



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA
NACIONAL**

Educadora de educadores

| La Fusión Nuclear y Energías Renovables: Propuesta para la Enseñanza y Divulgación de los Fundamentos de la Fusión nuclear y Conciencia Ambiental en Contextos de Transición Energética

Trabajo de grado para optar al título de
Licenciatura en Física

Estudiante:

Brayan Alexander Castro Cepeda

Asesora:

Sandra Bibiana Avila Torres

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología

2025

Índice general

Índice general	1
Índice de figuras	3
Introducción	6
Contexto de Investigación	9
Problema de Investigación	9
Antecedentes	13
Objetivos	14
Objetivo general	15
Objetivos Especificos	15
Metodología	15
1. Energías Renovables	17
1.1. Contexto respecto a las energías renovables en el mundo	17
1.2. Tipos de energías renovables trabajadas a nivel mundial y desafíos actuales	20
1.2.1. Energía solar	20
1.2.2. Energía Eólica	27
1.2.3. Energía hidroeléctrica	32
1.3. Energías renovables en América latina y Colombia	39
1.4. Necesidad de energías renovables: Problemáticas de las actuales formas de producción de energía	40
2. Historia de la Energía Nuclear	42
2.1. Energía por Fisión Nuclear	49
2.1.1. Aprovechamiento de la Fisión Nuclear	55
2.1.2. Energía de Fisión en el Mundo Actual	56
2.2. Energía por Fusión Nuclear	58
3. Fundamentos de la Fusión Nuclear, Reactores de Fusión y Propuesta para la Enseñanza	65
3.1. Energías en el Proceso de la Fusión	65

3.2. Reacciones de fusión	67
3.2.1. Combustibles de Fusión Controlados	69
3.2.2. Combustibles de Fusión Avanzados	70
3.2.3. Ciclo pp	70
3.2.4. Ciclo Carbono Nitrógeno Oxígeno	71
3.2.5. Reacciones Carbono-Carbono	71
3.3. Reactores Nucleares de Fusión	72
3.4. Reactor Tipo Tokamak	76
3.5. Reactor Tipo Stellarator	78
3.6. Proyectos de Reactores Nucleares de Fusión	79
3.6.1. PROYECTO ITER	79
3.6.2. Proyecto SMART	89
3.6.3. El EAST	90
3.6.4. International Fusion Materials Irradiation Facility	92
3.7. Reflexiones Finales Alrededor de las Energías Renovables y su Relación con el Desarrollo de la Propuesta	92
Criterios para la Formulación de la Propuesta Didáctica	94
Conclusiones	96
Referencias	99
A. Anexo1:Propuesta para la enseñanza de los principios físicos funda- mentales de la fusión nuclear, y sus ventajas para cubrir las demandas energéticas	105

Índice de figuras

1.1. fuentes de energía	19
1.2. consumo energético	19
1.3. Gráfica de CO ₂	20
1.4. flujo de irradiancia solar incidente sobre un plano normal a la tierra . .	21
1.5. Bandas de energía en cristales	23
1.6. cristal con doble impureza	25
1.7. funcionamiento de la celda solar	25
1.8. parque la loma	26
1.9. parque solar Bhadla	27
1.10. Corrientes de aire en la tierra	28
1.11. Mesoclima	29
1.12. Panémonas	29
1.13. Imagen de un molino griego en el que se muestra el dispositivo tipo vertical.	30
1.14. Parque Eólico Ganzu	32
1.15. Parque Eólico Guajira 1	32
1.16. Central Hidroeléctrica de Embalse	34
1.17.	36
1.18. Represa de las Tres Gargantas	38
2.1. Generador piezoeléctrico Pierre Curie. Patrimonio histórico del CSIC (4102H).	43
2.2. Serie Radiactiva de el Uranio 238	45
2.3. Serie Radiactiva de el Uranio 238, Tiempos de Vida Media	46
2.4. En este gráfico muestran los nucleidos, cuya existencia se conoce y los que son estables. Los nucleidos estables se indican en azul y los inestables en verde. Tenga en cuenta que todos los isótopos de elementos con números atómicos superiores a 83 son inestables. La línea sólida es la línea donde $n = Z$	50
2.5. Energía potencial vs distancia promedio de separación	53
2.6. fisión uranio 235	54
2.7. Proceso de Enriquecimiento del Uranio	54
2.8. Reactor de Tipo BWR	55
2.9. Reactor Tipo PWR	56

2.10. Central de Kashiwazaki-Kariwa.	57
2.11. central nuclear Angra	58
2.12. Energía de enlace por nucleón en función del número másico	63
3.1. Ciclo pp	71
3.2. Ciclo CNO	71
3.3. Ciclo c-c	72
3.4. El proceso de fusión nuclear mediante confinamiento inercial por láser en un blanco directo se desarrolla en varias etapas sucesivas. En la primera fase, haces de radiación láser inciden sobre la superficie externa de una cápsula que contiene el combustible, generando un calentamiento extremadamente rápido que transforma la superficie en plasma. Debido a la expansión de este plasma hacia el exterior, y aplicando el principio de acción y reacción, se produce una compresión hacia el interior del combustible. En la segunda etapa, esta compresión provoca la implosión de la cápsula, alcanzando densidades superiores a los 200 g/cm^3 y temperaturas cercanas a los 10^8 grados Celsius. Estas condiciones permiten que las reacciones de fusión se inicien en la región central del combustible. Finalmente, la energía liberada por la fusión se transmite al combustible adyacente comprimido, amplificando la reacción y generando una producción energética mayor a la empleada en el proceso de iniciación.	75
3.5. líneas de Campo Magnético	76
3.6. Campo Magnético Dentro de un Toroide	76
3.7. Reactor de Fusión Tipo Tokamak	77
3.8. Diseño de Stellarator	78
3.9. Tokamak ITER	82
3.10. Imanes	82
3.11. Bobinas de Campo Toroidales	83
3.12. Bobinas de campo poloidal	83
3.13. Solenoide Central	84
3.14. Bobinas de Corrección	85
3.15. Líneas de Alimentación de Bobinas	85
3.16. Bobinas Internas	86
3.17. Cámara de Vacío del ITER	87
3.18. Módulos de Cubierta que Protegen la Cámara y los Imanes del Calor	88
3.19. Desviador	88
3.20. Criostato	89
3.21. Plasma dentro del Tokamak Smart	90
3.22. (Experimental Advanced Superconducting Tokamak	91
3.23. International Fusion Materials Irradiation Facility	92

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado a las personas y momentos que marcaron mi camino durante esta intensa, hermosa y desafiante etapa universitaria

En primer lugar, a mi querida madre, cuyo amor incondicional y apoyo silencioso fueron el faro en los momentos más oscuros. Gracias por estar allí cuando más lo necesité, por adaptarte, por ceder espacios y tiempos para que yo pudiera estudiar, y por enseñarme con tu ejemplo que el sacrificio por amor es el más noble de todos

A mis hermanos de vida: Yersson Stevens Rincon, Daniel Ricardo Rojas y Cristian David Lombana. Gracias por enseñarme que la verdadera amistad se encuentra en quienes están dispuestos a llorar contigo, a celebrar contigo, y a crecer contigo. Su compañía fue un refugio en las tormentas, una risa en los días grises y un aprendizaje constante que llevaré siempre conmigo.

A la profesora Sandra Bibiana Ávila Torres, mi más profundo agradecimiento. Su compromiso, paciencia y pasión por la enseñanza fueron pilares fundamentales para el desarrollo de este trabajo. En un entorno muchas veces adverso, usted brilla con una inteligencia admirable y un amor auténtico por formar. Gracias por ser guía, maestra y ejemplo.

Y finalmente, a dos mentes brillantes que inspiran con cada palabra y gesto: el profesor Yesid Cruz y Fernando Espitia. Gracias por compartir su conocimiento con generosidad, por motivarnos a ir más allá y por recordarnos que pensar con profundidad también es un acto de valentía.

A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este logro. Este trabajo es también suyo.

Introducción

La humanidad enfrenta en la actualidad una profunda crisis ambiental y energética, resultado de décadas de explotación indiscriminada de recursos no renovables como el petróleo, el carbón y el gas natural. Esta situación ha derivado en problemas globales como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y el deterioro generalizado de los ecosistemas. Si bien las energías renovables tradicionales representan un avance en términos de sostenibilidad, también presentan limitaciones técnicas y ambientales que obligan a la búsqueda de alternativas más eficientes y limpias.

En este contexto, el liderazgo participativo y el fortalecimiento de la gobernanza ambiental se tornan fundamentales. La adopción de instrumentos como el *Acuerdo de Escazú* en América Latina y el Caribe constituye un hito en la promoción del acceso a la información ambiental, la participación ciudadana y la justicia ambiental. Sin embargo, los desafíos en su implementación, tanto a nivel regional como en Colombia, demuestran la necesidad de fortalecer la educación ambiental como pilar de una ciudadanía crítica y comprometida con la sostenibilidad.

La educación juega un papel estratégico en la transformación de las prácticas energéticas y ambientales. Sin embargo, aún persisten importantes carencias en la inclusión de la problemática energética en los currículos educativos, especialmente en lo que respecta a la exploración de nuevas fuentes de energía como la fusión nuclear. La falta de actualización de contenidos, la escasa capacitación docente y la limitada infraestructura tecnológica, dificultan la formación de estudiantes capaces de analizar y participar activamente en la transición energética.

Ante esta situación, la **fusión nuclear** surge como una opción prometedora para el futuro energético global. A diferencia de la fisión, la fusión ofrece la posibilidad de generar grandes cantidades de energía con un impacto ambiental mínimo, utilizando recursos abundantes y seguros. El desarrollo de proyectos internacionales como el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) pone en evidencia el interés científico y tecnológico por hacer de la fusión una realidad accesible en las próximas décadas. A partir de esto, el presente documento se divide en tres capítulos:

- **Capítulo 1: Energías Renovables**

Se analiza el contexto energético actual, destacando las problemáticas asociadas al

uso de fuentes de energía no renovables y las limitaciones de las energías renovables tradicionales. Se enfatiza la necesidad de explorar nuevas alternativas sostenibles para enfrentar la crisis ambiental y energética global.

■ **Capítulo 2: Historia de la Energía Nuclear**

Se presenta un breve recorrido histórico desde las primeras concepciones del átomo hasta los descubrimientos de la radiactividad y la estructura nuclear. Este capítulo se centra en establecer las bases teóricas necesarias para comprender la evolución de la energía nuclear y algunas de sus aplicaciones.

■ **Capítulo 3: Fundamentos de la Fusión Nuclear, Reactores de Fusión y propuesta para la enseñanza**

Se profundiza en los principios físicos fundamentales de la fusión nuclear, su comparación con otros procesos energéticos, se exploran los principales proyectos internacionales enfocados en el desarrollo de reactores de fusión, como ITER y SMART, se finaliza con la contextualización y justificación de la propuesta para la enseñanza de los principios de la energía de fusión como energía renovable para el futuro.

En este marco, el presente trabajo de grado propone una estrategia pedagógica de divulgación científica enfocada en la enseñanza de los fundamentos físicos de la fusión nuclear, su comparación con otras fuentes de energía renovable y su potencial como solución sostenible a la creciente demanda energética mundial. Basándose en los principios de la divulgación científica propuestos por Manuel Calvo Hernando informar, enseñar y sensibilizar, esta propuesta busca contribuir a la formación de ciudadanos críticos, informados y comprometidos con la construcción de un futuro energético más limpio, justo y sostenible.

De esta manera, el proyecto integra el análisis del contexto energético global, el estudio histórico y científico del desarrollo de la energía nuclear, y la identificación de las ventajas de la fusión nuclear, culminando en una propuesta pedagógica que articula conocimiento científico, conciencia ambiental y responsabilidad social.

Para la adecuada implementación de la propuesta, didáctica diseñada en este trabajo, se considera pertinente dirigirla a una población conformada por estudiantes que se encuentren en los primeros semestres de programas académicos afines a las ciencias físicas, la ingeniería o disciplinas relacionadas con las ciencias exactas. Asimismo, resulta igualmente adecuada para estudiantes de los últimos grados de educación media (grados 10° y 11°) que hayan adquirido competencias básicas en la interpretación de expresiones algebraicas, manejo de operaciones en ecuaciones y técnicas de despeje de variables. La propuesta demanda que los estudiantes cuenten con habilidades previas para comprender y manipular relaciones matemáticas sencillas, interpretar fenómenos físicos mediante el análisis de ecuaciones y establecer conexiones lógicas entre los principios físicos estudiados y sus aplicaciones. Estas competencias iniciales son esenciales para facilitar la apropiación de los conceptos fundamentales de la fusión nuclear, tales

como la energía de enlace, las condiciones de confinamiento y los criterios de generación energética, los cuales requieren de un razonamiento cuantitativo básico pero riguroso. De esta manera, la selección de la población objetivo garantiza la viabilidad de la propuesta educativa y maximiza su impacto formativo en el fortalecimiento de las competencias científicas y ambientales de los estudiantes.

Dentro de la estructura del presente trabajo de grado, cada capítulo cumple un rol esencial en la consolidación de la propuesta pedagógica, pese a que en algunos apartados los textos puedan presentarse en forma breve o condensada. Es importante destacar que, aunque ciertos párrafos o secciones sean relativamente cortos en extensión, su contenido es altamente sustancial, ya que concentran argumentos fundamentales que justifican y sustentan la pertinencia, viabilidad y necesidad de este trabajo junto con su propuesta final. Los capítulos 1, 2 y 3, en particular, presentan un desarrollo amplio y riguroso, resultado de una revisión profunda de los contenidos científicos y de los principios físicos que subyacen al fenómeno de la fusión nuclear. La amplitud de estos capítulos no solo responde a la necesidad de proporcionar un marco conceptual sólido, sino también a la intención de ofrecer una base robusta desde la cual se construye la propuesta educativa. Cada sección, independientemente de su extensión, ha sido cuidadosamente elaborada para cumplir un propósito específico dentro de la argumentación general del trabajo, contribuyendo así de manera significativa a la coherencia interna y al fortalecimiento de la justificación teórica, metodológica y social de la propuesta planteada.

Contexto de Investigación

El liderazgo participativo ha adquirido una importancia significativa en la gobernanza de las instituciones y en la gestión de sectores estratégicos en América Latina. En las sociedades democráticas, la interacción entre los ciudadanos, la toma de decisiones colaborativa y la planificación transparente son elementos esenciales para fortalecer la gestión pública. En el ámbito ambiental, estas dinámicas juegan un papel clave en la formulación e implementación de políticas que aseguren la protección del entorno y el bienestar de las comunidades.

Un ejemplo destacado de estos esfuerzos es el *Acuerdo de Escazú*, un tratado que busca mejorar el acceso a la información, la participación ciudadana y la justicia en asuntos ambientales. La firma de este acuerdo en 2018 por varios países de América Latina y el Caribe refleja la importancia de fomentar un liderazgo inclusivo que involucre a diversos actores en la toma de decisiones ambientales y garantice la transparencia en la gestión de los recursos naturales (CEPAL, 2024).

3

El Acuerdo de Escazú, su Impacto en la Gobernanza Ambiental en América latina y Colombia

El *Acuerdo de Escazú* fue concebido como una respuesta a la necesidad de contar con mecanismos efectivos de participación ciudadana en la protección ambiental. A través de este tratado, los países firmantes se comprometen a fortalecer el acceso a la información sobre el estado del medio ambiente, promover la inclusión de las comunidades en los procesos de toma de decisiones y garantizar la justicia en casos de conflictos ambientales. En este sentido, el acuerdo establece un marco legal que respalda la transparencia y la rendición de cuentas en asuntos relacionados con el medio ambiente.

Si bien el tratado representa un avance significativo en términos de gobernanza ambiental, su implementación enfrenta desafíos en varios países de la región. La eficacia del *Acuerdo de Escazú* depende de la voluntad política de los gobiernos para adoptar mecanismos de monitoreo, el fortalecimiento de instituciones ambientales y la promoción de una cultura de participación ciudadana (CEPAL, 2024).

En Colombia, el liderazgo participativo se ha convertido en un factor clave en la gestión ambiental, como se evidencia en diversas políticas públicas implementadas en los últimos años. De acuerdo con el informe de seguimiento a las políticas públicas ambientales del año 2023, se han identificado avances importantes en la promoción de prácticas sostenibles y la conservación de la biodiversidad (de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Uno de los principales logros de estas políticas es la integración de un enfoque participativo que involucra a las comunidades en la gestión de los recursos naturales. Se han desarrollado estrategias que permiten la adaptación de las políticas a las necesidades lo-

cales, promoviendo la gobernanza ambiental y fortaleciendo el sentido de pertenencia de la ciudadanía en la toma de decisiones. No obstante, a pesar de estos avances, persisten desafíos significativos. Entre ellos, se destaca la ausencia de indicadores claros en algunos documentos estratégicos, lo que dificulta la evaluación del impacto de las políticas y la identificación de áreas que requieren ajustes (de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Además, el informe resalta la necesidad de mejorar la interconexión de las políticas ambientales con otras estrategias sectoriales, con el fin de abordar de manera integral los problemas ambientales y evitar la duplicación de esfuerzos. La falta de datos históricos y la actualización de políticas más antiguas, como la Política Nacional de Educación Ambiental y la Política Nacional para Humedales Interiores de Colombia, también representan obstáculos para medir el progreso en la gestión ambiental (de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

A partir del análisis realizado, surgen interrogantes que pueden orientar la discusión sobre la efectividad del liderazgo participativo en la transformación de las políticas públicas ambientales. Es necesario cuestionar en qué medida la participación ciudadana ha permitido la reorientación de proyectos y decisiones gubernamentales en favor del bienestar ambiental. Asimismo, se debe reflexionar sobre hasta qué punto el liderazgo participativo es suficiente para generar cambios estructurales en la gestión ambiental y qué medidas podrían adoptarse para fortalecer su impacto en América Latina y en Colombia.

El liderazgo participativo desempeña un papel fundamental en la implementación efectiva de políticas ambientales. Iniciativas como el *Acuerdo de Escazú* y los avances en Colombia evidencian la importancia de involucrar a la ciudadanía en la toma de decisiones y fortalecer los mecanismos de transparencia y acceso a la información. Sin embargo, aún persisten desafíos en la consolidación de una gobernanza ambiental efectiva. La implementación de políticas debe ir acompañada de estrategias de monitoreo y evaluación que permitan garantizar su efectividad y sostenibilidad a largo plazo. En este contexto, la construcción de un marco institucional sólido y la promoción de una cultura de participación ciudadana serán esenciales para lograr una gestión ambiental más inclusiva y efectiva.

Las energías no renovables, como el petróleo, el carbón y el gas natural, han sido las principales fuentes de energía a nivel mundial durante décadas. Sin embargo, su explotación indiscriminada ha traído consigo consecuencias ambientales alarmantes, como el cambio climático, la contaminación del aire y del agua, y la pérdida de biodiversidad. Además que las energías renovables tradicionales representan un impacto hacia el entorno siendo responsable de un porcentaje de los problemas anteriormente mencionados. En este contexto, la educación juega un papel fundamental en la concienciación y en la formación de ciudadanos responsables con el medio ambiente.(y María Gómez, 2023)

Las instituciones educativas deben ser espacios donde los estudiantes adquieran conocimientos sobre el impacto de las energías no renovables y las alternativas sostenibles disponibles. La divulgación de estos temas dentro de la enseñanza es esencial para garantizar que las futuras generaciones tomen decisiones informadas respecto a su consumo energético y contribuyan activamente a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Problemáticas de las Energías No Renovables y renovables tradicionales en Instituciones Educativas

Las instituciones educativas, tanto a nivel escolar como universitario, presentan diversos desafíos en la implementación de estrategias para abordar el impacto de las energías no renovables. Algunos de estos problemas incluyen:

A pesar de la creciente preocupación por el cambio climático, muchas instituciones educativas aún no han integrado de manera efectiva la educación ambiental en sus programas de estudio. Esto limita la comprensión de los estudiantes sobre los efectos adversos del uso excesivo de combustibles fósiles y su contribución a problemas globales como el calentamiento global y la contaminación atmosférica.(y [Andrés Rojas, 2023](#))

En muchas instituciones educativas, no existen políticas claras que promuevan la transición hacia un modelo energético más sostenible. La falta de normativas y planes de acción dificulta la implementación de tecnologías limpias, como paneles solares o sistemas de ahorro energético, lo que perpetúa la dependencia de fuentes contaminantes.(y [Ana López, 2023](#))

Para que la educación ambiental sea efectiva, es fundamental que los docentes cuenten con la preparación adecuada para impartir conocimientos sobre energías renovables y sostenibilidad. Sin embargo, en muchos casos, los profesores no tienen acceso a capacitaciones especializadas ni a recursos educativos actualizados, lo que impide que puedan abordar estos temas de manera integral en sus clases.(y [Laura Herrera, 2022](#))

Importancia de Divulgar Problemáticas y Alternativas Actuales en Materia de Energía

Para enfrentar los desafíos que plantea el uso de energías no renovables, es crucial que las instituciones educativas implementen estrategias efectivas de divulgación y concienciación sobre las alternativas energéticas sostenibles. Algunos de los beneficios de la divulgación son:

Cuando se informa a los estudiantes sobre los efectos negativos de las energías no renovables y las alternativas disponibles, se promueve una mentalidad más responsable y comprometida con el medio ambiente. Esto puede traducirse en acciones concretas, como el ahorro energético en el hogar, el uso de transporte sostenible y la preferencia por productos y servicios con menor impacto ambiental.(y [María Gómez, 2023](#))

Las instituciones pueden ser pioneras en la transición energética mediante la instalación de tecnologías limpias, como paneles solares y turbinas eólicas, para alimentar sus propias instalaciones. Además de reducir su impacto ambiental, estos proyectos pueden servir como laboratorios de aprendizaje donde los estudiantes experimenten directamente con las ventajas de las energías renovables.

Los programas educativos enfocados en la sostenibilidad energética pueden ser una herramienta poderosa para formar ciudadanos comprometidos con el cuidado del planeta. Estos programas deben incluir actividades prácticas, debates, visitas a plantas de energía renovable y la integración de contenidos sobre energías limpias en diferentes asignaturas.(y [Daniela Torres, 2022](#))

Las instituciones educativas pueden trabajar en conjunto con organizaciones gubernamentales, empresas y comunidades locales para desarrollar proyectos de educación ambiental y eficiencia energética. A través de convenios y alianzas estratégicas, es posible acceder a recursos y tecnologías que faciliten la implementación de soluciones energéticas sostenibles en el ámbito educativo.(y [Ana López, 2023](#))

La crisis ambiental y energética actual exige un cambio de paradigma en la forma en que se educa a las nuevas generaciones sobre el uso de la energía. Las instituciones educativas tienen la responsabilidad de formar ciudadanos informados y comprometidos con la sostenibilidad. Para ello, es fundamental integrar la educación ambiental en los programas académicos, adoptar tecnologías limpias en sus instalaciones y fomentar la investigación y el desarrollo en energías renovables. Solo a través de la educación y la divulgación será posible avanzar hacia un modelo energético más sostenible y equitativo.

Problema de Investigación

En el contexto de la crisis ambiental en la que se encuentra actualmente la humanidad, dado por la creciente demanda energética y la insostenibilidad que se tiene del modelo energético actual que se basa en fuentes de energía no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón, se establece principalmente que en un futuro cercano estas fuentes se agotarán, además de tener en cuenta que su consumo actualmente contribuye significativamente al calentamiento global, la contaminación atmosférica y otros impactos nocivos para los ecosistemas y también para la salud de las personas ([Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021](#)). En esta situación, algunos gobiernos han promovido proyectos para el uso de energías renovables como la solar, la eólica y la hidroeléctrica, las cuales se plantean como alternativas que favorecen en muchos aspectos la producción energética de ciertas poblaciones. A pesar de estos esfuerzos, estas tecnologías aún presentan limitaciones asociadas con las interrupciones en la generación, la dependencia del clima para la producción, la extensión en cuanto a espacios para la instalación y por tanto la afectación de los paisajes y la biodiversidad de la zona en la cual se establece y los demás desafíos tecnológicos para su almacenamiento eficiente([Quaschnig, 2019](#)).

Dado este panorama, surge la fusión nuclear como una alternativa que tiene el potencial de revolucionar la forma en que se produce energía de forma sostenible para las actividades humanas. A diferencia de la energía nuclear por fisión, esta forma de producción de energía nuclear por fusión promete ser una energía más limpia (sin desechos radiactivos), con un impacto considerablemente menor para el ambiente y con un menor riesgo de accidentes como el que se presentó en Chernóbil o Fukushima ([ITER Organization, 2023](#)). A pesar de esto, el desarrollo y puesta a punto de esta tecnología enfrenta barreras en cuanto a la ingeniería y tecnología para su ejecución, así como problemas económicos y políticos. En consecuencia, las décadas e investigación han permitido tener actualmente algunos proyectos que apuntan a la construcción de reactores por fusión, que aunque no se han ejecutado en su totalidad, han tenido avances significativos y aún presentan retos frente a la viabilidad real como solución a corto y mediano plazo ([Wesson, 2011](#)).

Por tanto, se hace necesario analizar en profundidad el estado actual, los fundamentos científicos y las perspectivas de implementación de la fusión nuclear, para determinar si puede representar una respuesta efectiva frente a la crisis energética y ambiental global. Es así como, en el presente trabajo de grado se propone explorar y analizar las formas de producción de energía renovable, centrándose en la fusión nuclear como propuesta prometedora para la generación de energía, la cual será la temática principal para la enseñanza y divulgación de las formas de producción de energía y los conceptos asociados con la física, desde una mirada que articule ciencia, tecnología, sociedad y ambiente (CTSA).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente se propuso la siguiente pregunta que guió la investigación:

Pregunta Problema:

¿Cómo diseñar una ruta de enseñanza que facilite la comprensión de los principios físicos fundamentales de la fusión nuclear, permitiendo analizar sus ventajas en comparación con otras fuentes de energía renovable, y su potencial para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad, con un enfoque en el contexto colombiano?

Antecedentes

1. En primer lugar, se tiene el trabajo de grado titulado “Alternative sources of energy - nuclear fission and fusion” del 2013 realizado por Gari Jose Ciodaro Guerra en la Universidad de los Andes. En este documento se abordan conceptos esenciales de la física nuclear para así presentar los procesos de fisión nuclear y la respectiva base teórica. Además, muestra una descripción básica de los reactores de fisión nuclear, el tipo de reacciones requeridas para su funcionamiento y se analizan los procesos en estos con la formulación de Einstein teorizando qué

cantidad de energía se libera. En el capítulo 5 se da un acercamiento de los experimentos internacionales de reactores termonucleares como lo es el ITER y su diseño tipo Tokamak donde se da una descripción de sus componentes. Por lo cual se considera un insumo importante para desarrollar el marco de las diferencias y ventajas entre la fusión y la fisión nuclear

2. Como segundo antecedente se tiene el trabajo de grado titulado “La Fusión Nuclear en la Actualidad” por Patricia Expósito Ballesta de la Universidad de Jaén en el año 2017.

El objetivo de este trabajo es realizar una amplia revisión bibliográfica para analizar la evolución de la fusión nuclear a lo largo de los últimos años y su estado en la actualidad. Para ello procedió con el estudio de las líneas de investigación más importantes en el campo de fusión nuclear, entre ellas, por ejemplo, se presenta el tipo de confinamiento en el proyecto ITER, con el que se quiere demostrar que esta energía es viable tecnológicamente. Este antecedente además de ser una base para analizar la evolución en este tipo de producción de energía en los últimos años, muestra referencias que se convierten en insumo fundamental para la consolidación de la investigación y da un vistazo de los países que más contribuciones tienen en el tema, donde se prestó especial atención en el papel de Latinoamérica.

3. En tercer lugar, se tiene el trabajo titulado “Diseño de un material didáctico como recurso educativo en el aprendizaje de las energías renovables para estudiantes del grado séptimo” por Oswaldo Aníbal Rodríguez Garzón de la universidad Pedagógica Nacional en el año 2015. Este trabajo tiene como objetivo general el diseño de un material didáctico como recurso educativo que promueva el aprendizaje de las energías renovables, donde se abarque los diferentes estilos de aprendizaje del grupo de estudio. En la información presentada se habla desde el marco de la alfabetización tecnológica y plantea la necesidad de la educación energética como un asunto social, ambiental, económico y cultural que debe ser asumido en la formación de los sujetos desde la perspectiva del desarrollo sostenible a través de las energías renovables. Particularmente el documento muestra que, en el contexto colombiano, la educación energética se ve apoyada dentro del marco legal por la PROURE “Programa de uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales”, del Ministerio de Minas y Energía, como un estudio que brinda una posible respuesta a la problemática de abastecimiento y administración energética en Colombia. Este trabajo fue puesto en práctica en un colegio al sur de la ciudad de Bogotá donde en primera instancia los estudiantes de grado séptimo desconocen fuentes de energía diferentes al petróleo y la electricidad.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el desarrollo, los fundamentos y las ventajas de la fusión nuclear como una alternativa energética sostenible, en el contexto de las energías renovables, con el fin de presentar su viabilidad como solución eficiente para la demanda energética, con enfoque en el contexto colombiano.

Objetivos Específicos

1. Realizar una contextualización del desarrollo de las energías renovables tradicionales en el mundo y el contexto en Colombia y Latinoamérica
2. Presentar los aspectos principales en la historia que llevaron a la construcción de conocimiento en física nuclear sobre los procesos de la fisión y su aplicación en la generación de energía.
3. Identificar los conceptos fundamentales del proceso de fusión nuclear en reactores con diseño Tokamak, y establecer las ventajas de dicho proceso como alternativa para la demanda energética.
4. Construir una propuesta de enseñanza que argumente por qué la fusión nuclear puede establecerse como la mejor alternativa de la humanidad para una producción más eficiente de energía.

Metodología

Para el presente trabajo se utilizó una metodología de investigación cualitativa basada en el análisis contenido descrito por Krippendorff (1990) quien lo establece como “ una técnica de investigación que se utiliza para hacer inferencias reproducibles y válidas de los datos y su contexto”.

Por tanto, de acuerdo con los objetivos propuestos la investigación se desarrolló en tres fases.

1. Recolección de información respecto a las estadísticas de consumo energético y problemas de contaminación debido a la producción de energías renovables y no renovables en el contexto latinoamericano, para la comparativa de su evolución durante el siglo XXI.
2. Descripción y análisis del proceso de fusión nuclear utilizado en el reactor nuclear del proyecto ITER en el diseño tokamak.
3. Construcción de una propuesta divulgativa centrada en los objetivos establecidos por Calvo alrededor del periodismo científico a través de una triple función: in-

formar, enseñar y sensibilizar ([Calvo Hernando, 1984](#)) entendiendo la creación de un clima que lleve a la sociedad a ser consciente del consumo creciente de energía y los problemas que estos le generan al medio ambiente.

Capítulo 1

Energías Renovables

El uso de la energía por parte de la humanidad ha sido el sello característico de las civilizaciones industrializadas. La investigación desde la ciencia alrededor de cómo aprovechar la fuerza de la naturaleza para beneficio de las labores, para mejorar la comodidad del día a día y para optimizar la industria han cambiado el estilo de vida en cada época. En el presente capítulo se explorará el contexto del uso de los recursos naturales para la producción de energía y cómo en las últimas décadas se ha vuelto prioritaria la investigación en energías renovables.

1.1. Contexto respecto a las energías renovables en el mundo

Con la llegada de la revolución industrial en la segunda mitad del siglo XVII, se presenta una de las mas grandes transformaciones en los sectores de la tecnología, la sociedad y la economía hasta ese momento; particularmente, Inglaterra fue uno de los primeros países en explotar la energía de minerales como el carbón para sus procesos industrializados y poder darle vida a sus grandes maquinarias en auge de crecimiento. Sin embargo, al pasar el tiempo empezó a ser difícil el acceso al carbón ya que los depósitos naturales se encontraban a grandes profundidades y el agua era un gran problema para al extracción en las minas.

No fue hasta la llegada de la máquina de vapor comercial, la cual tenía una baja eficiencia y en consecuencia consumía bastante combustible; posteriormente, se inventó y patentó una mejora de la maquina de vapor en 1769 a manos de James Watt, lo que permitió crear bombas para extraer el agua de las minas de carbón y mejorar la extracción de este material, vital en la época para el uso de la energía. Años después a mediados del siglo XIX, Estados Unidos acumulo conocimiento científico alrededor del uso de energías fósiles para la industria, adquiriendo avances tecnológicos y al ser este un gran consumidor de recursos naturales, tuvo un paso paulatino a la utilización de

gas de hulla , para luego tener otra transición a la energía eléctrica, que permitió una mayor eficiencia en la obtención de luz, potencia y calor, permitiendo la creación de nuevos sistemas de producción y transmisión de la electricidad.

Siguieron a estos eventos, más contribuciones e innovaciones en el siglo XIX, como las de George Westinghouse, quien insistió en 1886 correctamente en la corriente alterna (CA) para la transmisión de electricidad, ya que era de mas bajo costo y su menor perdida de energia frente a la corriente continua(CC) permitía optimizar el uso comercial de este recurso. También se tiene a Charles Parsons quien patentó la primera turbina de vapor en 1884 la cual aprovechaba las altas temperaturas y presiones de las calderas trasformando la energía del vapor en energía mecánica. Además se encuentra William Stanley quien introdujo un transformador eficiente en 1885 diseñando así el primer sistema de distribución de corriente alterna de alto voltaje del mundo. Y no se puede dejar de lado a Nikola Tesla quien inventó el motor eléctrico en 1888 utilizando la corriente alterna (Smil, 2004).

Con estas mejoras en la producción y uso de diferentes energías inicia el siglo XX, en el cual el petroleo se establece como una de las fuentes primarias de energía, lo que trae como consecuencia un aumento en el poder económico para quienes lograron hacer de este una fuente energética con mayor eficiencia, además de caracterizarse por tener una extracción mas fácil que otros recursos naturales, gracias a las tecnologías desarrolladas en este siglo. La llegada y uso del petroleo y sus derivados permitió la creación del motor de combustión, el cual fue utilizado en gran parte para el trasporte de toda la humanidad y se posicionó como la materia prima mas importante alrededor del mundo para todos los procesos industrializados.

Para sintetizar este primer acercamiento al uso de las energías por parte de la humanidad, en la Figura 1.1 se presenta una estadística de cómo se dio el consumo y cambios de diferentes tipos de energía datados en Estados Unidos en el periodo comprendido entre 1776 y 2012 (u.s energy information administration, 2013). En esta imagen se puede ver el creciente consumo de energías no renovables, lo cual plantea una dependencia importante de este país de recursos que tienen un límite en el planeta, esta es una muestra del panorama que en general se replica en otros países.

Haciendo una revisión del crecimiento del consumo energético en el mundo desde el año 2000 hasta el año 2022, se puede ver en la Figura 1.2 la información proporcionada por (Enerdata, s.f.), donde se muestra el aumento que hubo en el mundo, de aproximadamente $13000TWh$ a más de $25000TWh$ consumidos en este periodo de tiempo. Este notable crecimiento, año tras año, pone en evidencia que al pasar el tiempo las actividades humanas consumirán cada vez más energía. Es por esto que se plantea el reto de crear una forma más eficiente de obtener esta energía que supla la necesidad humana y permita depender cada vez menos de las energías no renovables.

Adicionalmente, se deben tener en cuenta en las estadísticas, presentadas en la Figura

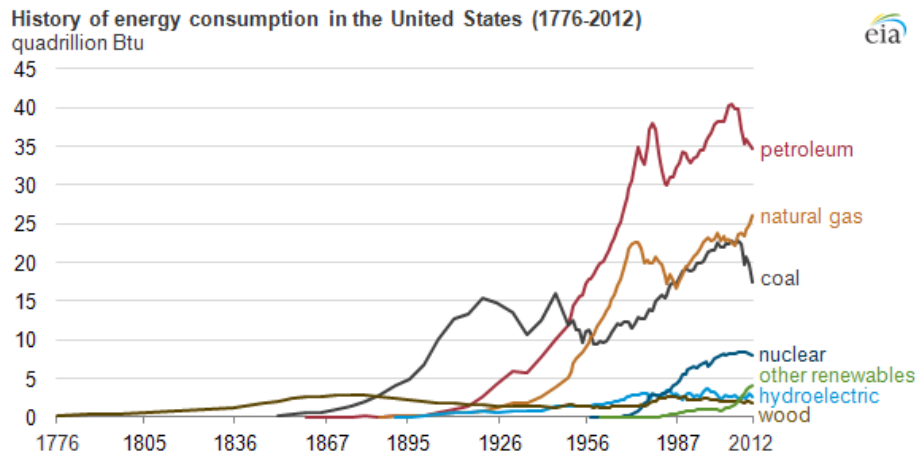


Figura 1.1: Gráfica que describe el consumo de las diferentes fuentes de energía en USA([u.s energy information administration, 2013](#))

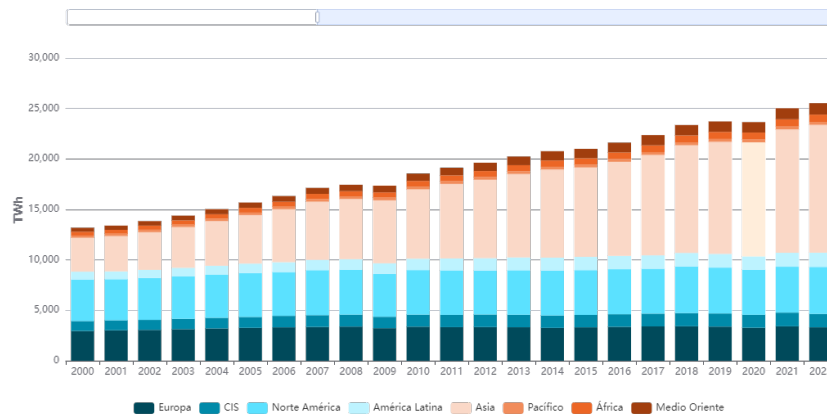


Figura 1.2: Gráfica que describe el consumo energético desde el año 2000 hasta 2022 ([Enerdata, s.f.](#))

1.3, respecto a la contaminación con CO_2 , cómo interviene allí los residuos producto de las actividades humanas. En esta gráfica se presenta el cambio en la emisión de CO_2 entre el año 2000 hasta el año 2022, en los cuales se tiene un crecimiento de 30 000 millones a 40 000 millones de toneladas de CO_2 lanzado a la atmósfera. Este crecimiento, en un gran porcentaje es aportado por el consumo de energías no renovables, lo que contribuye a que la contaminación siga creciendo en el planeta ([Epdata.es, s.f.](#)). Teniendo este breve acercamiento al panorama de la producción de energía, necesidades de la humanidad en este aspecto y consecuencias ambientales de las practicas de producción de energía actuales, en la siguiente sección se abordará cómo se ha tratado de hacer frente a estas problemáticas mediante alternativas propuestas por la humanidad.

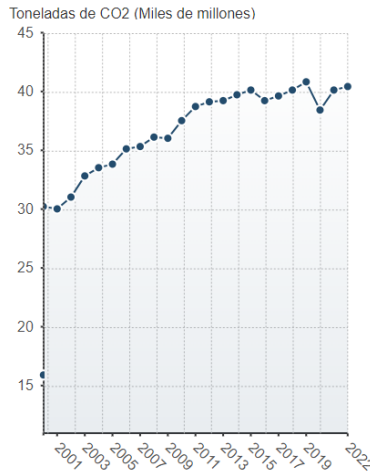


Figura 1.3: Gráfica que describe el crecimiento CO_2 en la atmósfera desde el año 2000 hasta 2022

(Epdata.es, s.f.)

1.2. Tipos de energías renovables trabajadas a nivel mundial y desafíos actuales

1.2.1. Energía solar

Para aprovechar la energía que llega a la tierra proveniente del Sol, en esta sección se hará un acercamiento a la descripción de las emisiones solares y las células fotovoltaicas, una alternativa ampliamente usada en lugares sin acceso a una red eléctrica, pero también una apuesta de grandes proporciones en algunos países como Colombia.

EL SOL

El Sol es una estrella que se encuentra aproximadamente a 150 millones de kilómetros de la tierra, a esta distancia se le conoce como unidad astronómica (UA). Está compuesto principalmente hidrógeno y helio, elementos que representan más del 98 % de su masa total. Esta gran estrella emite energía en forma de radiación electromagnética, producto de los procesos fusión nuclear (los cuales se detallan en el capítulo 3); donde básicamente a partir de dos átomos ligeros (isótopos del hidrógeno) se obtiene el núcleo de un elemento más pesado (helio) el cual es el siguiente elemento de la tabla periódica, en este proceso además se libera energía en forma de radiación y partículas subatómicas a lo que se denomina viento solar. Esta producción de energía se da de acuerdo con la ecuación propuesta por Einstein:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \tag{1.1}$$

Estos productos del proceso de fusión en el Sol, realizan un largo viaje hacia la superficie de la tierra, donde la humanidad ha desarrollado la tecnología para usarlos como fuente aprovechable para las actividades humanas, específicamente la energía se genera por la interacción de la radiación con las placas fotovoltaicas (Marcial, 2019). Durante el viaje de radiación por el espacio desde el Sol hasta la Tierra, esta no sufre pérdidas considerables por interacciones con la materia, sin embargo, la densidad de flujo radiante solar es atenuada de acuerdo con el cuadrado de la distancia. Este es por supuesto un valor constante que describe como es el valor de irradiancia solar incidente en un plano normal al vector Sol Tierra, ver figura 1.4, propuesto por la Organización Meteorológica Mundial(Oscar, 2013)

$$B_0 = 1367 \frac{W}{m^2}$$

$$I_0 = SC \cdot \left[1 + 0.034 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (W/m^2)$$

SC solar constant and n is the day number. 1.377 kW/m²

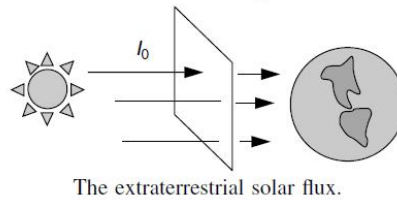


Figura 1.4: flujo de irradiancia solar incidente sobre un plano normal a la tierra (Mírez, 2011)

donde B_0 es la constante de la irradiancia solar en $\frac{W}{m^2}$

Celulasfotovoltaicas

Ahora, teniendo en cuenta que se busca aprovechar específicamente la radiación proveniente del Sol, a la generación directa de electricidad a través de la luz se le denomina como el efecto fotovoltaico. Este fenómeno fue demostrado por primera vez por el físico Antoine Becquerel en 1839. Para que se de este efecto, se necesita un material que pueda absorber la luz solar y convertir la energía radiante en energía eléctrica, una función que realizan las células fotovoltaicas.

Alrededor del año 1870, el profesor inglés W. Grylls Adams y su estudiante R. Evans Day llevaron a cabo experimentos sobre los efectos de la luz en el selenio, observando la generación de un flujo eléctrico que llamaron "Fotoeléctrico". En 1885, Charles Fritts fabricó el primer módulo fotoeléctrico colocando una capa de selenio sobre una base metálica y cubriéndola con una delgada capa de oro transparente. Fritts envió estos módulos a Werner von Siemens, quien los presentó ante la Real Academia de Prusia,

proclamando que era “la primera vez que se demostraba la conversión directa de energía luminosa en energía eléctrica”(Jofra, 2007).

Tras los trabajos de grandes pensadores a inicios del siglo XX y la descripción del efecto fotoeléctrico por Albert Einstein, en 1941 la primera célula fotovoltaica de silicio fue documentada por el ingeniero estadounidense Russell Ohl, aunque la producción de dispositivos fotovoltaicos no comenzó hasta la siguiente década. Las investigaciones posteriores, permitieron el reemplazo definitivo del selenio por el silicio como el material principal para la construcción células fotovoltaicas.

En esta época, además, había un creciente número de investigaciones en materiales semiconductores, lo cual abrió paso para que, a principios de los años 50 en los Bell Laboratories, se iniciara una apuesta por la mejora de las células fotovoltaicas. En el albor de la posguerra se encontraban los científicos de Bell, Calvin Fuller y Gerald Pearson, dedicados a aplicar la teoría del transistor de silicio. Mientras trabajaban en la mejora de los transistores, se les unió otro científico de Bell, Darryl Chapin y juntos comienzan a investigar con selenio y luego con silicio para la construcción de las células fotovoltaicas, desde febrero de 1953, alcanzando eficiencias del 2.3%. Los estudios teóricos de Chapin sugerían que las células de silicio podrían alcanzar eficiencias de hasta el 23%, aunque en la práctica lograron desarrollar una célula con una eficiencia del 6% en 1954 (Jofra, 2007).

Hasta este punto se ha presentado una breve contextualización de la historia que lleva a creación de las celdas fotovoltaicas, ahora se presentarán cuales son los proceso físicos en el material para generar corriente, lo cual permite el consumo de electricidad en el mundo, se iniciara con una descripción de los semiconductores, elementos clave en el desarrollo de las células fotovoltaicas.

La corriente eléctrica se define como un flujo de electrones generado por una diferencia de potencial eléctrico. Todos los materiales contienen electrones, y los átomos de estos materiales se han modelado con núcleos con carga positiva rodeados de nubes de electrones con carga negativa. Según la mecánica cuántica, estos electrones solo pueden ocupar ciertos niveles de energía de acuerdo con los números cuánticos y el principio de exclusión de Pauli. En algunos materiales, la corriente eléctrica fluye con facilidad, mientras que en otros es difícil o incluso imposible, esto se ha estudiado ampliamente a través de la historia, pero en el siglo XX, con el establecimiento de la física del estado sólido surge la teoría de bandas, la cual permite explicar no solo la conducción en los metales, sino también la existencia de semiconductores y aislantes; En un sólido, la gran cantidad de átomos produce que, de acuerdo con el tipo de enlace que se tenga, se generen niveles de energía muy cercanos para cumplir las condiciones cuánticas, lo cual tiene como consecuencia la formación bandas continuas y bandas prohibidas de energía. Los electrones en los átomos de un sólido ocupan estas bandas de forma ascendente, desde los estados de menos energía hasta los de más energía de acuerdo con la cantidad de electrones que se tenga por átomo. La banda llena o semillena que tiene de mayor energía se llama banda de valencia (electrones ligados a átomos), y la banda siguiente,

se le conoce como banda de conducción (donde los electrones se comportan como partículas libres en el material). Estas bandas se encuentran separadas por una banda de energía prohibida, denominada Gap, pero en el caso de los conductores las bandas de valencia y conducción pueden solaparse, permitiendo una transición fácil entre ellas.

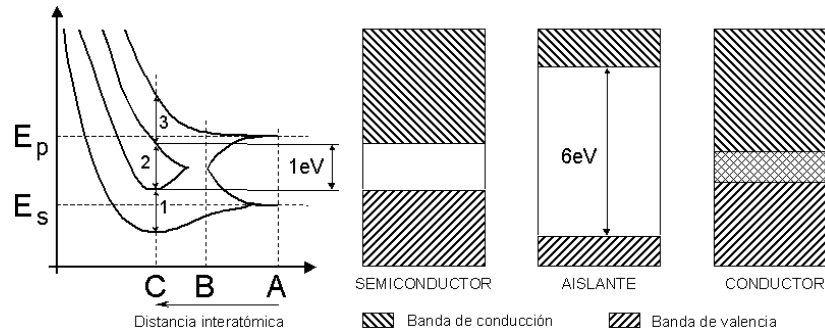


Figura 1.5: Bandas de energía en cristales
([Wikipedia contributors, 2024](#))

Las características eléctricas de un sólido dependen de la relación entre estas bandas. Así, la anchura de la banda prohibida (Gap, E_g) clasifica los sólidos en conductores, aislantes y semiconductores. En un conductor, la E_g es muy baja o nula, permitiendo que los electrones se muevan fácilmente a través de la banda de conducción. En un aislante, la E_g es alta ($E_g > 5eV$), y se requiere mucha energía para que los electrones accedan a la banda de conducción. Por su parte, en un semiconductor, la E_g es menor que en un aislante pero no es nula como en un conductor ($E_g < 5eV$), lo que permite que los electrones pasen a la banda de conducción con menos energía que en el caso de los aislantes. Por ejemplo, el silicio tiene una E_g de 1,12 eV y es ampliamente utilizado en la industria solar, por lo que se mencionará preferentemente este semiconductor([Perpiñan, 2013](#)).

La energía E_g anteriormente mencionada es justamente la que se necesita para que en un material sólido se genere liberación de electrones de la banda de valencia convirtiéndose en electrones de conducción. Este proceso sucede también a temperaturas mayores al cero absoluto ($0K$), por la vibración de los átomos en la red, los electrones que adquieren la energía suficiente generan transiciones entre la banda de valencia y conducción; en la banda de conducción los electrones pueden moverse fácilmente por la acción de un campo externo y en la banda de valencia se pueden desplazar los electrones por la existencia de estados libres (enlaces covalentes con una vacante debida a un electrón que migró a la banda de conducción)([Perpiñan, 2013](#)).

Ahora para entender lo que se concibe como corriente se tiene que estos electrones de la banda de valencia pueden ocupar una vacante en un enlace cercano o átomo cercano, generando a su vez una nueva vacante con carga positiva asociada. Esto da lugar a un desplazamiento aparente de vacantes o huecos cargados positivamente. Así, la corriente en la banda de valencia es descrita a través de la corriente de estos huecos. En conse-

cuencia, al romperse un enlace en un semiconductor puro, se liberan tanto un electrón como un hueco, denominados portadores, quedan libres para moverse por el material. Sin embargo, la densidad de huecos y electrones es idéntica. Esta densidad, denominada densidad intrínseca, depende de la temperatura y de la anchura de la banda prohibida. La corriente eléctrica producida es aleatoria, sin una dirección predeterminada y por tanto, no es aprovechable en un circuito externo. Cada cierto tiempo se producen encuentros electrón-hueco que restablecen un enlace con liberación de energía (E_g) en forma de calor. Este fenómeno se denomina recombinación de un par electrón-hueco, y es favorecido por las impurezas existentes en el cristal. Dado que el objetivo es mantener la existencia de la corriente eléctrica y aprovecharla externamente, es necesario evitar la recombinación para lo que es preciso dirigir el movimiento de electrones y huecos mediante un campo eléctrico. Aplicando un campo eléctrico externo conseguiríamos separar y dirigir los electrones y los huecos, pero la energía empleada en mantener este estado sería superior a la obtenida. Por lo cual se estableció un mecanismo para mantener la conducción eléctrica con base en uso de semiconductores dopados(Perpiñan, 2013).

Los semiconductores dopados tipo n (son materiales semiconductores a los que se les ha añadido impurezas con átomos donadores, que tienen más electrones de valencia que el semiconductor base. Esto introduce portadores de carga mayoritarios en forma de electrones libres, mejorando la conductividad eléctrica del material.) y tipo p (son materiales semiconductores a los que se les ha añadido impurezas con átomos aceptores, que tienen menos electrones de valencia que el semiconductor base. Esto introduce portadores de carga mayoritarios en forma de huecos, que mejoran la conductividad eléctrica del material.) son neutros eléctricamente, lo que los hace inadecuados para aplicaciones electrónicas por sí mismos. No obstante, si un cristal semiconductor puro de *Ge* o *Si* se modifica con impurezas trivalentes¹ y pentavalentes², de manera que una mitad del cristal se dota de impurezas trivalentes y la otra mitad de pentavalentes, se genera una fuerza electroquímica en la unión.

Esta fuerza atrae los electrones del lado n hacia el lado p. Esta atracción se debe al exceso de electrones en el lado n y a su escasez en el lado p, provocando que los electrones migren del lado n al lado p. Como resultado, la región adyacente a la unión en el lado p se carga negativamente, mientras que la región correspondiente en el lado n se carga positivamente. Esta distribución de carga crea una barrera de potencial que bloquea el paso de la corriente eléctrica. Es importante señalar que este efecto solo ocurre con un cristal semiconductor homogéneo y que la unión de dos piezas separadas de materiales n y p no produce el mismo resultado. Tal unión se conoce como un diodo semiconductor, esencial en sistemas de rectificación de corriente alterna.

¹Son átomos con tres electrones de valencia, pertenecientes al grupo III de la tabla periódica. Se utilizan para crear semiconductores tipo P, donde los huecos son los portadores de carga mayoritarios.

²Son átomos con cinco electrones de valencia, pertenecientes al grupo V de la tabla periódica. Se utilizan para fabricar semiconductores tipo N, donde los electrones libres son los portadores mayoritarios.

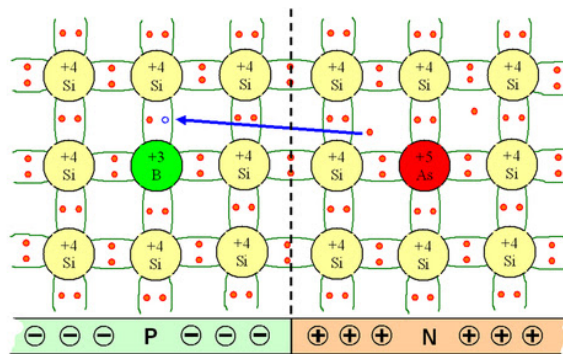


Figura 1.6: cristal con doble impureza
([Optique Ingénieur, 2025](#))

Ahora bien, gracias la explicación dada por Einstein respecto al efecto fotoeléctrico, donde al irradiar con luz una placa metálica se generaba desprendimiento de electrones que eran capaces de cerrar un circuito abierto y generar una corriente en un circuito mediante la idea de cuantos de luz, que posteriormente fueron llamados fotones, se idearon materiales contruidos con la unión $p - n$ específicos para que al irradiarlos con luz se le proporcione la energía necesaria a los electrones para pasar a la banda de conducción. El campo eléctrico de la unión conduce los portadores generados por esta interacción y dificulta la recombinación. Esta corriente de iluminación, denominada fotocorriente, es aprovechable ahora por un circuito externo([Farrera, 2008](#)).

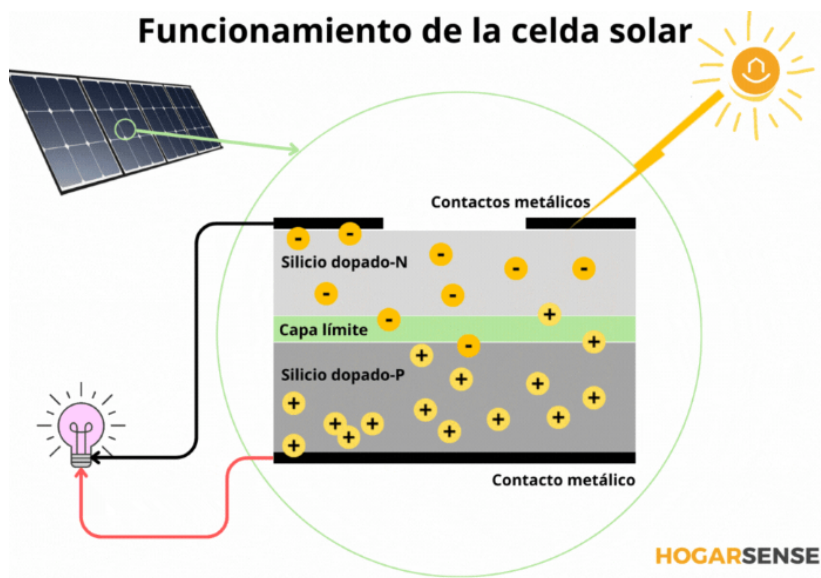


Figura 1.7: funcionamiento de la celda solar
([Carbonell, 2024](#))

Teniendo en cuenta esta aproximación al fenómeno que permite el aprovechamiento

de la luz solar para generar corriente eléctrica y su uso en las actividades humanas, a continuación, se procede a revisar un caso particular de la capacidad que tiene un parque solar en Colombia y cómo se puede proyectar esto a otros proyectos similares.

Ubicado en el departamento colombiano del Cesar, se tiene el Parque Solar la LOMA, donde hay más de 400000 paneles solares, distribuidos en 437 hectáreas una vez sean completadas sus obras. La potencia total instalada será de $187MWdc$ (mega watts de corriente continua), generando $420000MWh$ (mega watts hora) de energía renovable al año (Enelgreenpower, s.f.) Gracias a proyectos como este, ver Figura 1.8, se contempla la magnitud del espacio que se requiere en un parque solar, para generar esa cantidad de energía.



Figura 1.8: parque solar la loma
(Enelgreenpower, s.f.)

Entrando en detalle respecto al calculo aproximado que se genera detrás de la obtención del dato estadístico del consumo de energía en unidad de potencia por hora, con el fin de predecir la cantidad de energía que se puede ofrecer en casos particulares de parques solares al rededor del mundo, los cuales no cuentan con información accesible al publico de esta cantidad de energía hora que podría consumir alguna ciudad, es necesario establecer primero la cantidad media de horas pico del sol al año, estos datos estarán caracterizados dependiendo la zona en que se encuentren en el planeta; cuanto más cerca a la línea del ecuador se encuentre el lugar en cuestión, mayor será esta cantidad de horas. Con este dato se realiza el siguiente calculo:

En el acaso particular del parque solar la LOMA la irradiancia pico en el día es de 6,9 horas, por lo cual, se establece la relación de las ecuaciones 1.2 y 1.3. (Chamorro, 2017)

$$potencia \times horas \text{ pico de sol} \times 365días = potencia \times hora \times año \quad (1.2)$$

$$187MW \times 6,9h \times 365días = 470,959Wh/año \quad (1.3)$$

Actualmente, el parque solar mas grande del mundo es el Parque Solar Bhadla, localizado en el desierto de Thar de Rajasthan en India, su extensión es de 5700 hectáreas y la

potencia de sus paneles alcanza los 2245MW (BHATTACHARJEE, 2021) generando así 7570GWh de energía renovable al año.

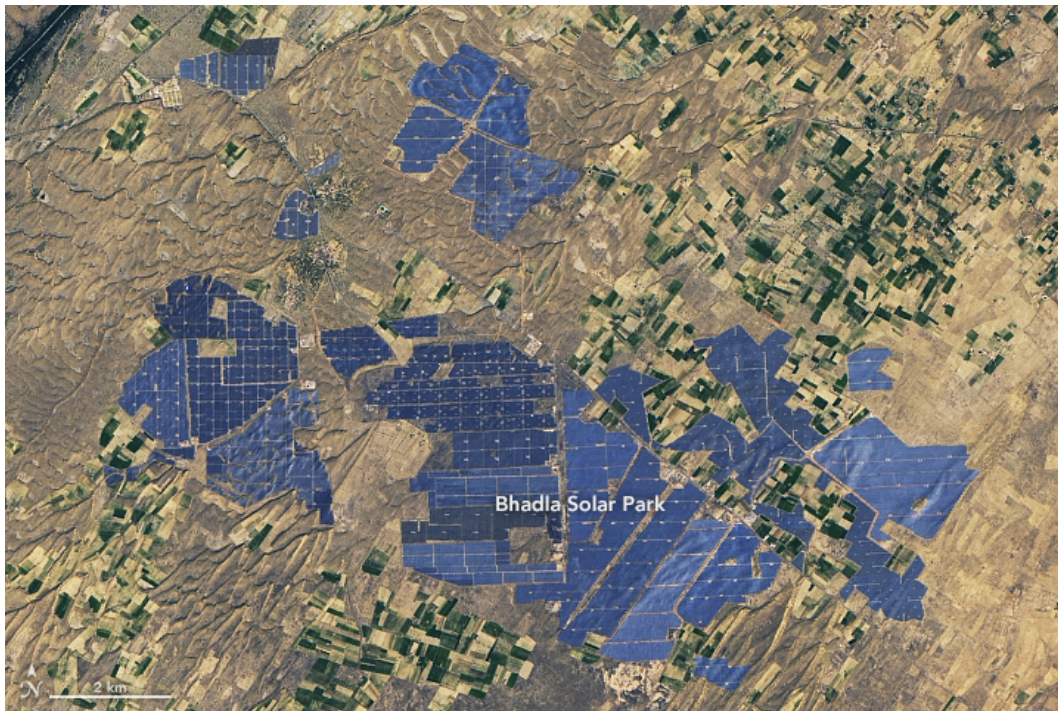


Figura 1.9: parque solar Bhadla
(León, 2022)

1.2.2. Energía Eólica

Otro de los recursos en los cuales la humanidad se ha enfocado para la producción de energía renovable se encuentra a la base del movimiento que puede generar el viento en ciertos objetos, configurados a partir de unas aspas unidas a un eje que rota. Este movimiento ha sido aprovechado desde tiempos antiguos, sin embargo, en la búsqueda de mejorar el panorama energético ahora se usan específicamente para la producción de electricidad. A continuación, se presentan algunas características relacionadas con el viento y la producción de energía eólica.

El viento

En nuestro planeta se genera debido a gradientes térmicos, los cuales son consecuencia de la radiación solar en la atmósfera de la Tierra, esta radiación calienta el aire, el cual asciende generando un vacío que afecta al aire vecino, permitiéndole ocupar su lugar, este desplazamiento de la masa de aire se le llama viento (Espinosa, s.f.). En el caso de nuestro planeta el lugar que mas recibe la radiación solar es la región ecuatorial

permitiendo elevar el aire de los trópicos y reemplazándolo por el aire frío de los polos, teniendo en cuenta que la tierra se encuentra en rotación se describe en la atmósfera un patrón en la dirección del viento.

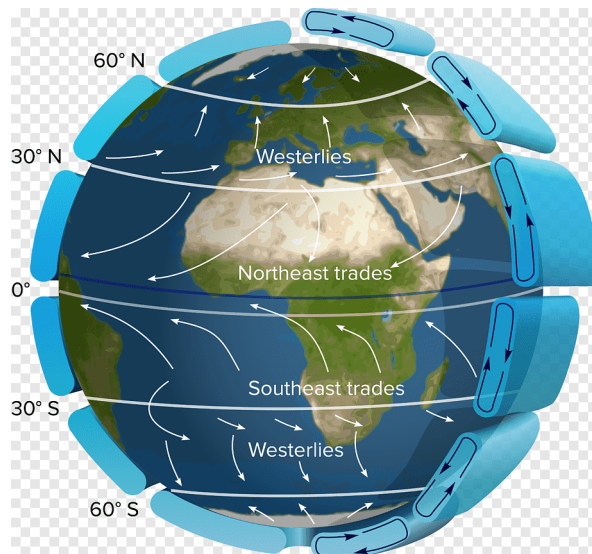


Figura 1.10: Corrientes de aire en la tierra (PNGWing, 2024)

La imagen anterior muestra cómo es esta predominancia de los vientos en la tierra, pero también existen pequeñas variaciones que se pueden dar de manera local, generando configuraciones particulares de viento: las brisas que vienen del mar y las costas, además de las zonas montañosas que describen aires cálidos que ascienden o aires frescos que descienden en el caso del día y en la noche, también es de señalar que los aires cálidos ascienden y los aires frescos descienden generando un flujo constante de manera local en cualquier parte.

Es importante señalar que la velocidad del viento varía con la altura y depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno sobre el cual se desplazan las masas de aire. La variación de velocidad puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (1.4)$$

donde $v_1 < v_2$ representan las velocidades del viento a las alturas $h_1 < h_2$, respectivamente. El exponente α caracteriza al terreno, pudiendo variar entre 0,08 (sobre superficies lisas como hielo, lagunas, etc.) y 0,40 (sobre terrenos muy accidentados) (MoraguesyRapallini, 2003) .

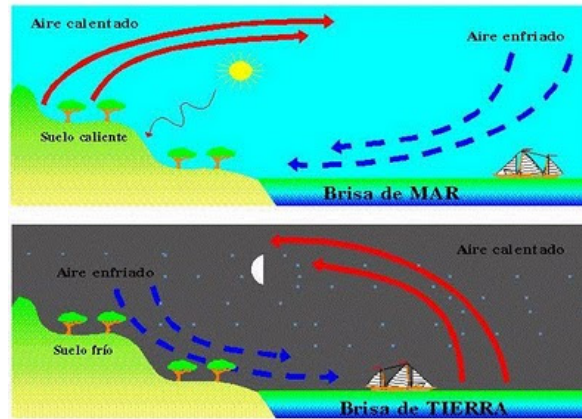


Figura 1.11: Mesoclima
(Cambio climático y planeta, 2014)

Nacimiento de los molinos de viento

El aprovechamiento de la energía del viento data desde el siglo IV y V a.C; los registros mas antiguos de los cuales tiene conocimiento, establecen que fueron los egipcios de las primeras civilizaciones en aprovechar el poder del viento, estos realizaban navegaciones a vela, sin embargo se tiene el aprovechamiento del viento con molinos de viento por parte de los pueblos persas, iraníes y chinos muchos siglos antes; En la era mesopotámica se utilizaban para regar las llanuras, Se trataba de primitivas máquinas eólicas de rotor vertical con varias palas de madera o caña(panémonas), cuyo movimiento de rotación era comunicado directamente por el eje a las muelas del molino.

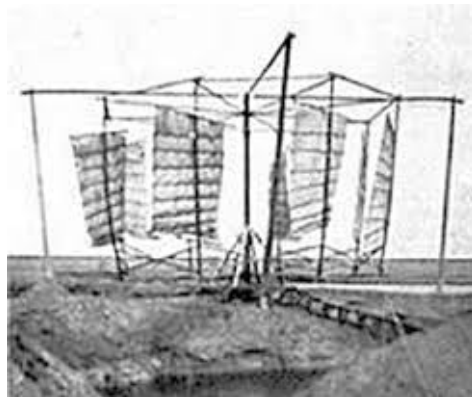


Figura 1.12: Panémonas
(K. S. Sánchez, 2016)

Posteriormente y especialmente en las islas griegas del Mediterráneo, se desarrollaron molinos de viento de eje horizontal cuya principal característica fue el uso de velas triangulares a modo de palas. Aún hoy este diseño es utilizado en la isla griega de

Mikonos para moler granos. Es de destacar que, este tipo de diseño permite ajustar la superficie de captación, según la velocidad del viento, enrollando las velas en sus “mástiles”.



Figura 1.13: Imagen de un molino griego en el que se muestra el dispositivo tipo vertical. (Bibikow, 2025)

El viento y su aprovechamiento tuvo tal impacto que, mediados del siglo XIX aproximadamente 9000 molinos operaban en Holanda, algunos de hasta 65 kW (90 HP). Sin embargo, con la llegada de la Revolución Industrial y su famosa máquina de vapor, comenzaron a darse a la baja los molinos dejando en uso alrededor de 1000 molinos a mediados del siglo XX. El vatio (W) puede ser utilizado más allá de su relación con la corriente eléctrica. En general, mide la potencia o la tasa a la cual se realiza trabajo o se transfiere energía. Por ejemplo, en la mecánica, la potencia de un motor o una máquina se mide en vatios. La fórmula básica es $P = W/t$, donde W es el trabajo realizado y t es el tiempo. Así, un vatio representa la cantidad de energía transferida o consumida por segundo, sin necesidad de involucrar electricidad.

Como en otras regiones del mundo la aparición de alternativas más baratas de abastecimiento energético hizo que paulatinamente fueran reemplazándose por máquinas térmicas o motores eléctricos alimentados desde las redes.

Posteriormente, cuando aumentó la escasez de los recursos no renovables, la preocupación por el daño al medio ambiente y los costos elevados obligaron a buscar alternativas más renovables volviendo nuevamente a resurgir el interés por el recurso eólico.

Aprovechamiento Energético del Viento

En la actualidad el uso de l viento se logra por un principio básico usado por siglos: la energía del viento es captada por las aspas que rotan de forma que se transforma en energía mecánica, este movimiento puede utilizarse para impulsar dispositivos que generen electricidad, esta es una descripción muy superficial ya que no es lo importante

del lo que se busca en este trabajo, sin embargo, precisar cuanta energía puede producir el viento es de suma importancia; la energía teorizada que se puede obtener de aire circundante es:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.5)$$

E_c es la energía cinética, m es el flujo de aire [kg/s] y $[v]$ es la velocidad del viento y el flujo del aire será:

$$m = \delta Av$$

A es el área de Captación [m^2]y δ es la densidad del aire [kg/m_3].

Es de recordar que el mundo real no es posible aprovechar completamente la potencia total de un maquina, su caracterización esta dada por su eficiencia η la cual no superara el 60%, así que se tiene la siguiente ecuación, reemplazando también los valores de área.(Betz, 1920)

$$P = \frac{1}{2}\eta\delta \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) v^3 \quad (1.6)$$

Donde D el diámetro del rotor en [m]. Conociendo las características de una turbina eólica y la velocidad del viento en un instante dado, es sencillo determinar la potencia útil. El problema radica en que la velocidad del viento no es constante y, por lo tanto, es necesario conocer su evolución temporal para estimar la energía útil que una turbina eólica es capaz de entregar en un período determinado. Lamentablemente, las mediciones que se realizan con fines climatológicos no tienen, por lo general, el grado de detalle que requieren ciertos proyectos eólicos. En el caso de instalaciones de pequeña potencia, o para analizar la predictibilidad de instalaciones de potencias altas, existen métodos estadísticos que permiten, a partir de las características de un lugar y la velocidad media del viento, determinar la distribución de velocidades horarias a lo largo de, por ejemplo, todo un año y estimar la energía útil anual obtenible. Cuando se trata de instalaciones de mayor potencia será inevitable la realización de mediciones especiales, como frecuencia y velocidad máxima de ráfagas, que contribuyan a la selección de las máquinas y a un cálculo más preciso de la rentabilidad del proyecto.(MoraguesyRapallini, 2003).

El proyecto del parque eólico mas grande del mundo se encuentra en la provincia occidental de Ganzu en China, ubicado en zonas desérticas la cual posee gran abundancia de viento, el ultimo dato que se tiene registro es de una capacidad instalada de generación de energía de 25200MW (Peishen, 2021), cuenta con aproximadamente 7000 aerogeneradores ocupando una superficie de más de 1.500 kilómetros cuadrados.



Figura 1.14: Parque Eólico Ganzu
(EVWind, 2019)

En Colombia se tiene el proyecto Guajira I de Isagen S.A., ubicado al norte del país cuya construcción finalizó en diciembre de 2021, cuenta con 10 aerogeneradores de 78 metros de altura, con una capacidad para la generación de 20MW de energía limpia, que equivalen al consumo de 33 295 familias colombianas y a una reducción de 136 toneladas de CO_2 (Isagen, 2021).



Figura 1.15: Parque Eólico Guajira 1
(Isagen, 2021)

1.2.3. Energía hidroeléctrica

Una de las formas de energía renovable que se adapta en el mundo, ya que no es necesario grandes tecnologías avanzadas ni compra de materia prima y en cuestiones políticas generado una independencia de los demás países lo que permite que en el contexto latinoamericano, puedan los países del tercer mundo obtener una forma de energía limpia es el agua, este es el elemento necesario en la industria de las energías limpias en el caso particular de las hidroeléctricas en esta no se genera un deterioro, permitiendo así darle mas usos tales como el riego, usos sanitarios, industriales etc.

Este recurso renovable supone una fuente energética limpia y autóctona que aprovecha los saltos de agua naturales o artificiales. Para su explotación se necesita construir las infraestructuras adecuadas.

Las instalaciones hidroeléctricas deben contar con una serie de características para garantizar su eficiencia y sostenibilidad. En primer lugar, es fundamental que la ubicación sea estratégica, con disponibilidad de caudales constantes y una topografía que permita el aprovechamiento del desnivel del agua. Además, deben diseñarse presas o embalses que regulen el flujo hídrico y aseguren el suministro energético de manera estable. Otro elemento clave es la casa de máquinas, donde se encuentran las turbinas y los generadores eléctricos. Estas estructuras deben estar diseñadas para minimizar pérdidas de energía y optimizar la conversión de la fuerza del agua en electricidad. También es importante la instalación de sistemas de control y monitoreo que permitan una gestión eficiente del recurso hídrico y de la producción energética. Por último, es esencial considerar el impacto ambiental de la infraestructura. Las hidroeléctricas deben contar con medidas de mitigación para proteger los ecosistemas acuáticos y terrestres, asegurando la conservación de la biodiversidad y el uso responsable del agua en la región (autores, 2017).

La primera central hidroeléctrica moderna se creó en Gran Bretaña, en 1880. En la actualidad, alrededor del 20 % de la electricidad empleada en el mundo procede de la energía hidroeléctrica, siendo Canadá y Estados Unidos las primeras potencias productoras. Haciendo un acercamiento a los inicios del uso de esta tecnología, se conoce que los antiguos romanos y griegos aprovechaban la energía del agua para moler trigo. Sin embargo, la facilidad de emplear esclavos y animales era la potencia que generaba la electricidad. Durante la edad media, las grandes ruedas hidráulicas de madera desarrollaban una potencia máxima de cincuenta caballos. La energía hidroeléctrica debe su mayor desarrollo al ingeniero civil británico John Smeaton, que construyó por vez primera grandes ruedas hidráulicas de hierro colado. La hidroelectricidad tuvo mucha importancia durante la Revolución Industrial dado que impulsó las industrias textil y del cuero y los talleres de construcción de máquinas a principios del siglo XIX. (Expoenergía, 2017) Aunque los ingleses reconocieron el valor de la potencia del agua para generar electricidad, la primera presa hidroeléctrica fue construida en Wisconsin por la Compañía de Luz Appleton Edison y puesta en marcha en 1882 (Jenison, 1919). Antes de la Appleton Edison, se utilizaba el vapor de agua para la generación de energía. H.F. Rogers, propietario de la firma, se le ocurrió que el agua pasando a través de una turbina podría generar electricidad también. En 1870, se construyó en Craggside Rothbury, Inglaterra la primera central hidroeléctrica que se utilizó en Inglaterra y en 1879, las fuerzas de las cataratas del Niágara se utilizaron para construir la Central hidroeléctrica que en 1871 convertiría a Niágara Falls en la primera ciudad iluminada por energía hidroeléctrica (Tavalán Hernández, 2004). A partir de entonces, los Estados Unidos reconocieron el valor de invertir en la producción de energía hidroeléctrica.

Ahora bien, la energía hidroeléctrica, nace como una combinación entre energía hidráu-

lica que generara energía cinética y que se transforma en eléctrica por medio de unos dinamos, cuando se realiza una inducción electromagnética para crear fuerza electromotriz con fundamento en los estudios de Alessandro Volta, Thomas Alva Edison, Nicola Tesla, Marconi, Oersted, Maxwell y Faraday (John W. Jewett, 2008). Existen varias configuraciones de centrales eléctricas unas directamente puestas en el pie de una represa, también por medio de canales que permiten la captación del agua o una mezcla entre las dos en la imagen de la figura 1.16 se observa cómo es la configuración generar que compone este tipo de centrales.

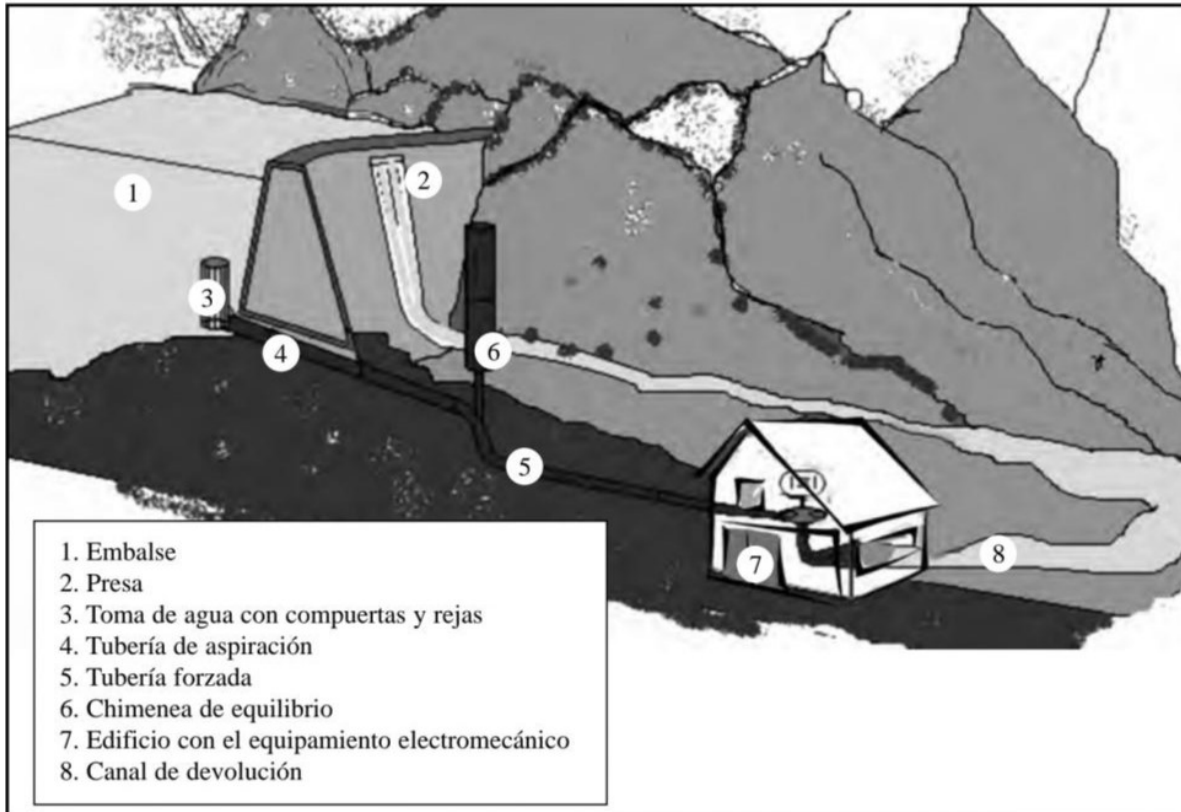


Figura 1.16: Central Hidroeléctrica de Embalse
.(Osorio, 2008)

Fundamentos de la Producción de Energía Hidroeléctrica

a continuación se dará una mirada de las variables que permiten conocer la producción de energía de las centrales hidroeléctricas.

Potencia instalada

La potencia instalada o bien potencia útil nominal descrita en la ecuación 1.7 depende de la las siguientes variables

$$P_i = \gamma \cdot Q_e \cdot H_n \cdot \eta_t \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot \eta_{tr} \quad (1.7)$$

- P_i = Potencia instalada
- γ = Peso específico del agua ($9,81 \text{KN/m}^3$)
- Q_e = Caudal de equipamiento (m^3/s)
- H_n = Salto neto (m)
- η_t = Rendimiento de la turbina
- η_m = Rendimiento del multiplicador
- η_g = Rendimiento del generador
- η_{tr} = Rendimiento del transformador

en el caso del rendimiento η se puede tomar como un promedio de los existentes que es de 0,8 a 0,85 reduciendo la ecuación a:

$$P_i = 0,8 \cdot \gamma \cdot Q_e \cdot H_n \quad (1.8)$$

En un estudio riguroso de la potencia de los diferentes caudales, se debe generar una aproximación matemática mediante las curvas de rendimiento. Si en lugar de caudal de equipamiento Q_e se utiliza el caudal en un momento dado, la potencia corresponderá a la potencia instantánea.

En los saltos de media y gran altura se admite que las variaciones del nivel entre la lámina de agua y el canal de descarga sean despreciables. Sin embargo, en pequeños saltos se debe tener en cuenta estas variaciones [Osorio \(2008\)](#).

Una turbina trabajando a una altura H_m menor que la de equipamiento admitirá un caudal Q_m de forma que este caudal estará relacionado según la siguiente fórmula:

$$\frac{Q_e}{Q_m} = \sqrt{\frac{H_e}{H_m}} \quad (1.9)$$

Donde,

Q_e : Caudal de equipamiento ($\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$)

H_e : Salto de equipamiento (m)

Como se desprende de la ecuación 1.7, la potencia y por tanto la energía producida, son directamente proporcionales a la altura del salto de agua del aprovechamiento. Se llama altura del salto de agua a la distancia vertical recorrida por una masa de agua desde un determinado nivel superior a otro inferior y básicamente, se distinguen cuatro tipos de saltos:

Salto bruto (H_B):

Es el salto total existente, y su valor es igual a la diferencia de altura entre el nivel de aguas arriba del salto y el nivel inferior. El nivel inferior depende del tipo de turbina: en el caso de las turbinas de reacción corresponde al punto de devolución del agua al río, mientras que en el caso de las turbinas de acción el nivel inferior viene dado por el punto donde el agua golpea a las cazoletas del rodete (Osorio, 2008).

Salto útil (H_u):

Es la diferencia de altura entre el nivel de la cámara de carga y el nivel inferior.

Pérdidas de carga (h_p):

Corresponden a la pérdida de altura efectiva debido a rozamientos en los diversos elementos de conducción y control del caudal, desde el nivel en la cámara de carga y el nivel inferior.

Salto neto (H_n):

Es el valor obtenido de restarle al salto útil todas las pérdidas de carga h_p . Este es el salto empleado para el cálculo de la potencia de turbina

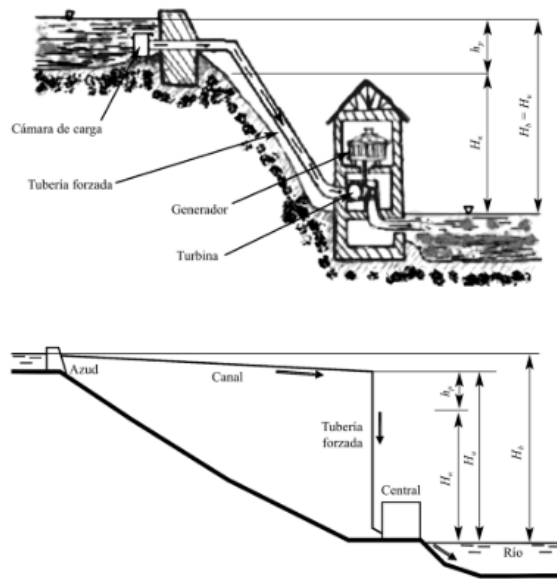


Figura 1.17:
(Osorio, 2008)

La **Represa de las Tres Gargantas** es la central hidroeléctrica más grande del mundo en términos de capacidad instalada. Ubicada en el río Yangtsé, en la provincia de

Hubei, China, representa una de las obras de ingeniería más ambiciosas de la historia moderna. Su construcción y operación han tenido un impacto significativo en los aspectos económicos, sociales y ambientales de la región.

Información General

- **Nombre:** Represa de las Tres Gargantas.
- **Ubicación:** Río Yangtsé, cerca de la ciudad de Yichang, provincia de Hubei, China.
- **Capacidad Instalada:** 22.500 MW (megavatios).
- **Altura de la Represa:** 181 metros.
- **Longitud de la Represa:** 2.335 metros.
- **Reservorio:** Capacidad de almacenamiento de 39.300 millones de metros cúbicos, con una longitud de 600 kilómetros.
- **Año de Finalización:** 2012 (aunque empezó a operar parcialmente en 2003).
- **Costo Estimado:** Aproximadamente \$31.000 millones de dólares.

Características Técnicas

- **Generación de Energía:** La represa cuenta con 32 turbinas principales de 700 MW cada una, junto con 2 turbinas más pequeñas de 50 MW, alcanzando una capacidad total de 22.500 MW.
- **Control de Inundaciones:** La capacidad del embalse permite regular el flujo del río, mitigando el impacto de inundaciones históricas en la región.
- **Infraestructura Adicional:** La represa incluye un sistema de esclusas y un ascensor para barcos, facilitando la navegación para embarcaciones de gran tamaño.

Historia y Desarrollo

La idea de construir una represa en el río Yangtsé fue propuesta por primera vez en 1919 por Sun Yat-sen, fundador de la República de China. La planificación moderna comenzó en la década de 1950, pero la construcción se retrasó debido a factores políticos, económicos y técnicos. Finalmente, la construcción inició oficialmente en 1994 y fue dividida en fases para permitir la operación parcial de la planta mientras se completaba el resto de la estructura. El último generador fue conectado en 2012.

Los principales objetivos de la represa incluyen la generación de electricidad, el control de inundaciones en el bajo Yangtsé y la mejora de la navegación fluvial.

Impactos y Controversias

La represa ha traído consigo beneficios significativos, como la generación de energía limpia que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, mejoras en la navegación fluvial y el transporte de mercancías, y un control efectivo de las inundaciones en el valle del Yangtsé. Sin embargo, también enfrenta desafíos importantes.

Más de 1,3 millones de personas fueron reubicadas debido a la construcción del embalse. Además, la represa ha alterado significativamente los ecosistemas locales, afectando la biodiversidad del río Yangtsé y contribuyendo a la extinción de especies como el delfín del río Yangtsé. También ha incrementado la incidencia de deslizamientos de tierra y pequeños terremotos en la región. Por último, ha sido objeto de críticas sociales por la falta de transparencia en la toma de decisiones y los impactos negativos en comunidades locales.

Importancia Global

La Represa de las Tres Gargantas es un símbolo de la capacidad de China para emprender proyectos de infraestructura a gran escala. Representa tanto los logros técnicos del país como los complejos desafíos asociados con proyectos de esta magnitud. Su éxito o fracaso tiene implicaciones significativas para futuros proyectos de energía hidroeléctrica en todo el mundo. (Corporation, 2023)



Figura 1.18: Represa de las Tres Gargantas
(Corporation, 2023)

En Colombia, la generación de energía hidroeléctrica desempeña un papel fundamental en el suministro eléctrico del país. Las principales plantas hidroeléctricas, como la Central Hidroeléctrica del Guavio y el Proyecto Hidroeléctrico Hidroitungo, destacan no solo por su capacidad instalada, sino también por su impacto ambiental, social y económico. Se presenta un análisis de ambas plantas basado en estudios técnicos y académicos.

Central Hidroeléctrica del Guavio

La Central Hidroeléctrica del Guavio, localizada en el departamento de Cundinamarca, es actualmente la planta hidroeléctrica más grande en operación en Colombia. Con una capacidad instalada de 1.260 MW, abastece aproximadamente el 7% de la demanda energética nacional.

:Impactos Ambientales Según un estudio de la Universidad Militar Nueva Granada, la construcción del Guavio generó impactos significativos, especialmente en la biodiversidad y en las comunidades locales que debieron ser reubicadas ([Granada, 2022](#)).

Características Técnicas: El embalse del Guavio tiene una capacidad de almacenamiento considerable y está diseñado para garantizar la estabilidad energética en la región. Su operación subterránea también minimiza la exposición de la infraestructura a condiciones climáticas adversas ([de Minas y Energía de Colombia, 1992](#)).

Proyecto Hidroeléctrico Hidroituango

El Proyecto Hidroeléctrico Hidroituango, ubicado en el departamento de Antioquia, está diseñado para ser la planta más grande del país, con una capacidad instalada planificada de 2.456 MW. Este proyecto ha enfrentado múltiples desafíos técnicos, incluyendo una grave contingencia en 2018 ([Invest, 2018](#)).

Inspección Técnica y Análisis Geológico: El Servicio Geológico Colombiano destaca la necesidad de monitorear continuamente el macizo rocoso sobre el cual se construye la presa, dado su impacto en la estabilidad de las obras ([Colombiano, 2022](#)). Además, informes independientes sugieren mejoras en los procedimientos de construcción para evitar futuros riesgos ([Vivos, 2018](#)).

Las plantas hidroeléctricas en Colombia representan un pilar esencial para el desarrollo energético del país. Tanto El Guavio como Hidroituango simbolizan el avance tecnológico y los desafíos de la ingeniería moderna en contextos complejos.

1.3. Energías renovables en América latina y Colombia

En los últimos años, el suministro total de energía mundial ha seguido aumentando. En contraste, el porcentaje de producción de petróleo ha disminuido significativamente a lo largo de las décadas, la contribución de la energía nuclear y el gas natural han tenido un aumento significativo. El desarrollo de fuentes de energía renovables se justifica porque ofrecen reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitigar el cambio climático, oportunidades de creación de empleo y desarrollo tecnológico. Es también de resaltar, la independencia de dichas fuentes de energía respecto de los combustibles fósiles, los cuales son finitos, agotadores y tardarán millones de años en regenerarse

por completo. Vale la pena enfatizar que el mundo está siendo testigo de un rápido crecimiento de las energías renovables dando lugar a empresas de fabricación y distribución, por lo cual las empresas eléctricas están actualizando sus modelos de negocio e infraestructura de red (Robles, 2018).

Las políticas energéticas y establecimiento de objetivos de reducción de emisiones y reducción de la dependencia de las energías renovables se han potenciado en los países en desarrollo. América Latina necesita unirse para promocionar la participación de las energías renovables en los mercados energéticos. La primera tarea es que las unidades gubernamentales deben centrarse en garantizar que todas las políticas y estrategias permitan proponer el uso a gran escala de energías renovables a través de planes de desarrollo, para garantizar su sostenibilidad. Con este propósito se requiere la participación de la sociedad y las empresas en todas las etapas, desde las etapas iniciales del proyecto hasta su implementación.

Sin embargo, la necesidad de presencia del Estado en los países latinoamericanos en proyectos de producción de energías limpias permitiría garantizar a los inversores y a la misma sociedad que no se incrementen los problemas sociales y ambientales asociados a las energías no renovables y que se tenga condiciones óptimas de seguridad, lo cual solo será posible en tanto el común denominador de las personas pueda entender la necesidad de avanzar en las energías renovables, pero para poder llevar a cabo todos estos procesos deben tener unos cimientos desde la academia que genere concientización y divulgación entre las sociedades del mundo con trabajos como este (Robles, 2018).

Actualmente se pueden encontrar organizaciones como la Red Latinoamericana para la Educación y la Capacitación en Tecnología Nuclear (LANENT), la cual se "... estableció para promover, gestionar y preservar los conocimientos nucleares y garantizar la disponibilidad ininterrumpida en el ámbito nuclear, en la región de América Latina y el Caribe, de recursos humanos con talento y cualificados" (IAEA, 2023). Uno de los propósitos de esta organización es "crear conciencia entre la población acerca de los beneficios de la tecnología nuclear y sus aplicaciones" y por tanto, en esta misma vía de acción el presente proyecto se propone como un insumo que permita mostrar a las siguientes generaciones, específicamente a los estudiantes de media y pregrado la importancia de involucrarse en los proyectos de producción de energía del futuro, así como entender de manera general las ventajas y diferencias entre la fusión y la fisión, donde esta última es el proceso ampliamente utilizado en el mundo para aprovechar la energía nuclear.

1.4. Necesidad de energías renovables: Problemáticas de las actuales formas de producción de energía

A finales del siglo XX e inicios del siglo XXI, se incrementó la preocupación por la escasez de los recursos no renovables como los combustibles fósiles y sus consecuencias

en el planeta tierra, entonces surgió la necesidad de transitar hacia una producción de energías más limpias y renovables como la energía solar, eólica, hidroeléctrica, nuclear, entre otras (González, 2009). Las energías renovables tienen beneficios ambientales significativos al ser más limpias y sostenibles que las fuentes de energía no renovable. Sin embargo, también presentan desafíos como los siguientes:

1. **Intermitencia:** en el caso de la energía solar, esta depende de la luz del sol, por su parte la energía eólica depende del viento, lo que significa que la producción puede ser intermitente y no constante.
2. **Almacenamiento:** almacenar la energía producida para su uso cuando la fuente es intermitente es un desafío tecnológico y costoso, en el caso de la biomasa requiere de mayores sistemas de almacenamiento debido a que su densidad energética es menor.
3. **Localización geográfica:** en el caso de la energía solar y eólica se debe tener en cuenta que no todas las regiones tienen suficiente luz solar o viento para generar energía de manera eficiente, lo que limita su aplicabilidad en ciertas áreas geográficas.
4. **Impacto ambiental:** aunque éstas formas de producción de energía son más limpias en comparación con los combustibles fósiles, las energías renovables también pueden tener impactos ambientales, como la alteración del paisaje para la instalación de paneles solares, turbinas eólicas y centrales hidroeléctricas. Respecto a la obtención de la energía por procesos de fisión quedan desechos que son perjudiciales en temas de salud para los humanos, los animales y los ecosistemas al ser radiactivos.
5. **Costos iniciales:** aunque los costos están disminuyendo, la instalación de infraestructuras para energías renovables puede ser costosa comparada con las plantas tradicionales.

Es importante tener en cuenta que en la investigación y el desarrollo actuales alrededor de cómo suplir las necesidades energéticas de las actividades humanas, se están abordando estos desafíos para hacer que las energías renovables sean más viables y accesibles a largo plazo. Por tanto, en el siguiente apartado se darán a conocer más ampliamente los tipos de energías renovables más usadas a nivel mundial, además de tratar para cada una de ellas el surgimiento (un poco de historia), una breve descripción de los procesos físicos, producción y algunas propuestas emergentes para la mejora de estas.

Capítulo 2

Historia de la Energía Nuclear

Desde la época de la antigua Grecia, Demócrito (460a.C. hasta 370a.C.) definió la parte más pequeña de la materia como el átomo que a su vez es indivisible; posteriormente, luego de mucho tiempo, tras la creciente necesidad de crear un elemento teórico fuerte que fundamente el comportamiento de los fenómenos tratados como los fluidos y el comportamiento de los gases desde la termodinámica, llega la revolución científica y el desarrollo de la química moderna en los siglos XVIII y XIX, se hicieron descubrimientos cruciales sobre la naturaleza de la materia. La formulación de leyes, como la ley de conservación de la masa de Lavoisier y la ley de proporciones definidas de Proust, mostraron que los compuestos estaban formados por átomos en proporciones específicas. Recordando que existió una época de oscuridad que dado los conflictos sociales económicos y políticos el conocimiento se vio fragmentado, perdido dentro de lo que fue lo más importantes para las civilizaciones de la época las enseñanzas centradas en la teología.

De acuerdo con esto, surge una cuestión importante: los átomos que forman cada elemento son iguales según lo dicho por Jhon Dalton en 1803; el trabajo de Dalton establece las bases para que científicos como Dmitri Mendeleev se encargara de presentar una organización que permitiera mostrar las características de los elementos, dando así paso al surgimiento de la tabla periódica. Posteriormente, a finales del siglo XIX, J.J Thomson con sus experimentos de tubo de rayos catódicos permitió que se replanteara el concepto de átomo, dando origen a un modelo llamado "pudin de pasa"; una distribución homogénea positiva con cargas negativas como pasas incrustadas, presentando por primera vez la idea de que la materia se encuentra compuesta por corpúsculos más pequeños que los átomos, los cuales además tienen una carga definida. Desde aquí el concepto de átomo cambia rápidamente y a principios del siglo XX con las investigaciones de Rutherford, quien en 1911 por medio del bombardeo de partículas alfa a una lamina delgada de oro obtiene como resultado de esta interacción, que las partículas alfa no describían las trayectorias y desviaciones previstas dado el modelo de carga positiva de Thomson al pasar por el metal y por el contrario algunas de ellas tenían desviaciones

con ángulos cercanos a los 180° , como si rebotaran contra una pared, lo que le permitió teorizar alrededor de una nueva forma de átomo la cual contaba con un núcleo denso cargado positivamente.

Algunos años antes, Marie Curie en sus estudios enfocados hacia el fenómeno de emisión de rayos de sales raras de uranio en 1898, trabajadas previamente por Henri Becquerel, consigue consolidar un estudio sobre la conductividad del aire bajo la influencia de la rayos (radiación) emitidos por el uranio. El procedimiento experimental era, en principio, sencillo: colocaba el uranio en medio de dos placas paralelas tal como un condensador, utilizaba entonces el electrómetro de cuarzo piezoeléctrico (desarrollado, por Pierre Curie) para comprobar si pasaba alguna corriente eléctrica por el aire contenido entre las placas. Cuanta mayor fuese la intensidad de esa corriente, mayor la “actividad” (es decir, la “potencia”) radiactiva de la sustancia. Se trataba, en suma, de procedimientos básicamente físicos, no químicos. Con esto ella procedió estudiar otros materiales con la misma técnica generando así los cimientos para el estudio del fenómeno de la radiactividad y como resultados descubrió dos elementos radiactivos el radio (*Ra*) y el polonio (*Po*), nombrados así por ella (Ron, 2011).

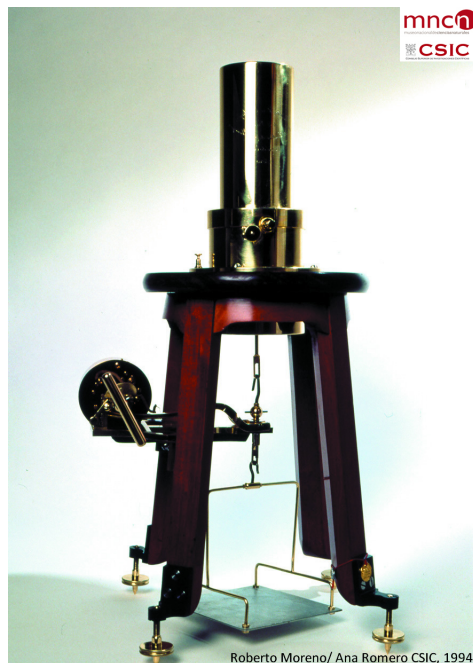


Figura 2.1: Generador piezoeléctrico Pierre Curie. Patrimonio histórico del CSIC (4102H).

(Museo Virtual del CSIC, 2025)

Posteriormente, en 1903 Frederick Soddy, colaboró con Ernest Rutherford para estudiar los procesos de desintegración radiactiva, no nombrado así por Henri Bequerel pero si pensado de esa manera. Juntos, desarrollaron el concepto de que los elementos radiactivos podían transformarse en otros elementos a través de la emisión de partículas alfa

y beta. Este trabajo sentó las bases para la comprensión moderna de la radiactividad y por medio de algunos experimentos demostró que la emisión de estos rayos, de elementos como el radio, eran núcleos de helio y radiación γ . De esta forma, posteriormente se describe la desintegración radiactiva como un proceso nuclear espontáneo en el cual un núcleo inestable emite partículas o radiación para alcanzar un estado más estable (Soddy y Rutherford, 1902).

Realizando un paréntesis es importante entender los tipos de radiación que emiten los átomos radiactivos; la desintegración radiactiva implica tres tipos principales de emisiones::

- **Partículas alfa (α):** Núcleos de helio (${}^4_2\text{He}$) emitidos por elementos pesados como el uranio y el torio.
- **Partículas beta (β):** Electrones (β^-) o positrones (β^+) emitidos durante la transformación de un neutrón en un protón o viceversa, para estabilizar un núcleo y lograr un equilibrio entre protones y neutrones.
- **Radiación gamma (γ):** Fotones de alta energía emitidos para liberar el exceso de energía de un núcleo ya estable.

Continuando con el análisis que se realizaba a inicios del siglo XX sobre la radiactividad, Soddy y Rutherford demostraron que la desintegración radiactiva sigue una ley exponencial, descrita matemáticamente como:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2.1)$$

donde:

- $N(t)$ es el número de núcleos restantes en el tiempo t ,
- N_0 es el número inicial de núcleos,
- λ es la constante de desintegración.

A partir de sus estudios, Soddy formuló la *Ley de desplazamiento radiactivo*, que describe cómo cambian los elementos durante la desintegración:

- **Emisión alfa:** El núcleo pierde dos protones y dos neutrones, desplazándose dos posiciones atrás en la tabla periódica.
- **Emisión beta:** Un neutrón se convierte en un protón, desplazándose una posición adelante en la tabla periódica.

En 1913, Soddy introdujo el término *isótopos* para describir átomos de un mismo elemento químico que tienen el mismo número de protones pero diferente número de neutrones. Este concepto explicó por qué ciertos elementos presentaban propiedades químicas idénticas, pero masas atómicas diferentes, esto es, tienen igual Z (número de protones) y diferente A (masa atómica) (Soddy, 1913); cuando un núcleo atómico emite

una partícula α , el átomo se transforma en otro debido a que su masa atómica disminuye en cuatro unidades y su número atómico en dos. El esquema de la desintegración es el siguiente:



Aquí se muestra que el núcleo, inicialmente con número atómico Z y masa atómica A , al desintegrarse emitiendo una partícula α cambia a otro con número atómico $Z - 2$ y masa atómica $A - 4$.

Cuando hay emisión de partículas β^- , un neutrón se convierte en protón y se emite un electrón, por tanto, el número atómico del nuevo elemento es $Z + 1$ y su masa nuclear permanece igual, porque la masa de un electrón es despreciable comparada con la masa del núcleo. Cuando las masas de dos elementos son las mismas los núcleos se denominan *isóbaros*. El esquema de la desintegración beta es el siguiente:



Cabe aclarar que no todos los isótopos son radiactivos y algunos elementos no radiactivos poseen isótopos que si lo son.

En “*The Radioactive Transformations and the Discovery of Isotopes*” fue una de las primeras publicaciones de Frederick Soddy junto a Kasimir Fajans, donde se habló que en este proceso de desintegración ocurría un tipo de serie de decaimiento, lo que llevo a datar el decaimiento del uranio ya que era el elemento radiactivo mas estudiado de la época, esta serie se muestra en la figura 2.2 y en la figura 2.3 se muestran los tiempos de decaimiento.

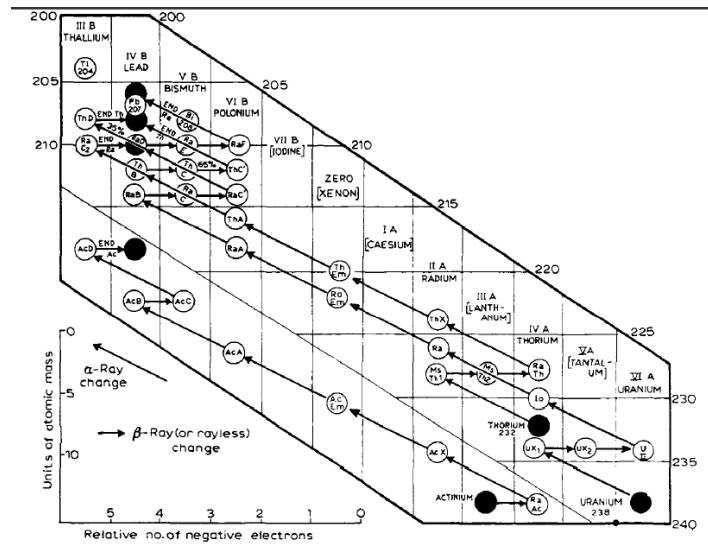


Figura 2.2: Serie Radiactiva de el Uranio 238 (Soddy, 1922)

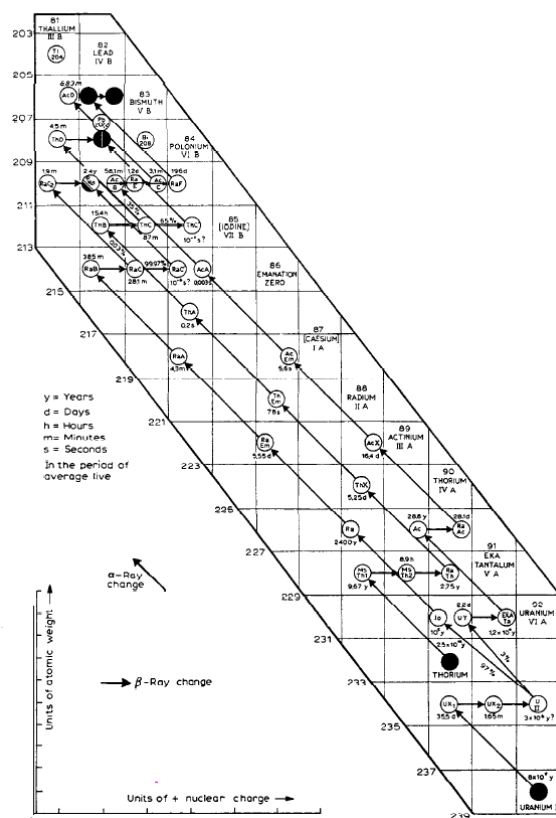


Figura 2.3: Serie Radiactiva de el Uranio 238, Tiempos de Vida Media (Soddy, 1922)

Paralelamente, en 1913 Niels Bohr estableció aspectos claves para una mayor composición de un modelo atómico: propuso que las orbitas de los átomos donde se establecen los electrones están cuantizadas al igual que su energía, por tanto en cambios de órbitas se emiten o absorben fotones de longitud de onda definida, dando así una base para el desarrollo de mecánica cuántica. Esta propuesta de Bohr genera un cambio más profundo en la descripción de los fenómenos a escalas atómicas y subatómicas desde que Planck propuso que en un cuerpo negro "un oscilador sólo emite energía cuando pasa de un estado de mayor energía a otro de menor energía", Bohr enunció sobre esto, que la frecuencia del oscilador era análoga a la frecuencia del movimiento circular del electrón alrededor del núcleo atómico, describiendo así que el átomo sólo emite radiación electromagnética cuando uno de sus electrones pasa de un estado de mayor energía a otro de menor energía. Existen entonces para Bohr estos lugares llamados estados estacionarios en los cuales un electrón puede moverse sin emitir radiación electromagnética; las orbitas están restringidas según múltiplos de la constante de Plank reducida, su velocidad y su masa, estos múltiplos que demuestran la cuantización de la energía y a su vez la energía necesaria para pasar de un estado base a un estado excitado (García Mauricio, 2003).

El modelo de Bohr sufrió modificaciones en investigaciones que trataban de adaptar la ya comprobada teoría de la relatividad y las condiciones de estructura fina de la materia en la década de los 20', estableciendo diferentes modelos atómicos hasta llegar al modelo de Schrödinger. Pero luego, en 1934, la pareja Joliot-Curie llevó a cabo un experimento innovador: bombardearon una fina pieza de aluminio con partículas alfa descubriendo que tras el bombardeo éste emitía una radiación, la cual permanecía en el interior de un aparato conocido como cámara de nubes, y que esta radiación continuaba incluso después de retirar la fuente. Esto significaba que los átomos de aluminio estables se habían tenido que convertir en otro elemento radiactivo, concretamente en un isótopo radiactivo del fósforo. Las implicaciones eran enormes: por primera vez en la historia, se habían creado elementos radiactivos de forma artificial. Este logro revolucionó la comprensión de la estructura atómica, pero además cambió la forma de ver los elementos químicos y las relaciones entre ellos, incluyendo los fenómenos de fisión de núcleos pesados en otros más ligeros o la fusión de núcleos ligeros para formar núcleos más pesados, lo que abrió nuevas perspectivas para la investigación en física nuclear([Consejo de Seguridad Nuclear, 2024](#)).

En el artículo titulado "Nachweis der Entstehung von Barium bei der Bestrahlung des Urans mit Neutronen"(en español, "Detección de la formación de bario al irradiar uranio con neutrones") publicado en 1939 por los químicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann se establece un momento fundamental en la historia de la ciencia, ya que este trabajo documenta el descubrimiento de la fisión nuclear; la experimentación con materiales radiactivos era una investigación activa en la comunidad científica de la época, pero se concreta un método puntual para dividir núcleos con esta publicación y se convierte en la base para el desarrollo de experimentos posteriores alrededor de fisión de núcleos radiactivos.

Hahn y Strassmann llevaron a cabo experimentos en los que bombardearon muestras de uranio con neutrones. Contrario a las expectativas de producir elementos ligeramente más pesados, observaron la aparición de elementos mucho más ligeros, específicamente isótopos de bario. Este hallazgo fue sorprendente, ya que implicaba que el núcleo del uranio se había dividido en elementos menos pesados, un fenómeno que no había sido observado hasta ese momento de manera artificial, solo se conocían las series de decaimiento que se presentaron previamente.

Los autores realizaron análisis químicos detallados para confirmar la presencia de bario y descartar la posibilidad de que se tratara de elementos similares, como el radio. Sus resultados proporcionaron evidencia concluyente de que, al irradiar uranio con neutrones, se producían isótopos de bario, indicando una ruptura del núcleo de uranio.([Hahn y Strassmann \(1939\)](#)).

Incapaces de explicar completamente estos resultados, Hahn y Strassmann compartieron sus hallazgos con la física austro-sueca Lise Meitner, quien había colaborado estrechamente con Hahn durante años, pero que recientemente había huido de Alemania debido a su ascendencia judía. Junto con su sobrino, el físico Otto Robert Frisch, Meit-

ner proporcionó la interpretación teórica del fenómeno que habían descubierto Hahn y Strassmann.

Meitner y Frisch aplicaron un modelo para interpretar los resultados de Hahn y Strassmann, el cual fue propuesto por Bohr en 1935 para explicar la estabilidad del núcleo atómico: el modelo de la gota líquida. Según este modelo, el núcleo atómico puede comportarse como una gota de líquido cargada eléctricamente. Cuando el núcleo de uranio (U-235) absorbe un neutrón, su equilibrio se altera, y comienza a vibrar y deformarse. Si las fuerzas de repulsión eléctrica entre los protones superan la fuerza nuclear que mantiene unido el núcleo, este se divide en dos fragmentos más pequeños.

El artículo "*Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction*" publicado en 1939 por Meitner y Frisch, describe cómo al dividirse, el núcleo libera una enorme cantidad de energía debido a la conversión de una pequeña fracción de la masa en energía, conforme a la ecuación 1.1 de Einstein. Este fue el primer marco teórico que explicó el mecanismo de la fisión nuclear. Frisch, inspirado por la biología, utilizó el término "fisión" para describir el proceso, haciendo un paralelismo con la división celular. Este término se introdujo oficialmente en el artículo y se convirtió en una pieza clave de la nomenclatura científica relacionada con la energía nuclear. La idea de que un núcleo pudiera "dividirse" en dos partes fue revolucionaria y contradecía el paradigma predominante sobre la estabilidad de los núcleos pesados.

El artículo no solo ofreció una explicación cualitativa, sino que también incluyó predicciones cuantitativas. Meitner y Frisch calcularon que la energía liberada por cada evento de fisión era del orden de 200 millones de electronvoltios (MeV), una cantidad significativamente mayor que la de cualquier otra reacción química o nuclear conocida en ese momento. Este cálculo se basó en la diferencia de masas entre el uranio original y los fragmentos producidos, utilizando la relación de Einstein entre masa y energía. El artículo de Meitner y Frisch marcó un antes y un después en la física y la química nuclear. La fisión nuclear no solo explicaba fenómenos observados experimentalmente, sino que también abrió las puertas a una nueva era de investigación científica con implicaciones prácticas profundas. Entre ellas, se encuentra el desarrollo de reactores nucleares para la generación de energía y el diseño de armas nucleares, que cambiarían el curso de la historia humana durante la Segunda Guerra Mundial y en las décadas posteriores. A pesar de su importancia, el trabajo de Lise Meitner no recibió el reconocimiento que merecía en su momento. Mientras que Otto Hahn fue galardonado con el Premio Nobel de Química en 1944 por el descubrimiento experimental de la fisión, Meitner fue ignorada por el comité Nobel, a pesar de que su contribución teórica fue fundamental para comprender el fenómeno. Este hecho ha sido ampliamente criticado por historiadores y científicos. (Meitner y Frisch, 1939).

2.1. Energía por Fisión Nuclear

Lo anteriormente dicho, junto con la ecuación (1.1) que se vio en el capítulo 1, establece la correlación de la masa y la energía, se vio la posibilidad de generar energía mediante el bombardeo de neutrones a determinados elementos gracias a la inestabilidad de algunos átomos; al tener una masa atómica grande en comparación con los elementos más comunes de la naturaleza, es más probable poder separar el núcleo al introducir un elemento que lo desestabilice, como los neutrones bombardeados en los experimentos, lo cual genera que las fuerzas que los mantienen unidos sean más fáciles de romper.

He aquí un cuestión importante que se debe entrar a revisar y es de cuantas masas atómicas y de que variables depende esta inestabilidad en el núcleo, la estabilidad dependerá de determinadas configuraciones y energías de enlace de los núcleos.

Una de las consideraciones importantes es la **relación entre el número de neutrones y protones (n/p)**, que es un factor clave en la estabilidad de los núcleos atómicos. En los elementos ligeros (con un número atómico ($Z \leq 20$)), la estabilidad nuclear se alcanza cuando la relación n/p es aproximadamente 1 : 1. Esto significa que el número de neutrones y protones es casi igual, lo cual asegura un equilibrio entre las fuerzas de repulsión electrostática entre los protones y las fuerzas nucleares fuertes que mantienen unido el núcleo (OpenStax, 2021).

A medida que aumenta el número atómico, se requieren más neutrones en comparación con protones para mantener la estabilidad. Los neutrones adicionales contrarrestan la repulsión electrostática que surge debido a la acumulación de protones en el núcleo. En núcleos pesados, como los de elementos radiactivos, la relación n/p puede superar 1.5 para garantizar su estabilidad (OpenStax, 2021).

La estabilidad nuclear también se representa visualmente en una "banda de estabilidad", que aparece en un gráfico de neutrones versus protones. Los núcleos estables están situados dentro de esta banda. Aquellos que se encuentran fuera de ella tienden a ser inestables y experimentan desintegraciones radiactivas para alcanzar una configuración más equilibrada. Los núcleos con exceso de neutrones suelen sufrir desintegración beta (β^-), mientras que los que tienen demasiados protones pueden experimentar desintegración beta inversa (β^+) (LibreTexts, 2021).

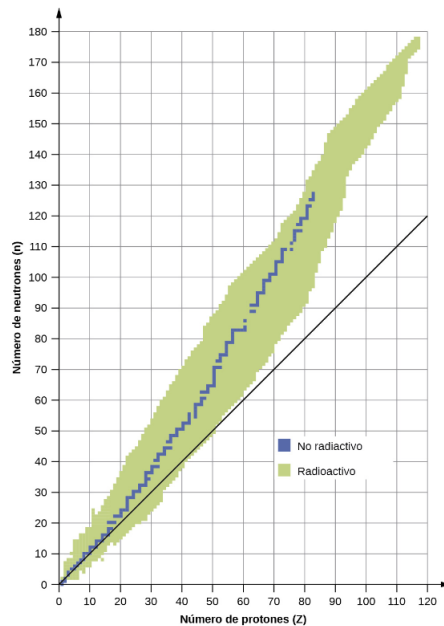


Figura 2.4: En este gráfico muestran los nucleidos, cuya existencia se conoce y los que son estables. Los nucleidos estables se indican en azul y los inestables en verde. Tenga en cuenta que todos los isótopos de elementos con números atómicos superiores a 83 son inestables. La línea sólida es la línea donde $n = Z$.

(LibreTexts, 2021)

Además, la relación n/p influye directamente en la **energía de enlace por nucleón**, una medida que refleja cuánta energía es necesaria para mantener unidos los nucleones (protones y neutrones). Cuando esta relación es adecuada, la energía de enlace por nucleón alcanza su máximo, lo que contribuye a la estabilidad del núcleo. Un ejemplo icónico es el núcleo del hierro-56, que tiene una de las energías de enlace más altas, lo que lo convierte en uno de los núcleos más estables (Científica, 2021).

El modelo de capas se reconoce como uno de los enfoques más exitosos en la física nuclear, particularmente en lo relacionado con la identificación de los números mágicos se refieren a cantidades específicas de protones o neutrones en un núcleo atómico que confieren una estabilidad excepcional. Estos números son 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126. Este modelo logra describir de manera adecuada los espines y los momentos magnéticos de los nucleones, especialmente en regiones cercanas a capas completas.

La evolución histórica de los modelos nucleares muestra que, hasta la década de 1930, el modelo de núcleo compuesto propuesto por Bohr predominaba, logrando notables avances, como la explicación de la energía de enlace nuclear y los fenómenos de fisión. Sin embargo, hacia finales de los años 40, se hicieron evidentes ciertas irregularidades en las energías de enlace y se identificaron nuevas propiedades asociadas a números específicos de protones y neutrones. Esto destacó la necesidad de modelos nucleares

centrados en partículas individuales, ya que los enfoques colectivos no lograban responder a estas nuevas observaciones. En este contexto, datos experimentales relacionados con los números mágicos respaldaron la idea de una estructura nuclear basada en niveles de energía definidos. A partir de este fundamento, Mayer, Jensen y otros científicos comenzaron a desarrollar el modelo de capas nucleares. En 1949, este modelo recibió una formulación coherente dentro del marco de la mecánica cuántica mediante la incorporación de la interacción espín-órbita.

Este modelo se caracteriza como un enfoque de partículas independientes y se inspira en la analogía con la estructura orbital de los electrones en los átomos. Así como los electrones se distribuyen en niveles discretos de energía, los nucleones también ocupan capas específicas en este modelo. La ocupación completa de ciertas capas, denominadas cerradas, confiere una mayor estabilidad al núcleo, una característica directamente relacionada con los números mágicos.

Según el modelo de capas, cada nucleón se desplaza dentro de un campo autocoherente generado por la acción colectiva de los demás nucleones, lo que se conoce como un potencial medio. En este caso, no se contempla la interacción directa entre nucleones, sino entre cada nucleón y el potencial generado. Debido a la naturaleza de corto alcance de las fuerzas nucleares, este campo decrece rápidamente más allá del volumen nuclear, lo que define la llamada "superficie del núcleo". Por esta razón, el estado total del núcleo se describe especificando individualmente los estados de cada nucleón. (Gomes, Amorim, Santos, Rispoli, y Cardoso, 2024).

En la siguiente ecuación se puede observar que es un problema la fisión asimétrica que muestra la importancia de los números mágicos:

$$B(A, Z) - 2B(A/2, Z/2) = 17,2A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + 0,70 \frac{Z(Z+1)}{A^{1/3}} (1 - 2^{-2/3}) \quad (2.4)$$

Esta ecuación está regida por el modelo de gota de líquido mencionado en la sección anterior. También resulta positiva para núcleos pesados, indicando que la diferencia corresponde a la liberación de energía en la reacción; sin embargo, no explica cómo ocurrió el proceso

Se puede hacer el estudio de como se comporta esta ecuación para describir la fusión espontánea, bajo pequeñas deformaciones de su superficie, mientras se mantiene su volumen constante. La forma del núcleo es inicialmente esférica, si lo deformamos en pequeña cantidad, su forma cambiaría a una elipse. Es decir, eje mayor $a = R(1 + \epsilon)$, eje menor $b = R(1 + \epsilon)^{-0,5}$ con un volumen constante $V = \frac{4}{3}\pi ab^2$, entonces la superficie sería:

$$S \approx 4\pi R^2 \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2 \right) \quad (2.5)$$

Donde identificamos el factor como el que explica la deformación. Esto nos deja con $E_s = 17, 2A^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2\right)$. El término de Coulomb también cambia la energía electrostática obtenemos:

$$E_c \approx \frac{3e^2 Z(Z-1)}{5R} \left(1 - \frac{\epsilon^2}{5}\right) \quad (2.6)$$

Escribir lo anterior da como resultado una forma más familiar:

$$E_S = E_S^0 \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2\right) \quad (2.7)$$

$$E_C = E_C^0 \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2\right) \quad (2.8)$$

Las dos ecuaciones anteriores representan la energía debida a la deformación, donde el súper índice 0 indica el término de energía de los núcleos esféricos. Si ahora calculamos el cambio de energía durante este proceso obtenemos:

$$\Delta E_C = E_C^0 - E_C \quad (2.9)$$

$$\Delta E_S = E_S - E_S^0 \quad (2.10)$$

Podemos inferir entonces, que si 2.9 y 2.10 son iguales, tenemos un núcleo que tiene un balance del término de energía superficial nuclear y el término de energía de Coulomb, por lo que igualamos se ellos obtenemos:

$$\frac{E_C^0}{2E_S^0} = 1 = \alpha_c Z \frac{(Z-1)}{2A^{1/3} A^{2/3}} \quad (2.11)$$

por consiguiente tenemos:

$$\frac{Z^2}{A} \approx 50 \quad (2.12)$$

$$E_{ex} = 6, 8MeV > 6, 6MeV \quad (2.13)$$

La ecuación 2.12 dice que cualquier nucleido con una relación Z^2/A menor que 50 es estable. Esto establece un límite superior para los núcleos, ya que por encima de este número cada núcleo debería sufrir fisión espontánea. Sin embargo, debido al efecto túnel

cuántico cerca de este número podría ocurrir fisión espontánea, pero a medida que nos alejamos de este punto, la sección transversal disminuye rápidamente.

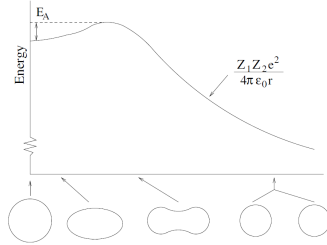


Figura 2.5: Energía potencial vs distancia promedio de separación
(Ciodaro Guerra, 2013)

La diferencia entre la energía del estado fundamental esférico y la energía del estado excitado más bajo se denomina E_A , energía de activación, un parámetro utilizado para determinar si el núcleo se fisiónaría.

Uno de los grandes personajes que trabajo en este campo fue Enrico Fermi, bombardeando núcleos de mas de 60 elementos distintos, entre ellos el isótopo físil del Uranio, el U-235. La radiactividad o también pero menos llamada desintegración nuclear es el proceso en el que un átomo de núcleo pesado (con muchos neutrones y o muchos protones) pierde energía en forma de radiación como los son de menor a mayor cantidad de energía son la radiación α (núcleos de Helio), radiación β (electrones y positrones) y radiación γ (fotones) , hace parte de la base del proceso de fisión en algunos elementos de núcleos pesados ya que esta perdida genera que algunos núcleos se dividan en partes mas pequeñas en algunos caso este proceso se puede realizar con la ayuda del bombardeo por un neutrón como en el caso del uranio-235 que este a su ves si no es controlado puede generar una reacción en cadena ver la siguiente la figura 2.6.

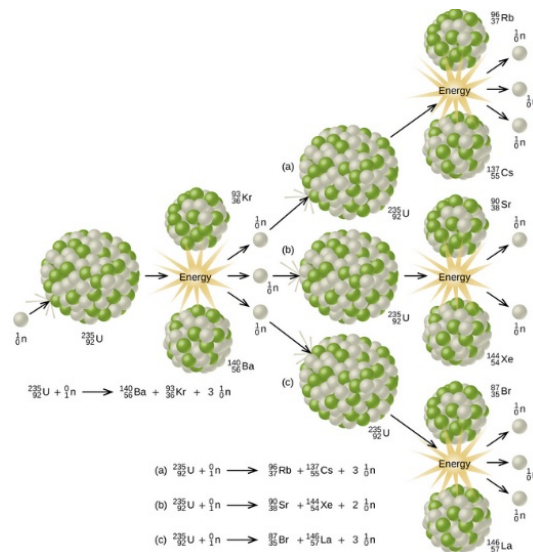


Figura 2.6: fisión uranio 235
(Liceo AGB, 2021)

En este proceso se han evidenciado cierta cantidad de resultados diferentes en las que se realiza este proceso físico del uranio-235, dependientes de una probabilidad de que así sea (G. Sánchez, 2001). La energía liberada se exhibe en forma de energía cinética y por las partículas que están en el medio son frenada produciendo calor o también por la radiación emitida cambiar la configuración de otros Compuestos del entorno ya que en general la radiación que es emitida de estos procesos es de tipo γ (fotones); El uranio es encontrado en la naturaleza en forma óxido, conocido normalmente como pechblenda. El uranio que se da en la naturaleza es el Uranio-238, teniendo que pasar por un proceso de enriquecimiento del mineral para generar U-235. A este proceso la humanidad le dio dos utilidades la primera en el conflicto bélico y la otra en obtención de energía para el consumo de las masas.

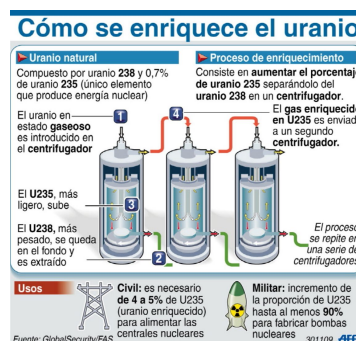


Figura 2.7: Proceso de Enriquecimiento del Uranio
(ABC, 2014)

2.1.1. Aprovechamiento de la Fisión Nuclear

Mediante la búsqueda de nuevas fuentes de energía el mundo a creado algunos tipos de reactores nucleares de fisión entre los que se destacan dos muy importantes el BWR Y PWR.

Funcionamiento Reactores Tipo BWR

Los reactores de tipo BWR(boiling water reactor) posee dos circuitos de refrigeración aislados entre sí. El primero extrae calor de la reacción nuclear, generando vapor que sale del contenedor del reactor dirigiéndose a la turbina generando el funcionamiento del alternador, del condensador y del sistema de agua de alimentación, impulsando a su vez las bombas de agua que alimentan el contenedor del reactor, la presión por lo general se encuentra a unas 75 Atmósferas.

El segundo circuito de refrigeración exterior que está en contacto con el medio ambiente que permite nuevamente condensar el vapor de agua que sale de la turbina generando así un circuito cerrado en la alimentación del agua que pasa por el contenedor del reactor.

En la parte inferior del contenedor del reactor se disponen de una barras de control (retirando o introduciéndolas en el combustible) que permite controlar la potencia del reactor con el fin de que estas barras absorban los neutrones, entre mas adentro se encuentren estas barras mas reducen la potencia, generalmente están compuestas de boro.

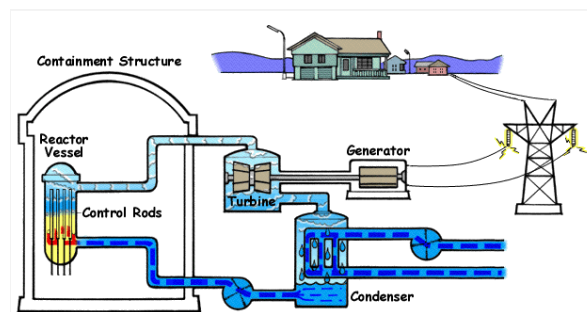


Figura 2.8: Reactor de Tipo BWR
(Rincón Educativo, 2018)

Funcionamiento reactores tipo PWR

Los reactores de agua presurizada tienen tres circuitos de agua: el primero para extraer el calor del núcleo del reactor, el segundo para producir el vapor que mueve las turbinas y el tercero para entregar el calor remanente al medio ambiente. En el primer circuito, la presión del agua se mantiene lo suficientemente alta para que el agua no hierva y no se produzca vapor. El calor extraído por este circuito es transferido al segundo circuito por medio de un intercambiador de calor en forma de U invertida. En el segundo circuito la

presión es menor permitiendo que el agua hierva y se produzca vapor. El vapor húmedo producido en el intercambiador de calor esta a una temperatura de 293C y a una presión de 5 MPa. Para procurar la seguridad en este tipo de sistemas se evita que los tubos de combustible estén en contacto el uno con el otro ya que esto aumentara el calor (este tipo de organización se le llama ensamblaje). Adicionalmente, los PWR utilizan como sistema de control barras de bromuro de carbón y un sistema para diluir boro en el agua del circuito primario para cambiar el nivel de reactividad del reactor. (Varón Echeverri, 2021).

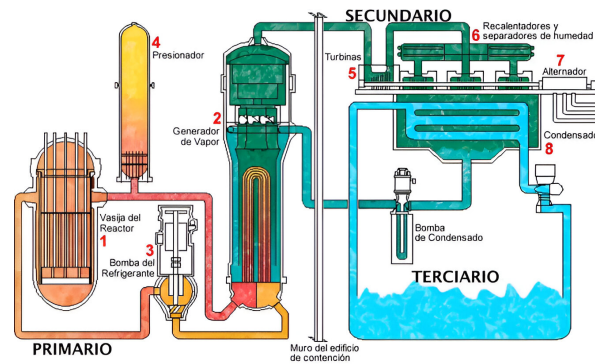


Figura 2.9: Reactor Tipo PWR
(Operador Nuclear, 2018)

2.1.2. Energía de Fisión en el Mundo Actual

En la actualidad la Planta Nuclear Kashiwazaki-Kariwa, ubicada en la prefectura de Niigata, Japón, es una de las centrales nucleares más grandes del mundo en términos de capacidad instalada. Operada por la compañía Tokyo Electric Power Company (TEPCO), esta planta ha sido un símbolo de la capacidad de Japón para desarrollar tecnologías nucleares avanzadas, pero también ha enfrentado desafíos relacionados con la seguridad y la aceptación pública.

Información General

- Ubicación: Kashiwazaki y Kariwa, Prefectura de Niigata, Japón.
- Operador: Tokyo Electric Power Company (TEPCO).
- Capacidad Instalada: Aproximadamente 8.212 MW eléctricos, con siete reactores nucleares.

Tipo de Reactores:

- Cinco reactores de agua en ebullición (BWR).
- Dos reactores avanzados de agua en ebullición (ABWR), considerados de tercera generación.



Figura 2.10: Central de Kashiwazaki-Kariwa.
([Enula, 2024](#))

Año de Inicio de Operaciones:

- El primer reactor comenzó a operar en 1985.
- El último reactor fue añadido en 1997.

La planta es una de las instalaciones nucleares más grandes y avanzadas del mundo, diseñada para proporcionar una parte significativa de la energía de Japón. Antes del accidente nuclear de Fukushima Daiichi en 2011, Kashiwazaki-Kariwa jugó un papel crucial en la estrategia energética del país, que dependía en gran medida de la energía nuclear para reducir la dependencia de combustibles fósiles importados.

Aunque TEPCO ha avanzado en los esfuerzos para reactivar los reactores de Kashiwazaki-Kariwa, la planta sigue enfrentando una fuerte oposición pública y desafíos regulatorios. A partir de 2023, ninguno de los reactores estaba en operación comercial. La reactivación de los reactores sigue siendo incierta, y el futuro de la planta dependerá de la evolución del debate político y social sobre la energía nuclear en Japón. (([TEPCO](#)), 2023).

En Latinoamérica tenemos la central nuclear Angra II (Figura 4) en el país vecino Brasil, la cual proporciona una producción de energía anual de 11 712 GWh, casi la mitad de lo consumido por la ciudad de Río de Janeiro ([Eletronuclear, s.f.](#)).

Información General

- **Nombre Completo:** Central Nuclear Angra II
- **Ubicación:** Angra dos Reis, Estado de Río de Janeiro, Brasil.
- **Operador:** Eletronuclear (subsidiaria de Eletrobras).
- **Tipo de Reactor:** Reactor de agua a presión (PWR, por sus siglas en inglés).



Figura 2.11: imágenes aéreas de la central nuclear Angra
([Javier Bonilla, 2019](#))

- **Capacidad Instalada:** 1.350 MW eléctricos.
- **Inicio de Operaciones Comerciales:** 2001.

Historia y Desarrollo

El desarrollo de la central comenzó en la década de 1970 como parte de un programa nuclear ambicioso en Brasil. La construcción de Angra II inició en 1976, pero enfrentó múltiples retrasos debido a dificultades financieras y técnicas, después de varios retrasos, Angra II fue conectada a la red eléctrica en julio de 2000 y comenzó operaciones comerciales en 2001. Angra II es crucial para el suministro eléctrico de Brasil, especialmente en períodos de estrés hídrico, ya que complementa la generación hidroeléctrica. ([Eletronuclear, 2023](#))

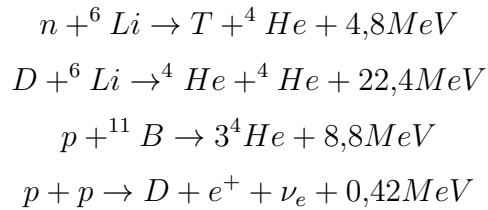
Características Técnicas

- **Tecnología:** Angra II utiliza un reactor de agua a presión diseñado por Siemens/KWU (actualmente Framatome).
- **Combustible:** Uranio enriquecido, con recargas planificadas cada 18 meses aproximadamente.
- **Seguridad:** Cumple con estándares internacionales estrictos de seguridad nuclear.

2.2. Energía por Fusión Nuclear

Dentro de la producción de energía nuclear también existe el aprovechamiento por fusión nuclear, con un potencial energético aun mas grande que la fisión, junto con un añadido muy importante en lo que se promete, no tener desechos que generen problemas de seguridad tanto de salud como hacia el medio ambiente, además de ello una de las cosas de las cuales también se diferencia de la fisión es que su materia prima es mucho

mas fácil de conseguir en la naturaleza y su en producción humana los cuales son los isótopos de hidrógeno de podemos ver en los siguientes ejemplos de reacciones y su resultado en energía.



Donde:

n : Neutrón

Li : Litio

T : Tritio (isótopo del hidrógeno)

He : Helio

D : Deuterio (isótopo del hidrógeno)

p : Protón

B : Boro

e^+ : Positrón

ν_e : Neutrino electrónico

MeV : Megaelectronvoltio (unidad de energía)

La cuarta reacción es la cual se produce directamente en el sol, la fisión es una reacción exotermica y para que pueda ocurrir este proceso tenemos que entender las condiciones como lo es la sección trasversal.

Consideremos un haz de partículas que pasa a través de un área A , con un ancho dx

Definimos:

$$I = \frac{(\text{N de partículas})}{m^2 \cdot s} \cdot A_{rea} = \phi A$$

Si suponemos que se produce una reacción entre las partículas incidentes y el número N de núcleos en el volumen $A \cdot dx$, entonces la velocidad de reacción será proporcional a esos dos parámetros:

$$tasa \propto N\phi \tag{2.14}$$

La constante de proporcionalidad se conoce como sección transversal:

$$\phi = \frac{\text{tasadeeventospornucleo}}{\text{flujoincidente}}$$

ϕ este tiene un equivalente a la probabilidad de que ocurra un proceso, se observara las características generales para la secciones eficaces ya que se requiere saber la interacción involucrada.

Analicemos la sección eficaz de una reacción general como la siguiente:



El estado mecánico cuántico inicial está definido por el momento de la partícula inicial, el momento angular y la polarización. Los estados finales, sin embargo, forman un continuo, al igual que en la física atómica, cuando el fotón que sale de un átomo no tiene una dirección preferida de escape, por lo que se deben tener en cuenta todas las posibilidades. Utilizando la regla de oro de Fermi para la dispersión podemos escribir la probabilidad de transición por unidad de tiempo como:

$$w = \frac{2\pi}{\hbar} \langle |H_{if}|^2 \rangle \frac{dn}{dE} \quad (2.16)$$

Donde $\langle |H_{if}|^2 \rangle$ es el valor cuadrado medio del elemento de la matriz que conecta los estados inicial y final. Este término a veces se denomina amplitud del proceso. Contiene toda la información dinámica. La otra parte se denomina densidad de los estados finales o espacio de fase disponible si recordamos la física estadística. A primera vista, la ecuación 2.16 parece dar un resultado divergente, ya que la densidad de estados finales forma un continuo, lo que significa que, encerrando el sistema en una caja de volumen Ω , restringiría los niveles de los estados finales de la $\frac{dn}{dE}$ siguiente manera:

$$\frac{dn}{dE} = \frac{2\Omega}{(2\pi\hbar)^3} p^2 \frac{dp_c}{dE} \quad (2.17)$$

Es casi imposible calcular explícitamente H_{if} ya que depende de la estructura nuclear. Sin embargo, podemos inferir algunas de sus propiedades generales. En la teoría de dispersión cuántica, tenemos en general un estado inicial representado por una onda plana ϕ_i y un estado final representado por una onda esférica ϕ_f de la forma $e^{ikr}/(\Omega)^{1/2}$. Si llamamos U a la energía de interacción, tendríamos por definición:

$$H_{if} = \int \phi_f^* U \phi_i d\tau \approx \langle U \rangle \frac{V}{\Omega} \quad (2.18)$$

Donde V es el volumen del núcleo. La ecuación 2.18 es incompleta debido a la naturaleza cuántica de los fenómenos. Se debe tener en cuenta una probabilidad de túnel de cruzar la barrera de Coulomb para partículas cargadas. Este término se llama factor de Gamow:

$$G_a = \frac{1}{\hbar} \int (2m_a(V_a - E_a))^{1/2} dr \approx \pi Z_x Z_a \frac{e^2}{\hbar v_a}$$

Por lo tanto, obtenemos:

$$H_{if} \approx \langle U \rangle \frac{V}{\Omega} e^{-G_a - G_c}$$

Usando la definición de probabilidad, es decir, eventos favorables sobre el total, podemos combinar las ecuaciones 2.14 y 2.17 como:

$$\frac{\text{tasa}}{N} = w \quad (2.19)$$

Reemplazando todos los valores en 2.19 y usando $dE = v_c dp$, obtenemos:

$$\sigma_{X \rightarrow Y} = \frac{1}{\pi \hbar^4} \Omega^2 \langle |H_{if}|^2 \rangle \frac{p_c^2}{v_a v_c} (2I_y + 1)(2I_c + 1)$$

Donde: μ_a es la velocidad relativa de a respecto de A.

μ_c la velocidad de c respecto de Y p_b .

El momento de b . La parte final de la ecuación era otra corrección debida a la degeneración del espín. A pesar de su complejidad es posible deducir propiedades muy importantes sobre cualquier interacción nuclear, ya que la ecuación 2.15 era, en todos los sentidos, general.

Aunque esta explicación funciona para describir la reacción exotérmica que se causa en un proceso de fisión también lo hace para la fusión. Si la partícula entrante está cargada, tendremos el mismo comportamiento $1/vb$ que antes, pero esta vez el factor de Gamow jugaría un papel importante en la sección eficaz, ya que ahora, ninguno de ellos se desvanece. Por lo tanto:

$$\sigma_{X \rightarrow Y} \propto \left(\frac{1}{v_a} \right) e^{-2G_a} \quad (2.20)$$

La fusión entra en esta categoría, podemos ver que cuanto más pesados sean los núcleos o partículas que interactúan, la probabilidad disminuye exponencialmente, mientras que al aumentar la energía cinética mejora la posibilidad de que ocurra. Al reemplazar

algunos valores para la reacción $D + D$, vemos que para tener una posibilidad razonable de que ocurra, necesitaríamos una energía cinética de aproximadamente 10 KeV, utilizando la constante de Boltzmann vemos que necesitaríamos una temperatura de aproximadamente 116099275.4 K, para tener una posibilidad razonable de que ocurra esta reacción, es por eso que la fusión es tan desafiante energéticamente, esto sería un lapso en la sección de fusión.(Ciodaro Guerra, 2013).

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la energía de enlace nuclear se define como la diferencia entre la energía del elemento y la energía de la misma cantidad de protones y neutrones considerados por separado. Esta energía es resultado de la interacción nuclear fuerte y puede ser cuantificada por la cantidad de energía necesaria para descomponer el núcleo en sus protones y neutrones individuales. La masa de un cuerpo puede ser categorizada como un tipo de energía; por lo tanto, al liberarse la energía de enlace nuclear entre dos partículas, estas pierden una porción de su masa, aunque la cantidad de masa perdida es mínima. En otras palabras, la masa conjunta de dos partículas en estado ligado es inferior respecto a la masa de dichas partículas evaluadas de manera individual.

Para efectos prácticos vamos a ver con un ejemplo el calculo simple que se debe hacer para obtener la energía de enlace: el defecto de masa para un núcleo de ${}^4_2\text{He}$ es de 0,0305 u, se determine la energía de enlace de un núcleo de ${}^4_2\text{He}$ mediante la ecuación de equivalencia masa-energía 1.1.

Primero, exprese el defecto de masa en g/mol. Esto es fácil de hacer, si se considera la equivalencia numérica de la masa atómica (u) y la masa molar (g/mol) que resulta de las definiciones de las unidades u y mol , Por consiguiente, el defecto de masa es de 0.0305 g/mol. Para ajustar las unidades de los otros términos de la ecuación masa-energía, la masa deberá expresarse en kg, ya que $1J = 1kgm^2/s^2$. Al convertir los gramos en kilogramos se obtiene un defecto de masa de $3,05 \times 10^{-26}kg/mol$. se obtiene:

$$E = mc^2 = 3,05 \times 10^{-26} \frac{kg}{mol} \times (2,998 \times 10^8 \frac{m}{s})^2 = 2,74 \times 10^{12} \frac{J}{mol} = 2,74 \text{ TJ/mol}$$

Observe que esta enorme cantidad de energía se asocia a la conversión de una cantidad muy pequeña de materia (unos 30 mg, aproximadamente la masa de la típica gota de agua).

La energía de enlace para un solo núcleo se calcula a partir de la energía de enlace molar con el número de Avogadro:

$$E = 2,74 \times 10^{12} \frac{J}{mol} \times \frac{1mol}{6,022 \times 10^{23}nucleos} = 4,55 \times 10^{-12} J = 4,55pJ$$

Recordemos que $1eV = 1,602 \times 10^{-19}J$. Utilizando la energía de enlace:

$$E = 4,55 \times 10^{-12} J \times \frac{1eV}{1,602 \times 10^{-19} J} = 2,84 \times 10^7 eV = 28,4 MeV$$

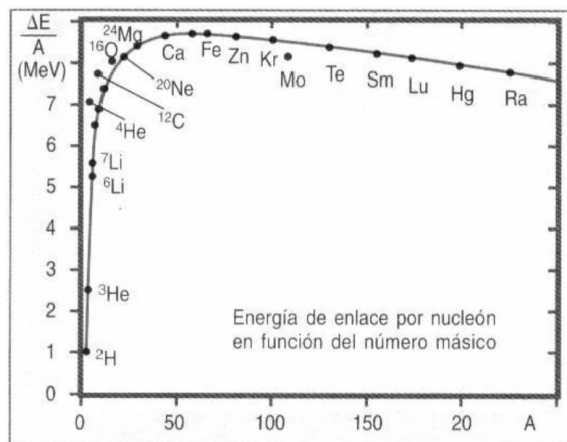


Figura 2.12: Energía de enlace por nucleón en función del número másico
([Fusion Nuclear Wiki, 2016](#))

El recorrido histórico presentado en este capítulo evidencia que la comprensión de la materia y de los procesos nucleares es fruto de un largo proceso de construcción científica, atravesado por momentos de avance, estancamiento y revolución conceptual. Desde las primeras ideas atomistas de Demócrito, pasando por los aportes fundamentales de Dalton y Mendeleev en la organización de los elementos, hasta los modelos atómicos de Thomson y Rutherford, se revela cómo la ciencia avanza gracias a la observación rigurosa, la experimentación y la reinterpretación crítica de los fenómenos naturales.

El descubrimiento de la radiactividad por Marie Curie y su estudio experimental sistemático abrieron el camino hacia la comprensión de los fenómenos nucleares que hoy sustentan tanto la fisión como la futura explotación de la fusión nuclear. Esta trayectoria histórica no solo muestra un crecimiento progresivo del conocimiento, sino que también pone en evidencia la necesidad de comprender los fundamentos científicos para poder valorar sus aplicaciones tecnológicas y sus implicaciones éticas y sociales.

En este sentido, la enseñanza de los principios de la energía nuclear y en particular de la fusión nuclear como alternativa energética limpia no puede concebirse de forma aislada. Es esencial enraizarla en la evolución histórica del pensamiento científico para que los estudiantes desarrollen una visión crítica y contextualizada de los avances tecnológicos contemporáneos.

Por ello, la propuesta planteada en este trabajo se justifica plenamente: formar estudiantes capaces de entender no solo el funcionamiento físico de la fusión nuclear, sino también su lugar en la historia de la ciencia, fortalece competencias científicas, fomenta

el pensamiento crítico y promueve una ciudadanía informada, tal como lo requiere la actual transición energética global y el desafío ambiental que enfrenta la humanidad.

Así, conocer la historia de la energía nuclear se convierte en un paso necesario para comprender los retos y las oportunidades que ofrece hoy la fusión nuclear, y para asumir un rol activo en la construcción de un futuro más sostenible.

Capítulo 3

Fundamentos de la Fusión Nuclear, Reactores de Fusión y Propuesta para la Enseñanza

En este capítulo se presentarán los datos, producto de las pruebas realizadas sobre el simulador en versión de prueba y en revisión acelerada de reactores de fusión .

La fusión es un proceso en el cual se forma elementos un poco más pesados que los iniciales siendo estos componentes muy ligeros la mayoría de ellos por debajo del hierro donde la energía de enlace alcanza un máximo, recordemos que esta reacción está determinada por la probabilidad de ocurrencia de la sección eficaz y la energía de enlace vistas en el capítulo anterior.

3.1. Energías en el Proceso de la Fusión

Una de las reacciones que más se han estudiado en el mundo es la fusión deuterio (2H) y tritio (3H) está dada por:



Cada reacción libera una energía de 17,6 MeV, lo que equivale a:

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J},$$

$$E_{\text{reacción}} = 17,6 \times 1,602 \times 10^{-13} = 2,82 \times 10^{-12} \text{ J}.$$

Dado que la reacción consume un núcleo de deuterio y uno de tritio, analizamos las masas involucradas:

- Masa molar del deuterio: 2 g/mol.

- Masa molar del tritio: 3 g/mol.

En una mezcla equilibrada (1:1 en núcleos), cada mol de reacción requiere:

$$\text{Masa por mol de reacción} = 2 + 3 = 5 \text{ g/mol.}$$

Por lo tanto, en 1 kg (1000 g) de mezcla hay:

$$\text{Número de moles} = \frac{1000 \text{ g}}{5 \text{ g/mol}} = 200 \text{ mol.}$$

Usando el número de Avogadro ($N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), el número total de reacciones es:

$$\text{Número de reacciones} = 200 \times 6,022 \times 10^{23} = 1,204 \times 10^{26} \text{ reacciones.}$$

La energía total generada es:

$$E_{\text{total}} = \text{Número de reacciones} \times E_{\text{reacción}},$$

$$E_{\text{total}} = (1,204 \times 10^{26}) \times (2,82 \times 10^{-12}) = 3,39 \times 10^{14} \text{ J.}$$

ahora realizamos conversión a kilovatios-hora (kWh), Sabemos que:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J.}$$

Por lo tanto:

$$E_{\text{total}} = \frac{3,39 \times 10^{14}}{3,6 \times 10^6} \approx 94,2 \times 10^6 \text{ kWh.}$$

Un kilogramo de una mezcla de deuterio y tritio puede producir aproximadamente:

$$\boxed{94 \text{ millones de kWh}},$$

lo que equivale a la energía consumida por miles de hogares durante un año.

La energía liberada de la ecuación 3.1 se distribuye de manera desigual entre los productos de la reacción debido a la conservación del momento y la diferencia en sus masas.

La distribución de energía entre los productos puede calcularse utilizando los principios de conservación de momento y energía.

El momento total del sistema antes y después de la reacción debe ser el mismo. Debido a que el sistema inicial tiene una cantidad mínima de energía cinética en comparación con la energía liberada, podemos asumir que la energía cinética inicial es despreciable:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_3 v_3 + m_4 v_4,$$

donde m_1 y m_2 son las masas de los reactantes (deuterio y tritio), y m_3 y m_4 son las masas de los productos (helio-4 y neutrón).

La relación entre las energías de los productos se deriva considerando sus masas:

$$\frac{E_n}{E_\alpha} = \frac{m_\alpha}{m_n},$$

donde E_n y E_α son las energías del neutrón y el helio-4, respectivamente, mientras que m_α y m_n son las masas correspondientes.

Usando las masas conocidas:

- Masa del neutrón: $m_n = 1,008664 \text{ u}$,
- Masa del helio-4: $m_\alpha = 4,002602 \text{ u}$,

y la energía total de 17,6 MeV, las energías de los productos son:

$$E_n = \frac{m_\alpha}{m_n + m_\alpha} E_{fus} \quad (3.2)$$

$$E_n = \frac{m_\alpha}{m_n + m_\alpha} \times 17,6 \text{ MeV} \approx 14,1 \text{ MeV},$$

$$E_\alpha = \frac{m_n}{m_n + m_\alpha} E_{fus} \quad (3.3)$$

$$E_\alpha = \frac{m_n}{m_n + m_\alpha} \times 17,6 \text{ MeV} \approx 3,5 \text{ MeV}.$$

Neutrón (14,1 MeV): Como partícula neutra, el neutrón escapa del plasma fácilmente y transfiere su energía al manto del reactor (por ejemplo, para generar tritio en un manto de litio).

Helio-4 (3,5 MeV): Al ser una partícula cargada, su energía permanece dentro del plasma, ayudando a mantener la temperatura necesaria para sostener la reacción de fusión.

La distribución de energía en los productos de la reacción de fusión D-T es un aspecto crucial para entender cómo diseñar reactores eficientes. La mayor parte de la energía es llevada por el neutrón, que puede ser aprovechado en sistemas externos, mientras que la energía del helio contribuye al calentamiento del plasma.

3.2. Reacciones de fusión

Existen algunos procesos de fusión que dependen de instancias diferentes como lo puede ser la materia prima (combustibles) lo que permite clasificar estos procesos permitiendo así analizarlos a beneficio de diferentes ámbitos como lo es la cantidad de energía producida o su fin investigativo, se deben tener en cuenta las siguientes variables.

La probabilidad de que ocurra una reacción de fusión nuclear está dada por la siguiente expresión:

$$P_{\text{fusión}} \propto S(E) \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right)$$

Esta ecuación combina dos factores principales: el **factor astrofísico** $S(E)$ y la **penetración de túnel cuántico**.

El factor astrofísico $S(E)$ encapsula las propiedades intrínsecas de la reacción nuclear y mide la probabilidad de fusión una vez que los núcleos han superado la barrera de Coulomb.

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} \exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right)$$

Donde:

- $S(E)$: Describe la eficiencia nuclear intrínseca y varía lentamente con E .
- E : Energía cinética relativa entre los núcleos reactantes.
- E_G : Energía de la barrera de Gamow, definida más adelante.

El $S(E)$ es importante porque simplifica el análisis separando los efectos nucleares intrínsecos de la repulsión de Coulomb.

El término de penetración de túnel describe la probabilidad cuántica de que dos núcleos superen la barrera de Coulomb a pesar de no tener suficiente energía clásica.

$$\exp\left(-\sqrt{\frac{E_G}{E}}\right)$$

Energía de la Barrera de Gamow E_G :

La energía de Gamow está dada por:

$$E_G = \frac{(Z_1 Z_2 e^2)^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 \cdot 2\mu c^2}$$

Donde:

- Z_1, Z_2 : Números atómicos de los núcleos reactantes.
- e : Carga del electrón.

- ϵ_0 : Permisividad eléctrica del vacío.
- μ : Masa reducida de las partículas reactantes.
- c : Velocidad de la luz.

La probabilidad de túnel disminuye rápidamente cuando $E \ll E_G$, lo que implica que para energías bajas, la probabilidad de fusión es extremadamente pequeña. Sin embargo, a temperaturas más altas (mayor E), la probabilidad aumenta de forma exponencial.

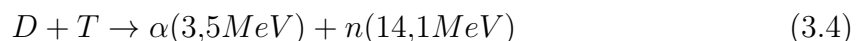
Rango de Energías

- **A bajas energías:** La probabilidad está dominada por la penetración de túnel, que es extremadamente baja.
- **A energías intermedias:** Es donde la probabilidad de fusión es máxima. Aquí, $S(E)$ es significativo y la penetración de túnel es suficiente para que la reacción ocurra.
- **A altas energías:** Aunque la penetración de túnel mejora, los núcleos suelen pasar de largo debido a su alta velocidad relativa, disminuyendo la sección eficaz.

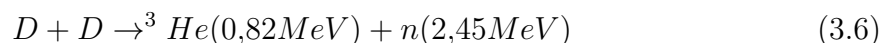
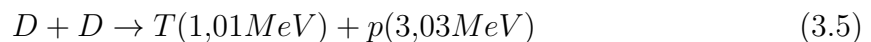
3.2.1. Combustibles de Fusión Controlados

Se conforma de los bajos Z , energías de Gamow pequeñas lo que va a permitir que la fuerza fuerte realice la fusión de las partículas por lo que permitirá mejor penetración a núcleo de tunelamiento cuántico y permitir que el factor astrofísico $S(E)$ que describe la eficiencia nuclear intrínseca de la reacción sea grande.

La reacción D-T encuentra su máxima sección transversal a casi 64 keV gracias a su gran resonancia debida al factor astrofísico para $E = 0$ no nos dice nada dice nada, ya que en el intervalo de interés su valor varía mucho y no puede aproximarse al de otras reacciones.



La reacción D - D, Para energías de 10 a 100 KeV, la sección transversal es de aproximadamente 2 órdenes de magnitud. es menor que el de DT y es casi el mismo para ambas reacciones.



Reacción T- T ,es importante notar que la energía asociada a los tres productos no está determinada únicamente por las leyes de conservación. En cuanto a las secciones eficaces, es aproximadamente la misma que la de una reacción DD.



3.2.2. Combustibles de Fusión Avanzados

Este grupo de reacciones involucra isótopos de hidrógeno (deuterio y tritio) y núcleos ligeros como helio, litio y boro. La sección eficaz de estas reacciones es menor comparada con las principales reacciones de fusión controlada, lo que indica una mayor barrera de Coulomb.



La reacción protón-boro 3.8 es particularmente interesante debido a la ausencia de productos radiactivos, lo que la convierte en una opción atractiva para la producción de energía limpia. Sin embargo, esta reacción presenta una resonancia muy estrecha a una energía del proyectil de 148 keV, lo que dificulta su implementación práctica.

A energías más altas, las secciones eficaces de estas reacciones se encuentran entre las de las reacciones deuterio-deuterio (DD) y deuterio-tritio (DT). Las energías liberadas en estas reacciones varían y dependen de los productos finales. Por ejemplo, la reacción DD puede producir tanto un tritio y un protón como un helio-3 y un neutrón, cada una con diferentes energías cinéticas.

3.2.3. Ciclo pp

La principal fuente de energía del Sol es la cadena protón-protón (pp). A pesar de ser fundamental para la vida en la Tierra, las primeras reacciones de este ciclo (pp y pD) presentan secciones eficaces extremadamente bajas debido a una barrera de Coulomb significativa. Esto se traduce en una probabilidad muy baja de que ocurran estas reacciones, especialmente la pp, que involucra una desintegración beta. De hecho, el factor astrofísico de la reacción pp es 25 órdenes de magnitud menor que el de la reacción deuterio-tritio (DT), lo que subraya la dificultad de iniciar y mantener estas reacciones en condiciones terrestres.

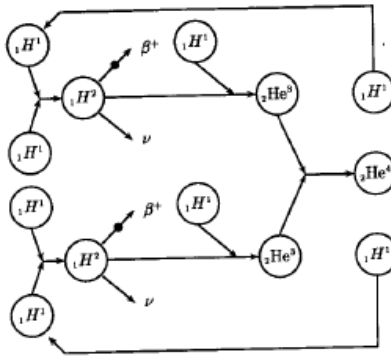


Figura 3.1: Ciclo pp
(Garcia Mauricio, 2003)

3.2.4. Ciclo Carbono Nitrógeno Oxígeno

A pesar de que los factores S del ciclo CNO no son tan pequeños como los del ciclo pp, la barrera de Coulomb, representada por la energía de Gamow, es significativamente mayor en el ciclo CNO, alcanzando valores cercanos a los 40 MeV. Esta alta barrera resulta en secciones eficaces extremadamente bajas, incluso menores que las del ciclo pp a temperaturas bajas como las del núcleo solar. En consecuencia, el ciclo CNO se vuelve dominante solo a temperaturas superiores a 1.5 keV, mientras que a temperaturas más bajas, el ciclo pp prevalece.

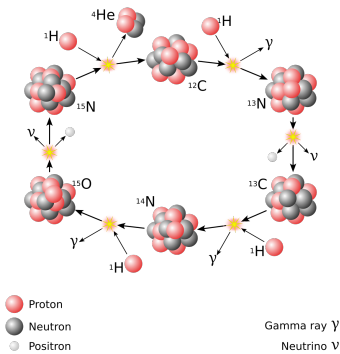
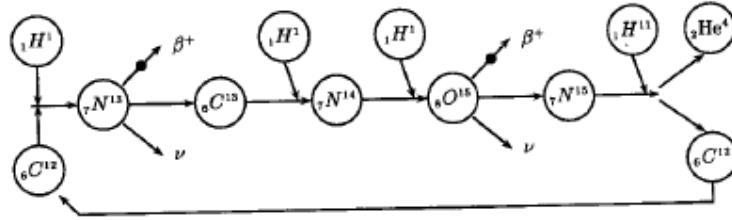


Figura 3.2: Ciclo CNO
(Wikiwand, 2011)

3.2.5. Reacciones Carbono-Carbono

Esta reacción nuclear es la principal fuente de energía en algunas enanas blancas. A pesar de que el factor S de esta reacción es elevado, la sección eficaz es extremadamente baja, incluso a energías tan altas como 100 keV. Esto se debe principalmente a la

enorme barrera de Coulomb que deben superar las partículas para fusionarse. Como consecuencia, esta reacción solo es viable en entornos con densidades extremas, superiores a 10^9g/cm^3 , como los interiores de las enanas blancas. Debido a estas condiciones tan específicas, esta reacción no se considera una opción viable para la producción de energía en la Tierra en la actualidad.



a. Carbono.

Figura 3.3: Ciclo c-c
(García Mauricio, 2003)

3.3. Reactores Nucleares de Fusión

A lo largo de este capítulo, se realizó una descripción detallada de los conceptos teóricos sobre cómo funciona la fusión nuclear y las condiciones necesarias para que este tipo de procesos se lleven a cabo. Ahora, nos centraremos en cómo la humanidad, a través del avance de las tecnologías, ha logrado desarrollar máquinas capaces de aprovechar la energía liberada por la fusión para satisfacer la creciente demanda energética global.

En esta sección, exploraremos los reactores de fusión, dispositivos diseñados para replicar los procesos que ocurren en el núcleo de las estrellas, permitiendo generar energía limpia, segura y prácticamente inagotable. Abordaremos las distintas configuraciones y enfoques tecnológicos utilizados, como los sistemas de confinamiento magnético y confinamiento inercial, que representan los principales métodos para contener y controlar el plasma a las condiciones extremas necesarias para la fusión.

Además, se analizarán casos específicos de proyectos emblemáticos, como el ITER, que han sido pioneros en demostrar la viabilidad de esta tecnología. También se discutirá cómo los avances en materiales, superconductores y diseño de reactores están acercándonos cada vez más a un futuro donde la fusión nuclear podría ser una fuente clave de energía para la humanidad. Este recorrido permitirá entender cómo estos desarrollos están configurando el panorama energético del siglo XXI y las implicaciones de su implementación a gran escala.

Aspectos a tener en cuenta:

Como se explicó anteriormente, para lograr la fusión nuclear es fundamental incrementar significativamente la energía cinética de las partículas, lo que, en términos macroscópicos, equivale a aumentar su temperatura a valores del orden de millones de grados como se observó en la ecuación de la sección eficaz 2.20. En estas condiciones extremas, los átomos experimentan un proceso conocido como disociación, en el cual los electrones son arrancados de sus núcleos, dando lugar a un estado de la materia denominado plasma.

El plasma, a pesar de compartir algunas propiedades con un gas, posee características únicas debido a la separación de sus cargas positivas (protones) y negativas (electrones). Esta separación de cargas lo hace altamente reactivo a los campos electromagnéticos, otorgándole un comportamiento complejo que debe controlarse cuidadosamente en el contexto de las reacciones de fusión (García Sánchez, 2018).

En cuanto al confinamiento de las reacciones nucleares, resulta inviable utilizar materiales sólidos, ya que ninguna sustancia conocida podría soportar las altísimas temperaturas sin desintegrarse o derretirse. En las estrellas, este problema se resuelve gracias a su enorme masa, que genera colosales campos gravitatorios capaces de mantener el plasma contenido. Sin embargo, replicar este mecanismo en la Tierra no es posible, por lo que han surgido otros métodos tecnológicos para el confinamiento. Los procesos que permiten llevar a cabo reacciones nucleares dentro de un plasma son los siguientes:

Confinamiento Gravitacional

En el corazón de las estrellas, la inmensa fuerza de gravedad comprime la materia hasta alcanzar densidades y temperaturas extremas. Estas condiciones propician un entorno ideal para que se produzcan reacciones nucleares, un proceso conocido como fusión. En este fenómeno, núcleos atómicos más ligeros se combinan para formar núcleos más pesados, liberando una enorme cantidad de energía en el proceso.

Inicialmente, en el núcleo estelar, los átomos de hidrógeno, el elemento más abundante en el universo, se fusionan para formar helio. A medida que el hidrógeno se consume, la estrella comienza a contraerse bajo su propio peso, lo que aumenta aún más la temperatura y la presión en su núcleo. Estas condiciones más extremas permiten que se inicien nuevas reacciones de fusión, involucrando ahora núcleos de helio. Este proceso continúa, dando lugar a la formación de elementos cada vez más pesados, como carbono, oxígeno, neón y así sucesivamente.

La secuencia de reacciones de fusión que se produce en una estrella depende de su masa. Las estrellas más masivas son capaces de alcanzar temperaturas y presiones mucho más altas, lo que les permite fusionar elementos más pesados y crear una mayor variedad de elementos químicos. Por el contrario, las estrellas menos masivas, como nuestro Sol, solo pueden fusionar hidrógeno y helio (Dorantes C y Francois L, 2011).

Es importante destacar que la fusión nuclear en las estrellas es el proceso responsable de la creación de la mayor parte de los elementos químicos que encontramos en el universo.

Sin las estrellas, no existirían los átomos que componen todo lo que nos rodea, desde los planetas y las galaxias hasta los seres vivos.

Confinamiento Inercial

El confinamiento inercial es una técnica que busca replicar las condiciones extremas del interior de las estrellas para lograr la fusión nuclear. Imaginemos una pequeña esfera, como una canica, llena de un combustible especial, generalmente isótopos de hidrógeno como el deuterio y el tritio. Esta esfera es sometida a un bombardeo intenso de láseres o partículas de alta energía, lo que provoca que se caliente rápidamente en su superficie. Este calentamiento genera una onda de choque que comprime el combustible hacia su centro, de forma similar a como una pelota de goma rebota al chocar contra una pared. Al comprimirse, el combustible alcanza densidades y temperaturas tan altas que los núcleos atómicos se ven obligados a unirse, liberando una enorme cantidad de energía.

La clave de este proceso es la velocidad. La compresión debe ser extremadamente rápida para que los núcleos tengan tiempo de fusionarse antes de que el combustible se disperse. Por eso se utilizan láseres de alta potencia o haces de partículas intensos, capaces de entregar una gran cantidad de energía en un tiempo muy corto.

Uno de los mayores desafíos en la investigación de la fusión por confinamiento inercial es lograr la ignición. La ignición se produce cuando la energía liberada por las reacciones de fusión es suficiente para mantener la reacción en marcha sin necesidad de un aporte externo de energía. En otras palabras, es como encender una fogata: una vez que la madera se enciende, el fuego se mantiene solo, siempre y cuando haya combustible disponible.

En los últimos años, los científicos han desarrollado nuevas técnicas para mejorar las posibilidades de lograr la ignición. Una de ellas es el ".^{en}cendido rápido", que consiste en utilizar un segundo pulso láser, más intenso y enfocado, para iniciar la fusión en un punto específico del combustible comprimido. Esta técnica permite separar la fase de compresión de la fase de ignición, lo que simplifica el proceso y lo hace más eficiente(Dorantes C y Francois L, 2011).

Si se logra dominar la fusión por confinamiento inercial, tendríamos a nuestra disposición una fuente de energía prácticamente ilimitada y limpia. La energía liberada por la fusión nuclear podría utilizarse para generar electricidad, desalinizar agua o incluso impulsar naves espaciales. Sin embargo, aún queda mucho camino por recorrer antes de que esta tecnología sea una realidad comercial.

En resumen, el confinamiento inercial es una rama de la física que busca aprovechar la energía del núcleo del átomo para generar electricidad. Aunque aún se encuentra en fase de investigación, los avances logrados en los últimos años son prometedores y ofrecen la esperanza de un futuro energético más sostenible.

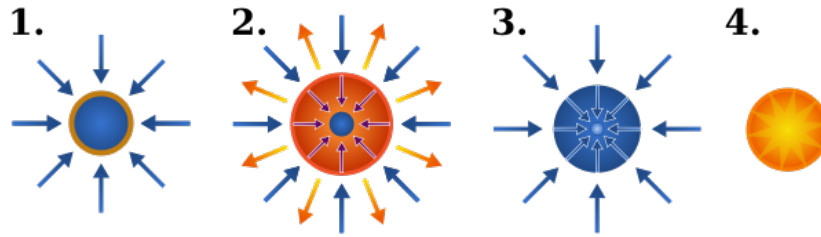


Figura 3.4: El proceso de fusión nuclear mediante confinamiento inercial por láser en un blanco directo se desarrolla en varias etapas sucesivas. En la primera fase, haces de radiación láser inciden sobre la superficie externa de una cápsula que contiene el combustible, generando un calentamiento extremadamente rápido que transforma la superficie en plasma. Debido a la expansión de este plasma hacia el exterior, y aplicando el principio de acción y reacción, se produce una compresión hacia el interior del combustible. En la segunda etapa, esta compresión provoca la implosión de la cápsula, alcanzando densidades superiores a los 200 g/cm^3 y temperaturas cercanas a los 10^8 grados Celsius. Estas condiciones permiten que las reacciones de fusión se inicien en la región central del combustible. Finalmente, la energía liberada por la fusión se transmite al combustible adyacente comprimido, amplificando la reacción y generando una producción energética mayor a la empleada en el proceso de iniciación.

(Autor, 2011)

Confinamiento Magnético

El plasma, el cuarto estado de la materia, es necesario mantenerlo aislado y controlado. Para aprovechar su energía. Aquí es donde entra en juego el confinamiento magnético.

Los campos magnéticos actúan como una jaula invisible para el plasma. Las partículas cargadas del plasma, al moverse a través de un campo magnético, experimentan una fuerza llamada fuerza de Lorentz 3.9. Esta fuerza obliga a las partículas a seguir trayectorias helicoidales alrededor de las líneas del campo magnético, evitando que entren en contacto con las paredes del reactor y se enfríen.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.9)$$

Al confinar el plasma, los científicos pueden mantenerlo a las altas temperaturas necesarias para que se produzcan las reacciones de fusión. Además, el confinamiento magnético permite controlar la forma y el movimiento del plasma, lo que es fundamental para lograr una fusión estable y controlada.

Para lograr un confinamiento eficiente, es necesario superponer un componente poloidal al campo magnético horizontal. Esto genera un campo magnético con líneas de fuerza que describen trayectorias helicoidales. Este patrón permite confinar y guiar el plasma a lo largo de dichas líneas magnéticas, siguiendo los principios establecidos por la fuerza de Lorentz.

En los sistemas de confinamiento magnético, se distinguen principalmente dos configuraciones importantes: los sistemas abiertos y cerrados. En los sistemas abiertos, muchas de las líneas de campo magnético se extienden fuera de la región del plasma, interceptando las paredes de la cámara, lo que facilita el flujo de plasma hacia estas superficies. Estos sistemas pueden adoptar formas específicas, como "espejos" o "cuernos", dependiendo de la curvatura de las líneas de campo magnético, como se muestra en la figura 3.5. La orientación de las líneas de campo generadas por las bobinas puede determinarse utilizando la regla de la mano derecha.

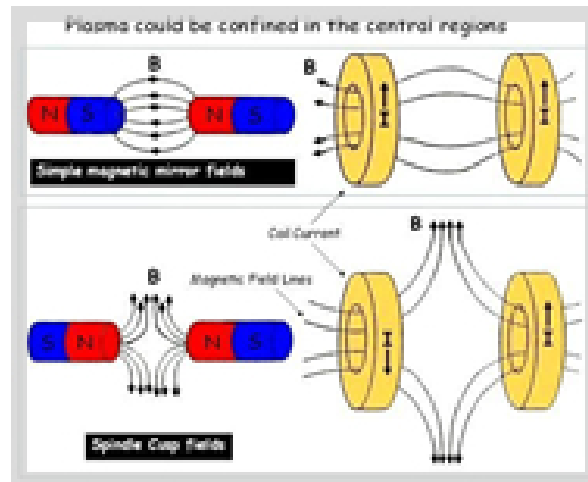


Figura 3.5: líneas de Campo Magnético (PUPR Plasma Laboratory, 2020)

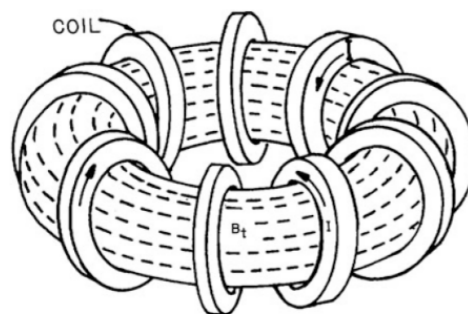


Figura 3.6: Campo Magnético Dentro de un Toroide (Mantovani, 2018)

3.4. Reactor Tipo Tokamak

El **tokamak** es un reactor experimental diseñado para confinar plasma mediante campos magnéticos, con el objetivo de facilitar la fusión nuclear. Su estructura toroidal

permite el confinamiento eficiente del plasma al combinar dos componentes de campos magnéticos principales. El *campo toroidal*, generado por bobinas superconductoras, forma un anillo magnético que circunda el plasma, mientras que el *campo poloidal*, producido por las corrientes internas del plasma, enrosca las líneas del campo en torno a superficies magnéticas cerradas. Esta combinación evita que el plasma escape y ayuda a mantener las altas temperaturas necesarias para la fusión.

El concepto de tokamak fue desarrollado en la década de 1950 en la Unión Soviética. Desde entonces, ha evolucionado significativamente con avances tecnológicos que buscan mejorar la estabilidad del plasma y maximizar la eficiencia energética. Uno de los desafíos críticos en los reactores tokamak es el control de la **corriente de bootstrap**, una corriente inducida dentro del plasma que contribuye al confinamiento magnético.

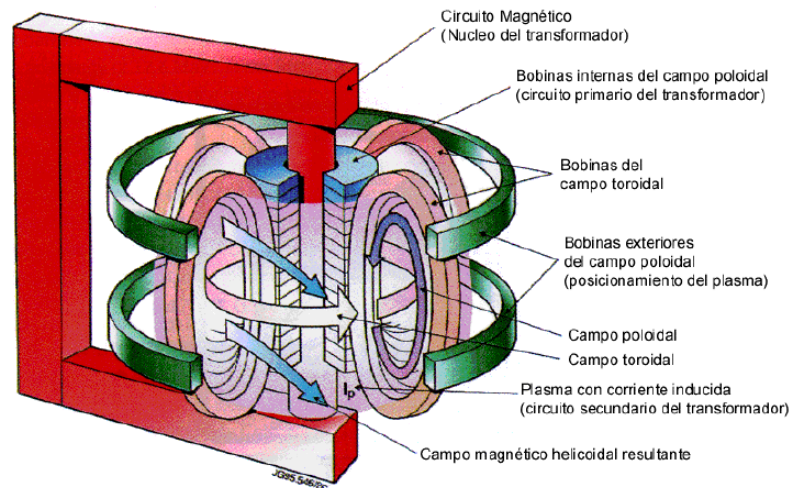


Figura 3.7: Reactor de Fusión Tipo Tokamak
(Dorantes C y Francois L, 2011)

Con el creciente interés en la automatización y la optimización de los procesos de fusión, las *redes neuronales artificiales* se han convertido en herramientas clave para abordar problemas complejos en el diseño y operación de tokamaks. Estas redes permiten realizar cálculos rápidos y precisos de la corriente de bootstrap, que tradicionalmente requerían simulaciones computacionales intensivas (Mantovani, 2018).

Por ejemplo, investigaciones recientes han empleado redes neuronales para modelar el comportamiento de la corriente de bootstrap en diferentes configuraciones de plasma, considerando variables como la densidad de partículas, la temperatura y los perfiles de campo magnético. Este enfoque reduce significativamente los tiempos de cálculo y facilita la toma de decisiones en tiempo real durante las operaciones experimentales.

3.5. Reactor Tipo Stellarator

El nombre "Stellarator" evoca una clara inspiración en las estrellas, ya que estos dispositivos buscan replicar los procesos de fusión nuclear que ocurren en su interior. A diferencia de los Tokamak, que utilizan tanto bobinas poloidales como toroidales para confinar el plasma, los Stellarators prescinden de las primeras, confiando únicamente en un sistema de bobinas externas con formas complejas y cuidadosamente diseñadas.

Esta configuración única permite a los Stellarators operar de forma continua, una ventaja significativa sobre los Tokamak. Al eliminar la necesidad de inducir corrientes en el plasma, se evitan las inestabilidades y los ciclos de operación intermitentes que caracterizan a otros diseños de reactores de fusión. Sin embargo, esta complejidad geométrica implica desafíos considerables en términos de ingeniería y física.

El diseño de las bobinas en un Stellarator debe ser extremadamente preciso para crear un campo magnético que confina el plasma de manera estable y eficiente. La forma y disposición de estas bobinas determinan la estructura del campo magnético, y cualquier pequeña variación puede afectar significativamente el comportamiento del plasma. Por esta razón, el diseño y la construcción de un Stellarator son procesos largos y complejos que requieren una profunda comprensión de la física del plasma y de las técnicas de ingeniería más avanzadas.

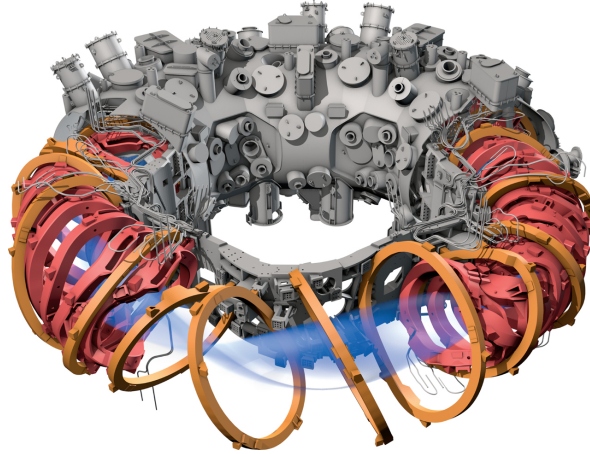


Figura 3.8: Diseño de Stellarator
(Clery, 2015)

Lo que se busca es que los reactores de fusión cumplan con una amplificación $Q \geq 1$ con esta condición permitirá que se produzca mayor cantidad de energía de la que se consume, proyectos como el ITER pretenden tener una eficiencia de $Q = 10$, Esta condición se conoce como el criterio de Lawson.

$$Q = \frac{P_{fus}}{P_{inj}} = \frac{P_{fus}}{P_{dt} + P_{br} + P'_{fus}} = \frac{\frac{1}{4}n^2\langle\sigma v\rangle E_n}{\frac{3nT}{\tau_E} + An^2Z_{eff}T^{1/2} - \frac{1}{4}n^2\langle\sigma v\rangle E_\alpha} \geq 1 \quad (3.10)$$

Donde:

- P_{fus} es la energía liberada de los reactivos
- P_{inj} es la potencia que se inyecta a la reacción es el tiempo necesario para disipar la energía del plasma en el caso en el que se detuviese el suministro de energía
- τ_E es el tiempo necesario para disipar la energía del plasma en el caso en el que se detuviese el suministro de energía
- P_{dt} son las pérdidas directas
- n es la densidad de iones
- T la temperatura
- P_{br} son las pérdidas debidas a las colisiones entre partículas debido al fenómeno de bremsstrahlung
- P'_{fus} es la energía liberada al generarse las partículas Alpha
- $\langle\sigma v\rangle$ es la re-actividad
- E_n es la energía liberada en la reacción
- E_α es la energía liberada al crearse las partículas Alpha
- A Y Z son parámetros que definen P_{br}

3.6. Proyectos de Reactores Nucleares de Fusión

El **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor), actualmente en construcción, es uno de los proyectos de tokamak más ambiciosos a nivel global. Este reactor busca demostrar la viabilidad de la fusión como fuente de energía, con objetivos como alcanzar la ignición del plasma y generar más energía de la que consume. Paralelamente, el proyecto **DEMO** está diseñado como el primer reactor de fusión completamente funcional, capaz de suministrar energía a la red eléctrica. además existen muchos reactores también en proyectos de investigación como china , japon estados unidos y España, a continuación hablaremos sobre algunos aspectos importante de ellos y como en la actualidad aportan aun mas a que se haga realidad conseguir una fuente de energía inagotable.

3.6.1. PROYECTO ITER

En Francia, en el departamento de Bocas del Ródano, un consorcio de 33 países está trabajando en la creación del tokamak más grande jamás diseñado. Este proyecto tiene como objetivo demostrar que la fusión nuclear, el proceso que alimenta al Sol y las

estrellas, puede convertirse en una fuente de energía escalable y libre de emisiones de CO₂ para la generación de electricidad.

Los resultados del programa científico ITER serán fundamentales para abrir el camino hacia futuras plantas de energía basadas en la fusión nuclear.

El propósito principal de ITER es producir "plasmas ardientes" y analizar su comportamiento. En este estado, la energía liberada por los núcleos de helio, resultantes de la reacción de fusión de deuterio-tritio, sería suficiente para mantener la temperatura del plasma, minimizando o incluso eliminando la necesidad de sistemas de calefacción externos. Además, ITER busca integrar y validar todas las tecnologías críticas necesarias para el funcionamiento de un reactor de fusión a escala industrial, incluyendo imanes superconductores, manipulación remota en entornos extremos y sistemas de extracción de energía. Otro objetivo clave es probar diversos conceptos de "módulos tritígenos", esenciales para que futuros reactores generen tritio de manera autosuficiente dentro del propio sistema.

Miles de científicos e ingenieros han contribuido al diseño de ITER desde que la idea de una colaboración internacional sobre fusión nuclear surgió en 1985. Los miembros del ITER —China, la Unión Europea, India, Japón, Corea, Rusia y Estados Unidos— han unido esfuerzos para construir y operar esta instalación experimental. La información obtenida podría servir de base para diseñar un reactor de demostración en el futuro.

La máquina Tokamak del ITER está diseñada para cumplir unos objetivos como proyecto a gran escala y son los siguientes:

- **Producir plasmas autosostenidos de deuterio-tritio mediante reacciones de fusión.** La investigación actual en fusión nuclear está enfocada en explorar los "plasmas ardientes". En este estado, la energía generada por las reacciones de fusión es suficiente para mantener la temperatura del plasma, lo que permite un equilibrio autosostenido. El proyecto ITER buscará alcanzar este objetivo, produciendo plasmas ardientes que generaran más energía y se mantendrán estables durante periodos prolongados.
- **Generar 500 MW de potencia de fusión de plasma.** El tokamak europeo JET mantiene el récord de energía de fusión producida, alcanzando 16 MW en 1997 con una potencia de calefacción de 24 MW (un factor "Q" de 0,67). ITER tiene como meta incrementar este factor a 10, generando 500 MW de potencia de fusión con una entrada de 50 MW. Aunque ITER no convertirá esta energía en electricidad debido a su naturaleza experimental, establecer las bases para futuras plantas industriales.
- **Contribuir a demostrar el funcionamiento integrado de las tecnologías de una planta de fusión electrogenética.** ITER representa un puente entre los dispositivos experimentales actuales y los demostradores industriales del mañana. Permitirá estudiar plasmas bajo condiciones similares a las de una planta de

fusión y probar tecnologías clave como calefacción, control, diagnóstico, criogenia y mantenimiento remoto.

- **Experimentar con la producción de tritio.** En una fase posterior, ITER se dedicará a validar la producción de tritio a partir de litio dentro de su cámara de vacío. Actualmente, el inventario global de tritio es insuficiente para cubrir las demandas de futuras plantas de fusión. ITER ofrecerá la oportunidad única de probar modelos de mantas "tritigenas" en un entorno de reactor de fusión.
- **Demostrar la seguridad de un dispositivo de fusión.** En 2012, la Organización ITER recibió la autorización para construir y operar la instalación nuclear ITER tras un riguroso examen de sus expedientes de seguridad. Uno de los principales objetivos es demostrar que las reacciones de fusión no representan riesgos para la población ni para el medio ambiente.

Entraremos a continuación a una revisión rápida de los componentes importantes que hacen parte de la estructura del tokamak del ITER.

El ITER se está desarrollando en un terreno de 180 hectáreas ubicado en el sur de Francia. Dentro de este espacio, se han levantado 39 edificaciones y zonas técnicas que albergan tanto el Tokamak como sus sistemas de apoyo. La estructura central de la instalación, conocida como el edificio Tokamak, es una construcción de hormigón armado de siete niveles que se extiende desde 13 metros bajo la plataforma hasta 60 metros sobre ella. El ensamblaje previo de los componentes del Tokamak se realiza en una sala de montaje contigua.

Además del edificio Tokamak, en las proximidades se encuentran diversas instalaciones complementarias, como torres de enfriamiento, sistemas eléctricos, una sala de control, una planta de gestión de residuos y una planta criogénica encargada de suministrar helio líquido para el enfriamiento de los imanes del ITER.

En cumplimiento de sus compromisos con el proyecto, Europa se encarga de la construcción de la mayor parte de los edificios y la infraestructura de la plataforma.

ITER será la instalación más grande del mundo con un radio de plasma de $6,2m$ y un volumen de $840m^3$, pesará 23.000 toneladas, alcanzará una temperatura de 150 millones de grados celsius.

Una gran cantidad de imanes son necesarios para generar el campo magnético que creará, confinará y dará forma al plasma, estos tendrán que estar a una temperatura de $4K$.

Estos a su vez estarán compuestos por:

Bobinas de Campo Toroidales

Las dieciocho bobinas de campo toroidal del ITER, dispuestas verticalmente alrededor de la cámara de vacío, confinan el plasma mediante un campo magnético de 11,8 teslas

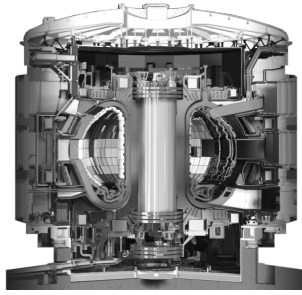


Figura 3.9: Tokamak ITER
(ITER Organization, 2024)

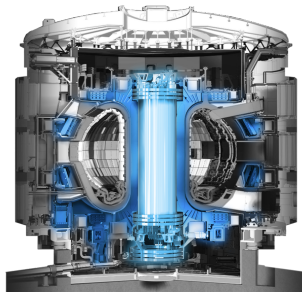


Figura 3.10: Imanes
(ITER Organization, 2024)

y una energía magnética total de 41 gigajulios. Cada bobina mide 17 metros de alto, 7 metros de ancho y pesa 330 toneladas, siendo uno de los componentes más grandes del reactor.

Fabricadas con superconductores de cable en conductos ensambladas en "paquetes de panqueques dobles" dentro de marcos de acero inoxidable, las 18 bobinas suman casi 6.000 toneladas, representando una cuarta parte del peso de la máquina. Se emplean técnicas avanzadas, como la soldadura láser en vacío, para garantizar tolerancias y calidad estrictas durante su fabricación.

Bobinas de Campo Poloidal

Al “pellizcar” el plasma, el campo magnético de las bobinas de campo poloidal lo mantiene alejado de las paredes y contribuye a su forma y estabilidad. El campo poloidal es inducido tanto por los imanes como por la corriente que fluye a través del plasma.

El sistema magnético poloidal consta de seis bobinas horizontales colocadas fuera de la estructura magnética toroidal. Hecho de “cables en conducto” que encierran hebras superconductoras de niobio-titanio (Nb-Ti), el sistema poloidal del tokamak ITER está diseñado para entregar una energía magnética total de 4 gigajulios y un campo magné-

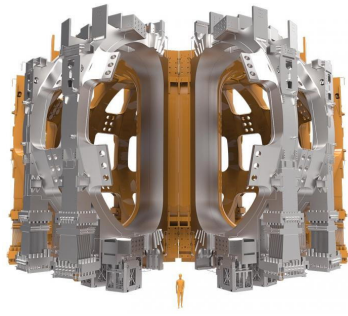


Figura 3.11: Bobinas de Campo Toroidales
([ITER Organization, 2024](#))

tico máximo de 6 teslas. Debido a su tamaño (más de 24 metros para las más grandes y 400 toneladas para las más pesadas), cuatro de las seis bobinas de campo poloidal se fabricaron in situ entre 2016 y 2024 en un edificio específico.

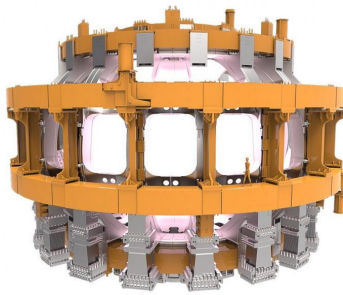


Figura 3.12: Bobinas de campo poloidal
([ITER Organization, 2024](#))

Solenoides Central

El solenoide central forma la columna vertebral de la máquina. Su función es inducir la corriente de plasma y mantenerla durante toda la descarga. Compuesto por seis bobinas independientes basadas en un superconductor de niobio y estaño, el solenoide central es uno de los imanes superconductores más complejos y potentes jamás construidos. Con un peso de 1.000 toneladas, 13 metros de altura (18 m de altura con su estructura) y 4 metros de ancho, producirá una energía magnética total de 6,4 GJ y un campo magnético máximo de 13 teslas, para una intensidad de corriente de 15 MA para descargas de 300 a 500 segundos. A lo largo de su vida útil, los devanados tendrán que soportar ciclos electromagnéticos intensos y repetidos (hasta 60.000 ciclos) asociados con corrientes y campos de alta intensidad. Una estructura de precompresión vertical asegurará la cohesión del conjunto. La estructura deberá resistir una fuerza de unos 60 meganewtons (o más de 6.000 toneladas de fuerza). En comparación, la fuerza necesaria para despegar un transbordador espacial equivale a unos 30 meganewtons.



Figura 3.13: Solenoide Central
(ITER Organization, 2024)

Bobinas de Corrección

Estas pequeñas bobinas, 18 en total, compensan las desviaciones que pueden afectar la geometría del campo magnético y que surgen de tolerancias en la fabricación y montaje de los elementos. Más ligeras y delgadas que las bobinas de campo toroidales o poloidales y portadoras de una corriente menos intensa (10 kA), las bobinas correctoras miden hasta 8 metros de ancho. Su fabricación e instalación en el tokamak presentan una serie de desafíos debido a sus formas complejas, tolerancias reducidas y el entorno particularmente denso de la cámara de vacío. Las bobinas correctoras están dispuestas en grupos de seis en las partes superior, media e inferior de la superficie exterior de la cámara de vacío.

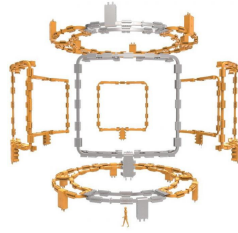


Figura 3.14: Bobinas de Corrección
([ITER Organization, 2024](#))

Líneas de Alimentación de Bobinas

Las líneas eléctricas (alimentadores de imanes) proporcionan energía eléctrica y criogénica a los imanes superconductores. Proporcionan el helio líquido para asegurar la superconductividad de las bobinas de campo toroidal/poloidal y del solenoide central, así como la energía eléctrica (a través de cables superconductores de alta temperatura) y la instrumentación.

Las líneas se prefabricarán en fábrica y se conectarán a las bobinas en el emplazamiento del ITER. En total, se instalarán 31 líneas eléctricas en el edificio Tokamak para alimentar el sistema magnético.

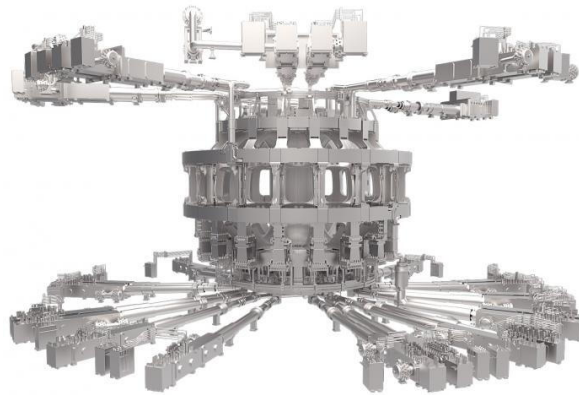


Figura 3.15: Líneas de Alimentación de Bobinas
([ITER Organization, 2024](#))

Bobinas internas

Dos sistemas magnéticos colocados dentro de la cámara de vacío, esta vez convencionales, ofrecen un medio adicional para controlar el plasma. A ambos lados del plano medio de la máquina están instaladas dos bobinas anulares que actúan sobre la estabilidad vertical del plasma; 27 bobinas, unidas a la pared interna de la cámara de vacío, están diseñadas para generar perturbaciones magnéticas dentro del plasma con el fin de evitar un tipo particular de inestabilidad llamada modos localizados en el borde (ELM). Diseñadas para resistir el ambiente extremo de la cámara de vacío de la máquina, las bobinas interiores están hechas de cobre envuelto en aislamiento mineral.

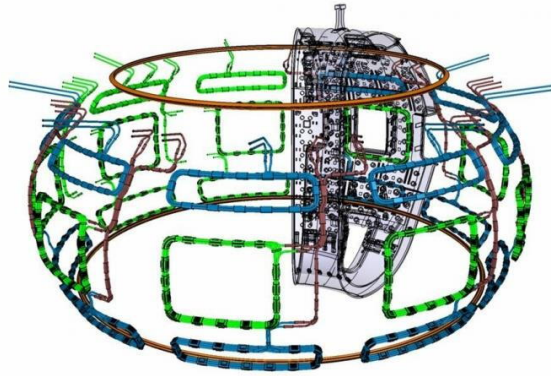


Figura 3.16: Bobinas Internas
(ITER Organization, 2024)

Cámara de vacío

La cámara de vacío del ITER es un recinto hermético de acero inoxidable en forma toroidal donde se producen las reacciones de fusión. Funciona como barrera primaria de contención, protegiendo contra la radiación de neutrones y contribuyendo a la estabilidad del plasma. Su diseño incluye una doble pared con agua de refrigeración para disipar el calor generado.

Equipado con 44 accesos sellados herméticamente, este sistema permite operaciones de mantenimiento y soporte a componentes internos como los módulos de cubierta y el desviador. Los módulos internos, además de proteger contra el impacto de neutrones, permitirán pruebas de materiales para la producción de tritio en fases posteriores.

Con un volumen total de 1.400 metros cúbicos y un peso de 5.200 toneladas (incrementado a 8.500 toneladas con componentes adicionales), esta cámara alojará un plasma seis veces mayor que el de los tokamaks actuales más grandes, marcando un hito en el desarrollo de la fusión nuclear.

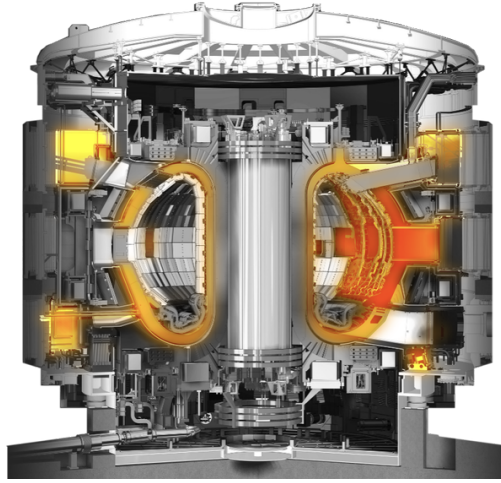


Figura 3.17: Cámara de Vacío del ITER
(ITER Organization, 2024)

Módulos de cubierta

Los 440 módulos de cubierta del ITER protegen la cámara de vacío y los imanes del calor y los neutrones generados por la fusión. Estos módulos convierten la energía cinética de los neutrones en energía térmica, que se disipa mediante agua de refrigeración. Con dimensiones de 1 x 1,5 metros y hasta 4,6 toneladas de peso, existen 180 variantes adaptadas a su posición dentro de la cámara.

Cada módulo incluye una pared frontal desmontable para evacuar el calor y un escudo contra neutrones, además de integrar sistemas de diagnóstico y calefacción por plasma. Diseñada para soportar cargas térmicas de hasta 736 MW, la cubierta es un componente crítico, refrigerado activamente.

En el futuro, módulos experimentales llamados "tritigen" evaluarán la producción de tritio dentro del reactor, un paso clave hacia la autosuficiencia en combustible para futuras plantas de fusión.

Desviador

El desviador del ITER, ubicado en el "suelo" de la cámara de vacío, extrae impurezas, efluentes gaseosos y parte del calor generado por la fusión. Consta de 54 casetes de acero inoxidable, cada uno con tres elementos principales: un objetivo vertical interno, uno externo y una cúpula. Los casetes incluyen sistemas de diagnóstico para monitorizar el plasma y se enfrían activamente con agua.

Expuestos a cargas térmicas extremas de 10-20 MW/m², los objetivos están recubiertos de tungsteno (W), seleccionado por su resistencia a altas temperaturas. Cada casete,

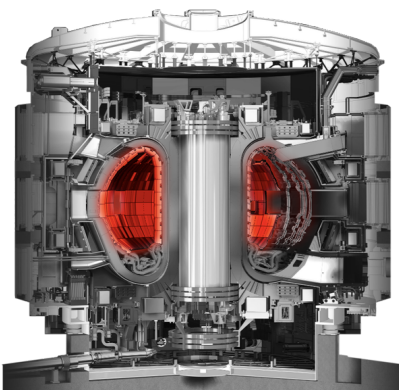


Figura 3.18: Módulos de Cubierta que Protegen la Cámara y los Imanes del Calor
(ITER Organization, 2024)

de 10 toneladas, será instalado y reemplazado con herramientas de telemanipulación diseñadas específicamente para el ITER.

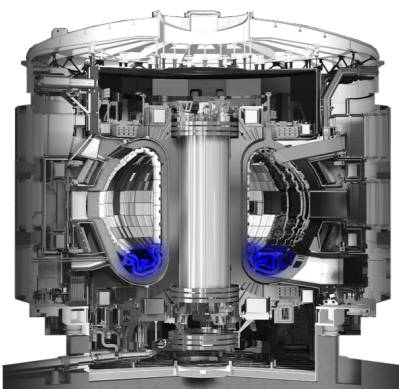


Figura 3.19: Desviador
(ITER Organization, 2024)

El criostato ITER, la cámara de vacío de acero inoxidable más grande construida (16.000 m^3), envuelve la cámara de vacío y los imanes superconductores, proporcionando un ambiente de vacío ultra frío. Con 30 metros de altura y diámetro, está fabricado con 3.850 toneladas de acero, siendo su base el componente más pesado (1.250 toneladas).

Incluye 280 huecos para mantenimiento y acceso a sistemas críticos como tuberías, suministros eléctricos y diagnóstico. Fuelles especiales compensan movimientos relativos durante la operación y aíslan el vacío interno. Su ensamblaje, iniciado en 2016, concluyó en 2022, con la base y el cilindro inferior ya instalados, mientras el cilindro superior y la tapa permanecen almacenado.

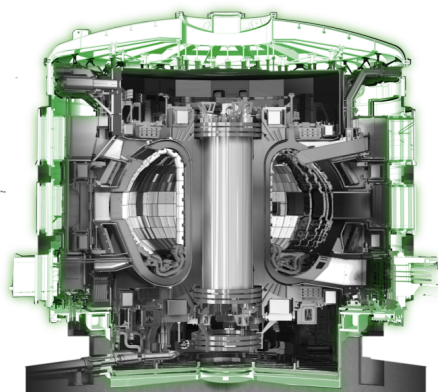


Figura 3.20: Criostato
([ITER Organization, 2024](#))

3.6.2. Proyecto SMART

La Figura muestra un esquema del tokamak SMART . Las dimensiones del recipiente son 1.6 m (diámetro) \times 1.6 m (altura). En el centro, un solenoide de 30 cm de diámetro está enrollado alrededor de 12 bobinas de campo toroidal. 8 bobinas de campo poloidal son responsables de las capacidades de conformado. El objetivo principal del tokamak SMART es la evaluación de la sinergia entre STs(tokamaks esféricos) y NT (los plasmas de triangularidad negativa).

La operación de SMART se dividirá en tres fases. En la primera, solo se estudiarán plasmas calentados óhmicamente. En la segunda, se implementará calentamiento por inyección de haz neutro (NBI) junto con un aumento de la corriente plasmática, el campo magnético y la duración del pulso. La fase 3 tendrá un mayor calentamiento auxiliar, corriente plasmática, duración del pulso y campo magnético([Cruz-Zabala y cols., 2024](#)).

El proyecto SMART (SMall Aspect Ratio Tokamak) de la Universidad de Sevilla es una iniciativa pionera en el campo de la fusión nuclear, cuyo objetivo es desarrollar un reactor de fusión compacto y eficiente. Este dispositivo experimental ha logrado avances significativos, incluyendo la generación y mantenimiento de plasma a temperaturas de 10 millones de grados durante un tiempo récord, superando las expectativas iniciales. ([País, 2025](#)).

Una de las innovaciones clave del tokamak SMART es su diseño esférico con "Triangularidad Negativa", una configuración de plasma que mejora el rendimiento y reduce el desgaste de las paredes del reactor. Este diseño permite alcanzar altas temperaturas sin comprometer la integridad estructural del dispositivo, acercando la tecnología de fusión nuclear a una fuente de energía limpia y prácticamente inagotable.

El proyecto SMART forma parte de la estrategia "Fusion2Grid"de la Universidad de

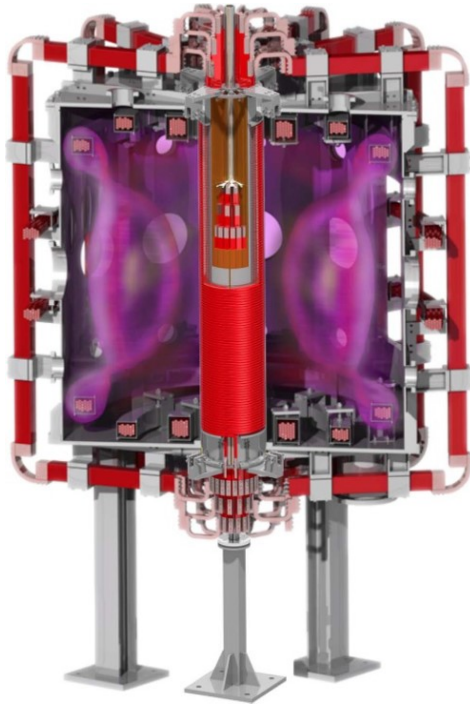


Figura 3.21: Plasma dentro del Tokamak Smart
([Cruz-Zabala y cols., 2024](#))

Sevilla, que busca conectar un reactor de fusión a la red eléctrica en la próxima década. Esta iniciativa cuenta con la colaboración de instituciones internacionales como la Universidad de Princeton y el Instituto de Física del Plasma de Princeton, y ha recibido una subvención de 695.500 euros de la Comisión Europea. ([Post, 2025](#)).

Para profundizar en los aspectos técnicos del proyecto, se han realizado estudios sobre el impacto de la resistividad del plasma en los equilibrios del tokamak SMART. Estos estudios utilizan el paquete de códigos FIESTA implementado en MATLAB para modelar cómo la resistividad afecta las propiedades de equilibrio del plasma en el dispositivo.

3.6.3. El EAST

El EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) es el primer tokamak superconductor del mundo y se destaca por tres características clave: su sección transversal no circular, imanes totalmente superconductores y componentes de revestimiento de plasma (PFC) enfriados por agua. Estas características son esenciales para la investigación de modos avanzados de operación del plasma en estado estable. Aunque es más pequeño que el ITER, EAST comparte una forma y equilibrio similares, pero con una mayor flexibilidad, lo que lo convierte en un banco de pruebas ideal para el desarrollo de la fusión nuclear. Durante la construcción de ITER, que durará más de 10 años, EAST será uno de los pocos dispositivos internacionales que podrá realizar investigaciones



Figura 3.22: (Experimental Advanced Superconducting Tokamak
([Institute of Plasma Physics, 2025](#)))

científicas avanzadas relacionadas con la fusión.

En los últimos años, EAST ha mejorado su capacidad de investigación al poner en funcionamiento los sistemas de calefacción auxiliar, que están relacionados con los sistemas de ITER. Además, la instalación de nuevos diagnósticos ha aumentado significativamente su capacidad para llevar a cabo experimentos científicos de alto nivel. Estos avances permitirán que EAST realice investigaciones clave en física y tecnología de reactores de fusión. Los objetivos de investigación del EAST se encuentran a la vanguardia de la I+D de fusión, y el Instituto de Física del Plasma de China (ASIPP) trabaja en cooperación con instituciones internacionales para investigar reactores tokamak avanzados con alto rendimiento y operación estable y segura([Institute of Plasma Physics, 2025](#)).

Las investigaciones de EAST tienen como objetivos abordar varios desafíos de la física y la ingeniería necesarios para la fusión nuclear. Estos incluyen el funcionamiento estable de tokamaks superconductores completos, el desarrollo de medidas de control en tiempo real y la investigación de la física del plasma asociada con el calentamiento auxiliar de alta potencia, especialmente el comportamiento de las partículas energéticas. Además, EAST investiga el confinamiento y transporte de plasma en escenarios avanzados, la interacción entre el plasma y la pared, y el diseño de desviadores para operación en estado estable. A través de estos estudios, EAST está contribuyendo significativamente al desarrollo de la tecnología necesaria para futuros reactores de fusión y para la construcción del ITER y otros proyectos de fusión a nivel mundial. EAST ha alcanzado importantes logros, como mantener un plasma a 158 millones de grados Celsius durante más de 1,000 segundos. Su investigación apoya el proyecto internacional ITER, que busca crear un reactor de fusión comercial, acercándonos a la energía de fusión.

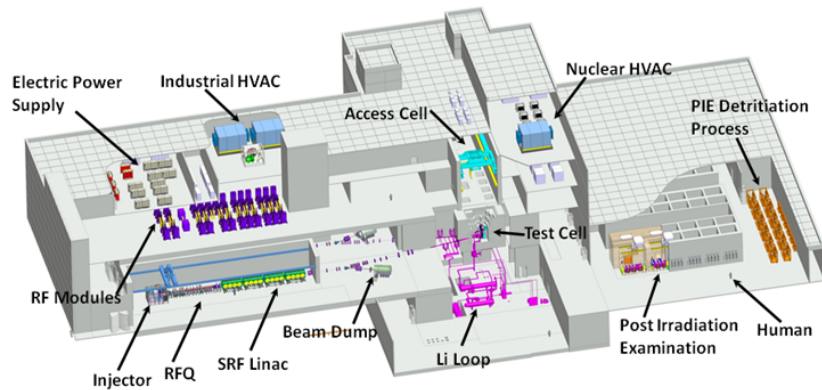


Figura 3.23: International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF/EVEDA, 2025)

3.6.4. International Fusion Materials Irradiation Facility

La Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión (IFMIF) es una infraestructura científica de vanguardia diseñada para someter a prueba los materiales que se utilizarán en los futuros reactores de fusión. A través de un acelerador de partículas, la IFMIF genera un flujo intenso de neutrones con características similares a las que experimentarán los materiales en el interior de un reactor de fusión. Esta exposición a condiciones extremas permite evaluar con precisión la resistencia de los materiales, su degradación y su vida útil, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad y la eficiencia de las futuras plantas de energía de fusión. El proyecto IFMIF, una colaboración internacional, representa un paso crucial hacia la materialización de la energía de fusión como una fuente de energía limpia y prácticamente ilimitada (IFMIF/EVEDA, 2025).

3.7. Reflexiones Finales Alrededor de las Energías Renovables y su Relación con el Desarrollo de la Propuesta

Desde el trabajo y la investigación realizada en torno a la creciente demanda energética observada en la figura 1.2, que abarca desde el año 2000 hasta 2022, se evidencia el problema de la contaminación por CO₂, el cual afecta no solo la salud de los seres vivos, sino también los ecosistemas. A medida que se realizan esfuerzos por encontrar fuentes de energía renovable, como la solar, eólica e hidráulica, se utilizan grandes extensiones de tierra, lo que desplaza la fauna y la flora. Además, en casos como el de la hidroeléctrica de Hidroituango en Colombia, la cual ha generado el desplazamiento de comunidades indígenas al verse afectadas por la modificación de las fuentes hídricas.

En este contexto, el reactor de fusión DEMO (Demonstration Power Plant), que se proyecta como el sucesor del ITER, está diseñado para producir entre 2.000 y 3.000 megavatios (MW) de potencia de fusión y generar aproximadamente entre 500 MW y 1.000 MW de electricidad (EUROfusion Consortium, 2025), lo que podría traducirse en una producción anual de entre 3,29 y 6,57 teravatios-hora (TWh) de electricidad.

A diferencia del ITER, que solo demostrará la viabilidad de la fusión sin generar electricidad, DEMO será el primer reactor de fusión en producir electricidad para la red eléctrica. Su objetivo es lograr una ganancia de energía de $Q \geq 30$, lo que significa que generará al menos 30 veces más energía de fusión de la que consume para calentar el plasma.

Se espera que DEMO esté operativo en la década de 2050, sirviendo como un puente entre los experimentos actuales y las futuras centrales de fusión comerciales.

Es así como en la revisión realizada, se puede destacar que la investigación en fusión nuclear ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos 15 años, reflejado en la gran cantidad de artículos científicos y proyectos en desarrollo. Este avance, impulsado por iniciativas globales como ITER y DEMO, demuestran que la humanidad se encuentra en un punto crucial en la búsqueda de fuentes de energía sostenibles y de alto rendimiento. Si bien la implementación de un reactor de fusión plenamente operativo aún tomará varias décadas, los progresos en esta área han sido significativos y continuos, consolidando a la fusión nuclear como una de las alternativas más prometedoras para el abastecimiento energético del futuro (Ballesta, 2017).

En cuanto a las líneas de investigación predominantes, el confinamiento inercial sigue siendo el enfoque con mayor número de publicaciones, mientras que los reactores tokamak y stellarator continúan evolucionando en paralelo. ITER, como el mayor experimento de fusión nuclear en la actualidad, ha logrado convertirse en un referente indiscutible dentro del sector, sirviendo como una plataforma para el desarrollo de futuras plantas comerciales de fusión.

En comparación con las fuentes de energía renovable actuales, un proyecto como ITER requiere una extensión de terreno mucho menor que cualquier parque de energía solar, eólica o hidráulica, lo que representa una ventaja significativa al reducir el impacto ambiental y el desplazamiento de comunidades. Además, a diferencia de otras fuentes de energía, la fusión nuclear no genera desechos radiactivos de larga vida ni emisiones de gases contaminantes, lo que la convierte en una alternativa limpia y sostenible para el futuro energético mundial, lo que al final se traduce es que el ITER es el primer gran paso hacia el futuro de las energías limpias.

Tras haber realizado este recorrido respecto a un contexto global de la producción de energías renovables, marcado por la creciente demanda energética y la necesidad urgente de transiciones hacia fuentes limpias, la enseñanza de la fusión nuclear no solo representa una prioridad académica, sino también una responsabilidad social. En este sentido, el trabajo de Manuel Calvo Hernando, pionero del periodismo científico en el

ámbito hispano, ofrece una base conceptual sólida para justificar la propuesta educativa presentada en este documento.

Calvo Hernando (1981) subraya que "... la alfabetización científica de la sociedad es condición necesaria para su maduración democrática". Desde esta perspectiva, el conocimiento sobre la fusión nuclear, sus principios físicos fundamentales y su potencial como fuente energética limpia, no puede quedar restringido a círculos académicos o técnicos. Por el contrario, debe ser objeto de divulgación y comprensión desde etapas formativas, como las que aborda esta propuesta.

El autor también advierte sobre la necesidad de "... acortar la distancia entre los avances de la ciencia y el conocimiento popular de estos avances". Este principio cobra especial relevancia si consideramos que la fusión nuclear suele presentarse como un concepto lejano o incomprensible para la mayoría, a pesar de sus implicaciones directas en el futuro energético del planeta. Por lo tanto, una propuesta pedagógica como la que se presenta formalmente en el anexo ?? se alinea con el imperativo ético de la divulgación científica responsable.

Asimismo, Calvo Hernando señala que el periodismo científico debe contribuir a la formación de ciudadanos críticos, capaces de tomar decisiones informadas en cuestiones complejas. En este sentido, dotar a los estudiantes de herramientas conceptuales y analíticas para comprender la fusión nuclear incluyendo el uso de ecuaciones físicas, análisis energético comparativo y referencia a proyectos reales como el ITER contribuye a ese mismo objetivo formativo desde el ámbito escolar.

Finalmente, esta propuesta responde a una de las funciones fundamentales que Calvo Hernando atribuye a la divulgación científica: la de hacer comprensible lo complejo, sin renunciar al rigor. En coherencia con este principio, la propuesta integra preguntas abiertas, actividades interactivas, cálculos reales y visualización de datos, como estrategia para acercar un fenómeno de alta complejidad a la experiencia educativa de los estudiantes.

Criterios para la Formulación de la Propuesta

La propuesta sobre la fusión nuclear como alternativa energética sostenible se sustenta en una serie de criterios que integran aspectos sociales, ambientales, pedagógicos y científicos. Estos criterios se estructuran de acuerdo con la contextualización previa y los capítulos temáticos del trabajo, permitiendo una articulación coherente entre el diagnóstico de la realidad y los contenidos abordados.

1. **Criterio de contextualización sociopolítica y ambiental:** A partir del análisis del *Acuerdo de Escazú* y del rol del liderazgo participativo en la gobernanza ambiental en América Latina y Colombia, se identificó la necesidad de promover la participación ciudadana informada en los temas ambientales. Este contexto revela la urgencia de fortalecer los mecanismos de acceso a la información ambiental

desde la educación, convirtiéndola en una herramienta para la construcción de una ciudadanía crítica y comprometida con el desarrollo sostenible. La propuesta surge como una respuesta educativa concreta a esa necesidad de formación ambiental desde una perspectiva participativa.

2. **Relevancia del contexto energético global (Capítulo 1):** El reconocimiento de las limitaciones y consecuencias del uso de energías no renovables, así como los desafíos que enfrentan las renovables tradicionales, establece la pertinencia del estudio de nuevas tecnologías como la fusión nuclear. Este capítulo fundamenta la necesidad de repensar el modelo energético actual desde una mirada crítica, informada y propositiva.
3. **Comprensión histórica del desarrollo de la energía nuclear (Capítulo 2):** El estudio de la fisión nuclear y sus aplicaciones permitió trazar una línea de evolución hacia la fusión nuclear como tecnología más limpia y segura. Este criterio histórico-técnico facilita la comprensión de la propuesta como parte de una continuidad científica y tecnológica que busca soluciones energéticas sostenibles.
4. **Fundamentación científica rigurosa (Capítulo 3.1 y 3.2):** La inclusión de conceptos clave como la energía de enlace, el tiempo de confinamiento y la sección eficaz de reacción, permitió que la propuesta se construyera sobre bases físicas sólidas, adecuadas al nivel educativo de los estudiantes, pero sin perder precisión teórica.
5. **Actualización tecnológica mediante proyectos reales (Capítulo 3.6):** La mención de iniciativas como el proyecto ITER en Francia, el SMART en Corea o el EAST en China permitió anclar la propuesta en el estado del arte de la investigación en fusión nuclear, mostrando a los estudiantes que se trata de un tema vigente y con impacto global.
6. **Valor didáctico y comprensibilidad del fenómeno físico:** La propuesta fue diseñada desde una perspectiva didáctica constructivista, utilizando actividades de predicción, cálculo, comparación y reflexión crítica. Este criterio busca transformar un tema complejo en una experiencia de aprendizaje significativa para los estudiantes.
7. **Justificación desde la divulgación científica (inspirada en Manuel Calvo Hernando):** Finalmente, se adoptó el criterio de *divulgabilidad pedagógica*, en línea con Calvo Hernando (1981), quien planteó que la alfabetización científica es clave para la formación democrática. Enseñar fusión nuclear de forma comprensible, rigurosa y contextualizada responde a su llamado a reducir la brecha entre ciencia y sociedad a través de la educación.

Presentación de los temas abordados en la propuesta

La presente propuesta didáctica tiene como propósito central la enseñanza de los principios físicos fundamentales de la fusión nuclear, enmarcados dentro de un enfoque pedagógico que promueva la alfabetización científica y la conciencia ambiental en los estudiantes. Para ello, la propuesta se estructura en tres grandes ejes temáticos:

Energías Renovables y el Contexto Energético Actual: Se aborda la situación crítica derivada del uso extensivo de energías no renovables, sus impactos ambientales, y las limitaciones de las fuentes renovables tradicionales. Este bloque sirve como punto de partida para comprender la necesidad de explorar alternativas energéticas más limpias, eficientes y sostenibles.

Historia y Evolución de la Energía Nuclear: Se presenta una visión general del desarrollo de la energía nuclear, desde sus aplicaciones iniciales en la fisión hasta los avances actuales en la investigación sobre fusión. Este eje temático permite contextualizar la fusión nuclear dentro de una trayectoria tecnológica y científica, destacando sus diferencias y ventajas frente a la fisión convencional.

Fundamentos Físicos de la Fusión Nuclear y su Aplicación Tecnológica: Se profundiza en conceptos físicos clave como la energía de enlace nuclear, la ecuación de Einstein, la temperatura, la presión, el tiempo de confinamiento y la sección eficaz de reacción. Además, se exploran los avances actuales en proyectos como el reactor ITER, mostrando el potencial de la fusión nuclear como una fuente energética del futuro.

Esta propuesta no solo busca enseñar contenidos técnicos, sino también fomentar el pensamiento crítico, la comparación entre tecnologías energéticas y la valoración de las implicaciones sociales y ambientales de las decisiones energéticas. A través de actividades prácticas, ejercicios de estimación energética y recursos visuales, se busca hacer accesible un tema complejo sin perder el rigor científico.

Conclusiones

En la investigación realizada acerca del desarrollo de las energías renovables tradicionales en el siglo XX y XXI se encuentra que el avance científico y tecnológico a jugado un papel primordial para poder desarrollar dispositivos que aprovechen diferentes recursos de la naturaleza, como la luz solar, el viento o el movimiento del agua que permite reducir uno de los grandes problemas a los cuales se enfrenta el mundo actual que es la contaminación. Sin embargo, este tipo de proyectos que utilizan las energías renovables más empleadas aún deben sortearse dentro de diferentes problemáticas como la intermitencias, el espacio de ocupación y impacto ambiental, lo cual desfavorece su implementación a gran escala en el mundo.

Un punto importante de la investigación se centró en mostrar la historia y las generaciones de la obtención de energía mediante procesos que involucran el átomo. Aquí se encontró, que el avance en investigación en física nuclear y todo el aporte que realizaron los científicos de la primera parte del siglo XX en esta vía, además del establecimiento de un método para generar reacciones de fisión controladas para la obtención de energía aprovechable para la humanidad, permitió el establecimiento de una nueva forma de obtención de energía “limpia”, que en realidad genera menor impacto ambiental que las energías no renovables, pero esta se encuentra lejos de ser la solución definitiva para la humanidad, ya que la creciente necesidad energética la ha convertido en un potencial peligro ambiental. También, es de resaltar que sin toda la investigación en los procesos de fisión, no habría sido posible pensarse en otras formas de aprovechar la energía almacenada en los átomos, como los proyectos que involucran procesos de fusión.

Al establecer los conceptos fundamentales del proceso de fusión y presentar los proyectos que se están desarrollando actualmente para lograr la puesta a punto de reactores de fusión tipo Tokamak, algo que se resalta es la compresión respecto a la cantidad de energía que se puede liberar y aprovechar para las actividades humanas en los procesos de fusión. Esta le permitiría a la humanidad generar una alternativa con gran ventaja ambiental frente a la creciente demanda energética que se afronta y se afrontará en el futuro, aunque con costos más elevados (sin embargo, el tema económico no era objetivo de este proyecto). Adicionalmente, el impacto ambiental tendría una mejora respecto a las alternativas de energía renovable actual, dado que en este caso, en la fusión del deuterio y tritio se genera como desecho un neutrón libre, el cual es más fácil de ser

aprovechable ayudando a generar materia prima para el mismo proceso gracias al litio. Aquí se observan ventajas y complejidades a lo largo de la creación de máquinas que puedan generar estas cantidades nunca antes pensadas de energía, que se proyecta como la mejor alternativa para el futuro. Sin embargo el desafío actual se encuentra en los límites que se tienen respecto a la ingeniería para el desarrollo de los materiales óptimos para conseguir los resultados esperados en la creación de estos proyectos.

El análisis desarrollado a lo largo del tercer capítulo permitió establecer una base sólida con los conceptos fundamentales de la fusión nuclear sus, diferencias respecto a la fisión y su potencial como fuente de energía sostenible, dado por condiciones de confinamiento la sección eficaz de reacción y la necesidad de superar el criterio de lazo. Esto sentó las bases para saber qué conceptos se pueden llevar al aula y cuales no teniendo en cuenta el nivel de profundidad o extensión en los mismos. En conclusión la propuesta desarrollada establece un nivel de cumplimiento de los objetivos planteados, al presentar que la fusión nuclear representa en términos científicos, ambientales y tecnológicos la mejor opción del futuro para la producción energética eficiente de la humanidad. Así mismo, se puede validar la pertinencia de generar este tipo de materiales con una estrategia para la enseñanza, que promuevan la comprensión crítica de este tipo de temas complejos en formaciones académicas, contribuyendo a la formación de ciudadanos informados críticos y comprometidos con los retos de la sostenibilidad energética global.

Finalmente se encuentra que en la construcción de conocimiento de los procesos de fusión y en los grandes laboratorios de investigación y diferentes proyectos no se han visto afectados los propios autores a diferencia de lo que ocurrió en laboratorios como el de Marie Curie, donde el desconocimiento de que la radiactividad afectaba la salud de los seres vivos, cobró la vida de varios científicos.

Referencias

- ABC. (2014). *¿en qué consiste el dióxido de uranio?* Descargado de <https://www.abc.com.py/edicion-impres/politica/en-que-consiste-el-dioxido-de-uranio-1308943.html>
- Autor, A. A. (2011). Hiper – la fusión nuclear por confinamiento inercial en europa. *Francis The Mule News*, 1(1), 1-10. Descargado de <https://francisthemulenews.wordpress.com/2011/04/27/hiper-la-fusion-nuclear-por-confinamiento-inercial-en-europa/>
- autores, V. (2017). *Energía hidráulica*. Autopublicación Tagus.
- Ballesta, P. E. (2017). La fusión nuclear en la actualidad. *UNIVERSIDAD DE JAÉN Facultad de Ciencias Experimentales*.
- Betz, A. (1920). *Das maximum der theoretisch möglichen ausnutzung des windes durch windmotoren. zeitschrift für das gesamte turbinenwesen*.
- BHATTACHARJEE, Y. (2021). La india apuesta por la energía solar, a pequeña y gran escala. *nationalgeographic*.
- Bibikow, W. (2025). *Traditional cretan windmills, ano kera, iraklio province, crete, greece*. Descargado de <https://www.imageprofessionals.com/en/images/70136725-Traditional-cretan-windmills-Ano-Kera-Iraklio-Province-Crete-Greece>
- Calvo Hernando, M. (1984). *Periodismo científico*. Comunicacion y Medios.
- Cambio climático y planeta. (2014). *Influencia del mar en el clima*. Descargado de <https://climaytemperatura.wordpress.com/2014/06/19/influencia-del-mar-en-el-clima/>
- Carbonell, M. (2024). *Celdas solares, la base del autoconsumo*. Descargado de <https://www.hogarsense.es/placas-solares/celdas-solares>
- CEPAL. (2024). *Acuerdo de escazú*. <https://www.cepal.org/es/temas/acuerdo-de-escazu>.
- Chamorro, M. V. (2017). Cálculo de las radiaciones total, directa y difusa a través de la transmisibilidad atmosférica en los departamentos del cesar, la guajira y magdalena (colombia). *Revista Espacios*.
- Científica, C. (2021). *Energía de enlace nuclear y estabilidad*. Descargado de <https://culturacientifica.com/2021/01/19/energia-de-enlace-nuclear-y-estabilidad/> (Recuperado el 1 de enero de 2025, de

- <https://culturacientifica.com/2021/01/19/energia-de-enlace-nuclear-y-estabilidad/>)
- Ciodaro Guerra, G. (2013). *Alternative sources of energy - nuclear fission and fusion*. Uniandes. Descargado de <http://hdl.handle.net/1992/19485> (Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/19485>)
- Clery, D. (2015). Twisted logic. *Science*, 350(6259), 369-371.
- Colombiano, S. G. (2022). *Informe de la visita técnica al proyecto hidroeléctrico ituango*. Descargado de <https://www2.sgc.gov.co/Noticias/Paginas/Informe-visita-tecnica-proyecto-hidroituango.aspx>
- ConsejodeSeguridadNuclear. (2024). Ciencia y tecnología a escala atómica. *Revista de seguridad nuclear y protección radiológica*.
- Corporation, C. T. G. (2023). *Three gorges dam - overview and impacts*. Descargado de <https://www.ctg.com.cn/en> (Información sobre la represa hidroeléctrica más grande del mundo, ubicada en China.)
- Cruz-Zabala, D., Podestà, M., Poli, F., Kaye, S., Garcia-Munoz, M., Viezzer, E., y Berkery, J. (2024). Performance prediction applying different reduced turbulence models to the smart tokamak. *Nuclear Fusion*, 64(12), 126071.
- de Ambiente y Desarrollo Sostenible, M. (2023). *Informe de seguimiento a políticas públicas ambientales 2023-ii*. Descargado de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/07/INFORME-DE-SEGUIMIENTO-A-POLITICAS-PUBLICAS-AMBIENTALES-2023-II-VF-REV.pdf>
- de Minas y Energía de Colombia, M. (1992). *Proyecto hidroeléctrico del guavio*. Descargado de <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/bitstream/handle/123456789/1946/1763.pdf>
- Dorantes C, J., y Francois L, J. (2011). Neutron analysis of a hybrid system fusion-fission. *universidad Autonoma de Mexico*.
- Eletronuclear. (s.f.). *Angra 2 alcança produção de 200 milhões de mwh*. <https://www.eletronuclear.gov>.
- Eletronuclear. (2023). *Central nuclear angra ii - informação geral*. Descargado de <https://www.eletronuclear.gov.br> (Detalles sobre la segunda unidad de la central nuclear de Angra dos Reis, Brasil)
- Enelgreenpower. (s.f.). *Parque solar la loma, colombia*. <https://www.enelgreenpower.com/es/proyectos/en-construccion/parque-solar-la-loma>.
- Enerdata. (s.f.). *Consumo nacional de electricidad*. <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>.
- Enula. (2024). *La central de kashiwazaki-kariwa prepara su reactivación*. Descargado de <https://enula.org/2024/05/la-central-de-kashiwazaki-kariwa-prepara-su-reactivacion/>
- Epdata.es. (s.f.). *Evolucion de las emisiones de co2 en el mundo*. <https://www.epdata.es/>.
- Espinosa, H. P. Q. (s.f.). *Agroclimatologia tropical*. editorial universidad estatal a distancia.

- EUROfusion Consortium. (2025). *DEMO: The European Demonstration Fusion Power Plant*. Descargado de <https://euro-fusion.org/programme/demo/>
- EVWind. (2019). *El noroeste de china recurre a más energía eólica*. Descargado de <https://www.evwind.com/2019/12/18/el-noroeste-de-china-recurre-a-mas-energia-eolica/>
- Expoenergia. (2017). Historia energia hidraulica. *blogexpoenergia*.
- Farrera, I. (2008). Conductores semiconductores y aislantes. *Universidad Autonoma. Mexico.*
- Fusion Nuclear Wiki. (2016). *Energía de enlace nuclear*. Descargado de https://fusion-nuclear.fandom.com/es/wiki/Energ%C3%ADa_de_enlace_nuclear
- Garcia Mauricio, E. J. (2003). *Introducción a la física moderna*. Universidad Nacional de Colombia.
- García Sánchez, J. L. (2018). Revisión sobre fusión nuclear y diseño del sistema de control de posición de fild mediante pid y gpc. *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla*.
- Gomes, M. M., Amorim, R. G., Santos, W. C., Rispoli, V. C., y Cardoso, L. X. (2024). Aplicação da equação de schrödinger ao modelo nuclear de camadas: obtenção dos números mágicos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 46, e20240147.
- González, V. (2009). *Energías renovables*. Revete.
- Granada, U. M. N. (2022). Impactos ambientales generados durante la construcción y puesta en marcha de la hidroeléctrica del guavio. *Repositorio Institucional*. Descargado de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/1645>
- Hahn, O., y Strassmann, F. (1939). Nachweis der entstehung von barium bei der bestrahlung des urans mit neutronen. *Die Naturwissenschaften*, 27, 11-15. (Descubrieron la fisión nuclear observando productos ligeros como el bario tras bombardear uranio con neutrones.)
- IAEA. (2023). *Red latinoamericana para la educación y la capacitación en tecnología nuclear (lanent)*. Comunicacion y Medios.
- IFMIF/EVEDA. (2025). *What is ifmif*. Descargado de <https://www.ifmif.org/what-is-ifmif/>
- Institute of Plasma Physics, C. A. o. S. (2025). *Experimental advanced superconducting tokamak (east)*. Descargado de <https://lssf.cas.cn/en/facilities-view.jsp?id=ff8080814ff56599014ff5a5768a0050>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Descargado de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Invest, B. (2018). *Proyecto hidroeléctrico ituango, colombia - informe del panel de expertos independiente*. Descargado de https://idbinvest.org/sites/default/files/2018-10/Ituango_Informe_Panel_Expertos.pdf
- Isagen. (2021). Guajira i. <https://www.isagen.com.co>.
- ITER Organization. (2023). *The iter project: Bringing the sun to earth*. Descargado de <https://www.iter.org>

- ITER Organization. (2024). *Iter components*. Descargado de <https://www.iter.org/components?id=0>
- Javier Bonilla. (2019). *Marina de brasil extiende la vida útil de las centrales nucleares en río de janeiro*. Descargado de <https://www.defensa.com/brasil/marina-brasil-extiende-vida-util-centrales-nucleares-rio-janeiro>
- Jenison, M. (1919). Two early electric plants in wisconsin. En (caps. vol. 2, núm. 4,págs. I-XXII). Revista de Historia de Wisconsin.
- Jofra, M. (2007). *Solar fotovoñtaica*. Energias Renovables.
- John W. Jewett, J. (2008). *Física para ciencias e ingeniería*. Cengage Learning.
- León, F. M. (2022). *Tomando el sol en el desierto de thar*. Descargado de <https://www.tiempo.com/ram/tomando-el-sol-en-el-desierto-de-thar.html>
- LibreTexts. (2021). *Estabilidad nuclear y desintegración radiactiva*. Descargado de <https://espanol.libretexts.org/> (Recuperado el 1 de enero de 2025, de <https://espanol.libretexts.org/>)
- Liceo AGB. (2021). *Título del artículo sobre química nuclear*. Descargado de <https://www.liceoagb.es/quimigen/nuc6.html>
- Mantovani, L. (2018). Neural network for fast calculation of the bootstrap current. *Master Thesis at Politecnico di Torino*. Descargado de <https://webthesis.biblio.polito.it/7854/1/Tesi.pdf>
- Marcial, A. (2019). *Energia solar fotovoltaica*. Elearning s.l.
- Meitner, L., y Frisch, O. R. (1939). Disintegration of uranium by neutrons: A new type of nuclear reaction. *Nature*, 143, 239-240. (Proporcionaron la explicación teórica del proceso de fisión nuclear y acuñaron el término.)
- MoraguesyRapallini. (2003). *Energia eolica*. instituto argentino de energia general mosconi.
- Museo Virtual del CSIC. (2025). *Generador piezoeléctrico pierre curie. patrimonio histórico del csic (4102h)*. Descargado de <https://museovirtual.csic.es/coleccion/mncn/instrumental/mncn22.html>
- Mírez, J. (2011, agosto). *Definición de radiación directa, difusa y reflejada sobre un colector*. Descargado de <https://jmirez.wordpress.com/2011/08/12/>
- OpenStax. (2021). *Química general (2da edición)*. /openstax.org. Descargado de <https://openstax.org/books/quC3ADmica-2ed/pages/21-1-estructura-y-estabilidad-nuclear> (Recuperado el 1 de enero de 2025, de)
- Operador Nuclear. (2018). *Texto o título del tweet*. Descargado de <https://x.com/OperadorNuclear/status/1038705620734697472?lang=bg>
- Optique Ingénieur. (2025). *Contenu du cours opi m05 c02*. Descargado de http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_05.html
- Oscar, P. (2013). *Energia solar fotovoltaica*. Creative Commons.
- Osorio, J. F. S. (2008). *Energía hidroeléctrica* (Vol. 139). Universidad de Zaragoza.
- País, E. (2025). El tokamak de fusión nuclear de la universidad de sevilla consigue generar plasma a millones de grados durante un tiempo récord. *El País*. Descargado de <https://elpais.com/tecnologia/2025-01-25/>

[el-tokamak-de-fusion-nuclear-de-la-universidad-de-sevilla-consigue-generar-plasma-a-millones-de-grados-durante-un-tiempo-record.html?utm_source=chatgpt.com](https://www.ingenieria.com/actualidad/el-tokamak-de-fusion-nuclear-de-la-universidad-de-sevilla-consigue-generar-plasma-a-millones-de-grados-durante-un-tiempo-record.html?utm_source=chatgpt.com)

- Peishen, F. (2021). Granja eólica de changma en yumen, gansu. *xingua*.
- Perpiñan, O. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Universidad Politécnica de Madrid.
- PNGWing. (2024). *Descripción o nombre de la imagen*. Descargado de <https://www.pngwing.com/es/free-png-vsotj>
- Post, H. (2025). España asombra al mundo al conseguir contener la energía nuclear en un 'donut'. *Huffington Post*. Descargado de https://www.huffingtonpost.es/sociedad/espana-asombra-mundo-conseguir-contener-energia-nuclear-donut.html?utm_source=chatgpt.com
- PUPR Plasma Laboratory. (2020). *Plasma laboratory research*. Descargado de <https://pupr.edu/research/plasma-laboratory/>
- Quaschnig, V. (2019). *Understanding renewable energy systems* (2.^a ed.). Routledge.
- Rincón Educativo. (2018). *¿cómo funciona un reactor nuclear bwr?* Descargado de <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/como-funciona-un-reactor-nuclear-bwr/>
- Robles. (2018). *Un panorama de las energías renovables en el mundo, latinoamérica y colombia*. Revistaespacios.
- Ron, J. M. S. (2011). Marie curie, la radiactividad y los premios nobel. *Real Sociedad Española de Química*.
- Smil, V. (2004). Historia mundial y energía. *Enciclopedia de la energía*.
- Soddy, F. (1913). The radioactive elements and the periodic law. *Chemical News*, 107, 97–99. (Introduction of the concept of isotopes)
- Soddy, F. (1922). *The origins of the conceptions of isotopes*. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/soddy-lecture.pdf>. (Conferencia Nobel de 1922 donde Soddy discute el descubrimiento de los isótopos y las transformaciones radiactivas.)
- Soddy, F., y Rutherford, E. (1902). The cause and nature of radioactivity. *Philosophical Magazine*, 4 (23), 370–396. doi: 10.1080/14786440209462843
- Sánchez, G. (2001). Uranio: mitos y realidades. *mundo científico*.
- Sánchez, K. S. (2016). El poder de eolo. *ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.*
- (TEPCO), T. E. P. C. (2023). *Kashiwazaki-kariwa nuclear power plant overview and history*. Descargado de <https://www.tepco.co.jp/en> (Información general sobre la planta nuclear más grande del mundo, ubicada en Japón.)
- u.s energy information administration. (2013). History of energy consumption in the unites states (1776-2012). *Administración de Información Energética de Estados Unidos, AER Energy Perspectives y MER*.
- Varón Echeverri, S. (2021). Reactores nucleares de generación iv. *Universidad de los Andes*.
- Vivos, M. R. (2018). *Informe técnico general sobre hidroituango*. Descargado de <https://riosvivoscolombia.org/wp-content/uploads/2018/10/Informe>

-Te%CC%81cnico-General.pdf

- Wesson, J. (2011). *Tokamaks* (4.^a ed.). Oxford University Press.
- Wikipedia contributors. (2024). *Bandas de energía en cristales*. Descargado de https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%ADsica_del_estado_s%C3%B3lido#/media/Archivo:Bandas_de_energ%C3%ADa_en_cristales.png
- Wikiwand. (2011). *Ciclo cno*. Descargado de https://www.wikiwand.com/es/articulos/Ciclo_CNO
- y Ana López, C. R. (2023). Implementación de energía solar fotovoltaica en instituciones educativas. *Revista de Ingeniería*, 28(52), 41-55. Descargado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v28n52/0121-1129-rfing-28-52-00027.pdf>
- y Andrés Rojas, S. M. (2023). La educación ambiental como alternativa para abordar el deterioro ambiental en instituciones educativas. *Revista Universidad Libertadores*, 10(1), 30-50. Descargado de <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/682b4104-676a-45d8-b106-a0b213a7da94/content>
- y Daniela Torres, J. R. (2022). Programa de sensibilización energética para el desarrollo sostenible en comunidades rurales. *Revista Universidad EAN*, 15(3), 60-78. Descargado de <https://repository.universidadean.edu.co/server/api/core/bitstreams/c9e1a660-ac54-4df3-aecc-a3b05de42604/content>
- y Laura Herrera, F. C. (2022). Educación en energías renovables desde el enfoque cts. *Pensamiento y Acción*, 14(2), 80-95. Descargado de https://revistas.uptc.edu.co/index.php/pensamiento_accion/article/view/11057/9467
- y María Gómez, J. P. (2023). Desafíos de la transición energética sostenible en América Latina. *Revista de Ingeniería*, 28(52), 27-40. Descargado de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfing/v28n52/0121-1129-rfing-28-52-00027.pdf>

Apéndice A

Anexo 1: Propuesta para la enseñanza de los principios físicos fundamentales de la fusión nuclear, y sus ventajas para cubrir las demandas energéticas

Contexto y Panorama de la Propuesta

El presente trabajo de grado se enmarca en una realidad energética global compleja, para quien en un futuro quiera llevar esto al aula debe tener contextualizada a la población objetivo de este trabajo (estudiante de últimos años de bachillerato o primeros semestres de carreras a fin).

La alta dependencia de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural y el carbón entablan el inicio de esa complejidad energética. Estas fuentes, que han sustentado el desarrollo industrial y económico de los últimos dos siglos, hoy representan uno de los mayores factores de deterioro ambiental, al ser responsables de emisiones masivas de gases de efecto invernadero, contaminación atmosférica y agotamiento de recursos naturales. A pesar del avance de tecnologías más limpias, la transición energética global sigue enfrentando importantes barreras tecnológicas, económicas y políticas.

En este escenario, las energías renovables tradicionales como la solar, eólica e hidroeléctrica si bien han adquirido un papel relevante, también presentan limitaciones considerables. Problemas como la intermitencia de la generación, la dependencia de condiciones climáticas, el uso intensivo del suelo o incluso ciertos impactos ambientales asociados a su instalación, han puesto en discusión su capacidad de convertirse por sí solas en una solución energética definitiva. Estos aspectos han abierto el debate sobre la necesidad de investigar y promover otras alternativas tecnológicas, entre ellas la fusión nuclear.

Este contexto energético y ambiental evidencia la urgencia de repensar los modelos de producción y consumo de energía desde una mirada integral, que considere tanto la eficiencia tecnológica como el impacto ambiental y la justicia intergeneracional. En esa línea, la fusión nuclear se proyecta como una opción de gran valor estratégico, al ofrecer un modelo de producción energética limpio, seguro y sustentable, sin los riesgos inherentes a la fisión nuclear ni los efectos colaterales de las fuentes fósiles.

Desde el ámbito educativo, esta problemática adquiere una dimensión aún más significativa. Las instituciones escolares y universitarias tienen el reto de formar ciudadanos capaces de comprender los fundamentos científicos de estas alternativas, y de participar activamente en los debates sociales y éticos que conlleva la transición energética. Sin embargo, el análisis realizado en el capítulo uno muestra que persisten grandes vacíos en la inclusión de temas energéticos actuales en los planes de estudio, especialmente aquellos relacionados con tecnologías emergentes como la fusión nuclear.

En este marco, surge la necesidad de propuestas pedagógicas que articulen el conocimiento científico riguroso con la conciencia ambiental, permitiendo a los estudiantes construir una comprensión crítica y propositiva de los desafíos energéticos del siglo XXI. El panorama descrito en el primer capítulo justifica ampliamente la pertinencia de diseñar estrategias de enseñanza orientadas a la divulgación de temas complejos como la fusión nuclear, entendiendo que el cambio hacia un modelo energético sostenible no puede lograrse sin una base sólida de educación científica accesible, actualizada y contextualizada.

Anexo 1

Brayan Alexander Castro
Universidad Pedagógica Nacional

Propuesta para la enseñanza de los principios físicos fundamentales
de la fusión nuclear, y sus ventajas para cubrir las demandas energéticas

Enero 2025

Objetivos

1. Comprender el proceso de la fusión nuclear .
2. Calcular la energía liberada en procesos de fusión .
3. Comparar la energía de fusión vs las energías renovables mas utilizadas

1. Introducción

La fusión nuclear es el proceso mediante el cual dos núcleos atómicos ligeros se combinan para formar un núcleo más pesado, liberando una enorme cantidad de energía en el proceso. Este fenómeno es la fuente de energía de las estrellas, incluyendo el Sol, donde la fusión de átomos de hidrógeno en helio genera luz y calor. La fusión nuclear se considera una alternativa prometedora a la fisión nuclear y a los combustibles fósiles debido a su alta eficiencia energética y la ausencia de residuos radiactivos de larga vida.

2. Variables Físicas Clave

Para lograr la fusión nuclear en la Tierra, es necesario recrear las condiciones extremas que permiten que este proceso ocurra de ma-

nera sostenida. Algunas de las variables físicas clave que se deben considerar incluyen:

2.1. Energía de Enlace Nuclear

La energía de enlace es la cantidad de energía necesaria para mantener unidos los protones y neutrones dentro del núcleo. En la fusión nuclear, la diferencia en la energía de enlace entre los reactivos (núcleos ligeros) y los productos (núcleos más pesados) es la fuente de la energía liberada. Cuanto mayor sea la diferencia de energía de enlace por nucleón entre los productos y los reactivos, mayor será la energía generada en la reacción.

2.2. Temperatura

Para superar la repulsión electrostática entre los núcleos cargados positivamente, se requiere una temperatura extremadamente alta, del orden de millones de grados Celsius. Estas temperaturas permiten que los núcleos alcancen velocidades suficientes para colisionar y fusionarse.

2.3. Presión

En el interior de las estrellas, la alta presión contribuye a mantener los núcleos en proximidad, aumentando la probabilidad de fusión. En los reactores de fusión en la Tie-

ra, se utilizan confinamientos magnéticos o inerciales para lograr un entorno similar.

2.4. Tiempo de Confinamiento

Para que la fusión sea eficiente, los reactivos deben permanecer el tiempo suficiente en condiciones extremas de temperatura y presión. Esto se conoce como tiempo de confinamiento y es un parámetro clave en la ecuación de Lawson, que establece los requisitos para alcanzar la ignición en la fusión nuclear.

2.5. Sección Eficaz de Reacción

La probabilidad de que ocurra una reacción de fusión depende de la sección eficaz de reacción, que varía según la temperatura y la composición de los núcleos en interacción. La reacción más eficiente para la fusión en la Tierra es la del deuterio-tritio, ya que tiene una alta sección eficaz a temperaturas relativamente accesibles.

2.6. Confinamiento del Plasma

Debido a las altas temperaturas requeridas, la materia se encuentra en estado de plasma, una mezcla de iones y electrones libres. Para evitar que el plasma se enfríe rápidamente y pierda energía, se utilizan métodos de confinamiento como el confinamiento magnético (Tokamak, Stellarator) y el confinamiento inercial (láseres de alta potencia).

¹se retroalimentara con la información mas concreta:el átomo se describe como un sistema cuántico donde los electrones no orbitan en trayectorias definidas, sino que existen en "orbitales" regiones de probabilidad alrededor del núcleo, gobernados por los principios de la mecánica cuántica. Además, el núcleo está formado por protones y neutrones, que a su vez están compuestos por quarks, partículas fundamentales en el modelo estándar de la física de partículas.

²se retroalimentara con la información mas concreta:Un isótopo es una variante de un elemento químico que tiene el mismo número de protones en el núcleo (lo que determina el elemento), pero un número diferente de neutrones, lo que resulta en una masa atómica diferente. Los isótopos de un mismo elemento tienen propiedades químicas similares, pero pueden tener diferentes propiedades físicas debido a las diferencias en su masa.

³El átomo se mantiene unido principalmente por dos fuerzas fundamentales: la fuerza nuclear fuerte, que actúa en el núcleo y mantiene unidos a protones y neutrones, superando la repulsión electromagnética entre los protones; y la fuerza electromagnética, que atrae a los electrones (negativos) hacia el núcleo (positivo), formando la estructura del átomo. Estas fuerzas, junto con la fuerza nuclear débil y la gravedad (aunque esta última es insignificante a escala atómica), garantizan la estabilidad y cohesión del átomo.

3. Descripción

Para entender un poco más sobre la fusión se deben tener conceptos claves que se detallaran con el siguiente apartado :

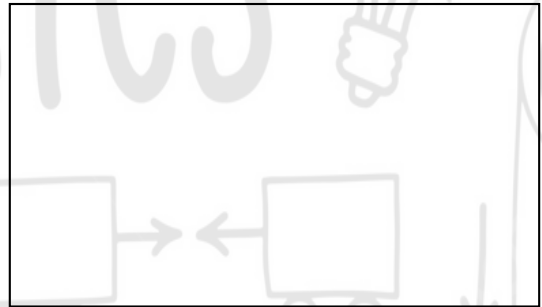
Preguntas de predicción

Puedes dar tu respuesta con texto o realizando algún dibujo (Recuerda que en esta sección no existen preguntas erróneas)

1. ¿Que crees que un átomo y de que esta compuesto ? ¹



2. ¿sabes que es un isótopo ? ²



3. ¿crees que existen algo que mantenga unido los componentes del átomo ? ³



4. ¿Sabes porque se diferencian unos elementos de otros ? ⁴



5. ¿Sabes que pasaría con dos átomos que se fusionan ?¿Que pasaría con su masa?



Expoliación: ya que al momento de fusionar dos átomos ligeros este se convierte en el siguiente elemento de la tabla periódica pero este elemento no posee la suma de las dos masa anteriores, lo que nos deja como resultado una masa faltante esta se convierte en energía la cual podríamos calcular con la ecuación de Einstein para verificar

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

Una forma practica de enter que sucede con la masa es la siguiente: por favor genera la operacion que creas que se debe hacer para fusionar dos atomos de hidrogeno y demostrar la masa reusltante.

En el siguiente recuadro realiza la operación con la ecuación anterior para obtener cuanta energía se obtuvo en el proceso.

⁴La diferencia entre un elemento y otro radica en el número de protones en su núcleo, lo que se conoce como el número atómico (Z). Cada elemento tiene un número atómico único que lo distingue de los demás, lo que define su identidad es siempre el número de protones.



4. Ecuaciones de algunas variables de la fusión

ya se en algunos casos como demostrar la temperatura, presión, sección eficaz a los cuales puede suceder un proceso de fusión es algo complejo podemos demostrar algunos calculo como la energía de enlace

la energía de enlace nuclear se define como la diferencia entre la energía del elemento y la energía de la misma cantidad de protones y neutrones considerados por separado. Esta energía es resultado de la interacción nuclear fuerte y puede ser cuantificada por la cantidad de energía necesaria para descomponer el núcleo en sus protones y neutrones individuales. La masa de un cuerpo puede ser categorizada como un tipo de energía; por lo tanto, al liberarse la energía de enlace nuclear entre dos partículas, estas pierden una porción de su masa, aunque la cantidad de masa perdida es mínima. En otras palabras, la masa conjunta de dos partículas en estado ligado es inferior respecto a la masa de dichas partículas evaluadas de manera individual.

Para efectos prácticos vamos a ver con un ejemplo el calculo simple que se debe hacer para obtener la energía de enlace: el defecto de masa para un núcleo de ${}^4_2\text{He}$

es de 0,0305 u, se determine la energía de enlace de un núcleo de ${}^4_2\text{He}$ mediante la ecuación de equivalencia masa-energía 1. Primero, exprese el defecto de masa en g/mol. Esto es fácil de hacer, si se considera la equivalencia numérica de la masa atómica (u) y la masa molar (g/mol) que resulta de las definiciones de las unidades u y mol, Por consiguiente, el defecto de masa es de 0.0305 g/mol. Para ajustar las unidades de los otros términos de la ecuación masa-energía, la masa deberá expresarse en kg, ya que $1\text{J} = 1\text{kgm}^2/\text{s}^2$. Al convertir los gramos en kilogramos se obtiene un defecto de masa de $3,05 \times 10^{-26}\text{kg/mol}$. se obtiene:

$$E = mc^2$$

$$\begin{aligned} &= 3,05 \times 10^{-26} \frac{\text{kg}}{\text{mol}} \times (2,998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 \\ &= 2,74 \times 10^{12} \frac{\text{J}}{\text{mol}} = 2,74 \text{ TJ/mol} \end{aligned}$$

Observe que esta enorme cantidad de energía se asocia a la conversión de una cantidad muy pequeña de materia (unos 30 mg, aproximadamente la masa de la típica gota de agua).

La energía de enlace para un solo núcleo se calcula a partir de la energía de enlace molar con el número de Avogadro:

$$\begin{aligned} E &= 2,74 \times 10^{12} \frac{\text{J}}{\text{mol}} \times \frac{1\text{mol}}{6,022 \times 10^{23}\text{nucleos}} \\ &= 4,55 \times 10^{-12} \text{J} = 4,55\text{pJ} \end{aligned}$$

Recordemos que $1eV = 1,602 \times 10^{-19} J$.
Utilizando la energía de enlace:

$$E = 4,55 \times 10^{-12} J \times \frac{1eV}{1,602 \times 10^{-19} J}$$

$$= 2,84 \times 10^7 eV = 28,4 MeV$$

En la siguiente imagen podemos observar como son los niveles de energía de enlace según los diferentes elementos

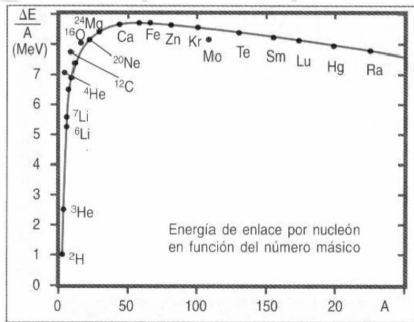
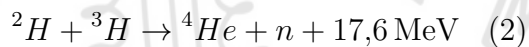


Figura 1: Energía de enlace por nucleón en función del número másico

La fusión es un proceso en el cual se forma elementos un poco más pesados que los iniciales siendo estos componentes muy ligeros la mayoría de ellos por debajo del hierro donde la energía de enlace alcanza un máximo, recordemos que esta reacción está determinada por la probabilidad de ocurrencia de la sección eficaz y la energía de enlace vistas en el capítulo anterior.

5. Energías en el Proceso de la Fusión

una de las reacciones que más se han estudiado en el mundo es la fusión deuterio (2H) y tritio (3H) está dada por:



Cada reacción libera una energía de 17,6 MeV, lo que equivale a:

$$1 MeV = 1,602 \times 10^{-13} J,$$

$$E_{\text{reacción}} = 17,6 \times 1,602 \times 10^{-13} = 2,82 \times 10^{-12} J.$$

Dado que la reacción consume un núcleo de deuterio y uno de tritio, analizamos las masas involucradas:

- Masa molar del deuterio: 2 g/mol.
- Masa molar del tritio: 3 g/mol.

En una mezcla equilibrada (1:1 en núcleos), cada mol de reacción requiere:

$$\text{Masa por mol de reacción} = 2 + 3 = 5 \text{ g/mol.}$$

Por lo tanto, en 1 kg (1000 g) de mezcla hay:

$$\text{Número de moles} = \frac{1000 \text{ g}}{5 \text{ g/mol}} = 200 \text{ mol.}$$

Usando el número de Avogadro ($N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), el número total de reacciones es:

Número de reacciones

$$= 200 \times 6,022 \times 10^{23} = 1,204 \times 10^{26} \text{ reacciones.}$$

La energía total generada es:

$$E_{\text{total}} = \text{Número de reacciones} \times E_{\text{reacción}},$$

$$E_{\text{total}} = (1,204 \times 10^{26}) \times (2,82 \times 10^{-12})$$

$$= 3,39 \times 10^{14} J.$$

ahora realizamos conversión a kilovatios-hora (MWh), Sabemos que:

$$1 MWh = 3,6 \times 10^9 J$$

Por lo tanto:

$$E_{\text{total}} = \frac{3,39 \times 10^{14}}{3,6 \times 10^9} \approx 94,2 \times 10^3 \text{ MWh.}$$

Un kilogramo de una mezcla de deuterio y tritio puede producir aproximadamente:

94000 MWh,

lo que equivale a la energía consumida por miles de hogares durante un año.

Ya viste como calculamos cuanta energía se puede producir a partir de un kilogramo en una relación 1:1 de deuterio y tritio ahora por favor realizarlo para la siguiente reacción:



6. Reactor nuclear ITER

⁵ En Francia, en el departamento de Bocas del Ródano, un consorcio de 33 países está trabajando en la creación del tokamak más grande jamás diseñado. Este proyecto tiene como objetivo demostrar que la fusión nuclear, el proceso que alimenta al Sol y las estrellas, puede convertirse en una fuente de energía escalable y libre de emisiones de CO₂ para la generación de electricidad.

Los resultados del programa científico ITER serán fundamentales para abrir el

⁵Se pueden utilizar medios audiovisuales para mostrar la página oficial del ITER donde se destaca sus excelentes imágenes de modelados 3D

camino hacia futuras plantas de energía basadas en la fusión nuclear. uno de sus objetivos principales es incrementar el factor de amplitud a 10, lo que significa incrementar su energía de salida 10 veces más de la que se consume en el proceso, generando así 500 MW de potencia de fusión con una entrada de 50 MW. Aunque ITER no convertirá esta energía en electricidad debido a su naturaleza experimental, establecer las bases para futuras plantas industriales.

El ITER está diseñado para generar 500 MW de potencia de fusión. Para calcular la energía teórica que produciría al año, partiendo del supuesto que toda la energía de salida pueda ser convertida en energía aprovechable como energía eléctrica, utilizamos la siguiente fórmula:

$$E_{\text{anual}} = P_{\text{salida}} \times \text{horas por año}$$

Donde:

$$P_{\text{salida}} = 500 \times 10^6 \text{ W}$$

y el número de horas por año es:

$$\text{horas por año} = 8760 \text{ h/año}$$

Por lo tanto, la energía anual producida por ITER es:

$$E_{\text{anual}} = 500 \times 10^6 \text{ W} \times 8760 \text{ h/año}$$

$$E_{\text{anual}} = 4,38 \times 10^{12} \text{ Wh/año}$$

$$= 4,38 \times 10^9 \text{ MWh/año}$$

Esto significa que ITER produciría aproximadamente $4,38 \times 10^9$ MWh al año. o en otras palabras es decir, la energía anual producida por ITER sería de 43'800,000. 380000 MWh sin necesidad de utilizar potencias de diez.

Para realizar un análisis de la dimensionalidad de esta cantidad de energía por favor consulte y llene la siguiente tabla:

	potencia instalada	área construida	energía al año
Parque eólico más grande del mundo			
Parque solar más grande del mundo			
Represa hidroeléctrica más grande del mundo			
Parque eólico más grande de Colombia			
Parque solar más grande de Colombia			
Represa hidroeléctrica más grande de Colombia			
Proyecto ITER	500 MW	180 hectáreas	43'800,000. MWh

Conclusiones

A modo de conclusión genere alguna construcción escrita puede utilizar ecuaciones, gráficas, dibujos, etc. Se deben tener en cuenta los aspectos vistos en esta propuesta de enseñanza donde genere comparaciones y se observe las proporcionalidad entre las cantidades de energía y demás. Resalte puntos claves que demuestre el entendimiento del proceso de fusión.

