber seleccionado toda la caldera, la turbina, el condensador, la bomba o toda la central o la mitad de esta.

2.3.2. Otros sistemas

Además de los sistemas abiertos, hay otros dos tipos: el sistema cerrado y el sistema aislado.

El sistema cerrado es aquel a través de cuyos límites hay intercambio de energía, pero no de materia. Es decir, la cantidad de masa en su interior no cambia.

Por su parte, el sistema aislado es aquel en el que no hay intercambios ni de materia ni de energía con el medio. Este sistema, que a simple vista parece inútil desde el punto de vista termodinámico, se emplea para definir el estado de equilibrio de un sistema. **donde ampliamos esto?**

2.4. Balance de materia

El balance de materia constituye uno de los pilares fundamentales en el estudio de los sistemas termodinámicos y de los procesos de ingeniería química. En términos prácticos, puede interpretarse como un proceso de contabilidad en el que se registran las masas que ingresan a un sistema, las que egresan y la masa que permanece dentro de sus límites. El fundamento de este análisis es el *principio de conservación de la masa*, el cual establece que la materia no se crea ni se destruye, sino que se conserva.

Para aplicar este principio es necesario definir un *volumen de control*, es decir, una región del espacio seleccionada para el análisis. A lo largo de este capítulo se adoptará como volumen de control la cañería por la cual circula el agua en el interior de la caldera. Este enfoque permite analizar el comportamiento del fluido a medida que ingresa al sistema, se calienta y finalmente lo abandona.

2.4.1. Estado transitorio: fase de llenado

Consideremos el caso de una instalación recién construida que se encuentra inicialmente vacía. Al iniciar el proceso de llenado, el fluido comienza a ingresar al volumen de control

definido por la cañería del sistema. Durante esta etapa existe una entrada de masa, pero no se observa aún una salida, lo que produce una acumulación progresiva de fluido en el interior de las conducciones.

En estas condiciones, la cantidad de materia contenida dentro del volumen de control varía con el tiempo. Este comportamiento se denomina *estado transitorio* y se caracteriza precisamente por la existencia de acumulación de masa dentro del sistema.

2.4.2. Estado estacionario: operación en régimen permanente

Una vez que la planta alcanza sus condiciones normales de operación y el fluido completa el circuito, el sistema entra en una fase de estabilidad. En este régimen, el volumen de control ya no acumula materia: toda la masa que ingresa por la sección de entrada es simultáneamente desplazada y evacuada por la sección de salida.

Este comportamiento se denomina *estado estacionario* o *régimen permanente* y se caracteriza porque las propiedades macroscópicas del sistema permanecen constantes en el tiempo. En una central térmica, este tipo de operación es el más habitual durante el funcionamiento normal del ciclo. Por ejemplo, el caudal de agua que ingresa a la caldera en estado líquido es igual al caudal de vapor que egresa, despreciando pérdidas menores.

2.4.3. Necesidad de una descripción en términos de flujo

Dado que el agua, en sus diferentes estados de agregación, circula de manera continua dentro del ciclo térmico, resulta poco práctico describir el proceso en términos de cantidades fijas de materia. En su lugar, es más conveniente analizar el sistema en términos de flujos, es decir, considerando cuánta masa atraviesa una determinada sección del sistema por unidad de tiempo.

Esta forma de descripción permite vincular el comportamiento del sistema con variables operativas como el régimen de funcionamiento, la capacidad de los equipos y las condiciones de diseño.

2.4.4. Caudal másico

Para cuantificar el ingreso y egreso de materia a través de las fronteras del volumen de control, se introduce el concepto de **caudal másico**. El caudal másico representa la cantidad de masa que atraviesa una sección del sistema por unidad de tiempo y se denota

como \dot{m} .

Desde el punto de vista matemático, el caudal másico se define como la derivada temporal de la masa que atraviesa una sección:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt}$$

y se expresa habitualmente en unidades de kg/s. La notación con un punto sobre la variable m indica, por lo tanto, una tasa de transferencia de masa.

2.4.5. Planteo general del balance de materia

Una vez definido el volumen de control y el concepto de caudal másico, el balance de materia puede plantearse de manera sistemática. En términos generales, para un sistema abierto, la variación de la masa contenida dentro del volumen de control es consecuencia del ingreso y egreso de materia a través de sus fronteras, así como de posibles procesos de generación o consumo.

De forma esquemática, este balance puede expresarse como:

la acumulación de masa dentro del sistema es igual a la masa que entra menos la masa que sale, considerando además posibles términos de generación y consumo.

En muchos sistemas de ingeniería química, y en particular en aquellos donde no ocurren reacciones químicas, los términos de generación y consumo de masa son nulos.

2.4.6. Formalismo matemático del balance de materia

Sobre la base de los conceptos previamente introducidos, el balance de materia puede expresarse en forma rigurosa mediante una formulación matemática integral. La masa contenida dentro de un volumen de control se define como:

$$m_{vc} = \int_{VC} \rho dV \tag{2.1}$$

donde ρ es la densidad del fluido y la integración se realiza sobre todo el volumen de control. La variación temporal de la masa almacenada puede entonces expresarse como:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV \quad (2.2)$$

El intercambio de masa entre el volumen de control y su entorno ocurre a través de sus superficies de entrada y salida. El flujo másico a través de una superficie diferencial dA puede expresarse como:

$$\delta\dot{m} = \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (2.3)$$

donde \vec{v} es el vector velocidad del fluido y \vec{n} es el vector normal a la superficie. Integrando sobre toda la superficie de control, se obtiene el flujo másico total:

$$\dot{m} = \int_{SC} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA \quad (2.4)$$

En muchos problemas de ingeniería, el flujo puede considerarse aproximadamente unidimensional y uniforme sobre una sección transversal. En ese caso, la expresión anterior se simplifica y el caudal másico puede escribirse como:

$$\dot{m} = \rho A v \quad (2.5)$$

El balance de materia para un sistema abierto puede entonces expresarse como:

$$\text{acumulación} = \text{entrada} - \text{salida} + \text{generación} - \text{consumo} \quad (2.6)$$

En ausencia de reacciones químicas, esta expresión se reduce a:

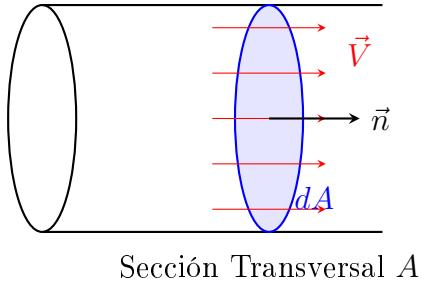
$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (2.7)$$

Esta ecuación es válida tanto para estados transitorios como para estados estacionarios. En particular:

- En **estado transitorio**, el término de acumulación es distinto de cero y la masa contenida en el volumen de control varía con el tiempo.
- En **estado estacionario**, el término de acumulación se anula y el balance se simplifica a:

$$\sum_e \dot{m}_e = \sum_s \dot{m}_s \quad (2.8)$$

Esta expresión indica que, en régimen permanente, la cantidad de masa que entra al sistema es igual a la que sale.



2.5. Balances de energía

2.5.1. El Primer Principio

No tengo ninguna duda de que, palabras más, palabras menos, aprendiste en asignaturas previas (o incluso en la escuela secundaria) que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. En otras palabras, ya tenés bien claro que la energía se conserva. Lo que quizás no tengas tan claro es que esto no es ni más ni menos que el **Primer Principio de la Termodinámica**, y lo emplearemos como uno de los instrumentos de análisis. Antes de seguir, algunas aclaraciones que considero necesarias sobre principios, leyes y teorías.

Sobre leyes, principios y teorías

En el contexto de la ciencia, una ley (o principio) **describe cierto fenómeno natural por medio de la relación de algunas variables**. Una ley no se demuestra, porque su función es simplemente describir un comportamiento observado en la naturaleza. Sin embargo, una teoría es un conjunto de ideas o suposiciones comprobadas que **explican** por qué ocurre ese fenómeno.

Para entender mejor esta diferencia, veamos un ejemplo cotidiano:

- **Ley:** Imagina que observas que cada vez que sueltas un objeto, este cae al suelo. Podrías formular una ley que diga: "Todos los objetos cerca de la superficie de la

Tierra caen con una aceleración constante de $9,8 \text{ m/s}^2$. Esta ley describe lo que ocurre, pero no explica por qué sucede.

- **Teoría:** Ahora, para explicar por qué los objetos caen, necesitas una teoría. La Teoría de la Gravitación de Einstein (Relatividad General) explica que los objetos caen porque la masa de la Tierra curva el espacio-tiempo a su alrededor, y los objetos simplemente siguen esa curvatura. Esta teoría no se deduce de la ley, sino que se construye a partir de observaciones, experimentos y datos que validan su explicación.

En este ejemplo, la ley describe el comportamiento (los objetos caen), mientras que la teoría explica la causa (la curvatura del espacio-tiempo). Es importante destacar que una teoría no se convierte en ley, ni una ley se deduce de una teoría. Ambas son herramientas complementarias: la ley describe, y la teoría explica.

Volviendo al caso de Newton: él formuló la Ley de Gravitación Universal, que describe cómo dos cuerpos se atraen en función de sus masas y la distancia que los separa. Sin embargo, la explicación de por qué ocurre esta atracción no estaba en su ley, sino que llegó más tarde con la Teoría General de la Relatividad de Einstein.

Retomando con nuestra querida Termodinámica: está estructurada sobre cuatro leyes o principios que describen distintos comportamientos de la energía, los cuales iremos viendo conforme avancemos en este libro.

2.5.2. La ecuación del Primer Principio para sistemas abiertos

En el balance de energía aplicaremos el Primer Principio y su ecuación para sistemas abiertos. Esta tiene la siguiente forma:

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m}_e (h + e_c + e_p)_e = \sum_s \dot{m}_s (h + e_c + e_p)_s \quad (2.9)$$

Vamos a desmenuzar la ecuación: primero diremos que, obviamente, todos los términos representan diferentes tipos de energía.

Los términos \dot{Q} y \dot{W} representan calor y trabajo respectivamente: son las dos maneras en que un sistema intercambia energía con el entorno. Discutiremos esto más adelante. El punto sobre la letra indica que es calor por unidad de tiempo.

2.5.3. Ejemplo: Balance de materia y energía en la Central Térmica Güemes

La Central Térmica Güemes, ubicada en Salta, Argentina, opera con un ciclo Rankine. Supongamos que analizamos el flujo de agua en la caldera:

- Flujo de entrada de agua líquida: $\dot{m}_e = 600 \text{ kg/s}$
- Flujo de salida de vapor de agua: $\dot{m}_s = 600 \text{ kg/s}$
- Entalpía del agua líquida: $h_e = 800 \text{ kJ/kg}$
- Entalpía del vapor de salida: $h_s = 2800 \text{ kJ/kg}$

Dado que no hay acumulación de materia en estado estacionario:

$$600 \text{ kg/s} = 600 \text{ kg/s} \quad (2.10)$$

Para el balance de energía:

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_s - h_e) = 600(2800 - 800) = 1200000 \text{ kW} \quad (2.11)$$

Esto confirma que la energía térmica suministrada permite la transformación de agua en vapor dentro de la caldera.

Bibliografía

- (IEA), I. E. A. (2023). *World Energy Outlook*.
- Argentina, N. (2023). *Centrales Nucleares en Argentina*.
- Baddeley, A. (2000). «The episodic buffer: A new component of working memory?» En: *Trends in Cognitive Sciences* 4.11, págs. 417-423.
- Cengel, Y. A. y M. A. Boles (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill Education.
- Dweck, C. S. (2006). *Mindset: The New Psychology of Success*. Random House.
- Energía de la Nación Argentina, S. de (2022). *Matriz Energética Argentina: Balance y Perspectivas*.
- Energías Renovables (CADER), C. A. de (2023). *Energías Renovables en Argentina*.
- Jones, A. y B. Taylor (2019). «Advances in Thermodynamic Modeling for Power Generation». En: *Journal of Chemical Engineering* 45.3, págs. 123-135.
- Kandel, E. R., J. H. Schwartz y T. M. Jessell (2013). *Principles of Neural Science*. McGraw-Hill Education.
- Moran, M. J., H. N. Shapiro, D. D. Boettner y M. B. Bailey (2018). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. Wiley.
- Pérez, R. y M. López (2021). «Energy Transition in Argentina: Challenges and Opportunities». En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150, págs. 111-123.
- Smith, J. M., H. C. Van Ness y M. M. Abbott (2020). *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill Education.