



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTUDIO DE LA SUSTENTABILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS DE
FISIÓN Y FUSIÓN NUCLEAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTA

ÁNGEL VELÁZQUEZ GÁLVEZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. CECILIA MARTÍN DEL CAMPO MÁRQUEZ

CIUDAD UNIVERSITARIA MÉXICO, D. F. 2009



Agradecimientos

Uno de los mejores momentos de escribir esta tesis fue el de los agradecimientos; sin embargo, también de los más difíciles, pues hubo gente que me ayudó a conseguir este objetivo y que ya no está en mi vida, y porque no he podido en estas páginas mencionar a todas las personas a quienes les agradezco, sin que ello quiera decir que no los considere.

A lo largo de mi carrera en la Universidad he tenido la fortuna de encontrar excelentes profesores, que me han marcado y me han formado como persona y como profesionista. El profesor Francisco Ramírez Estrada a quien conocí en el Colegio de Ciencias y Humanidades es el mejor ejemplo de lo anterior. A él debo gran parte de mi formación social y de mi ideología, sin sus clases yo sería otra persona.

Recuerdo bien que mi primera clase en la Universidad fue con uno de los profesores a quien más admiro y a quien agradezco por su apoyo incondicional incluso en la revisión de este trabajo, me refiero al Ingeniero Gabriel Alejandro Jaramillo Morales; gracias por la pasión que pone en cada una de sus clases.

Otro de los profesores al que no puedo dejar de agradecer porque le debo gran parte de mi formación como ingeniero, es al Ingeniero David Vázquez a quien considero como una de las personas más preparadas que he conocido, me siento muy afortunado de haber podido ser su alumno.

Le agradezco a la Doctora Cecilia Martín del Campo por asesorarme a lo largo de la tesis y acompañarme en este camino que está a punto de culminar, por compartir su conocimiento conmigo e inspirar en mí una gran admiración.

A mis sinodales Doctores Reinking y Chávez por sus aportaciones a este trabajo pero muy en especial al Doctor François de quien también tuve la fortuna de ser alumno y de quien recibí un gran apoyo para la elaboración de esta tesis.

Otro agradecimiento especial debo hacérselo al Doctor Julio Herrera Velázquez del Instituto de Ciencias Nucleares, por su ayuda desinteresada y sus innumerables contribuciones al presente trabajo.

En la Universidad también conocí a algunos de mis mejores amigos. Gracias Arlem, Brenda, Oscar, Rosa, entre otros muchos, por haber hecho de la Facultad de Ingeniería una de las mejores etapas de mi vida.

A Paty Hong, por su amistad apoyo y consejos.

A mi Alma Máter, la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser mi segundo hogar, a ella debo valores y conocimientos que ahora forman parte de mí.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la DGAPA, por el apoyo brindado.

Agradezco profundamente Miriam porque estuvo siempre a mi lado, en las buenas y en las malas, por aguantarme, por su compañía y por su amor. Sin ella el camino hubiera sido muy difícil.

Gracias a mi primo José Luis por estar siempre ahí, por ser mi incondicional, mi consejero, por ser mi hermano en quien siempre encontré apoyo, tú sabes que siempre has tenido toda mi admiración y cariño.

Pero la más grande razón por la que yo he alcanzado este objetivo es mi familia. Muchas gracias Lupita, porque en esto siempre estuviste conmigo, por ser mi amiga, mi consejera, mi apoyo, mi hermana. Yo sé que siempre podré contar contigo.

Y finalmente lo más importante; quiero dar el agradecimiento más grande a Ofelia y Antonio, mis padres, es por ustedes que estoy aquí, a ustedes debo lo que soy, gracias por creer en mí, por su inmenso apoyo, por su amor y comprensión, por su paciencia; esta tesis es de ustedes y dedicada a ustedes. Gracias mamá y gracias papá porque ustedes son todas mis razones... los quiero.

“Que el futuro demuestre la verdad y evalúe a cada uno de nosotros según sus trabajos y sus logros. El presente es de ellos, pero el futuro – por el que he estado trabajando – es mío”

Nikola Tesla

Índice de Contenido

Índice de Contenido.....	v
Índice de Figuras.....	viii
Índice de Tablas	xi
Resumen	xiii
Acrónimos.....	xv
1 Introducción a la Energía Nuclear	3
1.1 Historia	3
1.1.1 Comprendiendo la estructura atómica	3
1.1.2 Desarrollo de la energía nuclear de fisión.....	6
1.1.3 La fisión y la generación de energía eléctrica	7
1.1.4 El caso de México	10
1.2 Aplicaciones de la energía nuclear	13
1.2.1 Aplicaciones no energéticas	13
1.2.1.1 En medicina.....	13
1.2.1.2 En la industria:.....	15
1.2.1.3 Agricultura y alimentación:.....	15
1.2.1.4 Otras aplicaciones:.....	16
1.2.2 Aplicaciones energéticas	16
1.3 El aspecto social.....	23
2 Introducción a la Física Nuclear	29
2.1 Conceptos básicos.....	29
2.1.1 Electrón.....	29
2.1.2 Protón	29
2.1.3 Neutrón	29
2.1.4 Fotón.....	29
2.1.5 Neutrino	30
2.1.6 Masa atómica	30
2.1.7 Número de Avogadro y masa molar de un elemento.....	30
2.1.8 Masa molecular	32
2.1.9 Energías química y nuclear	32
2.2 Modelo atómico y nuclear.....	34
2.3 Conceptos básicos de física nuclear	35
2.3.1 Relación entre la masa y la energía.....	35
2.3.2 Energía de enlace	36
2.3.3 La tabla de nucleidos	37
2.3.4 Nomenclatura de las reacciones nucleares	38
2.4 Radiactividad.....	39
2.4.1 La rapidez del decaimiento radiactivo	43
2.4.2 Radiactividad natural y artificial	45
2.4.3 Efectos biológicos de la radiación	46
2.4.4 Fundamentos de la protección radiológica	47

3	Fisión Nuclear	53
3.1	Introducción.....	53
3.2	Materiales fisionables, materiales fisiles y materiales fértiles.	54
3.3	La física de la fisión	55
3.4	Reacción en cadena	56
3.4.1	Masa crítica	58
3.4.2	Moderador	61
3.5	El reactor de fisión nuclear.....	62
3.5.1	Elementos de un reactor nuclear.....	63
3.5.2	Evolución de los reactores nucleares.....	66
3.5.2.1	Reactores térmicos	66
3.5.2.2	Reactores de uranio enriquecido	66
3.5.2.3	Reactores de uranio natural	66
3.5.2.4	Reactores de combustible mixto de uranio-plutonio (MOx)	66
3.5.2.5	Reactores rápidos.....	67
3.5.2.6	Reactores convertidores y de cría.....	67
3.6	Evolución de la energía nuclear comercial.....	67
3.6.1	Descripción del reactor PWR.....	69
3.6.2	Descripción del reactor BWR.....	70
3.6.3	Descripción del reactor CANDU	71
3.6.4	Reactores de tercera generación	72
3.6.4.1	Reactor ABWR	73
3.6.4.2	Reactor ESBWR.....	74
3.6.4.3	Reactor EPR.....	74
3.6.4.4	Reactor AP1000.....	75
3.6.4.5	Reactor PBMR.....	76
3.6.5	Reactores de cuarta generación	77
3.6.5.1	Reactor rápido enfriado por gas (GFR).....	77
3.6.5.2	Reactor rápido enfriado por Plomo (LFR).....	78
3.6.5.3	Reactor de sal fundida (MSR)	79
3.6.5.4	Reactor rápido enfriado por sodio (SFR)	80
3.6.5.5	Reactor supercrítico enfriado por agua (SCWR).....	81
3.6.5.6	Reactor de gas a muy alta temperatura (VHTR)	82
3.7	Recursos energéticos.....	83
3.8	Ciclo de combustible nuclear e impactos ambientales.....	87
3.8.1	Etapas del ciclo de combustible nuclear incluyendo todas las actividades:	88
3.8.1.1	Exploración.....	88
3.8.1.2	Minería	89
3.8.1.3	Beneficio y purificación	90
3.8.1.4	Conversión del uranio	90
3.8.1.5	Enriquecimiento.....	91
3.8.1.6	Fabricación	93
3.8.1.7	Irradiación.....	94
3.8.1.8	Almacenamiento provisional.....	95
3.8.1.9	Reprocesamiento	95
3.8.1.10	Transporte de materiales radiactivos	96
3.8.1.11	Disposición de los residuos	97

4	Fusión Nuclear	101
4.1	Introducción.....	101
4.2	La fusión caliente y fría.....	104
4.2.1	La fusión caliente	104
4.2.2	La fusión fría	105
4.3	La física de la fusión	109
4.4	Combustible para la fusión.....	112
4.5	Plasma para la fusión	112
4.6	El reactor de fusión nuclear.....	115
4.6.1	El criterio de Lawson.....	115
4.6.2	Confinamiento inercial y magnético	118
4.6.3	Funcionamiento.....	119
4.6.4	Operación del reactor Tokamak	120
4.6.5	Tecnología para la fusión nuclear	123
4.7	Proyecto ITER.....	126
4.7.1	El reto de la ingeniería y de los materiales	128
4.8	Los reactores híbridos Fusión- Fisión.....	133
4.9	Recursos energéticos.....	134
4.9.1	Deuterio	134
4.9.2	Tritio	134
4.9.3	Litio.....	134
4.10	Impactos ambientales.....	135
5	Análisis de la Sustentabilidad de la Fisión y la Fusión para la Generación Eléctrica	139
5.1	Introducción.....	139
5.2	Desarrollo sustentable.....	139
5.2.1	Definiciones de desarrollo sustentable	140
5.3	Metodología	141
5.3.1	Descripción.....	141
5.3.2	Selección de criterios e indicadores.....	142
5.3.3	Matriz de indicadores.....	143
5.3.3.1	Dimensión Económica	143
5.3.3.2	Dimensión Ambiental	149
5.3.3.3	Dimensión Social.....	152
5.3.4	Método de análisis de decisión	157
5.3.5	Fundamentos de Lógica Difusa	158
5.3.5.1	Variables y etiquetas lingüísticas	159
5.3.5.2	Conjuntos difusos.....	160
5.3.5.3	Operadores Básicos de Lógica Difusa.....	162
5.3.5.4	Sistema de Control Difuso	164
5.3.6	Matlab 6.5.....	168
5.4	Aplicación de la metodología	168
5.4.1	Escenario a 30 años	178
5.4.1.1	Resultados de la dimensión Económica.....	179
5.4.1.2	Resultados de la dimensión Ambiental.....	179
5.4.1.3	Resultados de la dimensión Social	179
5.4.1.4	Resultados de las dimensiones Económica y Ambiental.....	179

5.4.1.5	Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social	180
5.4.1.6	Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social con pesos ponderados.....	180
5.4.2	Escenario a 60 años	180
5.4.2.1	Resultados de la dimensión Económica.....	180
5.4.2.2	Resultados de la dimensión Ambiental.....	181
5.4.2.3	Resultados de la dimensión Social.....	181
5.4.2.4	Resultados de las dimensiones Económica y Ambiental.....	181
5.4.2.5	Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social	181
5.4.2.6	Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social con pesos ponderados.....	182
6	Conclusiones.....	185
	Bibliografía:	197

Índice de Figuras

Figura 1.1	Representación esquemática del modelo atómico de Thomson.....	3
Figura 1.2	Esquema de la estructura del átomo de Rutherford.....	4
Figura 1.3	Diagrama del modelo atómico de Bohr.....	4
Figura 1.4	Representación del modelo atómico actual.....	5
Figura 1.5	Fotografía de la explosión de la bomba atómica en Hiroshima.....	6
Figura 1.6	Fotografía de una central nuclear con torres de enfriamiento y una línea de transmisión...	7
Figura 1.7	Fotografía del reactor 4 de Chernobil después de la explosión	8
Figura 1.8	Porcentaje de generación de energía eléctrica por energía nuclear en cada país	9
Figura 1.9	Primera máquina de rayos X utilizada en México	10
Figura 1.10	Protesta de grupos ambientalistas en la Central Nuclear Laguna Verde	11
Figura 1.11	Imagen obtenida mediante tomografía axial computarizada	14
Figura 1.12	Tratamiento de artritis reumatoide con Samario ¹⁵³ Sm.....	14
Figura 1.13	Esquema que muestra la detección de fugas en un ducto.....	15
Figura 1.14	Esqueleto de Tiranosaurio Rex, 70 millones de años de antigüedad	16
Figura 1.15	Planta de enriquecimiento de uranio mediante centrifugación gaseosa.....	17
Figura 1.16	Pastillas de combustible, barras de combustible y elementos combustibles.....	18
Figura 1.17	Esquema de una central nucleoelectrónica con un reactor de agua presurizada.....	19
Figura 1.18	Esquema de una central nucleoelectrónica con torre de enfriamiento y reactor de agua presurizada.....	20
Figura 1.19	Esquema de contención y reactor nuclear.....	21
Figura 1.20	Ciclo de generación eléctrica por medio de energía nuclear de fisión.....	22
Figura 2.1	Representación microscópica de las reacciones química y nuclear	33
Figura 2.2	La energía de enlace promedio por nucleón en función del número de masa	37
Figura 2.3	Muestra de la tabla de los nucleidos.....	38
Figura 2.4	Vida media de los isótopos radiactivos conocidos	40
Figura 2.5	Espectro electromagnético	41
Figura 2.6	Penetración de las partículas α , β , y γ	42
Figura 2.7	Unidades de medida de la actividad	44

Figura 2.8 Función de decaimiento radiactivo.....	44
Figura 2.9 Isótopos uranio 238 y 239 obtenidos de la tabla de nucleidos	45
Figura 2.10 Radiación natural y artificial recibida por el ser humano.....	46
Figura 2.11 Clasificación de tasas de dosis utilizada en una central nucleoelectrica	48
Figura 3.1 Reacciones de conversión del ^{232}Th y ^{238}U	55
Figura 3.2 Representación esquemática de la reacción de fisión nuclear.....	56
Figura 3.3 Reacción de fisión en cadena	57
Figura 3.4 Esquema de una reacción en cadena de fisión.....	57
Figura 3.5 Geometría esférica del material fisible.....	60
Figura 3.6 Reactor nuclear de agua hirviente	63
Figura 3.7 Barreras de contención de un reactor BWR.....	65
Figura 3.8 Evolución de los reactores nucleares	68
Figura 3.9 Reactor PWR.....	69
Figura 3.10 Reactor BWR	70
Figura 3.11 Esquema de un reactor CANDU	72
Figura 3.12 Reactor rápido enfriado con gas	78
Figura 3.13 Reactor rápido enfriado con plomo	79
Figura 3.14 Reactor de sales fundidas	80
Figura 3.15 Reactor rápido enfriado con sodio	81
Figura 3.16 Reactor supercrítico enfriado con agua	82
Figura 3.17 Reactor de gas a muy alta temperatura.....	83
Figura 3.18 Principales yacimientos de minerales radiactivos en México	86
Figura 3.19 Ciclo de combustible nuclear.....	88
Figura 3.20 Mineral de uranio – la materia prima principal del combustible nuclear.....	89
Figura 3.21 Yellowcake (Torta amarilla) – la forma en la que el uranio es vendido como U_3O_8	90
Figura 3.22 UF_6 – Forma en que el uranio es convertido para el enriquecimiento	90
Figura 3.23 Funcionamiento de una etapa en el proceso de difusión gaseosa	91
Figura 3.24 Diagrama de funcionamiento de una centrífuga.....	92
Figura 3.25 Planta de centrifugación gaseosa	93
Figura 3.26 Barra de combustible compuesta por pastillas.....	93
Figura 3.27 Ensamble de combustible (Caso del BWR).....	94
Figura 3.28 Arreglo de ensamblajes combustibles en el núcleo del reactor	95
Figura 3.29 Barco para transporte de combustible gastado.....	96
Figura 3.30 Contenedor para almacenamiento de combustible gastado de reactores PWR	97
Figura 3.31 Almacenamiento Geológico Profundo.....	98
Figura 4.1 El reactor Tokamak (de las palabras rusas toroid = toroide, kamera = cámara, magnit = imán y katushka = bobina) para controlar la fusión caliente.....	105
Figura 4.2 Representación de la energía liberada en la reacción nuclear de fusión.....	109
Figura 4.3 Esquema de las diferentes reacciones de fusión	110
Figura 4.4 El deuterio y el tritio se fusionan y se forma helio, se libera un neutrón y energía.....	111
Figura 4.5 Imagen de un material en forma de plasma	113
Figura 4.6 Distribución de las velocidades para un gas en equilibrio térmico	114
Figura 4.7 Sección eficaz de las diferentes reacciones en función de la energía cinética de los iones antes de la reacción.....	114
Figura 4.8 Probabilidad de reacción por unidad de tiempo de las diferentes reacciones en función de la temperatura de los iones	115
Figura 4.9 Criterio de Lawson y estado de ignición del plasma	116

Figura 4.10 El camino a la ignición de los diferentes proyectos de reactores nucleares.....	117
Figura 4.11 Ejemplo de fusión por confinamiento inercial, empleando láser.....	118
Figura 4.12 Esquema de un confinamiento magnético toroidal	119
Figura 4.13 Esquema simplificado de un reactor de fusión.....	119
Figura 4.14 Bobinas de campo y transformador en el Tokamak.....	121
Figura 4.15 Bobinas de campo toroidal y poloidal en el Stellarator	122
Figura 4.16 Para obtener una corriente continua en el plasma, es necesario inyectar un haz de ondas de radiofrecuencia	122
Figura 4.17 Diagrama simplificado del JET.....	124
Figura 4.18 Los tamaños a escala del proyecto ITER a la izquierda y el JET a la derecha.....	125
Figura 4.19 Mapa de Cadarache, Francia, lugar escogido como sede de ITER.....	127
Figura 4.20 Países que participan en el proyecto ITER	127
Figura 4.21 Esquema del ITER	128
Figura 4.22 Interior de un reactor Tokamak	130
Figura 5.1 Dimensiones del desarrollo sustentable	141
Figura 5.2 Representación de conjuntos difusos de entrada	160
Figura 5.3 Partes que conforman un sistema difuso.....	161
Figura 5.4 Comportamiento de los operadores sobre valores crisp y valores difusos.....	163
Figura 5.5 Método de Implicación de Mamdani.....	165
Figura 5.6 Método de Implicación de Larsen	165
Figura 5.7 Método del centroide.....	167
Figura 5.8 Máquina de Inferencia Difusa.....	167
Figura 5.9 Variables de entrada (indicadores) y de salida.....	169
Figura 5.10 Métodos del sistema de control difuso.....	170
Figura 5.11 Características del indicador Extensión de tierra perdida.....	171
Figura 5.12 Características del indicador Niveles de radiación en la región vecina	172
Figura 5.13 Características del indicador Desechos radiactivos de alta y mediana actividad.....	172
Figura 5.14 Características del indicador Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos	173
Figura 5.15 Características de la salida Sustentabilidad de la dimensión ambiental.....	173
Figura 5.16 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fisión a 30 años.....	176
Figura 5.17 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fusión a 30 años.....	176
Figura 5.18 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fisión a 60 años.....	177
Figura 5.19 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fusión a 60 años.....	177
Figura 5.20 Conjuntos difusos de salida, Sustentabilidad	178
Figura 6.1 Resultados de la Dimensión Económica, escenario a 30 años.....	186
Figura 6.2 Resultados de la Dimensión Ambiental, escenario a 30 años.....	187
Figura 6.3 Resultados de la Dimensión Social, escenario a 30 años	187
Figura 6.4 Resultados de la Dimensión Económica y Ambiental, escenario a 30 años	188
Figura 6.5 Resultados de las tres dimensiones, escenario a 30 años.....	188
Figura 6.6 Resultados de las tres dimensiones con pesos, escenario a 30 años.....	189
Figura 6.7 Resultados de la Dimensión Económica, escenario a 60 años.....	190
Figura 6.8 Resultados de la Dimensión Ambiental, escenario a 60 años.....	190
Figura 6.9 Resultados de la Dimensión Social, escenario a 60 años	191
Figura 6.10 Resultados de la Dimensión Económica y Ambiental, escenario a 60 años	191
Figura 6.11 Resultados de las tres dimensiones, escenario a 60 años.....	192
Figura 6.12 Resultados de las tres dimensiones con pesos, escenario a 60 años.....	193

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Propiedades de las partículas comunes en las reacciones nucleares	39
Tabla 2.2 Cadena radiactiva del Uranio 238	43
Tabla 3.1 Ejemplo de masa crítica de esferas, sin reflector, de algunos isótopos	61
Tabla 3.2 Reactores nucleares comerciales que actualmente operan en el mundo.....	68
Tabla 3.3 Características del reactor BWR de la CNLV	71
Tabla 3.4 Energía nuclear y fuentes fósiles. Equivalencias energéticas	84
Tabla 3.5 Requerimientos de combustible para la generación eléctrica.....	84
Tabla 3.6 Evolución de las reservas de uranio en México. Periodo 1959-1971	87
Tabla 4.1 Características de las reacciones de fusión nuclear	102
Tabla 4.2 Principales parámetros de JET, IGNITOR e ITER	126
Tabla 5.1 Matriz de indicadores de sustentabilidad	142
Tabla 5.2 Resumen de los indicadores de la Dimensión Económica	148
Tabla 5.3 Resumen de los indicadores de la Dimensión Ambiental	152
Tabla 5.4 Resumen de los indicadores de la Dimensión Social.....	157
Tabla 5.5 Tabla de verdad del operador OR.....	162
Tabla 5.6 Tabla de verdad del operador AND.....	163
Tabla 5.7 Tabla de verdad del operador NOT.....	163
Tabla 5.8 Pesos de los indicadores con respecto de la dimensión a la que pertenecen.....	175
Tabla 5.9 Resultados de la Sustentabilidad Económica, escenario a 30 años	179
Tabla 5.10 Resultados de la Sustentabilidad Ambiental, escenario a 30 años	179
Tabla 5.11 Resultados de la Sustentabilidad Social, escenario a 30 años	179
Tabla 5.12 Resultados de la Sustentabilidad Económica y Ambiental, escenario a 30 años.....	179
Tabla 5.13 Resultados de la Sustentabilidad global, escenario a 30 años.....	180
Tabla 5.14 Resultados de la Sustentabilidad global con pesos, escenario a 30 años.....	180
Tabla 5.15 Resultados de la Sustentabilidad Económica, escenario a 60 años	180
Tabla 5.16 Resultados de la Sustentabilidad Ambiental, escenario a 60 años	181
Tabla 5.17 Resultados de la Sustentabilidad Social, escenario a 60 años	181
Tabla 5.18 Resultados de la Sustentabilidad Económica y Ambiental, escenario a 60 años.....	181
Tabla 5.19 Resultados de Sustentabilidad global, escenario a 60 años.....	181
Tabla 5.20 Resultados de la Sustentabilidad con pesos, escenario a 60 años.....	182

Resumen

La primera fuente de energía que logró dominar el hombre fue el fuego; la madera y residuos vegetales constituyeron su principal combustible. En nuestra época, y especialmente en el último siglo del segundo milenio, se ha recurrido de manera cada vez más vertiginosa, al uso de los combustibles fósiles: carbón y sobre todo petróleo; este último posiblemente se agote en menos de un siglo y las reservas de carbón durarán unos 450 años. Aparte de la escasez, que amenaza todo el estilo de nuestra civilización actual, los dos combustibles principales presentan un peligro no menor, el de la contaminación ambiental, la acumulación de compuestos en la atmósfera que como se ve a diario en los medios de información pone en riesgo la vida sobre la Tierra.

Esta situación, nos hace mirar hacia formas alternas de generar energía. Actualmente se encuentran en el mundo cientos de investigadores, estudiando las diversas formas de poder cubrir la demanda de energía. Por ello se vuelve de vital importancia el aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, como el sol, el viento, las mareas, la biomasa, pero también de otras fuentes de energía, como el hidrógeno y la energía nuclear de fisión y de fusión. El aprovechamiento de la energía nuclear por el hombre, tuvo sus inicios a mitad del siglo XX; desde entonces se ha incrementado de manera importante.

En el presente trabajo se tratan algunas de las diversas aplicaciones de la energía nuclear; tanto las aplicaciones no energéticas, como las que sí lo son. El desarrollo de la ingeniería que hace posible este aprovechamiento, tuvo un gran auge durante la guerra fría, se construyeron reactores nucleares en los que se pueden controlar las reacciones de fisión nuclear, que consiste en dividir átomos y cuya reacción genera una gran cantidad de energía. Se trataron también los aspectos relacionados con la generación de energía por medio de fisión nuclear, tales como los tecnológicos, ambientales y sociales; el manejo de los desechos radiactivos y el de accidentes como el de Chernobil, así como también el tema de la proliferación. Además se presenta el estado en que se encuentran las investigaciones científicas sobre la energía producida por fisión nuclear, se muestra la evolución de los reactores nucleares comerciales, así como las características de los reactores del futuro, los de IV generación. Hoy casi 440 reactores nucleares producen energía eléctrica alrededor del mundo. Más de 15 países confían la generación de su energía eléctrica en un 25% o más en nuclear. En Europa y Japón, la porción de energía eléctrica generada por energía nuclear, está por encima de 30%; en Estados Unidos cerca del 20%. Francia, con 60 millones de personas, obtiene más de 75% de su energía eléctrica por medio de energía nuclear.

Sin embargo, hay otra posibilidad que aún no se ha logrado controlar de manera satisfactoria. Ésta se deriva de la fusión nuclear, la cual tiene un potencial energético más amplio que la fisión. La fusión no da lugar a productos radiactivos como resultado de la reacción; sin embargo, sí puede activar materiales debido al alto flujo de neutrones. Otro hecho importante en favor de la fusión es que el elemento básico que sirve como combustible es el hidrógeno, el cual se obtiene del agua, por lo que no habría problema para asegurar su abasto. Para fines prácticos podría decirse que la fuente de energía sería inagotable. La fusión nuclear es un proceso de unión entre dos núcleos atómicos para formar uno solo y liberando su energía de enlace que es un millón de veces mayor que la liberada en las reacciones químicas. El planteamiento es sencillo mas no así la manera de lograr la fusión nuclear: se señalan dos formas distintas de lograrla, en frío y en caliente y el desarrollo de la

explicación conduce a los Tokamaks, a la fase de la materia en que se convierte en plasma y otros problemas y maquinarias altamente complejas que prometen el dominio de dicha fuente de energía.

Los primeros cuatro capítulos son una investigación documental, necesaria para poder llevar a cabo el análisis de sustentabilidad. Para concluir el trabajo, se presenta la metodología y desarrollo de dicho estudio, en el que se comparan ambas tecnologías en cuestión. Esta comparación se realiza en el contexto del desarrollo sustentable y pretende como objetivo decidir cuál de las dos tecnologías es más sustentable, para su aplicación en la búsqueda de satisfacer las necesidades energéticas del mundo y en particular de México. El análisis está basado en las dimensiones del desarrollo sustentable; es decir, en la económica, ambiental y social-política. Dadas las cuestiones de desarrollo tecnológico para ambas tecnologías, el presente estudio se realizó en dos diferentes escenarios; el primero en el mediano plazo, 30 años. El segundo, a largo plazo, 60 años.

Al final de este trabajo, se llegó a una conclusión en cuanto a qué tipo de energía es mejor en términos de sustentabilidad, en el mediano y largo plazo. Aún y cuando ante los ojos de muchos, la respuesta parecería ser evidente, este trabajo nos brinda una visión más cercana a la realidad, además de darle un soporte teórico en la ayuda de la toma de decisiones que se tendrán que hacer, con miras en el futuro de la generación eléctrica del país. Por ello, es adecuado utilizar una metodología para la evaluación comparativa de las opciones de energía nuclear sobre la base de los criterios del desarrollo sustentable y en esta tesis se aporta una metodología que podrá ser revisada y complementada en el futuro.

Acrónimos

°C	grados Celsius
²³² Th	torio 232
²³³ U	uranio 233
²³⁵ U	uranio 235
²³⁸ U	plutonio 239
²³⁸ U	uranio 238
⁶ Li	litio 6
A	número de masa (número de nucleones)
ABWR	reactor avanzado de agua hirviendo
AP1000	avanzado pasivo 1000 (reactor)
b	barn (10 ⁻²⁴ cm ²)
Bq	becquerelio (1 desintegración/segundo)
BWR	reactor de agua hirviendo
c	velocidad de la luz en el vacío (299,792,458 m/s)
C	coulomb
CANDU	de la expresión "CANadá Deuterio Uranio"
CFE	Comisión Federal de Electricidad
Ci	curie (37,000,000,000 Bq)
CNLV	Central Nucleoeléctrica Laguna Verde
D	símbolo del deuterio (en inglés es <i>deuterium</i>)
-e	carga del electrón (-1.60219 x 10 ⁻¹⁹ C)
e ⁺	positrón
EPR	reactor europeo presurizado
ESBWR	reactor simplificado de agua en ebullición
GFR	reactor rápido enfriado por gas
h	constante de Plank (6.626x10 ⁻³⁴ J·s)
He	símbolo del helio (en inglés es <i>helium</i>)
ITER	<i>international thermonuclear experimental reactor</i>
JET	<i>joint european torus</i>
K	kelvin
keV	kilo electrón volt
LFR	reactor rápido enfriado por plomo
m ₀	masa en reposo de un objeto (v=0)
m _e	masa del electrón (9.10954 x 10 ⁻³¹ kg)
MeV	Mega electrón volt
m _n	masa del neutrón (1.67495 x 10 ⁻²⁷ kg)
MOx	mezcla de óxidos de uranio y plutonio
m _p	masa del protón (1.67265 x 10 ⁻²⁷ kg)
MSR	reactor de sal fundida

MW	Megawatt
N	número de neutrones
n	símbolo del neutrón
N _A	número de Avogadro (6.0221367x10 ²³)
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
p	símbolo del protón
PBMR	reactor modular de cama de esferas
pm	picómetro (1x10 ⁻¹² m)
PWR	reactor de agua a presión
Q	cociente de energía de fusión
SCWR	reactor supercrítico enfriado por agua
SFR	reactor rápido enfriado por sodio
Sv	sievert
T	símbolo del tritio (en inglés es <i>tritium</i>)
TFTR	reactor toroidal de fusión termonuclear
UF ₆	hexafluoruro de uranio
uma	unidad de masa atómica
UO ₂	dióxido de uranio
VHTR	reactor de gas a muy alta temperatura
W	watt
Z	número atómico (número de protones)
α	partícula alfa
β^+ o β^-	partícula beta
γ	radiación gamma



CAPÍTULO 1

Introducción a la Energía Nuclear

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Capítulo 1

1 Introducción a la Energía Nuclear

1.1 Historia

1.1.1 Comprendiendo la estructura atómica

Como en muchos de los casos, fueron los griegos los precursores de una nueva rama de la física. Ya los antiguos griegos indicaban la existencia de unas partículas fundamentales, que actuaban como elementos constituyentes de la materia, prediciendo la existencia de unos átomos de diminuto tamaño, y enumerando una pequeña cantidad de diferentes tipos. Hasta finales del siglo XIX no se descubrieron más datos sobre estos elementos.

J. J. Thomson, junto a otros investigadores, descubrió en 1897 que los átomos no eran indivisibles como se creía, sino que podían ser separados en componentes más pequeños (ver Figura 1.1) Asimismo, propuso la composición de los átomos y la existencia de unas partículas denominadas electrones, cuya masa era mucho menor que la del núcleo; éste, por su parte, tenía carga positiva y su masa suponía casi la totalidad del átomo en conjunto

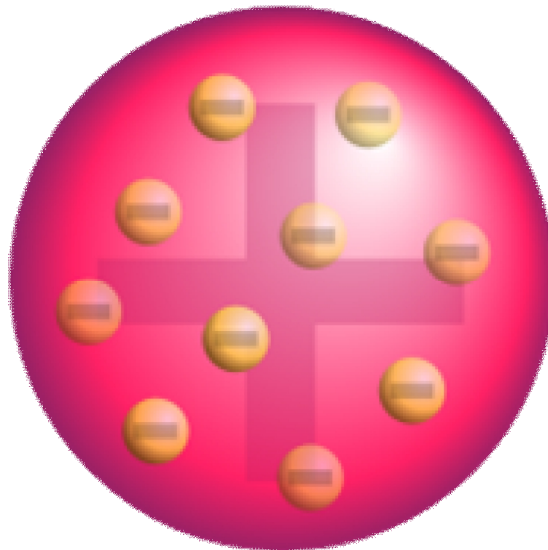


Figura 1.1 Representación esquemática del modelo atómico de Thomson [2]

El átomo consta de un núcleo sobre el que flotan (orbitan) los electrones. Ernest Rutherford desarrolló en 1911 un modelo basado en un sistema solar en miniatura, en el que el núcleo era una estrella (un sol) y los electrones los planetas. La explicación de su teoría consideraba que los electrones emitirían energía al girar, disminuyendo su velocidad y cayendo al núcleo; el modelo atómico actual propone que los electrones ocupan órbitas fijas. Además Rutherford propuso que los electrones podían saltar de una órbita a otra cualquiera alrededor del núcleo; sin embargo, se comprobó que los electrones sólo podían ocupar determinadas órbitas. En la Figura 1.2 se muestra de manera esquemática el modelo de Rutherford, en el cual se aprecia un núcleo en color negro y los electrones en color rojo girando en órbitas alrededor del núcleo.

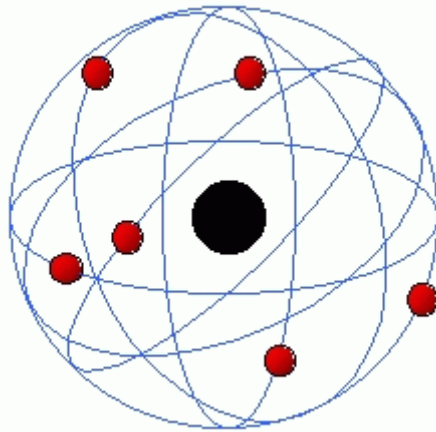


Figura 1.2 Esquema de la estructura del átomo de Rutherford [2]

En 1913 Niels Bohr enunció una nueva teoría atómica para dar solución a los fallos de la teoría de Rutherford; consistía en un sistema con un pequeño núcleo alrededor del cual giraban los electrones, pero con órbitas que obedecían a ciertas restrictivas (véase Figura 1.3) Según esas reglas, sólo podrían existir un número determinado de órbitas y cada órbita tendría un nivel de energía, por tanto el electrón que ocupase una órbita concreta poseería la energía correspondiente a esa órbita. Asimismo, un electrón no podría saltar de una órbita a otra, salvo recibiendo una energía adicional igual a la diferencia de energía de ambas órbitas; si un electrón cambiara de una órbita de energía superior a otra inferior, emitiría igual cantidad de energía en forma de onda electromagnética, que sería de espectro fijo para los mismos tipos de átomos (una especie de sello identificativo)

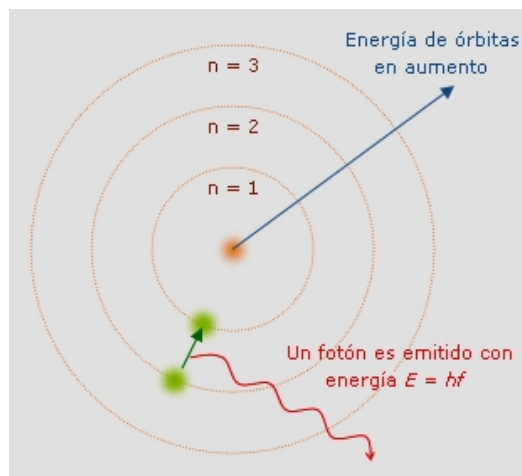


Figura 1.3 Diagrama del modelo atómico de Bohr [2]

Sin embargo, la teoría de Bohr, predecía que; los electrones deberían emitir energía al girar alrededor del núcleo, invalidando que las órbitas fueran de energía constante. La teoría de la mecánica cuántica vino a solucionar estas interrogantes, mediante la enunciación del principio de la dualidad onda-partícula, por la cual toda partícula puede comportarse igualmente como una onda. Estas teorías y estudios fueron fruto del desarrollo y aportaciones de muchos y notables científicos como Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Planck, Louis de Broglie, entre otros.

Posteriormente se dedujo que en estado normal un átomo no posee carga eléctrica; sin embargo, se observó que la carga del núcleo era positiva y siempre múltiplo de la carga del electrón; así pues, se concluyó que el núcleo estaba compuesto por un conjunto de partículas, cada una de ellas con igual carga que la del electrón, pero positiva; esas partículas fueron denominadas protones. Según este planteamiento, los átomos tienen el mismo número de electrones que de protones para poder mantener una carga neutra; es decir, cargas negativas en los electrones iguales a cargas positivas en los protones. El hidrógeno posee un electrón en su órbita, por tanto posee igualmente un protón en su núcleo; se dedujo así que la masa del protón era aproximadamente dos mil veces superior al del electrón; sin embargo, esta medida no corresponde con la de otros elementos atómicos. La incógnita de las masas quedó despejada en 1932 cuando James Chadwick, de la Universidad de Cambridge, descubrió un nuevo elemento en el núcleo cuando estudiaba las colisiones entre partículas a alta velocidad, al que se le denominó neutrón. Quedó así determinada la estructura del átomo que se conoce hasta hoy en día. En la Figura 1.4 se muestra un esquema del modelo atómico actual; en el núcleo se observan los protones y neutrones; en torno al núcleo se encuentran girando los electrones.

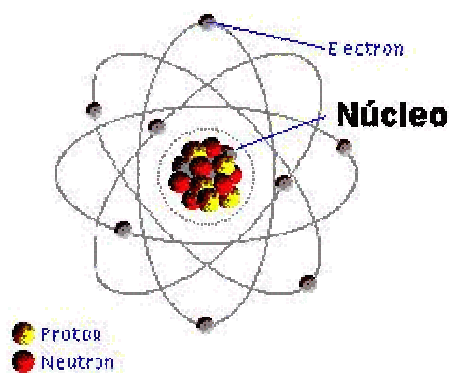


Figura 1.4 Representación del modelo atómico actual [2]

El paso entre la determinación de la estructura de la materia y la teoría para la obtención de la energía nuclear por fisión, lo dio Albert Einstein. Como parte de su teoría de la relatividad, desarrolló la ecuación que relaciona la masa y la energía.¹ Dicha ecuación afirma que una masa determinada (m) tiene asociada una cantidad de energía (E) igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz (c) $E=mc^2$. "La fórmula dice que la energía y la masa son diversas formas de la misma substancia; es decir, que son equivalentes. En otras palabras: la energía es materia liberada y la materia es energía que espera ser liberada"². Los experimentos sobre esta teoría demostraron que al bombardear un átomo con masa elevada con otra partícula, las diversas partes en que se separaba el núcleo tenían en conjunto masas menores que la del núcleo original, liberándose por tanto una cantidad de energía. Si se aplicaba la fórmula de Einstein sobre la diferencia de masas, se observaba que los resultados eran coincidentes con los de la energía liberada.

¹ I. La energía nuclear. Obtenido el 7 de enero de 2008 en: <http://www.inin.mx/paraconocer/laenergianuclear.pdf>

² Harald Fritzsche, Michael Helge. El genio del siglo: Albert Einstein. *Contacto Nuclear*, Diciembre de 2005, no 41, p. 31-34.

1.1.2 Desarrollo de la energía nuclear de fisión

Con el éxito en la ejecución de la teoría de Einstein se había encontrado una fuente de energía de enormes posibilidades; sin embargo, en la práctica aún era inviable, hasta 1939, cuando los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann anunciaron que habían fisionado núcleos de uranio bombardeándolos con neutrones. Esta reacción libera a su vez neutrones, con los que se puede causar una reacción en cadena con otros núcleos.³

Dado que tras los experimentos en Alemania previos a la segunda guerra mundial, se sabía que la fisión del átomo era posible y que los nazis estaban ya trabajando en su propio programa nuclear, el científico nuclear Leó Szilárd, refugiado judío proveniente de Hungría, creía que la energía liberada por la fisión nuclear podía ser utilizada para la producción de bombas por los alemanes, por lo que persuadió a Albert Einstein, el físico más famoso en Estados Unidos, para que advirtiera al presidente Franklin D. Roosevelt de este peligro por medio de una carta que fue enviada en agosto de 1939. En respuesta a la advertencia, Roosevelt incrementó las investigaciones acerca de la fisión nuclear. Además autorizó en 1941 un proyecto de investigación científico, de nombre clave proyecto Manhattan, cuyo objetivo era desarrollar la primera bomba atómica. Superadas las limitaciones para generar energía nuclear aprovechable, en 1942 comenzó a funcionar en la Universidad de Chicago el primer prototipo de reactor nuclear, construido por Enrico Fermi. Finalmente, el 6 de agosto de 1945, la tecnología nuclear se dio a conocer al mundo, los Estados Unidos detonarían una bomba de uranio sobre la ciudad japonesa de Hiroshima y el 9 de agosto, una de plutonio sobre la ciudad de Nagasaki, ambas causaron gravísimos daños, tanto en vidas humanas como materiales. Comenzó así la era nuclear. En la Figura 1.5 se expone una fotografía de la nube de hongo producido por la explosión de la bomba atómica detonada en la ciudad japonesa de Hiroshima.

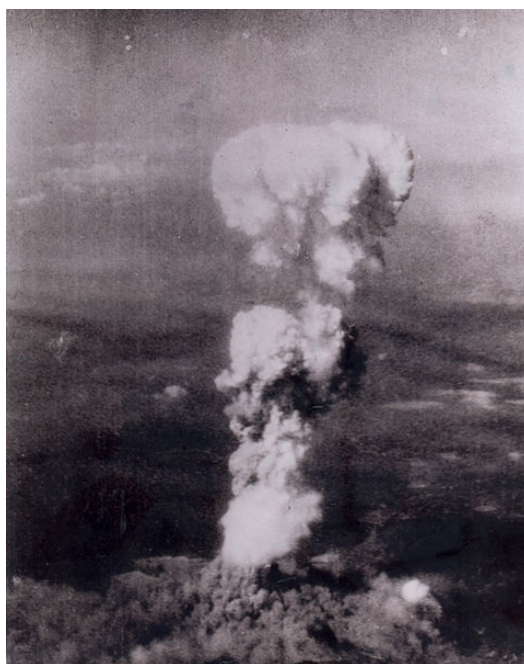


Figura 1.5 Fotografía de la explosión de la bomba atómica en Hiroshima [3]

³ I. La energía nuclear op. cit.

1.1.3 La fisión y la generación de energía eléctrica

A finales de 1950 comenzaría una utilización práctica de la energía de la fisión para producir energía eléctrica, con las primeras centrales nucleares de fisión. A mediados del siglo XX se comenzaba a confiar en la energía nuclear como la fuente que traería consigo el fin de todos los problemas inherentes a la escasez de combustibles fósiles. La notable rentabilidad de la fisión nuclear traería consigo el abaratamiento de la energía eléctrica, y crearía expectativas de un futuro prometedor para el sector industrial, al no depender de recursos energéticos inestables o escasos.



Figura 1.6 Fotografía de una central nuclear con torres de enfriamiento y una línea de transmisión [4]

La energía nuclear mediante la fisión de uranio supuso un paso tecnológico importante para la humanidad; sin embargo, los residuos radiactivos que produce, deben ser manejados con extremo cuidado, además de ser de complicado almacenamiento por el largo periodo de degradación que algunos de ellos precisan.

A lo largo de la historia de esta energía han existido algunos incidentes, aunque dos de ellos han tenido especiales consecuencias. El de la central de Three Mile Island (Pennsylvania) en 1979, por efecto de un error humano, se liberaron productos radiactivos del núcleo del reactor, aunque sólo una parte de ellos salieron al exterior; sin embargo, los daños materiales fueron cuantiosos. Este accidente fue el punto de partida para el establecimiento en todos los Estados Unidos de un buen número de normas y legislaciones, tendientes a la seguridad de funcionamiento y construcción de centrales nucleares.

El otro accidente, esta vez de graves consecuencias, tuvo lugar el 28 de abril de 1986 en Chernobil (Ucrania) La noticia saltó a los medios de información a partir de una advertencia procedente de Suecia, según la cual se registraba un fuerte aumento de la radiactividad ambiental que debía atribuirse, dada la situación meteorológica reinante, a un posible accidente en la central nuclear soviética de Chernobil, a 1500 km de distancia. La noticia fue confirmada por las autoridades soviéticas y la opinión mundial se enteró, con sobresalto, que tres días antes se había producido el

peor accidente nuclear de la historia, en la citada central, que se encontraba a 120 km al norte de la capital de Ucrania, Kiev, ciudad con una población de dos millones y medio de habitantes.

Como resultado de una serie de actividades humanas que no seguían las normas autorizadas, uno de los cuatro reactores de la central explotó y comenzó a arder. Se alcanzaron temperaturas de 1500 °C, y se generó una nube radiactiva que llegó a los países nórdicos, que fueron los primeros en dar la voz de alarma. En la Figura 1.7 se muestra una fotografía del estado en que terminó el reactor 4 de Chernobil después de la explosión. Actualmente se encuentra envuelto por una estructura denominada sarcófago que lo aísla del exterior.



Figura 1.7 Fotografía del reactor 4 de Chernobil después de la explosión [7]

Meses después, tras las contradicciones iniciales sobre el alcance real del accidente, se reconocieron 31 víctimas mortales. En septiembre de 2005 en el informe presentado por Chernobil Forum del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) preveía sólo 4,000 muertes adicionales atribuibles al accidente.⁴ Sin embargo, en otro informe del Centro Independiente de Evaluación Medio Ambiental de la Academia Rusa de la Ciencia, citado por Greenpeace (2006) basado en datos estadísticos del Centro Nacional de Estadística sobre el Cáncer de Bielorrusia y Ucrania, prevé que se producirán próximamente otros 270,000 cánceres, de los cuales 93,000 mortales, causados por Chernobil en todo el mundo.⁵

También durante estos años nos encontramos con la guerra fría, etapa en la que las dos superpotencias reinantes, Estados Unidos y la URSS, mantuvieron, además de una competencia en

⁴ Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine (2005) Obtenido el 16 de enero de 2008. Recuperado de:

<http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>

⁵ Los muertos por Chernóbil superan ya la cifra de 200,000 y se prevén otros 93,000 más por cáncer (2006) Obtenido el 16 de enero de 2008 en:

<http://www.greenpeace.org/espana/news/los-muertos-por-chern-bil-supe>

todos aspectos, una carrera armamentista basada principalmente en el desarrollo de las armas nucleares.

En la actualidad dos terceras partes de la población mundial, vive en naciones en donde las plantas de energía nuclear constituyen una parte de la producción de energía eléctrica e infraestructuras industriales. La mitad de la población mundial, vive en países en los cuales nuevos reactores nucleares son planeados o en construcción. Hoy casi 440 reactores nucleares producen energía eléctrica alrededor del mundo. Más de 15 países confían la generación de su energía eléctrica en un 25% o más en nuclear. En Europa y Japón, la porción de energía eléctrica generada por energía nuclear, está por encima de 30%; en Estados Unidos cerca del 20%.⁶ Hoy en el mundo se produce la misma cantidad de energía eléctrica, por medio de la energía nuclear, que la que se producía mundialmente en 1960, por medio de todas las fuentes de energía. Los reactores nucleares producen el 16% de las necesidades nucleares en 30 países.⁷ En la Figura 1.8 se muestran los 30 países en los que se genera energía eléctrica por medio de plantas nucleoelectricas, y qué tanto contribuyen éstas en la generación total de cada país. Cabe mencionar que Lituania consta únicamente con la Central Nucleoelectrica Ignalina, que tiene una capacidad instalada de 1360 MW.⁸

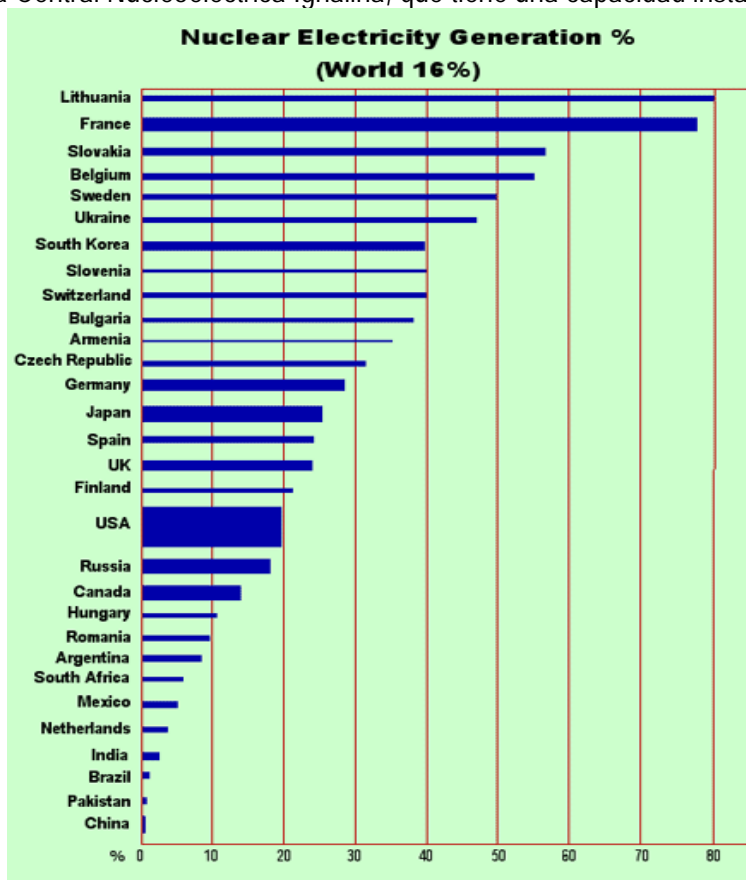


Figura 1.8 Porcentaje de generación de energía eléctrica por energía nuclear en cada país [8]

⁶ Nuclear Power Today (2007) Obtenido el 7 de enero de 2008 en:

<http://www.worldnuclear.org/why/nuctoday.html>

⁷ Nuclear Power in the World Today (Agosto 2007) Obtenido el 7 de enero de 2008 en:

<http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>

⁸ Ignalina Nuclear Power Plant (2009) Obtenido el 24 de enero de 2009 de:

http://www.iae.lt/visaginas_en.asp?lang=1&sub=1

Alrededor del mundo, científicos de más de 50 países emplean casi 300 reactores, con el objeto de investigar las tecnologías nucleares y producir los radioisótopos para el diagnóstico médico y terapia de cáncer.⁹

Muchos países tienen un compromiso fuerte con la energía nuclear. Entre éstos están Francia, China, India, los Estados Unidos, Rusia y Japón, que juntos representan la mitad de población mundial. Otras naciones, como Argentina, Brasil, Canadá, Finlandia, Corea del Sur, Sudáfrica, Ucrania y varios otros países en Europa Central y Oriental, están actuando para aumentar el papel de la energía nuclear en sus economías. Algunas naciones en vías de desarrollo sin energía nuclear (como Indonesia, Egipto y Vietnam) están considerando también esta opción.

La energía nuclear proporciona independencia energética y seguridad de suministro; Francia, con 60 millones de personas, obtiene más de 75% de su energía eléctrica por medio de energía nuclear y es el exportador neto de energía eléctrica más grande del mundo.¹⁰

1.1.4 El caso de México

Existen testimonios de que a finales del Siglo XIX, el mexicano Ing. Luis Espinoza y Cuevas, compró en Europa el primer equipo de Rayos X, trayéndolo a San Luis Potosí. Sin embargo, se ignora el uso preciso que se le dio a ese primer aparato.¹¹

Desde los primeros años del Siglo XX en México se utilizaron los Rayos X con fines de diagnóstico médico y existen datos de que a partir de los 1920's se utilizaron fuentes de radio-226 con propósitos médicos. A mediados del Siglo XX ya se utilizaba en forma extendida la tecnología de las radiaciones ionizantes en la industria, la radioterapia con cobalto y cesio y la Medicina Nuclear, proceso que se ha continuado hasta la fecha en forma evolutiva.



Figura 1.9 Primera máquina de rayos X utilizada en México [10]

⁹ Nuclear Power Today op. cit.

¹⁰ Ibid.

¹¹ Del Valle Gallegos Edmundo, François Lacouture Juan Luis. *Estado actual y futuro en México de la especialidad: Ingeniería Nuclear*. III Congreso Anual de la Academia de Ingeniería Palacio de Minería, México, D. F., 2007

A principios de la década de los 50, diversos científicos mexicanos comienzan a promover el uso de la energía nuclear para diversos fines. Uno de los principales promotores fue el doctor Nabor Carrillo Flores, quien fue nombrado asesor técnico de la delegación de México ante la Comisión sobre Energía Atómica para uso pacífico, de la ONU.

El doctor Carrillo Flores, rector de la UNAM de 1953 a 1961, así como otros científicos, impulsaron la creación de la Comisión Nacional de Energía Nuclear (CNEN) cuya fundación se dio en 1956, con el objetivo de regular las aplicaciones energéticas y no energéticas, así como los estudios en ciencias nucleares.

En la década de los 60, el proyecto nuclear más importante del país fue la construcción del Centro Nuclear "Nabor Carrillo Flores", ubicado en Salazar, Estado de México. Este centro se empieza a construir en mayo de 1964. Dos años después, el lugar ya contaba con dos aceleradores de iones y un reactor de investigación.

En 1972, la CNEN cambió su nombre a Instituto Nacional de Energía Nuclear y en 1979, con la emisión de la Ley Nuclear, la institución se transformó para crear la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (que se encuentra en Salazar, Estado de México) y la Comisión Nacional de Energía Atómica, la cual, nunca entró en función.

Fue también en 1972 cuando el gobierno federal consideró a la energía nuclear como una alternativa para la generación de energía eléctrica. En ese año, comenzó el proyecto de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde (CNLV) que en 1990 se inauguró en el municipio de Alto Lucero, localizada a 70 km al Noroeste del Puerto de Veracruz, sobre la costa del Golfo de México. La apertura de esta planta nuclear se realizó con la oposición de una parte de la sociedad y bajo la protesta de grupos ambientalistas (Ver Figura 1.10)

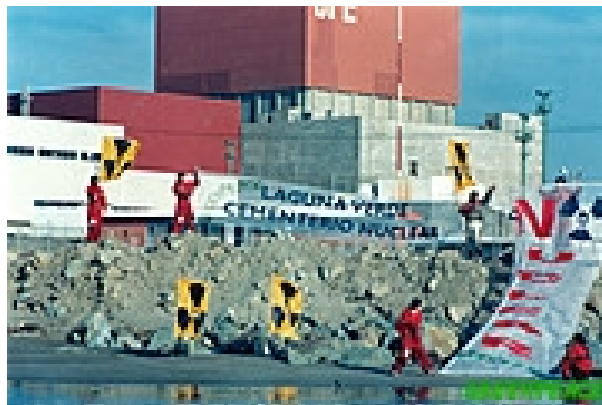


Figura 1.10 Protesta de grupos ambientalistas en la Central Nuclear Laguna Verde [15]

La puesta en marcha de la CNLV, cuya Unidad 1 entró en operación comercial el 29 de julio de 1990 y la Unidad 2 el 10 de abril de 1995, se da en momentos en los que la industria nuclear occidental se encontraba ya en una fase suficientemente madura. Esto es importante, porque las unidades de la CNLV, que son dos reactores del tipo de agua en ebullición de manufactura estadounidense, tienen un diseño que cumple con la filosofía de seguridad implantada en los reactores de aquel país. De hecho, el marco de referencia que se adoptó para evaluar la seguridad en el diseño fue

precisamente el capítulo 10 del Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos (conocido como 10CFR) así como las guías reguladoras y otros documentos emitidos por el órgano regulador de ese país. Desde entonces la CNLV se ha venido desempeñado exitosamente, entregando a la red nacional de energía eléctrica alrededor del 5% de la energía total generada en el país con muy altos estándares de confiabilidad.¹²

La CNLV cuenta con dos unidades generadoras de 682.5 MW eléctricos cada una. Los reactores son marca General Electric, tipo Agua Hirviente (BWR-5) contención tipo Mark II de ciclo directo. Con la certificación del organismo regulador nuclear mexicano, la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS) La energía eléctrica generada en la CLV fluye a través de la subestación elevadora que se conecta a la red eléctrica nacional mediante dos líneas de transmisión de 230 kV a la subestación Veracruz II, así como con 3 líneas de transmisión de 400 kV; dos a la subestación Puebla II y la tercera a la Subestación Poza Rica II.¹³

La CNLV con 1,364.88 MW representa el 2.74% de la capacidad instalada de CFE (incluyendo productores independientes de energía) con una contribución a la generación del 4.56%.¹⁴

Actualmente, se está realizando el aumento del 15% en la potencia de los dos generadores de la nucleoelectrica, por lo que para el año 2010, fecha en que se terminará la re-potenciación de los generadores, se tendrá una potencia adicional del 20% sobre el valor original de diseño. Además, una de las grandes ventajas de contar con la CNLV es que se ahorra entre las dos unidades, el quemado anual de unos 13 millones, 790 mil barriles de combustóleo, siendo el principal beneficio de tipo ambiental ya que las centrales nucleares tienen una emisión cero de gases de efecto invernadero.¹⁵

Entre los logros alcanzados en la especialidad de ingeniería nuclear en México se pueden mencionar la operación exitosa, con recursos nacionales, de la CNLV; la existencia de una industria nacional para la preparación y suministro de radiofármacos, el funcionamiento de dos plantas industriales de irradiación gamma en el país satisfaciendo a un mercado de unos 60 millones de pesos al año; la demostración de la capacidad de fabricación de combustible nuclear; los grupos de investigación e ingeniería sólidamente constituidos y la capacidad de educación en el área con estándares internacionales.¹⁶

¹² Ibid.

¹³ Laguna Verde, nucleoelectrica (2007) Obtenido el 6 de febrero de 2008 de:

<http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/visitasvirtuales/lagunaverdenucleoelctrica/>

¹⁴ Nucleoelectrica Laguna Verde (2007) Recuperado el 6 de febrero de 2008 de:

<http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoelectlagverde/>

¹⁵ Estado actual y futuro en México de la especialidad: Ingeniería Nuclear. Op. cit.

¹⁶ Ibid.

1.2 Aplicaciones de la energía nuclear

Existen múltiples beneficios que las técnicas nucleares producen a las distintas actividades del hombre. Las aplicaciones se clasifican en dos tipos, las aplicaciones del tipo no energético y las aplicaciones energéticas.

Para iniciar presentaremos de manera muy resumida y concisa a las primeras, las cuales son ampliamente diversas y otorgan beneficios significativos a la sociedad pero no son el tema principal de este estudio. Posteriormente nos enfocaremos a las aplicaciones energéticas, las cuales sí son el tema principal de este estudio en que trataremos de hacer un análisis comparativo de la sustentabilidad de la energía nuclear de fisión con respecto a la energía nuclear de fusión.

1.2.1 Aplicaciones no energéticas

1.2.1.1 En medicina

Las técnicas nucleares emplean rayos X, radiación ionizante, radioisótopos y radiofármacos para efectuar estudios de diagnóstico, terapia e investigación médica, cuyos resultados han generado avances significativos en el conocimiento y el ejercicio clínico de algunas especialidades de la medicina, como la oncología, neurología, cardiología, biología molecular, medicina interna y veterinaria entre otras, de tal forma que actualmente estas metodologías forman parte de la infraestructura básica de muchos hospitales.¹⁷

En la llamada "medicina nuclear in vivo", el radiofármaco se administra al paciente para investigar una función fisiológica o bioquímica del organismo. Por ejemplo, un compuesto conteniendo yodo radiactivo, suministrado a un paciente, permite investigar las glándulas tiroideas a través de un detector especial que obtiene la imagen del órgano estudiado.

En la llamada "medicina nuclear in vitro" lo que se hace es detectar y medir en un laboratorio ciertos componentes químicos de fluidos extraídos del cuerpo humano, como la sangre, y sacar conclusiones sobre enfermedades o deficiencias orgánicas. Cientos de millones de radioinmunoanálisis se realizan al año. Este método hace posible detectar con total precisión hormonas, vitaminas, enzimas y muchas drogas en los fluidos biológicos. Esta técnica se aplica para la detección precoz de alteraciones neurológicas importantes, como es, por ejemplo, el hipotiroidismo en niños aparentemente sanos.

El empleo de isótopos radiactivos en medicina ha permitido lograr un mejor conocimiento de la anatomía humana y de las patologías que lo afectan.

¹⁷ Paredes Gutiérrez L. C., Ortiz Magaña J. R., Delgado Guardado J. L. *Aplicaciones nucleares al cuidado de la salud, el ambiente, la industria y la generación de conocimientos*. III Congreso Anual de la Academia de Ingeniería Palacio de Minería, México, D. F., 2007

Con fines de diagnóstico se distinguen dos técnicas consistentes en:

- Administrar al paciente sustancias radiactivas de rápida eliminación, siguiéndolas desde el exterior por medio de equipos especializados, lo que permite localizar tumores.
- Tomar muestras biológicas del paciente y analizarlas en el laboratorio

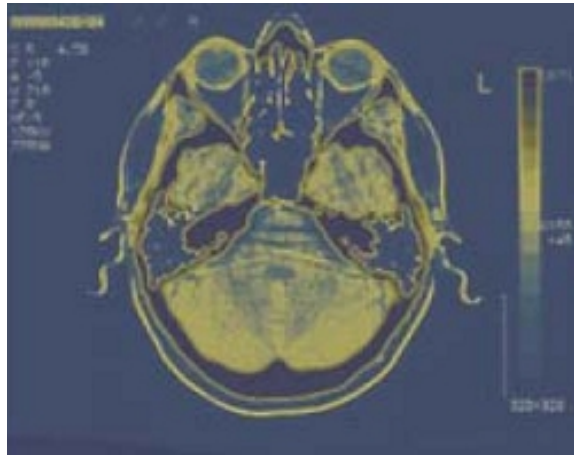


Figura 1.11 Imagen obtenida mediante tomografía axial computarizada [13]

Se sabe que cada elemento químico reacciona a las radiaciones electromagnéticas emitiendo rayos X característicos de dicho elemento, la detección y análisis de esos rayos X ofrece información cualitativa y cuantitativa sobre la composición de cualquier muestra sometida a radiaciones.

Con fines terapéuticos las radiaciones ionizantes se utilizan para destruir células o tejidos malignos.



Figura 1.12 Tratamiento de artritis reumatoide con Samario ^{153}Sm [13]

En el ámbito de la salud también las técnicas de irradiación son altamente eficaces y de bajo costo en la esterilización de artículos de uso médico (vestimenta quirúrgica, suturas, catéteres y jeringas, entre otros)

Los expertos predicen que la utilización general de técnicas nucleares en medicina habrá de triplicarse en un futuro próximo a fin de hacer frente a todos los casos que prevén las proyecciones.

1.2.1.2 En la industria:

En el campo de la industria, las aplicaciones nucleares han experimentado un importante desarrollo, lo que ha permitido aumentar la productividad, mejorar la calidad de los productos, desarrollar nuevos materiales, etc.

Gran parte de los instrumentos de uso industrial se basan en la propiedad de la materia de interactuar con los rayos gamma. Así tenemos:

- Medidores de densidad (petróleo, tabaco, silos, pasta de papel, polvos, lechadas)
- Indicadores de nivel (en silos, pozos, enlatados, botellas)
- Indicadores de espesor de láminas (papel, plásticos, chapas)
- Detectores de humo.

Otras utilidades de las radiaciones ionizantes en la industria son:

- Obtención de imágenes de la estructura interna de los materiales, utilizado por ejemplo para inspeccionar soldaduras.
- Detección de fugas, empleando radioisótopos que, mediante su surgimiento permiten localizar fugas en tuberías y depósitos (ver Figura 1.13)
- Medidas de humedad, este método se aplica en el análisis de suelos y en la construcción de carreteras para comprobar el grado de humedad del terreno.
- Medidas de niveles, usado para verificar el nivel de llenado en líquidos, por ejemplo en una planta embotelladora o para el envasado de productos.

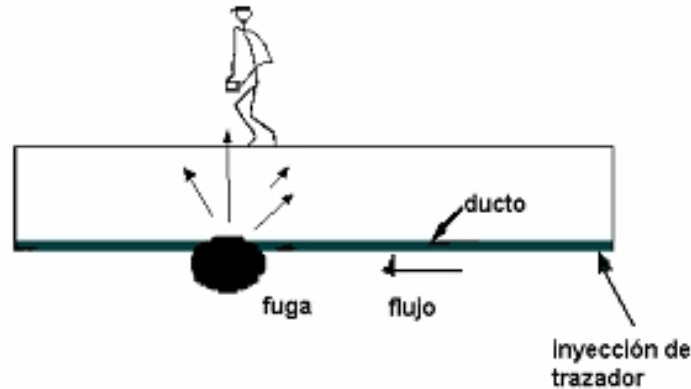


Figura 1.13 Esquema que muestra la detección de fugas en un ducto [13]

1.2.1.3 Agricultura y alimentación:

En la agricultura para obtener cultivos de elevado rendimiento, optimizar los sistemas de riego, comprobar el grado de absorción de abono por las plantas, combatir o erradicar plagas, evitar las mermas durante el almacenamiento de las cosechas, etc.

En la alimentación para esterilizar y prolongar el periodo de conservación de ciertos alimentos.

1.2.1.4 Otras aplicaciones:

Las múltiples aplicaciones de las técnicas nucleares, también son utilizadas para la restauración de obras de arte y evitar procesos de degradación como los producidos por la carcoma y los hongos. Se puede también verificar la fecha en que se realizaron y con ello verificar su autenticidad.

Por medio de isótopos radiactivos de origen natural, se pueden conocer con exactitud la antigüedad de objetos de interés arqueológico.



Figura 1.14 Esqueleto de Tiranosaurio Rex, 70 millones de años de antigüedad¹⁸

Los radioisótopos se emplean para la investigación, con ellos se puede ensayar en pequeña escala, el comportamiento de un proceso que posteriormente se podrá aplicarse a gran escala. También se puede estudiar el comportamiento de las aguas subterráneas.

1.2.2 Aplicaciones energéticas

La principal aplicación de la energía nuclear es la generación de energía eléctrica. Para tal fin se emplean las centrales nucleoelectricas. El funcionamiento de las centrales nucleares está basado en la fisión de los núcleos atómicos de ciertos elementos pesados como el uranio y el plutonio. La fisión de un núcleo atómico pesado es el resultado de la interacción de un neutrón con dicho núcleo, produciéndose la ruptura del núcleo en dos fragmentos (altamente radiactivos) y la liberación de dos o tres neutrones y energía. Los neutrones liberados, continuarán fisionando otros núcleos, proceso conocido como reacción en cadena.

Para el funcionamiento de la mayor parte de los reactores nucleares se utiliza un combustible llamado uranio enriquecido. Éste se obtiene a partir de minerales de uranio existentes en muchos lugares del mundo.

El mineral se somete a diferentes procesos para llevarlo a la forma adecuada para ser utilizado en los reactores nucleares. Uno de éstos consiste en aumentar la concentración de núcleos de uranio 235, que son los que favorecen la reacción en cadena. Este proceso, conocido como enriquecimiento del uranio, tuvo su origen en las aplicaciones militares y actualmente representa la

¹⁸ Imagen recuperada de: <http://horconboys.spaces.live.com/blog/>

etapa más cara del ciclo del combustible nuclear; sin embargo, los reactores que utilizan uranio enriquecido dominan mundialmente debido a sus ventajas económicas y operacionales. La alternativa es usar uranio natural, el cual contiene un 0.7% de núcleos de uranio 235, pero en este caso el reactor necesita agua pesada (que está constituida por deuterio en lugar de hidrógeno común) en el núcleo del reactor. También la tecnología de producción del agua pesada es muy costosa y los reactores de uranio natural y agua pesada, actualmente son minoría en el ámbito internacional.

La Figura 1.15 muestra una planta de enriquecimiento de uranio mediante un proceso que emplea centrifugación gaseosa.

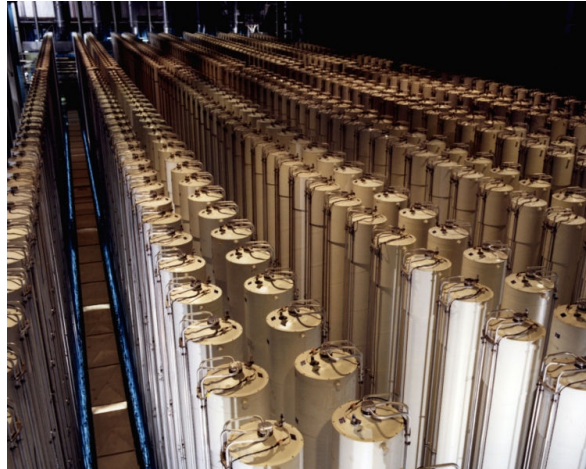


Figura 1.15 Planta de enriquecimiento de uranio mediante centrifugación gaseosa¹⁹

El combustible nuclear se prepara en forma de pastillas. Estas pastillas se colocan en unos tubos de material inoxidable. Los tubos se agrupan en haces que se llaman elementos combustibles. Estos elementos combustibles se colocan en el núcleo del reactor. La Figura 16 muestra las pastillas de combustible, las barras de combustible y los elementos combustibles, que se colocan en el núcleo del reactor. Las centrales nucleoelectrificadas son rentables, ya que necesitan muy poca cantidad de combustible, debido al elevado contenido energético del uranio enriquecido. Por ejemplo, una central nucleoelectrificada usa 27 toneladas de combustible; lo anterior equivale aproximadamente a 3,950,000 toneladas de carbón, 10,540,000 barriles de combustóleo ó 1,668 millones de metros cúbicos de gas para generar la misma cantidad de energía anualmente. El poder energético de una pastilla de combustible cuyo peso sea de 10 gramos equivale al de 3.9 barriles de combustóleo.²⁰

¹⁹ Imagen tomada de: <http://www.world-nuclear.org/ecsgallery/imageDisplay.aspx?id=10826&Page=1>

²⁰ ¿Qué es la energía nuclear? (2005) Obtenido el 16 de enero de 2008 de: <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoelectlagverde/quesenergianuclear/>



Figura 1.16 Pastillas de combustible, barras de combustible y elementos combustibles [10]

Para aprovechar y controlar la reacción en cadena se emplea un reactor nuclear, que contiene el combustible nuclear, capaz de producir la reacción en cadena. En el combustible se pueden introducir barras de control que disminuyen el número de fisiones que se producen, pues están fabricadas de boro, material capaz de absorber los neutrones libres. La energía de las fisiones que ocurren en el interior de un reactor nuclear hace que se caliente el agua en una vasija.

La energía eléctrica se produce en una central nuclear del mismo modo que en una central térmica convencional. Para el caso de una central nucleoelectrónica que opere con un reactor de agua presurizada (ver Figura 1.17) una fuente de calor, en este caso el reactor nuclear, eleva la temperatura de un cierto fluido (normalmente agua) dentro de un circuito primario. Este fluido transmite el calor al agua de un circuito secundario, la que se transforma en vapor. Este vapor de alta pureza acciona las turbinas que, a su vez, mueven al generador que produce energía eléctrica. Un circuito de agua terciario sirve para enfriar el agua del circuito secundario. Las centrales nucleares se ubican generalmente en las proximidades de un curso de agua importante del cual extraen el agua para el circuito de enfriamiento o terciario.

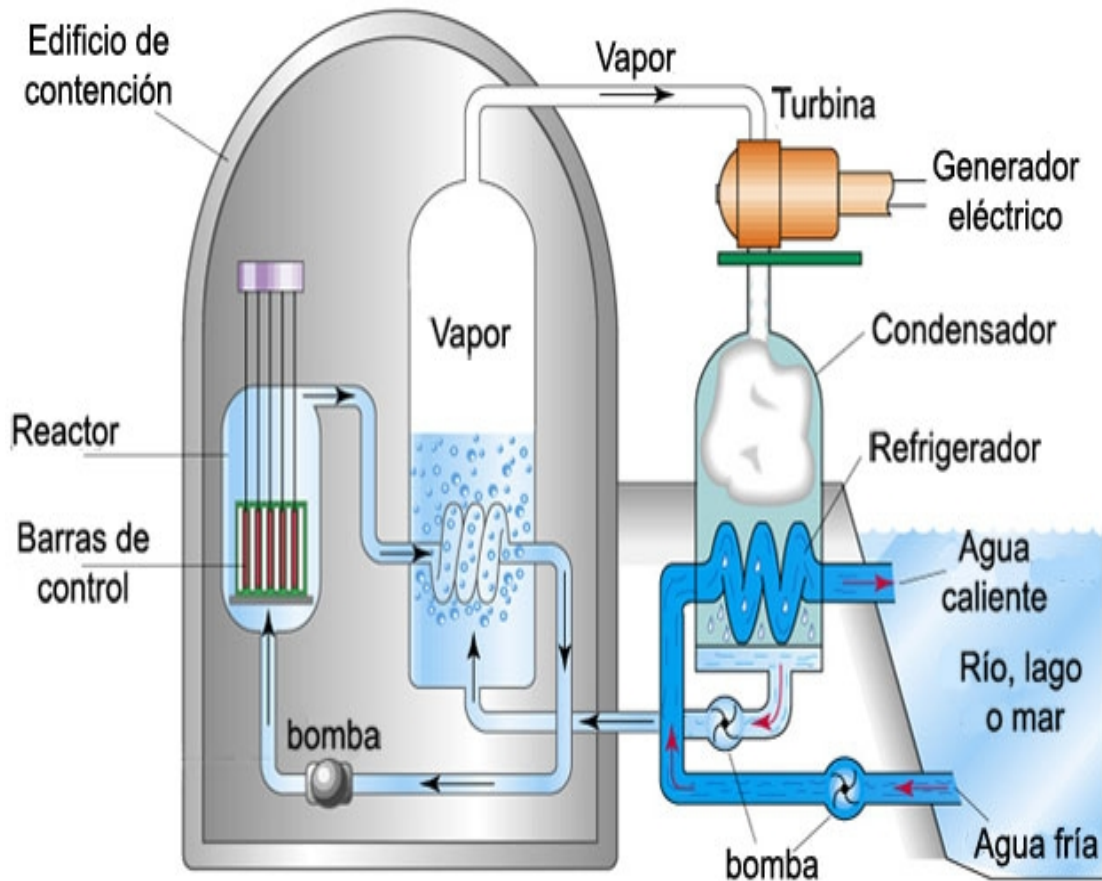


Figura 1.17 Esquema de una central nucleoelectrica con un reactor de agua presurizada ²¹

Cuando el agua para el circuito terciario se toma de un lago o de un río, a fin de no re calentar en exceso tal reservorio, se hace que el agua baje su temperatura en una torre de enfriamiento (ver Figura 1.18) antes de ser devuelta a dicho reservorio.

²¹ Imagen modificada de: http://www.eia.doe.gov/cneaf/nuclear/page/nuc_reactors/pwr.html

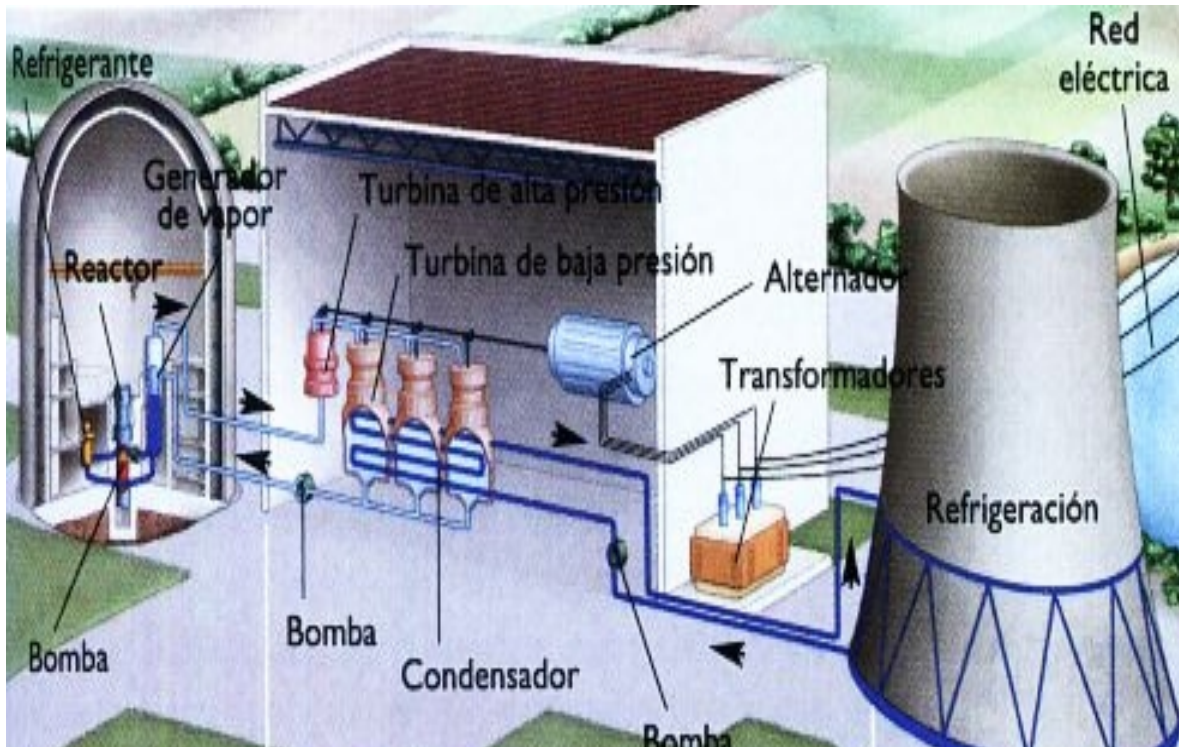


Figura 1.18 Esquema de una central nucleoelectrica con torre de enfriamiento y reactor de agua presurizada²²

En resumen, la energía de fisión se transforma en energía calorífica, que se transforma en energía mecánica y ésta en energía eléctrica.

En el caso de un ciclo de combustible abierto, cuando los elementos combustibles terminan su cometido en el reactor, son reemplazados por otros y depositados en piletas en las que permanecen sumergidos en agua durante un tiempo para permitir el decaimiento de la radiactividad de los productos de fisión y sus derivados de vida media más larga. Los de vida media más corta decaen en el propio reactor. Las radiaciones provenientes de los fragmentos de fisión tienen varias barreras de contención de manera que no lleguen al exterior de la central nuclear. La primera barrera es la propia pastilla de combustible, la segunda es la varilla que contiene las pastillas de combustible, la tercera barrera es la vasija del reactor, la cuarta es la estructura de concreto que recubre a la vasija y la quinta es la pared exterior del edificio del reactor hecha de concreto. La Figura 1.19 muestra esquemáticamente las barreras de contención de una central nucleoelectrica.

²² Imagen recuperada de: http://www.ciencia-tecnologia.com.ar/desarrollos_av/reactor_carem.htm

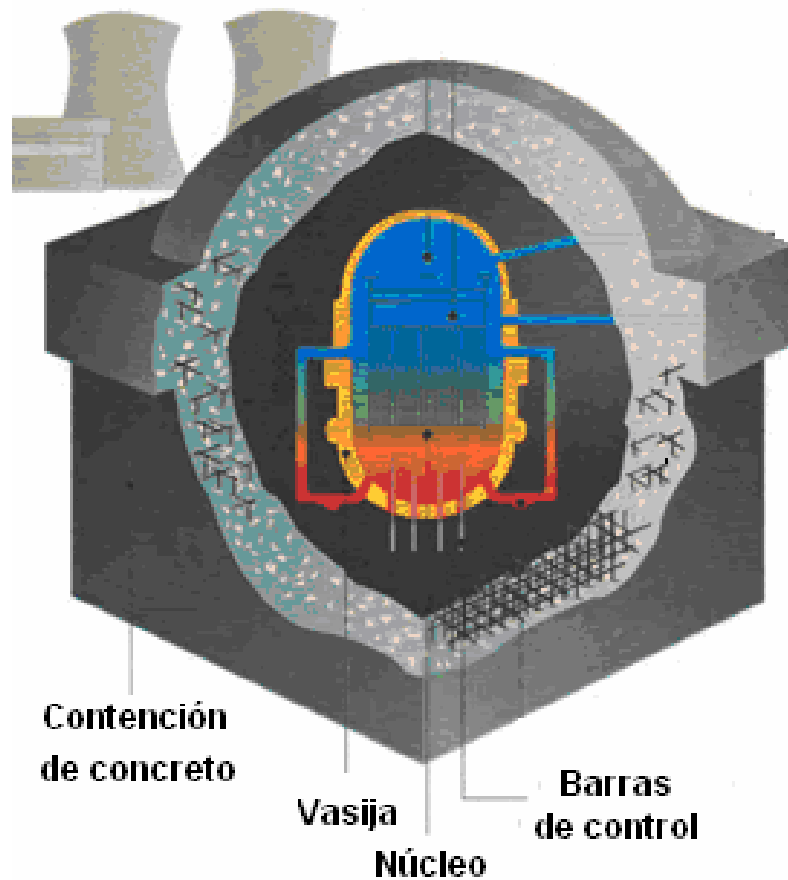


Figura 1.19 Esquema de contención y reactor nuclear [1]

Cuando el combustible gastado es reprocesado en una planta especial y se recupera plutonio y uranio que servirán nuevamente como combustible nuclear, entonces al ciclo de combustible se le denomina ciclo de combustible cerrado.

Todas las centrales térmicas generan productos resultado de la combustión, en las centrales a base de combustóleo o gas, los productos de combustión van a la atmósfera y en las centrales a base de carbón, las cenizas deben enterrarse y los gases de combustión también van a la atmósfera. En el caso de una central nucleoelectrónica, se generan productos resultados del proceso de fisión nuclear; El combustible utilizado se puede enviar a lugares donde se reprocessa para extraer los productos útiles; los productos radiactivos se separan para almacenarse en forma de productos químicos insolubles. También pueden almacenarse indefinidamente mediante un encapsulado o en albercas.²³

La generación de energía eléctrica por medios nucleares no emite gases invernadero durante la operación de las centrales, y la emisión de dichos contaminantes en fases previas o posteriores de la cadena de generación es pequeña. La Figura 1.20 es una representación del ciclo de generación de energía eléctrica, empleando la energía nuclear de fisión.

²³ ¿Qué es la energía nuclear? Op. Cit.

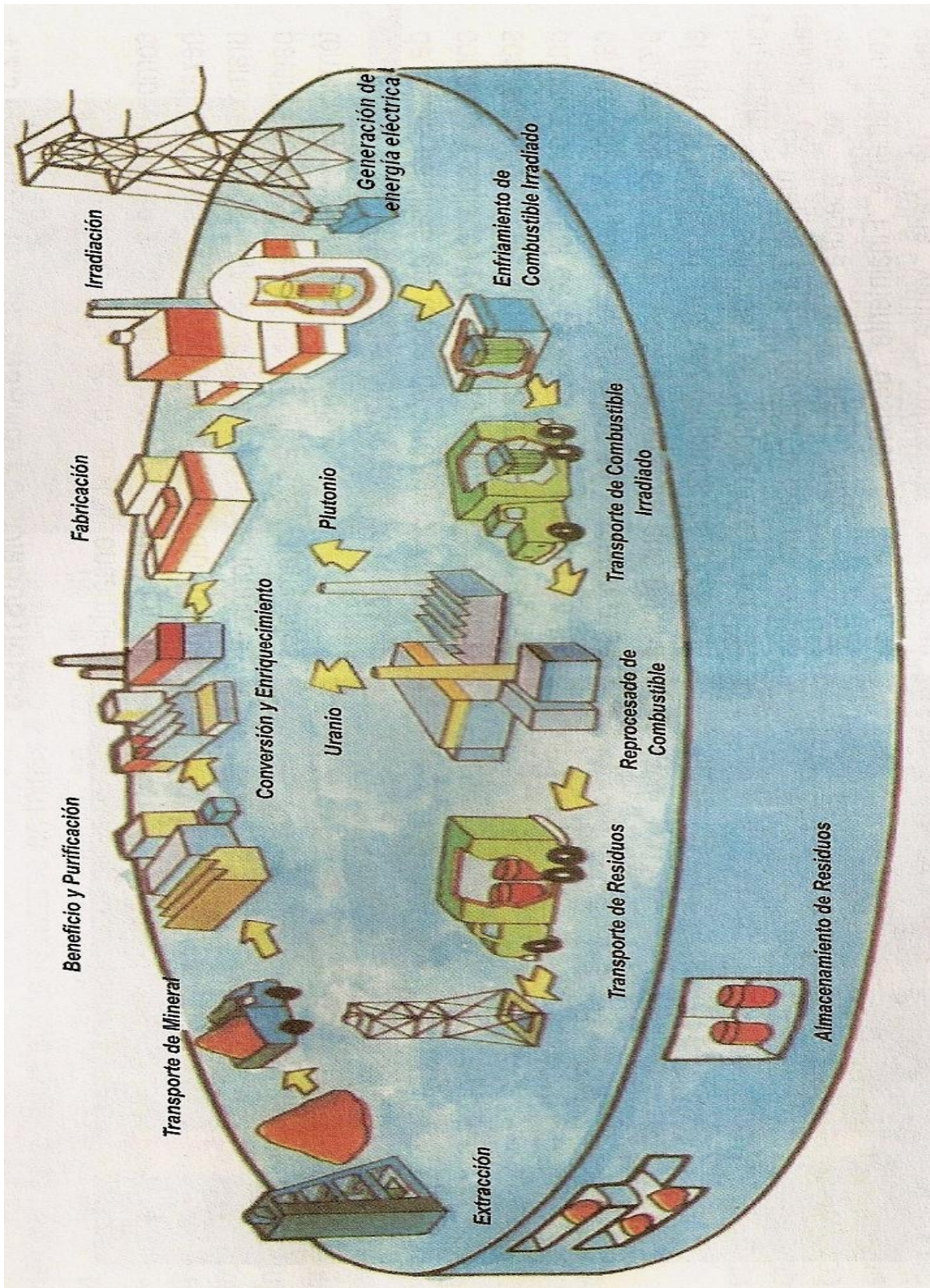


Figura 1.20 Ciclo de generación eléctrica por medio de energía nuclear de fisión²⁴

²⁴ Imagen adaptada de: Comisión Federal de Electricidad "Del Fuego a la Energía Nuclear" (2004) 5ta. edición Pag. 17

1.3 El aspecto social

Aunque la energía nuclear era conocida por los principales grupos de científicos prestigiados internacionalmente, el 6 de agosto de 1945, la energía nuclear se dio a conocer ante los ojos de la humanidad; el mundo vio el primer acto del poder del núcleo, cuando la explosión de una bomba totalmente desconocida hasta entonces causó cientos de miles de muertos y heridos en Hiroshima, Japón. Lamentablemente, el hecho tendría su segundo acto apenas tres días después, en Nagasaki, otra ciudad de Japón. Ese es, para muchos defensores de la energía nuclear, el pecado original con el que ésta “nació”, aunque en realidad ya había nacido pero no era conocida fuera del ámbito científico. Esta forma de energía, al igual que todas las formas de energía anteriormente descubiertas, no pudo escapar de tener una aplicación bélica. Cualquier sustancia, herramienta, aparato, o forma de energía ha tenido su desafortunada aplicación como arma mortal. Podemos mencionar armas nucleares pero también podemos mencionar armas biológicas, armas químicas, espadas, cuchillos, pistolas, cañones, catapultas, etc., se habla hasta de armas solares.

El Proyecto Manhattan permitió el desarrollo tecnológico de los reactores nucleares, que al término de la Segunda Guerra Mundial fueron utilizados para la generación de energía eléctrica. Estados Unidos, país que lanzó la bomba atómica, se convirtió en el más entusiasta publicista del uso de la energía nuclear para generar energía eléctrica. Con su programa “Átomos para la paz” se dio a la tarea de difundir por el mundo la tecnología nuclear. En 1957, la Organización de las Naciones Unidas creó la Agencia Internacional de Energía Atómica, la principal promotora de la industria nuclear con “fines pacíficos”.²⁵

Aún y cuando se ha promovido el uso de la tecnología nuclear con fines pacíficos, muchos países han dedicado una gran parte de la investigación al desarrollo de armamento nuclear, esta etapa se vivió principalmente en la guerra fría, cuando las dos superpotencias mundiales Estados Unidos y la URSS mantuvieron un enfrentamiento ideológico, político y de desarrollo militar, dicho desarrollo estaba basado principalmente en la producción de armamento nuclear. En varias ocasiones, este enfrentamiento estuvo a punto de desembocar en una guerra nuclear entre las dos potencias. La situación mantuvo a la humanidad preocupada y en constante tensión e incrementó el miedo que se tenía por la energía nuclear.

Uno de los grandes temores de la sociedad, es la proliferación de armas nucleares; Se ha comprobado que gracias a la adquisición y desarrollo de reactores nucleares para programas de investigación o de producción de energía eléctrica, diversos países lograron obtener material para fabricar armamento atómico. Resaltan los casos de China, India, Pakistán e Israel.²⁶

La guerra fría llegó a su fin. En los años posteriores más países lograrían desarrollar armas nucleares; sin embargo, cabe resaltar que, desde el 9 de agosto de 1945, nunca más se ha detonado un arma nuclear con la finalidad de causar la muerte.

En 1971 un grupo de de activistas antinucleares canadienses, que protestaban contra las pruebas nucleares que los Estados Unidos llevaban a cabo en el archipiélago de Amchitka (Alaska) al norte

²⁵ La amenaza nuclear. (2006) Recuperado el 7 de enero de 2008 de:
<http://www.greenpeace.org/mexico/campaigns/energ-a-y-cambio-climatico/la-amenaza-nuclear>

²⁶ Ibid.

de Canadá, fundó un movimiento ecologista que más tarde recibiría el nombre de Greenpeace. Entre muchos de sus objetivos se encuentra el de acabar con el uso de la energía nuclear tanto como para la generación de energía eléctrica, como también para el desarrollo de armas nucleares. Greenpeace ha sido una de las organizaciones que más se ha opuesto al desarrollo de la energía nuclear y se ha valido del miedo que provocaron en la gente las bombas sobre Japón en la segunda guerra mundial, como también del que ha provocado accidentes en algunas plantas de generación de energía eléctrica, para orquestar su campaña en contra de la energía nuclear en todo el mundo.

Otro de los argumentos que maneja Greenpeace, es el problema del manejo de los residuos de la industria nuclear. Por otra parte, el accidente de Chernobil, ocurrido en 1986, ha servido como bandera para los antinucleares para cuestionar la seguridad de la energía nuclear; sin embargo, también ha servido considerablemente para mejorar las normas de operación de los reactores nucleares existentes hacia una mayor seguridad y para mejorar el diseño de los nuevos reactores posteriores a ese accidente.

Mientras que el problema de los desechos radiactivos es bastante preocupante ya que no existe alguna manera económicamente viable de que puedan ser eliminados, gobiernos y compañías se dedican a buscar "lugares adecuados" para confinarlos.²⁷ Aunque para sus defensores, si bien es cierto que el almacenamiento definitivo de los desechos radiactivos es costoso por las medidas de seguridad que conlleva, no es imposible ni causa problemas insolubles.

Muchos son los movimientos en contra del desarrollo de la energía nuclear en todo el mundo y en general podemos hablar de un cierto rechazo general de la población, pues catalogan a la energía nuclear, en parte por su "pecado original", en parte por el accidente de Chernobil, en parte por la proliferación de armamento nuclear y en otra gran parte por la influencia de los movimientos ambientalistas como el de Greenpeace, como una energía sumamente peligrosa y que en cualquier momento puede causar la destrucción total de la humanidad.

Lo que es cierto es que los adelantos en las tecnologías creadas para las medidas de seguridad en las centrales nucleoelectricas, están en constante mejora y se puede aseverar con toda certeza de que es la industria que más invierte en medidas de seguridad y protección; por lo tanto, estamos hablando de que la generación de la energía eléctrica, encuentra en la energía nuclear, una de las formas más seguras y confiables. En cuanto a los residuos nucleares actualmente se han iniciado estudios para destruirlos parcialmente con aceleradores nucleares. Con estos aceleradores se pueden estudiar el interior de los núcleos y también se los puede transmutar. Las transmutaciones inducidas por las máquinas aceleradoras podrían permitir en el futuro la eliminación de los residuos de alta actividad nuclear.²⁸ Otra nueva línea de investigación se basa en reactores de fusión utilizados específicamente como fuente de neutrones de alta energía que pueden transmutar los átomos radiactivos y convertirlos en átomos más estables. En este caso el reactor de fusión puede ser una máquina relativamente pequeña en la que no se logra la reacción de fusión autosostenida, pero se producen fusiones gracias a la aplicación de energía externa para producir las condiciones de fusión con el objeto de producir neutrones de energía adecuada para transmutar gran variedad de

²⁷ Ibid.

²⁸ Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson (2004) Panorama de los fenómenos nucleares. Obtenido el 7 de enero de 2008 de:

http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/CAPITULO_1_Difusion/EL_TEMA_NUCLEAR/Panorama_de_los_fenomenos_nucleares.htm

átomos entre los cuales se encuentran los contenidos en el combustible gastado en los reactores de fisión nuclear.

A partir de los accidentes nucleares que se han presentado, el hombre ha aprendido de sus errores y ha desarrollado nuevos métodos y tecnologías para evitarlos. Toda actividad humana, y particularmente la industrial, tiene riesgos asociados que el avance tecnológico va superando. La industria nuclear no escapa a la regla y no podemos negar su aporte positivo e insustituible al progreso de la humanidad... Más allá de su pecado original.



CAPÍTULO 2

Introducción a la Física Nuclear

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO

Capítulo 2

2 Introducción a la Física Nuclear

2.1 Conceptos básicos²⁹

2.1.1 Electrón

El electrón tiene una masa en reposo $m_e = 9.10954 \times 10^{-31}$ kg y una carga eléctrica de $e = 1.60219 \times 10^{-19}$ C. Existen dos tipos de electrones uno con carga negativa $-e$ y otro con carga positiva $+e$. Excepto por la diferencia en los signos de la carga, estas dos partículas son idénticas. Los electrones negativos o negatrones, como son llamados en ocasiones, son los que encontramos normalmente en el mundo. Los electrones positivos, o positrones, son relativamente raros. Cuando, bajo ciertas circunstancias, un positrón choca con un negatrón, los dos electrones desaparecen y son emitidos dos fotones.

2.1.2 Protón

Esta partícula tiene una masa en reposo $m_p = 1.67265 \times 10^{-27}$ kg y cuenta con una carga eléctrica positiva igual en magnitud a la carga del electrón. Se han descubierto también protones con carga negativa, pero esas partículas no tienen importancia en la ingeniería nuclear.

2.1.3 Neutrón

La masa del neutrón es ligeramente más grande que la masa del protón $m_n = 1.67495 \times 10^{-27}$ kg y es eléctricamente neutro. El neutrón es una partícula inestable, excepto cuando se encuentra confinado dentro de un núcleo atómico. Un neutrón decae a un protón con la emisión de un electrón (partícula β^-) y un antineutrino, proceso que toma en promedio 12 minutos.

2.1.4 Fotón

Partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético. Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio. El fotón tiene una masa en reposo de cero y viaja en el vacío con una velocidad constante c ($c = 2.9979 \times 10^8$ m/s) Como todos los cuantos, el fotón presenta tanto propiedades corpusculares como ondulatorias ("dualidad onda-corpúsculo") Se comporta como una onda en fenómenos como la refracción que tiene lugar en una lente, o en la cancelación por interferencia destructiva de ondas reflejadas; sin embargo, se comporta como una partícula cuando interacciona con la materia para transferir una cantidad fija de energía.

²⁹ John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta. Introduction to Nuclear Engineering. 3rd edition, New Jersey, Prentice-Hall, 2001, ISBN 0-201-82498-1

2.1.5 Neutrino

Es otra partícula cuya masa en reposo es cero y no posee carga eléctrica, aparece en el decaimiento de ciertos núcleos. Existen al menos seis tipos de neutrinos, de los cuales sólo dos son importantes en los procesos nucleares y de interés en la ingeniería nuclear. No es necesario hacer una distinción entre estos tipos y en la ingeniería nuclear frecuentemente son llamados neutrinos.

2.1.6 Masa atómica³⁰

Por acuerdo internacional, la masa atómica es la masa de un átomo, en unidades de masa atómica (uma) Una unidad de masa atómica se define como una masa exactamente igual a un doceavo de la masa de un átomo de carbono-12. El carbono-12 es el isótopo del carbono que tiene seis protones y seis neutrones. Al fijar la masa del carbono-12 como 12 uma, se tiene el átomo que se utiliza como referencia para medir la masa atómica de los demás elementos. Por ejemplo, ciertos experimentos han demostrado que, en promedio, un átomo de hidrógeno tiene sólo 8.400% de la masa del átomo del carbono-12. De modo que si la masa de un átomo de carbono-12 es exactamente 12 uma, la masa atómica del hidrógeno debe ser 0.084×12 uma; es decir, 1.008 uma.

Sin embargo, cuando se busca la masa atómica del carbono en una tabla periódica, se encontrará que su valor no es 12 uma, sino 12.01 uma. La razón de esta diferencia es que la mayor parte de los elementos de origen natural tienen más de un isótopo. Esto significa que al medir la masa atómica de un elemento, por lo general se debe establecer la masa promedio de la mezcla natural de los isótopos; es decir, un promedio ponderado. Por ejemplo la abundancia natural del ^{12}C y del ^{13}C es de 98.90% y 1.10%, respectivamente. Se ha determinado que la masa atómica del carbono-13 es de 13.00335 uma. Así, la masa atómica promedio del carbono se calcula como sigue:

$$\text{masa atómica del carbono} = (0.9890)(12.00000[\text{uma}]) + (0.0110)(13.00335[\text{uma}]) = 12.01[\text{uma}]$$

Es importante entender que cuando se dice que la masa atómica del carbono es de 12.01 uma, se hace referencia a un valor promedio. Si los átomos de carbono se pudieran examinar de manera individual, se encontrarían átomos con masa atómica de 12.00000 o bien de 13.00335 uma, pero ninguno de 12.01 uma.

2.1.7 Número de Avogadro y masa molar de un elemento³¹

En el SI, el mol es la cantidad de una sustancia que contiene tantas entidades elementales (átomos, moléculas u otras partículas) como átomos hay exactamente en 12 g del isótopo de carbono-12. El número real de átomos en 12 g de carbono-12 se determina experimentalmente. Este número se denomina número de Avogadro (N_A) en honor del científico italiano Amedeo Avogadro. El valor comúnmente aceptado es:

$$N_A = 6.0221367 \times 10^{23}$$

³⁰ Raymond Chang Williams. Química. 9ª edición. México. Editorial Mc Graw Hill, 2007. ISBN -13 978-0-07-298060-8

³¹ Ibid.

Así, igual que una docena de naranjas contiene 12 naranjas, 1 mol de átomos de hidrógeno contiene 6.022×10^{23} átomos de H.

Se ha visto que 1 mol de átomos de carbono-12 tiene una masa exactamente de 12 g y contiene 6.022×10^{23} átomos. Esta cantidad de ^{12}C es su masa molar y se define como la masa (en gramos o kilogramos) de 1 mol de unidades (como átomos o moléculas) de una sustancia. Observe que la masa molar del ^{12}C (en gramos) es numéricamente igual a su masa atómica expresada en uma. De igual forma sucede con cualquier otro elemento. Si se conoce la masa atómica de un elemento, también se conoce su masa molar.

Una vez que se conocen la masa molar y el número de Avogadro, es posible calcular la masa, en gramos, de un solo átomo de carbono-12. Por ejemplo, se sabe que la masa molar del carbono-12 es 12 g y que hay 6.022×10^{23} átomos de carbono-12 en 1 mol de sustancia; por tanto, la masa de un átomo de carbono-12 está dada por

$$\frac{12.00 \text{ g de átomos de carbono} - 12}{6.022 \times 10^{23} \text{ átomos de carbono} - 12} = 1.993 \times 10^{-23} \text{ g}$$

Debido a que la masa de todo átomo de carbono-12 es exactamente 12 uma, el número de unidades de masa atómica equivalente a 1 gramo es:

$$\frac{\text{uma}}{\text{gramo}} = \frac{12 \text{ uma}}{1 \text{ átomo de carbono} - 12} \times \frac{1 \text{ átomo de carbono} - 12}{1.993 \times 10^{-23} \text{ g}}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} 1 \text{ g} &= 6.022 \times 10^{23} \text{ uma} \\ 1 \text{ uma} &= 1.661 \times 10^{-24} \text{ g} \end{aligned}$$

Ejemplo:

¿Cuántos átomos hay en 16.3 g de azufre?

Solución:

$$\begin{aligned} 1 \text{ mol de S} &= 32.07 \text{ g de S} \\ 1 \text{ mol} &= 6.022 \times 10^{23} \text{ átomos} \end{aligned}$$

$$\text{átomos de S} = 16.3[\text{g}] \times \frac{1[\text{mol}]}{32.07[\text{g}]} \times \frac{6.022 \times 10^{23}[\text{átomos}]}{1[\text{mol}]} = 3.06 \times 10^{23}[\text{átomos}]$$

2.1.8 Masa molecular³²

Es posible calcular la masa de las moléculas si se conocen las masas atómicas que las forman. La masa molecular es la suma de las masas atómicas (en uma) en una molécula. Por ejemplo, la masa molecular del H₂O es

$$2 \text{ (masa atómica del H) + masa atómica del O}$$

o bien

$$2 \text{ (1.008 uma) + 16.00 uma = 18.02 uma}$$

En general, es necesario multiplicar la masa atómica de cada elemento por el número de átomos de ese elemento presente en la molécula y sumar todos los términos de los elementos.

2.1.9 Energías química y nuclear³³

En los cambios físicos, las sustancias mantienen su naturaleza y sus propiedades esenciales; es decir, siguen siendo las mismas sustancias. Si doblamos o arrugamos un papel, cambia de aspecto pero sigue siendo papel. Decimos que es un cambio físico. Cuando vertemos nitrógeno líquido, éste hierve vivamente al adquirir la temperatura ambiente. Se trata de un cambio físico. En la naturaleza se producen gran variedad de cambios físicos, como la dilatación de un metal, los cambios de fase del agua, el movimiento de los coches etc.

Los cambios químicos y nucleares por su parte, están relacionados con dos formas importantes de la energía, ellas son la energía química y la energía nuclear. Junto con las radiaciones electromagnéticas que la tierra recibe del sol, estas dos formas de energía constituyen el grueso de las reservas energéticas de la tierra. Las dos formas están relacionadas de cerca pero tienen diferencias importantes. Junto con la energía térmica, las energías química y nuclear son parte de lo que en termodinámica se llama energía interna que depende de propiedades internas tales como la temperatura, la presión y la composición. Sin embargo, las energías química y nuclear no se transfieren debido a una diferencia de temperatura. Por ejemplo, en la reacción química que permite la formación de una molécula a partir de tres átomos está presente la energía química (ver Figura 2.1 a) La energía de los tres átomos es diferente de la energía de la molécula triatómica, ésta puede tener una energía mayor o menor. En síntesis si los constituyentes químicos en un estado alto de energía pueden intercambiarse por medio de una reacción química a un estado de más baja energía, la diferencia de energías debe aparecer en otra forma. Por ejemplo, una reacción en la que se combinan el carbono y el oxígeno del aire, se oxida el carbón, formando dióxido de carbono y agua. Estos últimos constituyentes se encuentran en un estado de más baja energía; la diferencia, usualmente llamada calor de combustión, se convierte en energía térmica del dióxido de carbono, del agua, del oxígeno no quemado y del nitrógeno (gases de la combustión)

³² Ibid

³³ Thomas J. Connolly. Fundamentos de ingeniería nuclear. Primera edición. México, Editorial Limusa, 1983. ISBN 968-18-1335-9

La liberación de energía de origen nuclear se presenta casi en la misma forma que la liberación de energía química, excepto por que los cambios ocurren en el núcleo de un átomo (ver Figura 2.1 b) Mientras que la energía química está asociada con electrones y enlaces interatómicos en moléculas, la energía nuclear está asociada con la atracción o enlace entre los constituyentes del núcleo. Las fuerzas nucleares son mucho más fuertes que las interatómicas, de tal manera que los cambios de energía en las reacciones nucleares son del orden de un millón de veces más intensas que las reacciones químicas.

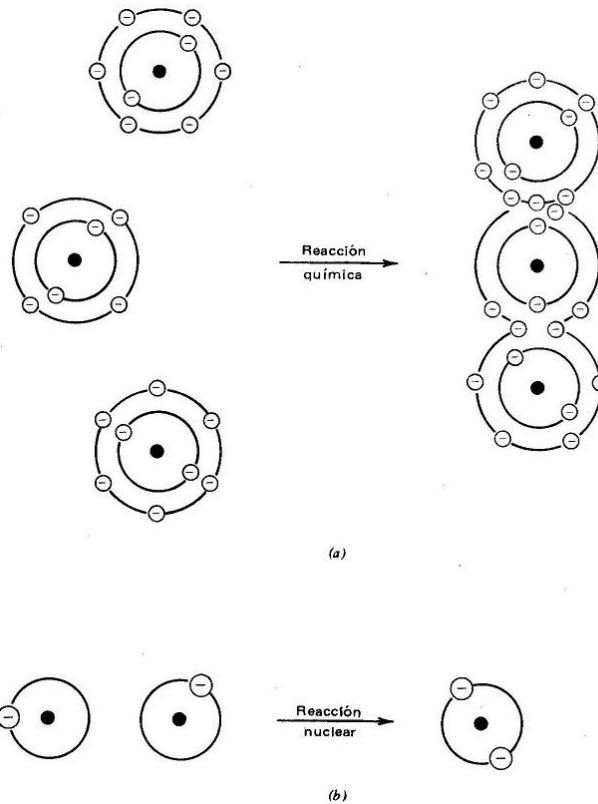


Figura 2.1 Representación microscópica de las reacciones química y nuclear [18]

Por ejemplo, cuando se fisiona el núcleo de un átomo de uranio 235, la energía liberada por átomo es de 200 MeV. ¿Cuánta energía se libera si se fisiona un kilogramo de este uranio?

El número de átomos en un kilogramo de ^{235}U es:

$$1000 \left[\frac{\text{g}}{\text{kg}} \right] \times \frac{1}{235} \left[\frac{\text{mol}}{\text{g}} \right] \times 6.022 \times 10^{23} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{mol}} \right] = 2.563 \times 10^{24} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{kg}} \right]$$

Por lo tanto la energía liberada es:

$$2.563 \times 10^{24} \left[\frac{\text{átomos}}{\text{kg}} \right] \times 200 \times 10^6 \left[\frac{\text{eV}}{\text{átomo}} \right] \times 1.6021 \times 10^{-19} \left[\frac{\text{J}}{\text{eV}} \right] = 8.212 \times 10^{13} \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}} \right]$$

Tanto en las reacciones químicas como en las nucleares, a menudo es difícil hacer que empiece la reacción que permita que ésta ocurra en la dirección del estado de menor energía; se debe emplear un poco de energía (energía de umbral) antes de poder obtenerla. Por ejemplo, un material combustible y el aire, se sabe que se debe suministrar una cantidad de energía externa antes de que empiece la reacción, la cual se sostendrá por sí sola si parte de la energía de la reacción se encuentra disponible para elevar parte del material, que todavía no reacciona, a la energía de umbral, por lo cual se tiene "el problema de ignición". En el caso de la energía nuclear de fusión, el problema de la ignición está resultando ser un obstáculo extraordinariamente difícil en el camino de la aplicación útil de la fusión, el punto será abordado más a detalle en el Capítulo 4.

2.2 Modelo atómico y nuclear³⁴

La estructura atómica puede ser en realidad un tema muy complejo; sin embargo, en la ingeniería nuclear el modelo utilizado es muy simple, se parte del modelo del átomo convencional, el cual consiste de un núcleo rodeado por una nube de electrones en órbita. El núcleo puede verse como un conjunto denso y fuertemente ligado a protones y neutrones; los protones tienen una carga eléctrica positiva igual en magnitud a la de un electrón. Los neutrones no tienen carga eléctrica. La masa del núcleo constituye la mayor parte de la masa total del átomo, pero el núcleo ocupa sólo $1/10^{13}$ del volumen total del átomo.

El radio típico de un átomo es aproximadamente de 100 pm ($1\text{pm} = 1 \times 10^{-12} \text{ m}$) en tanto que el radio del núcleo atómico es sólo de 5×10^{-13} pm. Se puede apreciar la diferencia relativa entre el tamaño de un átomo y su núcleo. Cabe aclarar; sin embargo, que el concepto de radio atómico tiene utilidad experimental, pero no debe suponerse que los átomos tienen dimensiones o superficies bien definidas; las regiones externas de los átomos son relativamente "difusas".

Al número de protones en el núcleo se le da el nombre de número atómico y se le designa con una Z. Al número de neutrones en el núcleo se le designa con una N. Una cantidad más es la suma, $Z+N$, la cual se designa con una A, y recibe el nombre de número de masa. A los neutrones y protones, constituyentes del núcleo, se les llama nucleones.

$$A = Z + N$$

en donde:

A = Número de masa = Número de nucleones

Z = Número atómico = Número de protones

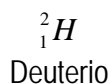
N = Número de neutrones

El número de electrones que giran alrededor del núcleo es igual al número de protones del mismo, lo que hace al átomo eléctricamente neutro. El número atómico, Z, determina las características químicas de un material; todos los átomos con un valor dado de Z pertenecen al mismo elemento químico. La forma aceptada para denotar el número atómico y el número de masa de un elemento X es como sigue:

³⁴ Ibid



No todos los átomos de un elemento determinado tienen la misma masa. La mayoría de los elementos tienen dos o más isótopos, átomos que tienen el mismo número atómico pero diferente número de masa. Por ejemplo, existen tres isótopos del hidrógeno. Uno de ellos, que se conoce como hidrógeno o protio, tiene un protón y no tiene neutrones. El isótopo llamado deuterio contiene un protón y un neutrón, y el tritio tiene un protón y dos neutrones.



Como otro ejemplo, consideraré dos isótopos comunes de uranio, con número de masa 235 y 238, respectivamente:



Las propiedades químicas de un elemento están determinadas, principalmente, por los protones y electrones de sus átomos; los neutrones no participan en los cambios químicos en condiciones normales. En consecuencia, los isótopos del mismo elemento tienen un comportamiento químico semejante, forman el mismo tipo de compuesto.

2.3 Conceptos básicos de física nuclear³⁵

2.3.1 Relación entre la masa y la energía

Debido al trabajo realizado por Albert Einstein, se reconoció que la masa y la energía no son propiedades independientes, aunque se puede tratar así para muchos propósitos prácticos. Toda energía tiene asociada una masa y, recíprocamente toda masa tiene su energía equivalente. Las ecuaciones básicas son:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$E = mc^2$$

Donde:

m_0 = masa en reposo de un objeto ($v = 0$)

m = masa del mismo objeto cuando tiene una velocidad v

c = velocidad de la luz en el vacío (2.998×10^8 m/s)

E = energía total relativista

³⁵ Ibid

La implicación de estas ecuaciones es que si un objeto se encuentra en movimiento, tiene una mayor masa que cuando está en reposo. Si un objeto tiene la suficiente velocidad o energía cinética para incrementar su masa en reposo, en forma significativa, entonces se dice que es relativista.

Pero la energía cinética, T , tiene una forma diferente, puesto que la energía cinética es la que posee un objeto como resultado de su velocidad:

$$T = mc^2 - m_0c^2$$

$$T = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)}} - 1 \right)$$

El término en el paréntesis se puede desarrollar para dar:

$$T = m_0c^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots - 1 \right)$$

Cuando $v/c \ll 1$, la energía cinética toma su forma no relativista

$$T = \frac{1}{2} m_0 v^2$$

Es común oír la aseveración de que en las reacciones nucleares la masa se convierte en energía, esto es engañoso pues la masa y la energía son equivalentes, la una no se convierte en la otra, no es análogo a decir que la energía potencial se convierte en energía cinética; una desaparece y la otra aparece. La energía y la masa van juntas, si un objeto pierde energía también pierde una masa equivalente. La relación entre la masa y la energía es universal; no está limitada a las reacciones nucleares. Toda la naturaleza obedece las leyes de la relatividad. En muchos casos el efecto relativista es tan pequeño que no se puede observar; la energía por unidad de masa de los reactivos de la mayoría de las reacciones nucleares, por otra parte, es tan grande que los efectos relativistas se observan fácilmente.³⁶

2.3.2 Energía de enlace

La energía de enlace se define como la diferencia de energía entre el núcleo dado y los nucleones, cuando éstos se encuentran en estado libre. La fórmula para la energía de enlace por nucleón del núcleo ${}^A_Z X$ se obtiene:

³⁶ Ibid

$$\text{Energía de enlace} = \frac{NM_n + ZM_H - M_X}{A}$$

En donde M_n es la masa del neutrón, M_H es la masa del átomo de hidrógeno y M_X es la masa del núcleo ${}^A_Z X$. Por lo general, la unidad es el MeV.

En la Figura 2.2 se muestra una gráfica de la energía de enlace contra el número de masa para todos los núcleos. Con la excepción de los importantes zig-zags en el extremo izquierdo, la energía de enlace aumenta con el número de masa, pasa por un máximo y luego disminuye. En el centro tiene la mayor energía de enlace; es decir, es más estable. Las reacciones que tienden a ir hacia el centro, desde cualquiera de los extremos, tendrán a ser reacciones en las que haya producción de energía (Reacciones exotérmicas)

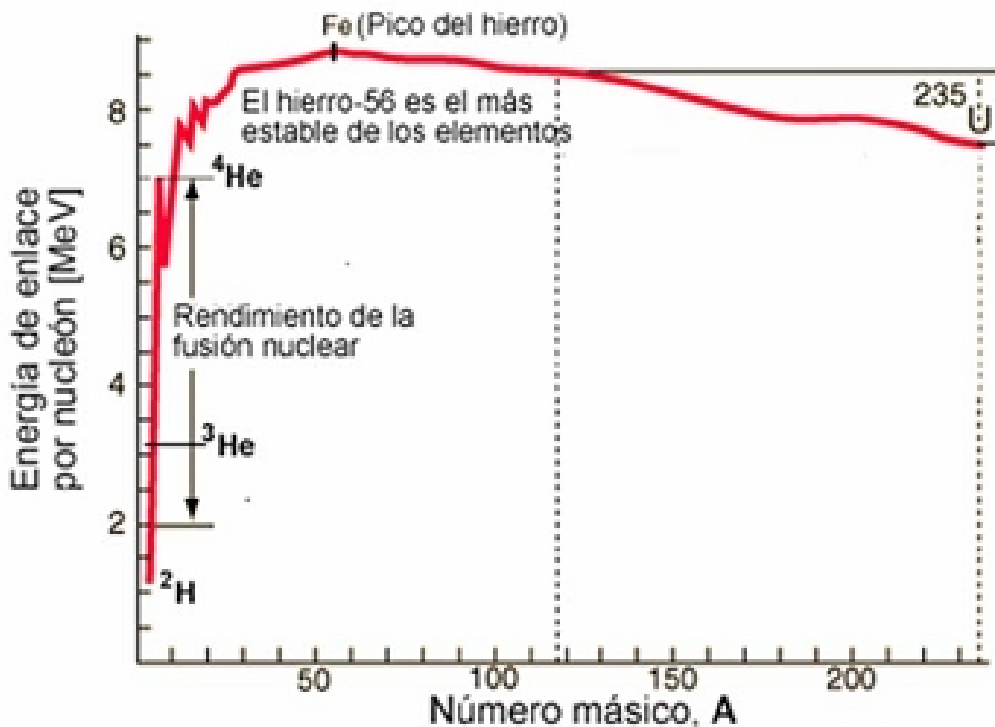


Figura 2.2 La energía de enlace promedio por nucleón en función del número de masa³⁷

2.3.3 La tabla de nucleidos

Un nucleido es el conjunto de todas aquellas posibles especies nucleares de un elemento químico; por ejemplo, los distintos isótopos del uranio forman el nucleido uranio.

³⁷ Imagen recuperada el 25 de enero de 2008 de: http://bp3.blogger.com/_pDhGZA1RQJE/RkteHXDZ14I/AAAAAAAAABM/len-iAi9UQM/s1600-h/Energ%C3%ADa_por_nucle%C3%B3n.png

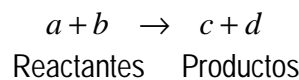
En la Figura 2.3 se expone un fragmento de una tabla de nucleidos, se ve que a cada especie nuclear en particular (o nucleido) se le asigna un cuadro localizado de acuerdo con su número atómico Z, y el número de sus neutrones N. Para localizar el helio, por ejemplo, se busca verticalmente en el renglón Z = 2 o con el símbolo He. En el renglón del helio (Z = 2) se encuentra un cuadro en la extrema izquierda que se designa simplemente con una He y ocho cuadros designados con He - 3 hasta He - 10. El cuadro de la izquierda describe al elemento helio como ocurre en la naturaleza.

	3	² Li 180,34° 1342° +1 6,941 1,86×10 ⁻⁷ %	Li4	Li5 1,5 MeV 3/2-	Li6	Li7	Li8 838 ms 2+	Li9 178,3 ms 3/2-	Li10 1,2 MeV	Li11 8,5 ms 3/2-	Li12
	2	² He -272,29° -268,91° -267,96° 0 4,002602 8,9%	He3	He4	He5 0,60 MeV 3/2-	He6 306,7 ms 0+	He7 160 keV (3/2)-	He8 119,0 ms 0+	He9 0,30 MeV (1/2)-	He10 0,3 MeV 0+	
1	1	¹ H -239,34° -252,87° -240,18° +1-1 1,00794 91,0%	H1	H2	H3 12,33 y 1/2+	H4	H5	H6	6	8	
			n1 614,8 s 1/2+		2	4					

Figura 2.3 Muestra de la tabla de los nucleidos [19]

2.3.4 Nomenclatura de las reacciones nucleares

En la mayoría de las reacciones nucleares se tienen dos partículas o núcleos que interactúan para formar dos núcleos diferentes. Así



Cualquier reacción debe satisfacer el requisito de que la suma de los números atómicos y los números de masa de los reactantes y los productos deben balancearse. En otras palabras:

$$Z_a + Z_b = Z_c + Z_d$$

$$A_a + A_b = A_c + A_d$$

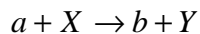
Sin embargo, la masa sí cambia.

Aunque no hay limitaciones teóricas sobre lo que pueden ser los nucleidos a, b, c y d, prácticamente a menudo sucede que ambos lados de la ecuación incluyen un nucleido muy ligero o un electrón, a éstos se les llama "partículas". Las más comunes de éstas se dan en la Tabla 2.1

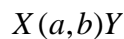
Tabla 2.1 Propiedades de las partículas comunes en las reacciones nucleares

Nombre	Representación formal	Representación común	Masa en reposo [uma]	Carga
Electrón	${}^0_{-1}e$	e^- ó b^-	0.0005486	-1
Positrón	${}^0_{+1}e$	e^+ ó b^+	0.0005486	+1
Neutrón	1_0n	n	1.008665	0
Protón	---	p	1.007277	+1
Protio	1_1H	H	1.007825	+1
Deuterio	2_1H	D	2.014127	+1
Tritio	3_1H	T	3.016049	+1
Alfa	4_2He	a	4.002603	+2

Si se designa a la partícula con letra minúscula, se puede escribir una reacción nuclear en la forma,



En una notación abreviada común



2.4 Radiactividad³⁸

La radiactividad es un fenómeno natural que forma parte del mundo en el que vivimos y que se origina en el núcleo de átomos inestables, llamados radiactivos. Estos átomos emiten radiaciones (decaimiento radiactivo) en forma de partículas o de ondas electromagnéticas, para convertirse en átomos estables.

En general son radiactivas las sustancias que no presentan un balance correcto entre protones o neutrones, tal como muestra el gráfico de la Figura 2.4 el color indica la vida media de los isótopos radiactivos conocidos. Cuando el número de neutrones es excesivo o demasiado pequeño respecto al número de protones se hace más difícil que la fuerza nuclear pueda mantenerlos unidos. Eventualmente el desequilibrio se corrige mediante la liberación del exceso de neutrones o protones, en forma de partículas α que son realmente núcleos de Helio, partículas β que pueden ser electrones o positrones. Estas emisiones llevan a dos tipos de radiactividad mencionados:

- Radiación α , que aligera los núcleos atómicos en 4 unidades másicas, y cambia el número atómico en dos unidades.

³⁸ Thomas J. Connolly. Fundamentos de ingeniería nuclear. Op. Cit.

- Radiación β , que no cambia la masa del núcleo, ya que implica la conversión de un protón en un neutrón o viceversa, y cambia el número atómico en una sola unidad (positiva o negativa, según la partícula emitida sea un electrón o un positrón)

La radiación por su parte se debe a que el núcleo pasa de un estado excitado de mayor energía a otro de menor energía, que puede seguir siendo inestable y dar lugar a la emisión de más radiación de tipo α , β o γ . La radiación γ es por tanto un tipo de radiación electromagnética muy penetrante ya que tiene una alta energía por fotón emitido.

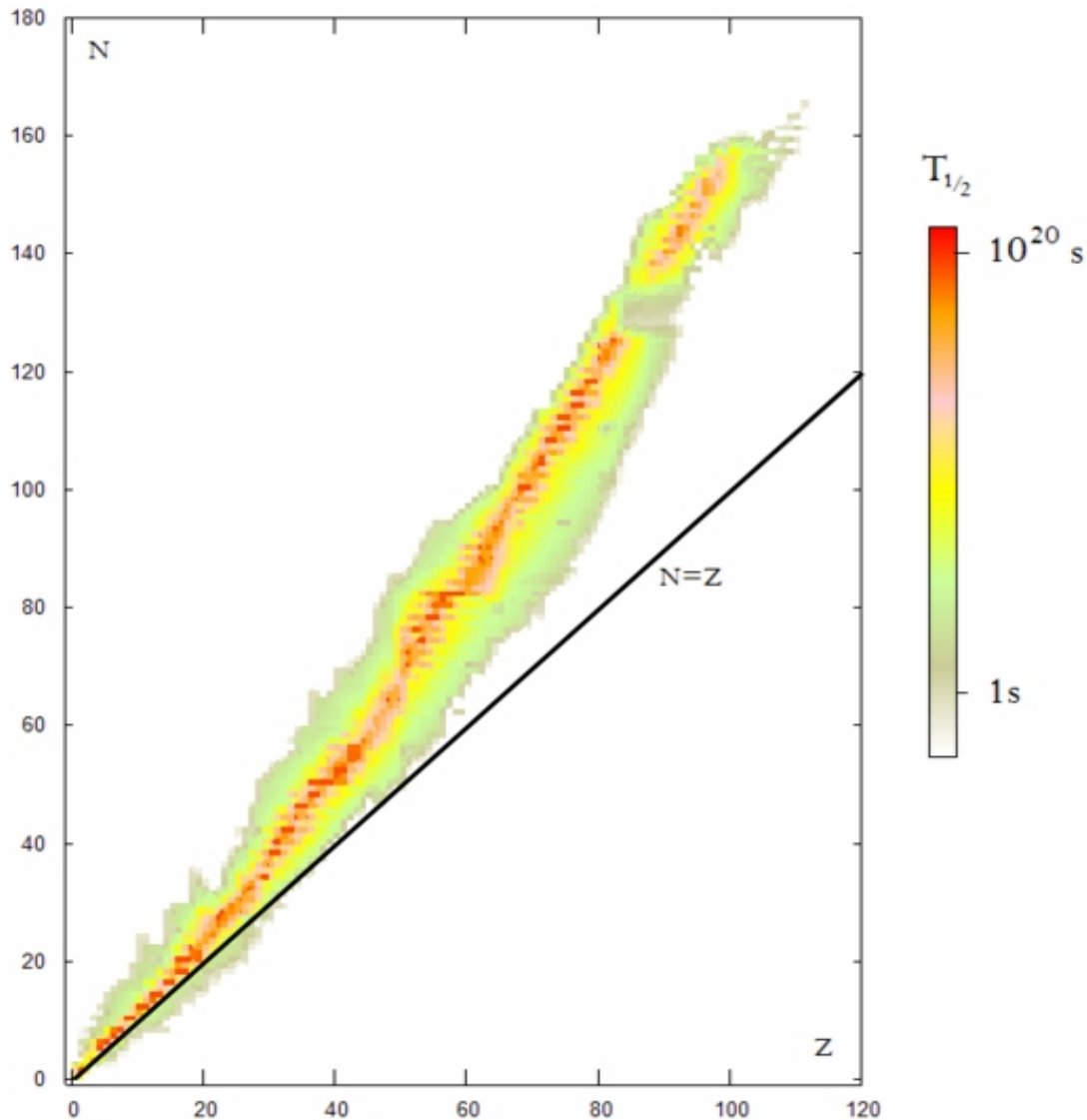


Figura 2.4 Vida media de los isótopos radiactivos conocidos [1]

Las radiaciones pueden ser no ionizantes o ionizantes. Las primeras, como la luz y el calor, no alteran la naturaleza de la materia en la que inciden, a menos que de que su energía sea excesiva, mientras que las segundas, tienen la facultad de ionizar (arrancar electrones de la corteza de los átomos) los átomos de dicha materia. Dentro del espectro electromagnético, la parte de energías más altas corresponde a las radiaciones ionizantes (ver Figura 2.5)



Figura 2.5 Espectro electromagnético [14]

Se conocen varios tipos de radiaciones ionizantes, entre ellas: la radiación alfa (α) la radiación beta (β) la radiación gamma (γ) y los rayos X.

Las radiaciones alfa, beta y gamma provienen de la desintegración de los núcleos y se pueden originar de manera espontánea en la naturaleza, o ser provocadas artificialmente. Los rayos X provienen de las transformaciones que tienen lugar en la corteza de los átomos y son de origen artificial. Los físicos Joliot-Curie demostraron que los átomos estables de un elemento pueden hacerse artificialmente radiactivos bombardeándolos adecuadamente con partículas nucleares o rayos. Estos isótopos radiactivos se producen como resultado de una reacción o transformación nuclear.

- **Radiación alfa:** son flujos de partículas cargadas positivamente compuestas por dos neutrones y dos protones (núcleos de Helio) Son desviadas por campos eléctricos y magnéticos. Son poco penetrantes aunque muy ionizantes y muy energéticos. Al chocar con la materia pierden gradualmente su energía ionizando los átomos y se frenan muy rápidamente, por lo que quedan detenidas con tan sólo unos centímetros de aire o unas milésimas de milímetro de agua. En el cuerpo humano no son capaces de atravesar la piel pudiendo ser absorbidas por una simple hoja de papel. Cuando un átomo radiactivo emite una partícula alfa, la masa del átomo resultante disminuye en 4 unidades y el número atómico en 2.
- **Radiación beta:** son flujos de electrones (beta negativas) o positrones (beta positivas) que viajan a velocidades próximas a la de la luz y que son resultantes de la desintegración de los neutrones o protones del núcleo cuando éste se encuentra en un estado excitado. Es desviada por campos magnéticos. Es más penetrante que la alfa, aunque su poder de ionización no es tan elevado como el de las partículas alfa. Pueden ser absorbidas por una lámina de aluminio de 0.5 mm de espesor, quedan frenadas en algunos metros de aire, o por 1 cm de agua. En el cuerpo humano pueden llegar a traspasar la piel, pero no sobrepasan el tejido subcutáneo. Cuando un átomo expulsa una partícula beta aumenta o disminuye su número atómico una unidad (debido al protón ganado o perdido) y el número de masa atómica se mantiene constante.

- Radiación gamma: son ondas electromagnéticas semejantes a la luz pero de mayor energía. Es el tipo más penetrante de radiación, pudiendo atravesar el cuerpo humano. Al ser ondas electromagnéticas de longitud de onda corta, tienen mayor penetración y se necesitan capas gruesas de plomo o concreto para detenerlos. Cuando un núcleo excitado emite radiación gamma, no varía ni su masa ni su número atómico, solo pierde una cantidad de energía $h\nu$ (donde "h" es la constante de Planck y "nu" es la frecuencia de la radiación emitida)
- Los neutrones proceden de las reacciones de fisión o de reacciones nucleares con otras partículas. Pueden ser muy penetrantes, excepto en agua y en concreto, y se utilizan para producir elementos radiactivos específicos cuando interactúan con determinados elementos estables o radiactivos. Los neutrones son considerados radiaciones no ionizantes.

En la Figura 2.6 se muestra el poder de penetración de las diferentes radiaciones.

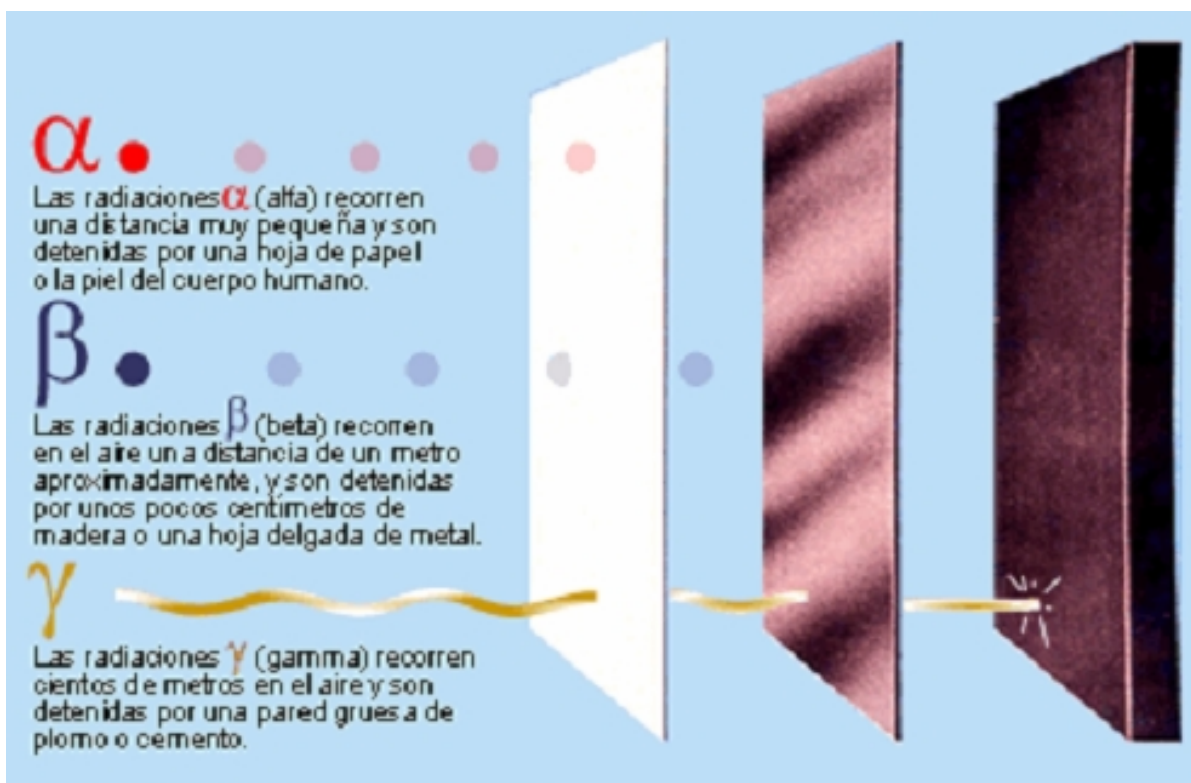


Figura 2.6 Penetración de las partículas α , β , y γ [21]

Cuando un átomo emite una radiación alfa o beta se transforma en otro átomo de un elemento diferente. Este nuevo elemento puede ser radiactivo, pero más estable que del que proviene, transformándose en otro, y así sucesivamente, dando lugar a las llamadas series radiactivas. En la Tabla 2.2 se muestra la cadena radioactiva del uranio 238.

Tabla 2.2 Cadena radiactiva del Uranio 238

Núclido	Modo de desintegración	Periodo de semidesintegración	Energía desprendida (MeV)	Producto de desintegración
U 238	α	4.468·10 ⁹ a	4.270	Th 234
Th 234	β	24.10 d	0.273	Pa 234
Pa 234	β	6.70 h	2.197	U 234
U 234	α	245500 a	4.859	Th 230
Th 230	α	75380 a	4.770	Ra 226
Ra 226	α	1602 a	4.871	Rn 222
Rn 222	α	3.8235 d	5.590	Po 218
Po 218	α 99.98 %	3.10 min	6.115	Pb 214
	β 0.02 %		0.265	At 218
At 218	α 99.90 %	1.5 s	6.874	Bi 214
	β 0.10 %		2.883	Rn 218
Rn 218	α	35 ms	7.263	Po 214
Pb 214	β	26.8 min	1.024	Bi 214
Bi 214	β 99.98 %	19.9 min	3.272	Po 214
	α 0.02 %		5.617	Tl 210
Po 214	α	0.1643 ms	7.883	Pb 210
Tl 210	β	1.30 min	5.484	Pb 210
Pb 210	β	22.3 a	0.064	Bi 210
Bi 210	β 99.99987%	5.013 d	1.426	Po 210
	α 0.00013%		5.982	Tl 206
Po 210	α	138.376 d	5.407	Pb 206
Tl 206	β	4.199 min	1.533	Pb 206
Pb 206	-	estable	-	

2.4.1 La rapidez del decaimiento radiactivo

La desintegración de un cuerpo radiactivo es un proceso estadístico; ello quiere decir que si consideramos un determinado átomo radiactivo no podemos conocer en qué momento tendrá lugar su desintegración, pero si tomamos un número muy grande de átomos de un mismo nucleido, podemos conocer la ley que, como promedio, sigue el conjunto en su desintegración. Se demuestra que la probabilidad de que se desintegre un átomo radiactivo permanece constante a lo largo del tiempo. Ello se traduce en que al desintegrarse una sustancia radiactiva la cantidad de ella que no se ha desintegrado disminuye exponencialmente con el tiempo.

Los núcleos radiactivos pierden con el tiempo su actividad. La actividad se puede expresar en decaimientos o desintegraciones sobre segundo o sobre minuto. Sin embargo, casi siempre la actividad se expresa en curies, Ci. 1 [Ci] = 3.7 x 10¹⁰ [desintegraciones/segundo] (ver Figura 2.7)

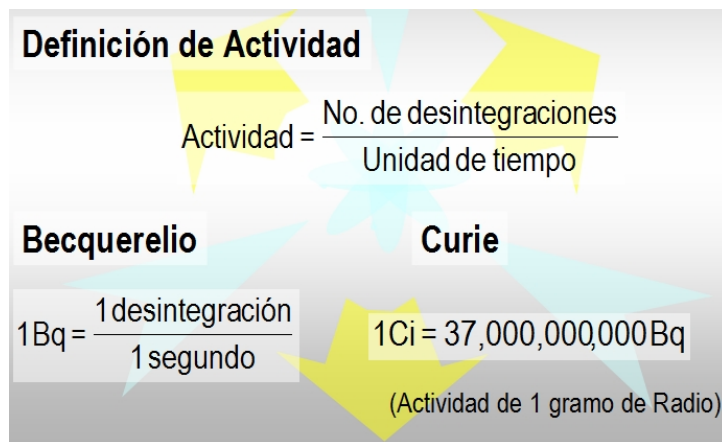


Figura 2.7 Unidades de medida de la actividad [21]

Aunque la constante del decaimiento da una descripción adecuada de la rapidez del decaimiento de un isótopo, no es tan utilizada como la vida media (periodo de semidesintegración) $t_{1/2}$, que se calcula de la siguiente manera:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La vida media está definida como el lapso necesario para que se desintegren la mitad de los núcleos de una muestra inicial de una sustancia radiactiva (Ver Figura 2.8) Esta es la razón por la cual los materiales radiactivos pierden con el tiempo su actividad.

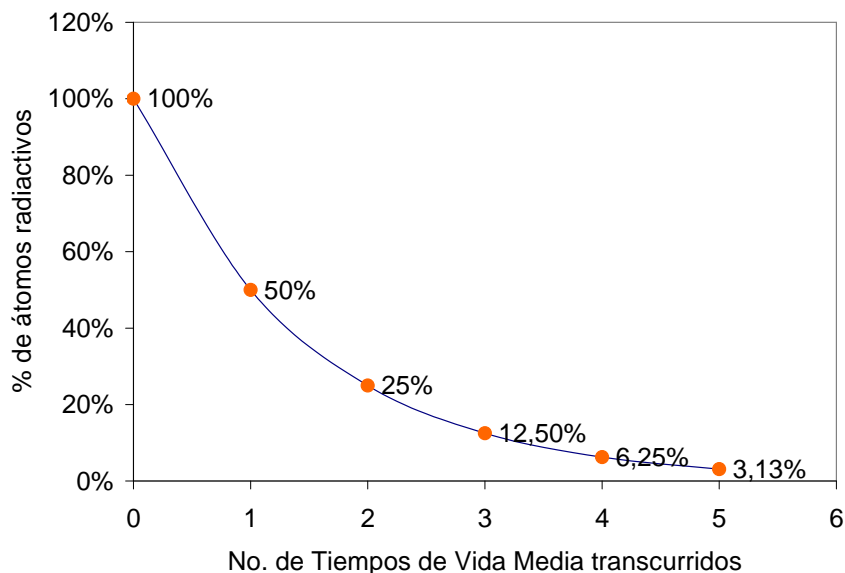


Figura 2.8 Función de decaimiento radiactivo

En las diversas fuentes de datos siempre se informa de la vida media, por ejemplo en la Figura 2.9 se muestran algunas propiedades de los isótopos uranio 238 y uranio 239, tomada de la tabla de nucleidos. De la tabla se sabe que el Uranio 238 tiene una vida media de 4.468×10^9 años y que

decae emitiendo partículas alfa. Por su parte el isótopo de uranio 239, tiene una vida media de 23.45 minutos y decae emitiendo partículas beta.

<p>U238 4.468E+9 y 0+ $\alpha, \beta, \beta^-, sf, \dots$ 99.2745</p>	<p>U239 23.45 m 5/2+ β^-</p>
--	---

Figura 2.9 Isótopos uranio 238 y 239 obtenidos de la tabla de nucleidos [19]

2.4.2 Radiactividad natural y artificial

La radiactividad natural procede de la transformación de los materiales radiactivos que componen la corteza terrestre y de las radiaciones procedentes del espacio exterior, que constituye la radiación cósmica. Esto significa que existe un fondo radiactivo natural desde que se creó nuestro planeta y al que estamos perfectamente adaptados; incluso nuestro propio cuerpo posee ciertos compuestos radiactivos como el potasio 40 (^{40}K) y el carbono 14 (^{14}C)

“En el tiempo que transcurre entre dos latidos del corazón se produce la desintegración radioactiva de casi 10,000 núcleos atómicos. Cada hora en nuestros pulmones desaparecen unos 30,000 núcleos de los isótopos radiactivos presentes en el aire que respiramos. Debido a los alimentos que consumimos. Unos 15 millones de núcleos de potasio 40 y unos 7,000 de uranio natural se desintegran en nuestro estómago e intestinos. El tabaco libera plomo y polonio radiactivos que van a parar a la atmósfera y a nuestros pulmones; quienes fuman un paquete diario reciben tres veces más radiación que la debida al gas radón que hay en nuestro alrededor. Unos días en el mar nos proporcionan un aporte adicional de radiactividad: en un metro cúbico de agua marina se desintegran 10,000 átomos por segundo. A todo esto hay que sumar los más de 200 millones de rayos gamma que nos atraviesan cada hora provenientes del suelo y de los materiales de construcción. Pero además están los cientos de miles de rayos cósmicos secundarios, subproducto de la interacción de las partículas subatómicas emitidas por agujeros negros, las galaxias activas o las explosiones de supernovas con los átomos de la alta atmósfera. Los astronautas, durante los primeros viajes espaciales, comprobaron el impacto de estas partículas en sus retinas, tanto que sus destellos luminosos les impedían dormir de manera apacible.”³⁹

Con cada persona que tenemos cerca, nos exponemos a una actividad de entre 8,500 y 10,000 becquerelios (Bq) o desintegraciones por segundo. Todos somos fuentes radiactivas., y los alimentos tampoco se escapan: todos los días ingerimos isótopos que son fuentes de radiaciones ionizantes, como el potasio 40 y el carbono 14.⁴⁰

³⁹ Sabadell, Miguel Ángel y Vito, Arturo. (2008) "Mundo Radiactivo: La Radiación del Planeta y sus Efectos". *Muy interesante*, Año XXV No. 2. pp. 74-80.

⁴⁰ Ibid

Además existen otros elementos radiactivos de origen artificial; es decir, creados por el ser humano, para ser empleados por actividades tan diversas como la medicina, la industria o la investigación, que son el origen de la actividad artificial.

Son ejemplos de fuentes de radiación creadas por el hombre:

- Rayos-X, diagnósticos y tratamientos de medicina nuclear.
- Detectores de humo, televisores, computadoras.
- Centrales nucleoelectricas.
- Centrales carboelectricas.

En la Figura 2.10 se muestra una imagen de los porcentajes promedio de radiación natural y artificial que recibe el ser humano.



Figura 2.10 Radiación natural y artificial recibida por el ser humano [21]

2.4.3 Efectos biológicos de la radiación

Los efectos de la radiactividad sobre la salud son complejos. Dependen de la dosis absorbida por el organismo. Como no todas las radiaciones tienen la misma nocividad, se multiplica cada radiación absorbida por un coeficiente de ponderación, para tener en cuenta las diferencias. Esto se llama dosis equivalente, que se mide en sieverts, ya que el becquerel considera como idénticas los tres tipos de radiaciones (alfa, beta y gamma). Una radiación alfa o beta es relativamente poco peligrosa fuera del cuerpo. En cambio, es extremadamente peligrosa cuando se inhala o se ingiere. Por otro lado, las radiaciones gamma son siempre dañinas puesto que se las neutraliza con dificultad. El riesgo para la salud no sólo depende de la intensidad de la radiación y la duración de la exposición, sino también del tipo de tejido afectado y de su capacidad de absorción, por ejemplo, los órganos reproductores son 20 veces más sensibles que la piel.

Por otra parte, diversos estudios experimentales realizados en animales y plantas sugieren que las radiaciones pueden llegar a producir trastornos que, aunque no se manifiestan en los individuos expuestos, sí lo hacen en su descendencia; es decir, se trata de efectos hereditarios. Sin embargo,

hasta la fecha, no se ha llegado a demostrar que la radiación sea causa de efectos hereditarios en seres vivos. Los efectos biológicos de las radiaciones ionizantes tienen su causa raíz en los daños que éstas producen a nivel celular, en particular en el ADN, que constituye el blanco fundamental de las células irradiadas. Cuando la radiación interacciona con el ADN, se pueden producir roturas y cambios en su estructura de doble hélice.

Las células del cuerpo más sensibles a la radiación ionizante son las que experimentan división rápida:

- Médula ósea
- Piel
- Órganos reproductivos
- Recubrimiento intestinal
- Todas las células de niños en crecimiento

En contraste, las células de los nervios, músculos, hígado y huesos de adultos son mucho menos sensibles a las radiaciones (porque ya no experimentan división celular)

2.4.4 Fundamentos de la protección radiológica⁴¹

La protección radiológica es una disciplina con bases científicas y aplicaciones técnicas que tiene como objetivo fundamental la protección de las personas y del medio ambiente contra los efectos nocivos que pueden resultar de la exposición a radiaciones ionizantes. La protección radiológica surgió, como una disciplina de estudio, en la década de los 50, a raíz del espectacular desarrollo de las aplicaciones pacíficas de la energía nuclear en los campos de la industria, la medicina y la investigación. Sin embargo, la constatación de que las radiaciones pueden provocar efectos nocivos para la salud de las personas, se dio mucho antes, en 1896, cuando Roentgen descubrió los rayos X y esto puso en evidencia la necesidad de la protección radiológica. El objetivo de la protección radiológica es evitar exposiciones a la radiación que puedan causar daño a la salud de las personas y asegurar que los individuos no reciban exposición a la radiación innecesaria o peligrosa.

No todas las sustancias son igualmente radiactivas ni afectan de la misma manera a nuestro cuerpo. Por ejemplo, una radiación de un curio se puede producir a partir de un solo gramo de radio-226 o con 3.2 toneladas de uranio 238. Pero la medida de la actividad no refleja sus efectos en el organismo; para ello se define el Sievert (Sv) La dosis máxima para los trabajadores expuestos a la radiación es de 0.05 Sv/año, diez veces mayor que la estimada para la población general. Si exponemos nuestro cuerpo a una radiación de 3 Sv, sin recibir tratamiento posterior, hay una probabilidad del 50% de morir en el siguiente mes.

A modo de ejemplo (Figura 2.11) se muestran las tasas de dosis actualmente utilizadas en una central nuclear para establecer los límites de permanencia en cada zona, el personal que puede acceder a ellas y su señalización:

⁴¹ International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources (2007) Obtenido el 25 de junio de 2008 de:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/SS-115-Web/Pub996_web-1a.pdf

Zona	Dosis
Zona gris o azul	de 0,0025 a 0,0075 mSv/h
Zona verde	de 0,0075 a 0,02 mSv/h
Zona amarilla	de 0,02 a 2 mSv/h
Zona naranja	de 2 a 100 mSv/h
Zona roja	> 100 mSv/h

Figura 2.11 Clasificación de tasas de dosis utilizada en una central nucleoelectrica [21]

Los materiales radiactivos están por todas partes, pero nuestra salud no empieza a correr peligro hasta una dosis de 100,000 μ Sv anuales. Los humanos recibimos un promedio de 3,500 μ Sv al año.

Las siguientes son las radiaciones que absorbemos de los elementos del entorno:⁴²

- Rayos cósmicos a nivel del mar 260 μ Sv al año (0.03 μ Sv por hora) La intensidad de la radiación cósmica aumenta con la altitud porque la capa atmosférica se hace más delgada.
- Rayos cósmicos a 10 km de altitud 5 μ Sv por hora de vuelo en avión.
- Rayos cósmicos a 15 km de altitud 10 μ Sv por hora de vuelo en jet.
- Central nuclear 0.1 μ Sv al año si se vive en un radio de 80 km.
- Central Térmica 0.3 μ Sv al año por la combustión del carbón
- Residuos y materiales radiactivos 0.1 μ Sv al año
- Tormentas 1 μ Sv al año
- Granito 500 μ Sv al año
- Agua mineral 400 μ Sv al año por el radón disuelto en ella. Los Animales y las plantas la consumen y pasa a nuestros alimentos.
- Playa 160 μ Sv al año por la arena y las sales minerales del mar.
- Radón del aire 2000 μ Sv al año.
- Alimentos 400 μ Sv al año. El más radiactivo es el marisco.
- Tabaco 400 μ Sv al año por fumar un paquete diario.
- Televisor 10 μ Sv al año (4 horas al día)
- Edificios 70 μ Sv al año Las grietas aumentan el riesgo por inhalación de radón.
- Medicina nuclear 60 μ Sv por una radiografía de pecho y 1100 μ Sv por una TAC.
- Materiales del suelo 450 μ Sv al año por sus minerales.

Sus premisas principales para considerar todas sus recomendaciones, ya sea recomendando o deslegitimando aplicaciones de radiaciones, recomendando límites de dosis, redactando planes de emergencia, planificando actuaciones en caso de emergencia (contramedidas) o cualquier otra, son las siguientes:

⁴² Mundo Radiactivo: La Radiación del Planeta y sus Efectos. Op. Cit.

- Justificación: toda acción recomendada por la protección radiológica siempre estará debidamente justificada, siendo la mejor de las opciones existentes, tanto para el individuo como para la sociedad en su conjunto.
- Optimización: todas las acciones deberán estar realizadas de forma tal que estén hechas en el mejor modo posible según la tecnología existente en el momento y el grado de conocimiento humano que se posea.
- Limitación de dosis: principio reflejado en las siglas ALARA (As Low As Reasonably Achievable, en inglés, o tan bajo como sea razonablemente posible, en español) Aunque una recomendación esté justificada porque el beneficio reportado es mayor que las desventajas, y optimizada según la tecnología, se intentará por todos los medios posibles que la dosis recibida por cualquier individuo o por un colectivo cualquiera, sea lo más baja posible, siempre que las medidas de protección y minimización de dosis no supongan un daño mayor para el individuo o la sociedad. Por ejemplo, es imposible alcanzar un nivel de dosis cero cerca de un aparato de rayos X, el precio de un blindaje que aislara completamente las radiaciones sería infinito. Por eso se dice razonablemente posible.

Las tres reglas fundamentales de protección contra toda fuente de radiación son:

1. Distancia: alejarse de la fuente de radiación, puesto que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia;
2. Blindaje: poner pantallas o barreras protectoras (blindaje biológico) entre la fuente radiactiva y las personas. Por ejemplo, en las industrias nucleares, barreras múltiples protegen a los trabajadores. Las pantallas utilizadas habitualmente son muros de concreto, láminas de plomo o acero y cristales especiales enriquecidos con plomo;
3. Tiempo: disminuir la duración de la exposición a las radiaciones.

Estas medidas de protección radiológica se pueden comparar con las que se toman contra los rayos ultravioletas: utilización de una crema solar que actúa como una pantalla protectora y limitación de la exposición al Sol.

Para las fuentes radiactivas que emitan radiaciones, se deben añadir otras dos recomendaciones adicionales:

1. Esperar, cuando sea posible, el descenso de la actividad radiactiva de los elementos por su decaimiento natural. Por ejemplo, las instalaciones nucleares no se desmantelan inmediatamente después de su detención, para esperar una disminución de la actividad radiológica de las zonas afectadas
2. Ventilar, si existen gases radiactivos. Por ejemplo, en las minas subterráneas de uranio, una ventilación muy eficaz permite mantener una débil concentración de radón en el aire que respiran los mineros.

Los trabajadores que puedan alcanzar niveles de dosis cercanos a los límites legales debido a las radiaciones ionizantes en su trabajo (industrias nucleares, médicos, radiólogos...) suelen llevar dosímetros que miden la cantidad de radiación a la cual han estado sometidos. Estos dispositivos permiten asegurarse de que la persona ha recibido una dosis inferior a la dictada legalmente, o en caso de accidente radiológico, conocer el alcance de la dosis recibida.



CAPÍTULO 3

Fisión Nuclear

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO

Capítulo 3

3 Fisión Nuclear

3.1 Introducción

La palabra “fisión” se aplica a una clase de reacción nuclear que tiene lugar en el núcleo del átomo. La fisión ocurre cuando un núcleo se divide en dos más pequeños y algunos subproductos. Los nuevos núcleos, resultantes del proceso de fisión, serán núcleos más ligeros que el núcleo del que provienen. Los subproductos, por su parte, incluyen neutrones libres, fotones (generalmente rayos gamma) y otros fragmentos del núcleo como partículas alfa y beta.

La fisión ocurre de manera espontánea en algunos cuantos nucleidos (por ejemplo el ^{240}Pu) siguiendo las reglas del decaimiento radiactivo (Capítulo 2.4) Sin embargo, este tipo de nucleidos son muy raros y la rapidez del decaimiento muy baja, por lo que estas reacciones no son importantes como fuentes de energía. La Ingeniería Nuclear se interesa por una subclase de reacciones de fisión que no son espontáneas, aquellas causadas por la interacción de neutrones con un núcleo.

De las tres clases de reacciones nucleares que ofrecen posibilidades como fuentes de energía (decaimiento radiactivo, la fisión nuclear y la fusión nuclear) la fisión es la que en el presente tiene el primer lugar en la cantidad de energía nuclear que realmente se está aprovechando. La fisión en cualquier elemento más pesado que el hierro produce energía, y la fisión en cualquier elemento más liviano que el hierro requiere energía. La fisión de núcleos pesados es un proceso exotérmico lo que supone que se liberan cantidades sustanciales de energía. El proceso genera mucha más energía que la liberada en las reacciones químicas (Capítulo 2.1.9) La energía que se libera en el proceso de fisión se emite, tanto en forma de energía cinética de los productos de la fisión, como en forma de radiaciones beta, gamma y la emisión de neutrones. Se puede calcular un valor Q , para una reacción de fisión; sin embargo, la fisión es toda una serie de reacciones y es necesario obtener algún promedio, también, hay variación de un isótopo fisionable a otro. En general se puede considerar, la energía promedio por fisión como⁴³:

	MeV
Fragmentos de fisión	168
Partículas beta	8
Fotones gamma	19
Neutrones	5
Neutrinos	(12)
	<hr/>
	200

La energía del neutrino no se cuenta porque no es recuperable, el grueso de la energía tiene forma de la energía cinética de los dos fragmentos de fisión (los núcleos productos de la fisión) Estos fragmentos salen de la reacción de fisión como iones. Se frenan muy rápido y su energía se

⁴³ Thomas J. Connolly. Fundamentos de ingeniería nuclear. Op. Cit.

convierte en energía térmica a una distancia de micras del lugar de la fisión. La energía de los fotones gamma y de los neutrones se deposita en un intervalo mucho mayor.

Los núcleos atómicos lanzados como productos de la fisión pueden ser de varios elementos químicos. Los elementos que se producen son resultado del azar, pero estadísticamente el resultado más probable es encontrar núcleos con la mitad de protones y neutrones del átomo fisionado original. Los productos de la fisión son generalmente altamente radiactivos: no son isótopos estables; estos isótopos entonces decaen, mediante cadenas de desintegración (Capítulo 2.4)

3.2 Materiales fisionables, materiales fítiles y materiales fértiles.⁴⁴

El isótopo fisionable se define como aquel en el cual la reacción de fisión puede ser causada por neutrones. El isótopo fítil es aquel en el cual la fisión puede ser causada por neutrones de baja energía, no se requiere que haya un mínimo en la energía del neutrón, los isótopos fítiles son una subclase de los isótopos fisionables.

Muy pocos isótopos son fítiles; los más importantes son el uranio 233, el uranio 235 y el plutonio 239. De éstos sólo el uranio 235 se encuentra en la naturaleza, como el 0.71% del uranio natural, el uranio 238 forma el otro 99.3%, los otros dos isótopos son producto de reacciones con neutrones seguidas de decaimientos beta.

Existen ciertas reacciones de conversión que nos permiten obtener los isótopos ^{233}U y ^{239}Pu , estos dos isótopos se pueden producir de los isótopos ^{238}U y ^{232}Th ; a estos isótopos se les conoce, entonces, como materiales fértiles. En cada una de las dos reacciones, la reacción (n, γ) original conduce a un isótopo con vida media corta (Ver Figura 3.1) que rápidamente decae al isótopo fítil. Los isótopos ^{233}U y ^{239}Pu también son radiactivos, pero tienen vidas medias tan largas que no hay desaparición significativa por medio del decaimiento en tiempos que sean de interés. Además, el torio es tres veces más abundante en la corteza terrestre que el uranio y sería más resistente a la proliferación.

⁴⁴ Ibid.

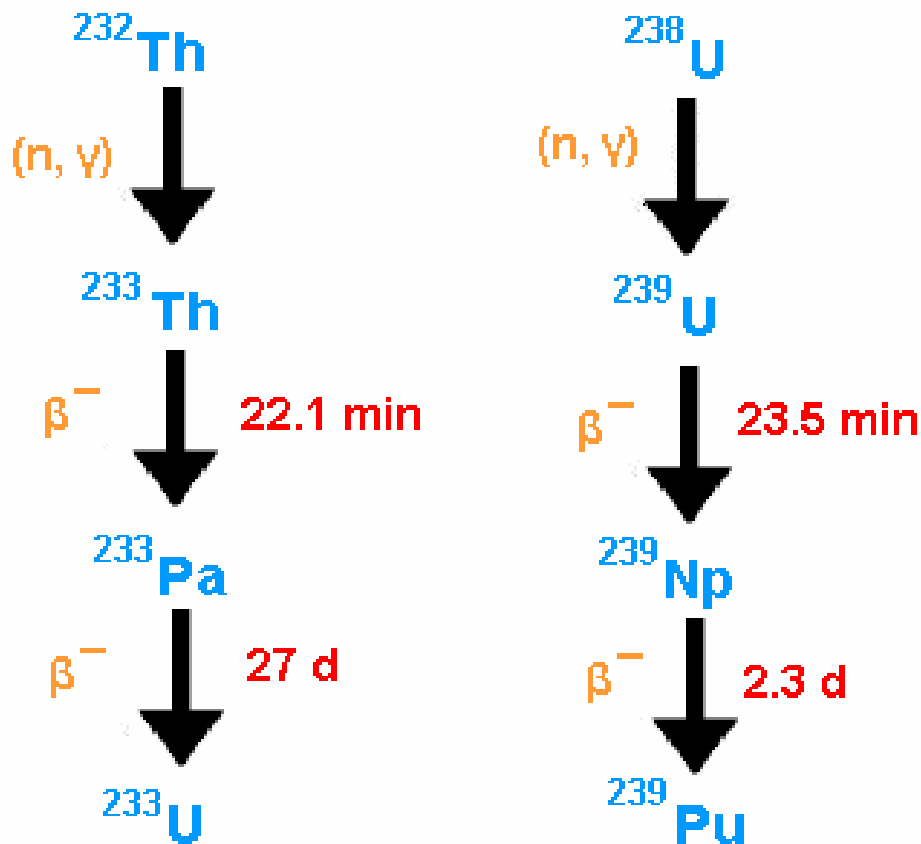


Figura 3.1 Reacciones de conversión del ^{232}Th y ^{238}U

Puesto que el uranio 238 forma el grueso del uranio natural y el torio 232 es el único isótopo del torio natural, las cantidades potenciales de ^{233}U y ^{239}Pu exceden, con mucho a las de ^{235}U . La esperanza de que la energía de fisión sustituya a los combustibles fósiles depende en gran medida, de la conversión del ^{238}U y del ^{232}Th .

3.3 La física de la fisión

Es posible expresar la reacción de fisión con palabras:

Neutrón + Núcleo \rightarrow (Núcleos producto de fisión) + (Neutrones + Radiación beta + Fotones gamma)

En la Figura 3.2 se expone esquemáticamente la reacción de fisión; el neutrón penetra en el núcleo (volviéndolo inestable) y por un momento, existe un núcleo compuesto. En esta etapa, es posible que dicho núcleo decaiga a su estado base con la emisión de radiación gamma. Sin embargo, cuando se realiza la fisión, el núcleo compuesto se parte, usualmente en un par de núcleos. A estos núcleos se les llama productos de fisión, por lo general son radiactivos y decaen por emisión β^- .⁴⁵

⁴⁵ Ibid.

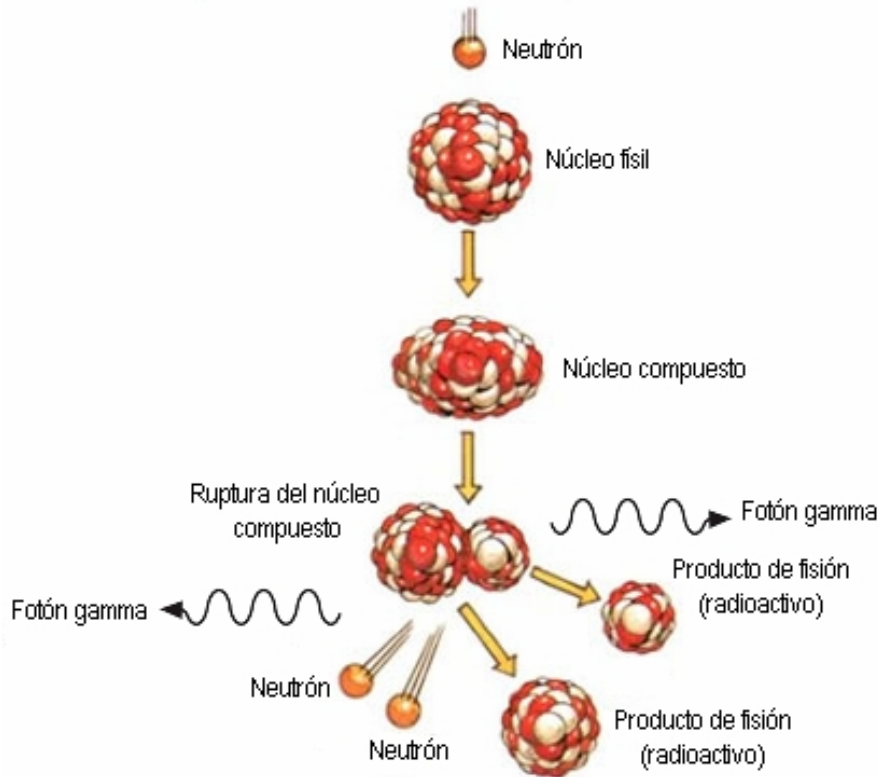


Figura 3.2 Representación esquemática de la reacción de fisión nuclear⁴⁶

3.4 Reacción en cadena

Como había mencionado en el capítulo 2.1.9 para provocar el inicio de una reacción en la dirección del estado de menor energía; se debe emplear un poco de energía (energía de umbral) antes de poder obtenerla. Por ejemplo, un material combustible y el aire, se sabe que se debe suministrar una cantidad de energía externa antes de que empiece la reacción, la cual se sostendrá por sí sola si parte de la energía de la reacción se encuentra disponible para elevar parte del material, que todavía no reacciona, a la energía de umbral. De continuar la reacción en forma sostenida, ésta se mantendrá hasta que el material combustible se termine.

En el caso de una reacción nuclear, haciendo una analogía, el material combustible sería el material fisionable y la energía externa suministrada, un neutrón a cierta velocidad. La reacción se sostendrá por sí sola si los neutrones lanzados a cierta velocidad por el proceso de la fisión, causan la fisión de otros núcleos del combustible.

Una reacción nuclear en cadena, es entonces, una reacción nuclear que se sostiene en el tiempo. La reacción en cadena de fisión ocurre como sigue: un acontecimiento de fisión ocurre y lanza 2 o más neutrones como subproductos. Estos neutrones se escapan en direcciones al azar y golpean otros núcleos, incitando a estos núcleos para experimentar la fisión. Puesto que cada acontecimiento de la fisión lanza 2 o más neutrones, y estos neutrones inducen otras fisiones, el proceso se construye rápidamente y causa la reacción en cadena (ver Figura 3.3)

⁴⁶ Imagen adaptada de: <http://civiliblog.blogcindario.com/2006/04/index.html>

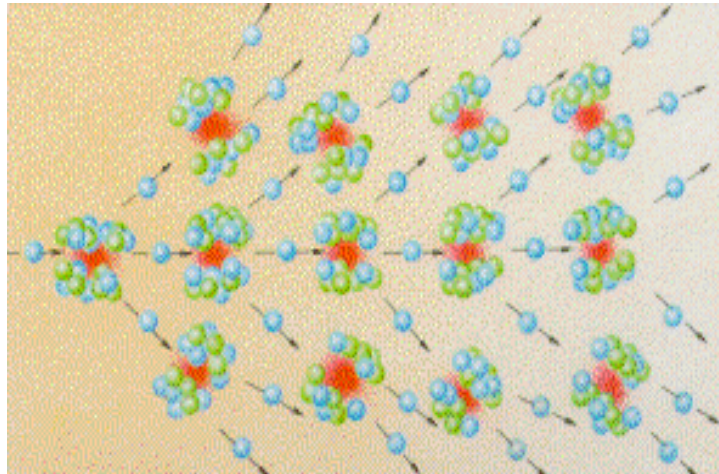


Figura 3.3 Reacción de fisión en cadena [16]

Debe mencionarse que para poder contar con una reacción en cadena, es necesario que, en promedio, un neutrón producido en cada fisión cause una fisión más. Por ejemplo, en la Figura 3.4 se ilustra el proceso de la reacción de fisión en cadena: 1) Un átomo de Uranio-235 absorbe un neutrón, y se divide en 2 nuevos átomos (productos de fisión) dejando libres 3 nuevos neutrones. 2) Uno de los neutrones es absorbido por un átomo de Uranio-238, y no continúa la reacción. Otro neutrón es simplemente perdido y no continúa la reacción. Sin embargo, un neutrón entra en colisión con un núcleo de U-235, que se divide y libera 2 neutrones. 3) Estos 2 neutrones colisionan con 2 átomos de U-235, que se dividen y sueltan de 1 a 3 neutrones, que continúan con la reacción.

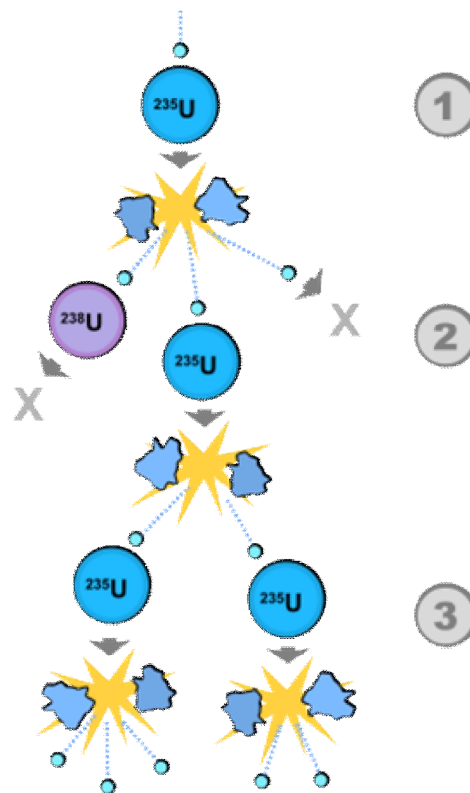


Figura 3.4 Esquema de una reacción en cadena de fisión [16]

Para lograr una reacción en cadena de manera controlada, es necesario emplear una estructura dentro de la cual se pueda conducir dicha reacción de fisión. Esta estructura es conocida comúnmente como reactor nuclear. El reactor nuclear será tratado en el **Capítulo 3.4**; sin embargo, es necesario entender antes, dos conceptos fundamentales para que en el reactor nuclear se pueda lograr una reacción en cadena de fisión nuclear. Dichos conceptos son la masa crítica y el moderador.

3.4.1 Masa crítica

En física, la masa crítica es la cantidad mínima de material necesaria para que se mantenga una reacción nuclear en cadena. La masa crítica de una sustancia fisionable depende de sus propiedades físicas (en particular su densidad) y nucleares (su enriquecimiento y sección eficaz de fisión) su geometría (su forma) y además de si está rodeado o no por un reflector de neutrones. Al rodear a un material fisionable por un reflector de neutrones la masa crítica resulta menor.

La masa subcrítica es una cantidad de masa inferior a la masa crítica, y por ende, incapaz de sostener en el tiempo una reacción nuclear en cadena; al introducir una cierta cantidad de neutrones en un conjunto subcrítico, la población de neutrones disminuirá a lo largo del tiempo por fenómenos de absorción en el material o por fuga y la reacción nuclear de fisión se extinguirá. La masa crítica es la cantidad de material mínima necesaria para mantener una reacción en cadena; "crítico" se refiere a un estado de equilibrio dinámico en la reacción de fisión en cadena. La masa supercrítica, es una cantidad de masa mayor a la masa crítica, "supercrítico" se refiere, entonces, a un sistema en el que la cantidad de procesos de fisión por unidad de tiempo aumenta hasta el punto en que algún mecanismo de realimentación intrínseco hace que el reactor alcance un punto de equilibrio dinámico; es decir, se ponga crítico. También se puede tener una masa supercrítica y aplicar algún efecto de control que disminuya la "supercriticidad" a modo de mantener la reacción en cadena en estado estable; es decir, crítico.

En cuanto a las propiedades físicas, la densidad del material es importante. Si el material es gaseoso, es poco probable que los neutrones choquen con otro núcleo porque hay demasiado espacio vacío entre los átomos, que un neutrón volaría probablemente entre ellos sin golpear nada. Si el material se pone bajo alta presión, los átomos estarán mucho más cercanos y las ocasiones de una reacción en cadena son mucho más altas.

Las propiedades nucleares son también de suma importancia; la masa crítica del uranio depende del grado en que esté presente (enriquecido) el isótopo uranio-235: para un enriquecimiento del 20 % de U-235 la masa crítica es de más de 400 kg; para el 15 % de U-235, la masa crítica excede los 600 kg.⁴⁷

Además también es importante la sección eficaz; en física nuclear, la sección eficaz se define como la probabilidad de interacción entre dos partículas. Es una magnitud de superficie normalmente representada con la letra sigma y se suele medir en barns: $1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$. El diámetro nuclear típico

⁴⁷ John Holdren y Matthew Bunn (2002) Types of Nuclear Bombs, and the Difficulty of Making Them. Recuperado el 30 de octubre de 2008 de:

http://www.nti.org/e_research/cnwm/overview/technical2.asp

es de unos 10^{-12} cm por lo que las secciones eficaces entre núcleos son del orden de 10^{-24} cm² valor al que se le dio una unidad propia, el barn.

La sección eficaz se clasifica en microscópica y macroscópica.⁴⁸

Dentro de la sección eficaz microscópica, encontramos a la sección eficaz de absorción, que es igual a la suma de la sección eficaz de captura más la sección eficaz de fisión.

$$S_A = S_C + S_F$$

Por otra parte también se encuentra la sección eficaz de dispersión.

$$S_S$$

Cuanto más grande sea la sección eficaz de absorción o dispersión de un material, la probabilidad de que exista interacción entre él y los neutrones es más grande. La sección eficaz de absorción de los materiales fisionables, es grande, gracias a esto se logra que el material absorba al neutrón y que entonces después se produzca la reacción de fisión.

Puesto que los neutrones de la fisión se emiten en direcciones al azar, en lo que se refiere a la geometría, la esfera es la forma que requiere menor masa crítica; es decir, es la mejor forma y la peor es probablemente una hoja aplanada, puesto que la mayoría de los neutrones escaparían de la superficie de la hoja y no chocarían con otros núcleos. Además, es posible reducir la masa crítica si se rodea la esfera con un material reflector de neutrones. Al rodear a un material fisible por un reflector de neutrones la masa crítica resulta menor.

En el caso de una esfera desnuda (sin reflector de neutrones) la masa crítica es de más de 50 kg para el uranio-235 y 10 kg para el plutonio-239. En la Figura 3.5 se muestran ejemplos de esferas formadas de material fisible; la figura superior: una esfera de material fisible demasiado pequeña para permitir que la reacción en cadena se auto mantenga debido a que los neutrones generados por la fisión pueden escapar fácilmente del sistema; la figura del centro: al incrementar la masa de la esfera hasta alcanzar la masa crítica la reacción nuclear se auto mantiene; la figura inferior: al recubrir la esfera original por un reflector de neutrones, se aumenta la eficiencia de la reacción y permite que el sistema posea una reacción auto sostenida.

⁴⁸ John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta. *Introduction to Nuclear Engineering*. 3rd edition. New Jersey. Prentice-Hall, 2001. ISBN 0-201-82498-1

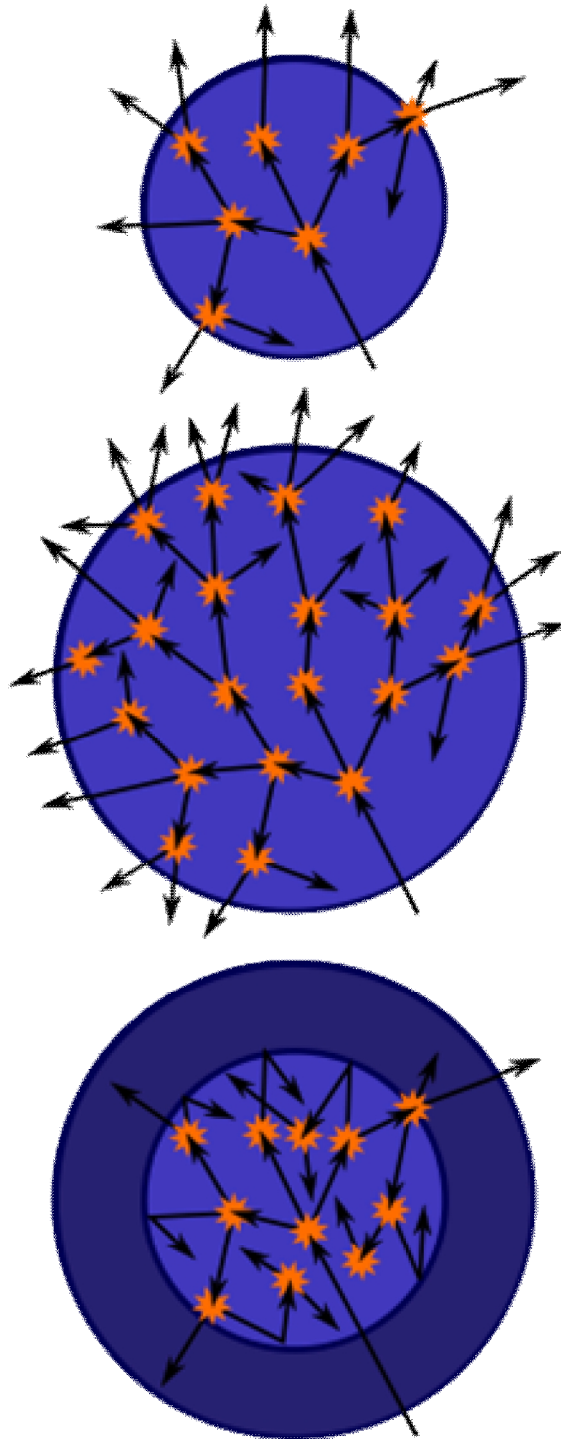


Figura 3.5 Geometría esférica del material fisible [16]

La Tabla 3.1 presenta la masa crítica de esferas desnudas de algunos isótopos con vidas medias de más de 100 años.

Tabla 3.1 Ejemplo de masa crítica de esferas, sin reflector, de algunos isótopos^{49, 50}

Número atómico	Isótopo	Masa Crítica
91	protactinio-231	750±180 kg
92	uranio-233	15 kg
92	uranio-235	52 kg
93	neptunio-236	7 kg
93	neptunio-237	60 kg
94	plutonio-238	9.04–10.07 kg
94	plutonio-239	10 kg
94	plutonio-240	40 kg
94	plutonio-242	100 kg
95	americio-241	55–77 kg
95	americio-242m	9–14 kg
95	americio-243	180–280 kg
96	curio-243	7.34–10 kg
96	curio-244	(13.5)–30 kg
96	curio-245	9.41–12.3 kg
96	curio-246	39–70.1 kg
96	curio-247	6.94–7.06 kg
98	californio-249	6 kg
98	californio-251	5 kg

3.4.2 Moderador

Juntar mucho uranio en un solo lugar no es suficiente como para comenzar una reacción en cadena. Los neutrones emitidos por la fisión nacen a una velocidad muy elevada (20,000 m/s) Esto significa que muy probablemente los neutrones escaparán del núcleo antes de que tengan una oportunidad de golpear cualquier otro núcleo (debido a un efecto relativista) Aún antes de fugarse, a esa velocidad, es poco probable que un átomo de uranio 235 se fisione. Sin embargo, la probabilidad de fisionarse aumenta considerablemente con neutrones de baja velocidad. Ésta es la razón por la cual se utiliza un material moderador en prácticamente todos los reactores nucleares actuales, llamados reactores lentos o térmicos que funcionan con neutrones que han sido frenados hasta energías cercanas a la energía térmica del medio en que se desplazan. El empleo del moderador permite obtener un mejor rendimiento del reactor.

⁴⁹ John Holdren y Matthew Bunn (2002) Op. Cit.

⁵⁰ INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (2005) Evaluation of nuclear criticality safety data and limits for actinides in transport. Obtenido el 31 de octubre de 2008 de:
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/transport/doc/irsn_sect03_146.pdf

La disminución de la velocidad de los neutrones se logra por el choque entre el neutrón y los núcleos de los átomos del material moderador. Tras el choque, una parte de la energía cinética del neutrón se transmite al núcleo de dichos átomos, lo que provoca la disminución de la velocidad del neutrón.

Los buenos materiales moderadores son materiales que poseen masas atómicas bajas (agua, agua pesada) lo que maximiza la energía transferida en cada choque y por consiguiente el desaceleramiento del neutrón, además es importante que los materiales moderadores posean una baja sección eficaz de captura para no absorber los neutrones y una alta sección eficaz de dispersión elástica. Cuanto más parecidas sean las masas del neutrón y de la partícula dispersora, mayor es la pérdida de energía cinética del neutrón. Por lo tanto los elementos ligeros son los más eficaces como moderadores del neutrón. Las características de un buen moderador son: peso atómico bajo, y baja o nula sección eficaz de captura y alta sección eficaz de dispersión. Los moderadores posibles son entonces el hidrógeno, helio, litio, berilio, boro, y carbono. El litio y el boro absorben los neutrones fácilmente, así que se excluyen. El helio es difícil de utilizar porque es un gas y no forma ningún compuesto. La opción de moderadores estaría entonces entre el hidrógeno, deuterio, el berilio y el carbono.

En diciembre de 1942, en la Universidad de Chicago (Estados Unidos) el físico italiano Enrico Fermi logró producir la primera reacción nuclear artificial en cadena. Para ello empleó un conjunto de bloques de uranio natural distribuidos dentro de una gran masa de grafito puro (una forma de carbono) En la "pila" o reactor nuclear de Fermi, el "moderador" de grafito frenaba los neutrones y hacía posible la reacción en cadena.

Se verá más adelante que la nueva generación de reactores nucleares funciona mejor con neutrones a altas energías por lo que se evita utilizar en el núcleo materiales que actúen como moderadores.

3.5 El reactor de fisión nuclear

Es una instalación física donde se produce, mantiene y controla una reacción nuclear en cadena. Se puede utilizar para la obtención de energía, la producción de materiales fisionables, como el plutonio, para ser usados en armamento nuclear, la propulsión de buques o de satélites artificiales o para investigación.

Los reactores productores de radioisótopos son utilizados precisamente para producir una gran variedad de radioisótopos que tienen una infinidad de aplicaciones en la industria, en la agricultura y conservación de alimentos, en la medicina y en los estudios de contaminación ambiental.

Los reactores de investigación son utilizados para investigar sobre las propiedades de los materiales (entre ellos los materiales que serán utilizados en los reactores de potencia) para aplicaciones de neutrografías y para realizar un sin fin de experimentos relacionados con la neutrónica y la termohidráulica de componentes de los reactores de potencia.

Los reactores de potencia son especialmente diseñados para generar potencia; es decir, para producir trabajo mecánico que puede ser utilizado para generar energía eléctrica o para la propulsión de submarinos y transatlánticos. Los reactores nucleares no requieren de oxígeno (pues no llevan a cabo procesos de combustión) lo cual representa una gran ventaja para ser utilizados en los

submarinos. Sin embargo, los reactores nucleares de potencia para la generación de energía eléctrica representan la mayor aplicación energética de la energía nuclear para beneficio de la humanidad.

Una nucleoelectricidad es una central térmica de producción de energía eléctrica. Convierte calor en energía eléctrica. La conversión se realiza en tres etapas:

- a. La energía del combustible se utiliza para producir vapor a elevada presión y temperatura.
- b. La energía del vapor se transforma en movimiento de una o más turbinas.
- c. El giro del eje de la turbina se transmite a un generador que produce energía eléctrica.

Las centrales nucleoelectricas, se diferencian de las demás centrales térmicas únicamente en la primera etapa; es decir, en la forma de producir el calor. Las centrales nucleoelectricas tienen un reactor que equivale a la caldera de las centrales convencionales. El reactor no tiene sistemas de inyección continua de aire y combustible, ni en él se necesita un dispositivo de eliminación continua de residuos sólidos. Los reactores no producen gases de combustión. En el reactor se utiliza la energía nuclear del combustible. En la Figura 3.6 se muestra un esquema de un reactor nuclear del tipo de agua hirviente (BWR por sus siglas en inglés)

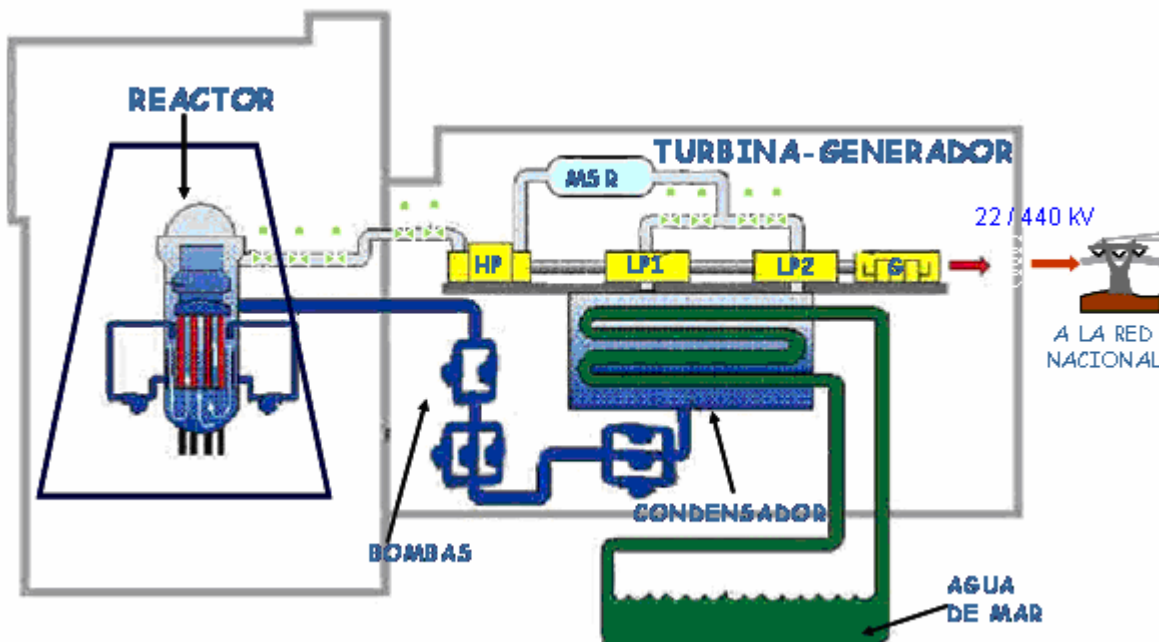


Figura 3.6 Reactor nuclear de agua hirviente⁵¹

3.5.1 Elementos de un reactor nuclear

A continuación se describen los principales componentes de los reactores de agua ligera, los cuales son los más abundantes en el mundo.

⁵¹ Imagen adaptada de: Comisión Federal de Electricidad "Del Fuego a la Energía Nuclear" (2004) 5ta. edición Pag. 37

- Un núcleo compuesto básicamente por el combustible, el moderador y el refrigerante
- Un sistema de control y seguridad para regular el ritmo de liberación de energía.
- Un contenedor hermético, dentro del cual se encuentra el material nuclear que es un blindaje biológico para la protección de los trabajadores.
- Un sistema de extracción de energía o de enfriamiento para transportar el calor producido.

El núcleo del reactor es la región donde tiene lugar la reacción nuclear exotérmica. Los principales elementos que constituyen el núcleo son el combustible, el moderador y el refrigerante. Las variantes en estos tres elementos dan lugar a distintos tipos de reactores.

- Las barras de combustible (o varillas de combustible): son el lugar físico donde se confina el combustible (UO_2 , MOx , etc)
- Moderador: Los moderadores, como ya se mencionó, son los encargados de la desaceleración de los neutrones para aumentar la probabilidad de captura útil por parte de los núcleos del material fisible.
- Las barras de control: Son diseñadas para capturar a los neutrones (s_c alta) que se encuentran en el medio circundante. Su posición en el núcleo permite aumentar o disminuir la cantidad de neutrones y por lo tanto variar la tasa de fisiones nucleares en cadena y por lo tanto la potencia.

Refrigerante: Es el fluido empleado para la extracción del calor (energía térmica generada) Fluye en un circuito cerrado, puede ser líquido o gaseoso. Los más utilizados son el agua y el agua pesada que sirven a la vez de moderadores. Otros fluidos utilizados son el sodio fundido, el anhídrido carbónico (CO_2) y el helio.

En los reactores refrigerados por agua, la refrigeración se obtiene calentando el agua, y esto puede hacerse de dos formas:

- El agua se mantiene a una presión constante superior a la de saturación del vapor y no se evapora en el reactor, sino en un generador de vapor y después pasa a la turbina (reactor de agua presurizada, PWR por sus siglas en inglés)
- El agua se hace evaporar en el reactor y el vapor va directamente a la turbina (reactor de agua hirviente, BWR)

Sistema de control: está constituido por las barras de control dentro del reactor. Las barras de control son accionadas por una serie de sistemas mecánicos, eléctricos o electrónicos para asegurar con rapidez la extinción de reacciones nucleares. Para esto se cuentan con dispositivos de monitoreo dentro y fuera del núcleo del reactor, para asegurar una constante vigilancia de los parámetros que intervienen como presión, temperatura, nivel de radiación, etc.

Sistema de contención: está constituido por una serie de barreras que impiden el escape de la radiación y de los productos radiactivos.

Seguridad a Ultranza: toda central nuclear se diseña y construye bajo el concepto de seguridad a ultranza. Se busca reducir al mínimo toda exposición a las radiaciones durante la operación normal y en caso de accidente. A continuación, en la Figura 3.7 se presentan las barreras de contención de la radiación para el caso de un reactor BWR.

BARRERAS DE CONTENCIÓN / CONTAINMENT BARRIERS

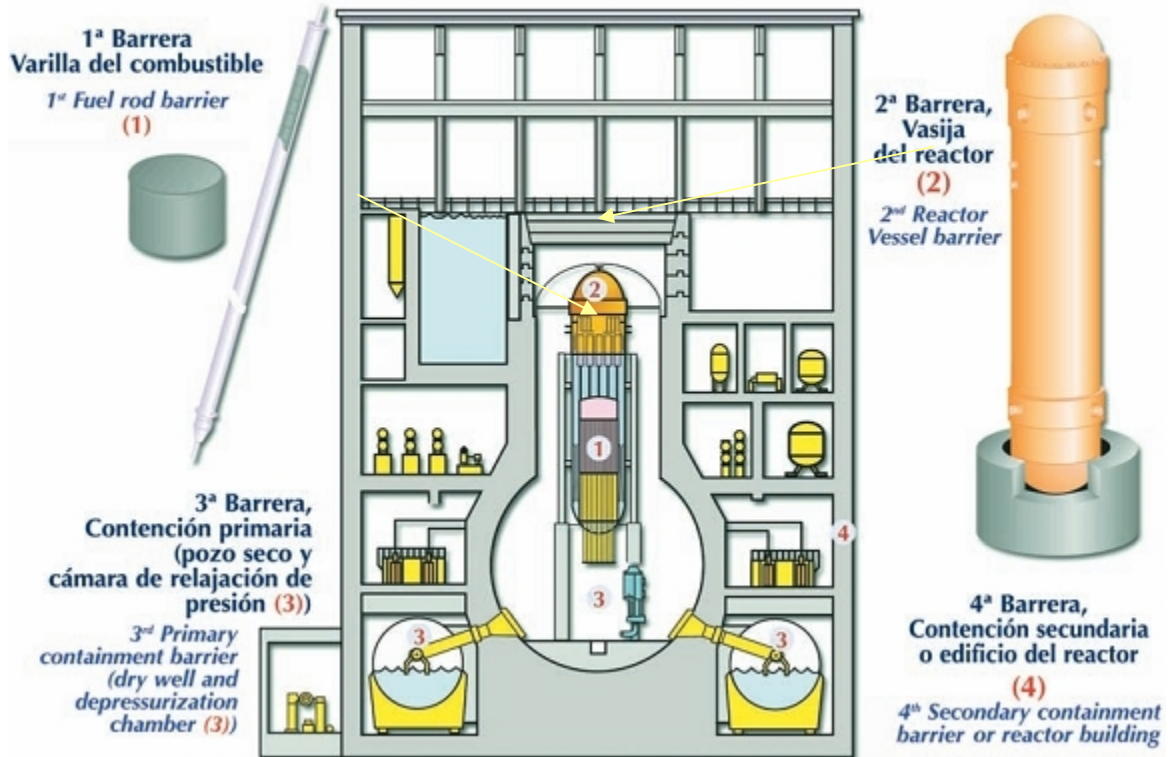


Figura 3.7 Barreras de contención de un reactor BWR⁵²

Barrera	Descripción
1ª Varilla de combustible	Tubos con aleación de Zirconio en cuyo interior se encuentra el combustible cerámico el cual es también una barrera de contención.
2ª Vasija del reactor	Recipiente cilíndrico de acero al carbono, recubierto interiormente de acero inoxidable, de 12.5 centímetros de espesor, con 18.5 metros de altura y 4.77 metros de diámetro. En su interior, se encuentra el núcleo del reactor, donde se obtiene el vapor que mueve la turbina.
3ª Contención primaria	Esta contención incluye el pozo seco y la cámara de supresión de presión.
4ª Edificio del reactor	Es una estructura de concreto armado de 1 metro de espesor y 55 metros de altura (12 de ellos, bajo tierra) Está diseñado para soportar las condiciones del mayor accidente posible.

⁵² Imagen obtenida de: <http://www.nuclenor.org/img/barreras.jpg>

3.5.2 Evolución de los reactores nucleares

3.5.2.1 Reactores térmicos

En estos reactores, las fisiones nucleares se realizan con neutrones de baja energía; es decir, con neutrones lentos o térmicos; para lo cual utilizan un moderador, el cual es un elemento ligero, con peso atómico bajo que absorbe gran parte de la energía reduciendo la velocidad de los neutrones y éstos reducen su nivel energético hasta el correspondiente a la temperatura del combustible, alcanzando un equilibrio térmico (de aquí su nombre) Son los reactores más abundantes y existen dos subtipos principales:

1. Los reactores a base de uranio enriquecido que utilizan agua ligera (H_2O) como refrigerante y moderador.
2. Los reactores a base de uranio natural que utilizan agua pesada (D_2O) como moderador y refrigerante.

3.5.2.2 Reactores de uranio enriquecido

Utilizan uranio enriquecido como combustible (generalmente en forma de óxido de uranio) El enriquecimiento es un proceso de alta tecnología y costoso. Una planta de enriquecimiento sólo se justifica si se tiene un programa nuclear grande. La mayoría de reactores en el mundo son reactores de agua ligera (LWR-Light Water Reactor) y uranio enriquecido. Se distinguen principalmente dos tipos: Los reactores de agua hirviente (BWR- Boiling Water Reactor) y los reactores de agua a presión (PWR-Pressurized Water Reactor)

3.5.2.3 Reactores de uranio natural

Utilizan uranio natural como combustible (generalmente en forma de óxido de uranio) Este tipo de reactores CANDU (Canadian Deuterium Uranium) es construido principalmente en Canadá, en Argentina y en India. Tienen la gran ventaja de no requerir el proceso de enriquecimiento isotópico del uranio en U-235. Sin embargo, requieren de la utilización de agua pesada como moderador (material con menor absorción de neutrones que el agua ligera) Por lo tanto requieren del proceso de fabricación de agua pesada. Este proceso es de alta tecnología pero es más accesible que la del enriquecimiento de uranio.

3.5.2.4 Reactores de combustible mixto de uranio-plutonio (MOx)

El plutonio es un material fisible que no existe en la naturaleza. Se forma como resultado de la captura de neutrones en el uranio-238 y después de una reacción de decaimiento radiactivo. En estos reactores se utiliza combustible en forma de óxido mixto de uranio y plutonio. El plutonio procede de las plantas de reprocesamiento que aprovechan el plutonio producido en los mismos reactores en ciclos de operación anteriores (o de otros reactores) Este tipo de combustible puede ser utilizado en los reactores de agua hirviente o en reactores a presión.

La utilización de este tipo de combustible es una tecnología dentro del marco del desarrollo sustentable. Aprovecha combustible creado en los mismos reactores, lo cual ayuda a reducir el consumo de uranio. Además disminuye la cantidad de material altamente radiactivo que tiene que

ser almacenado en depósitos especialmente diseñados para mantener el medio ambiente protegido durante un tiempo indefinido.

3.5.2.5 Reactores rápidos

En estos reactores, las fisiones nucleares se realizan principalmente con neutrones de alta energía; es decir, con neutrones rápidos; por lo que estos reactores no utilizan moderador y los neutrones liberados en la fisión conservan una energía cinética elevada. El refrigerante de estos reactores es un metal pesado, puede ser sodio o plomo líquido.

Los reactores rápidos pueden utilizar sodio, plomo o plomo-bismuto líquidos como refrigerante. Su objetivo principal es producir más combustible. En la actualidad existen pocos reactores rápidos en el mundo (Francia, Japón y Rusia) Algunas dificultades tecnológicas relacionadas principalmente con el manejo del metal líquido como refrigerante no han permitido que este tipo de reactor se construya comercialmente.

3.5.2.6 Reactores convertidores y de cría

Todos los reactores son “convertidores” en algún grado; es decir, tienen la habilidad de crear nuevo material fisible en su operación normal en la que se fisiona el combustible original. Por ejemplo un reactor térmico que utiliza uranio con una razón de masa de aproximadamente $^{235}\text{U} / ^{238}\text{U} = 3/97$ convierte algo del ^{238}U en plutonio el cual es un combustible fisible, mientras se está “quemando” el ^{235}U . El plutonio generado es fisionado (consumido) y es responsable de aproximadamente 20% de la potencia del reactor.

Cuando un reactor produce más material fisible del que consume se llama reactor de cría. Los reactores de cría son diseñados especialmente para crear plutonio por lo que utilizan una cobija de uranio-238 que se pone como blanco para que absorba neutrones. Estos reactores deben ser rápidos para aumentar la probabilidad de que los neutrones de alta energía sean capturados por el uranio-238. Por lo tanto no utilizan moderador y en general utilizan metales líquidos como refrigerante. Estos reactores son también un concepto de desarrollo sustentable.

3.6 Evolución de la energía nuclear comercial

El uso pacífico de la energía nuclear comenzó aproximadamente en 1950, con los llamados reactores prototipo, los cuales fueron la primera generación de reactores nucleares de fisión controlada, entre los que destacan principalmente los reactores de uranio natural enfriados por gas y moderados por grafito que operaron principalmente en Francia y Reino Unido. La segunda generación está constituida por los reactores nucleares comerciales que iniciaron operación a partir de la década de los 70s y que actualmente están en operación comercial: reactor de agua hirviente, reactor de agua a presión, reactor canadiense de agua pesada (CANDU) reactor de grafito-gas (AGR y Magnox) y los reactores rusos (RBMK) Los reactores de tercera generación son aquellos que evolucionaron a partir de los anteriores. Estos reactores presentan mejoras considerables en aspectos de seguridad, tiempo de construcción y aprovechamiento del combustible, y que representan una opción de generación eléctrica económicamente competitiva y ambientalmente amigable. Simultáneamente, varios países del mundo están trabajando en el diseño de los llamados

reactores avanzados de cuarta generación, que se contempla entrarán en operación para el año 2030. Finalmente, se espera que la principal fuente de energía nuclear del futuro sea la de la fusión nuclear. La Figura 3.8 muestra la evolución de las diferentes generaciones de reactores nucleares desde 1950.

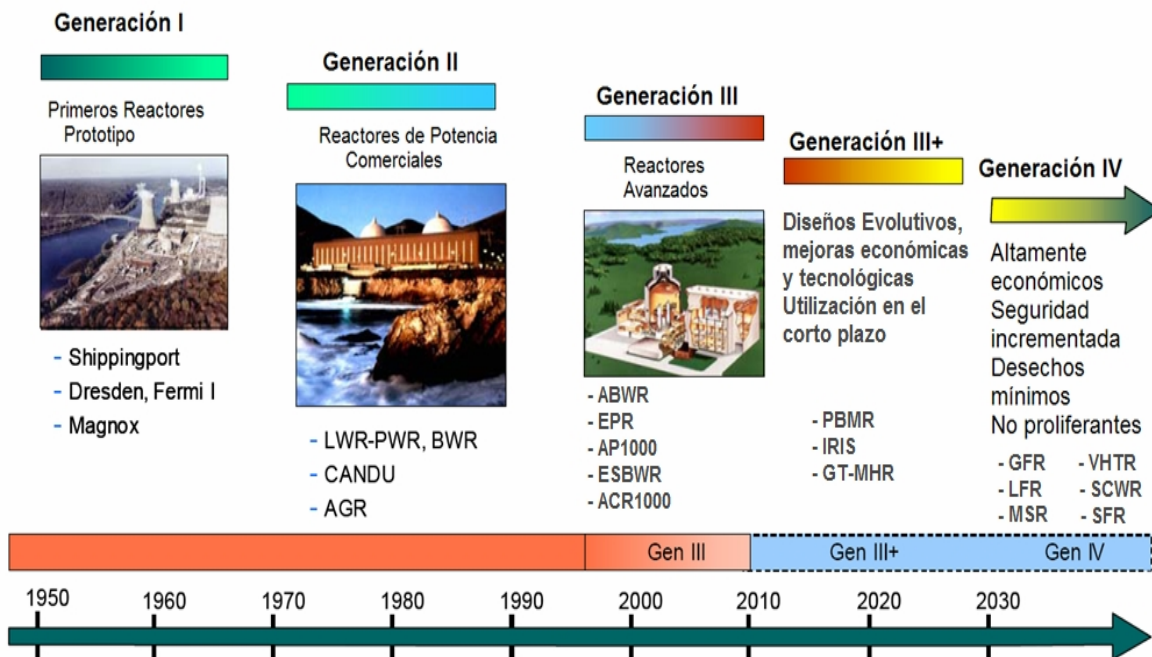


Figura 3.8 Evolución de los reactores nucleares⁵³

La siguiente lista presenta los reactores nucleares comerciales para la generación eléctrica que operan en el mundo y su potencia instalada, y que son clasificados como reactores de segunda generación, con excepción de los reactores avanzados de agua hirviendo (ABWR por sus siglas en inglés) que son de tercera generación.

Tabla 3.2 Reactores nucleares comerciales que actualmente operan en el mundo

263 PWRs,	236 Gwe	(EUA, Francia, Japón, Rusia, Brasil, etc.)
90 BWRs,	79 GWe	(EUA, Japón, Suecia, México, etc.)
38 Candu,	19 GWe	(Canadá, Corea, Argentina, etc.)
26 AGR y Magnox,	11 GWe	(Reino Unido)
17 RBMK,	13 GWe	(Rusia, Ucrania, etc.)
4 ABWRs,	4 GWe	(Japón)

A continuación se describen los dos reactores más utilizados en el mundo, el PWR y el BWR.

⁵³ Imagen adaptada de: <http://www.world-nuclear.org/info/inf08.html>

3.6.1 Descripción del reactor PWR

El PWR es un reactor de potencia donde el agua entra a la vasija del reactor a una temperatura de alrededor de 290°C, fluye alrededor del núcleo del reactor, sirviendo como refrigerante, asciende a través del mismo saliendo a una temperatura de alrededor de 325°C, para evitar su ebullición se mantiene al agua a una presión considerablemente alta de alrededor de 15 MPa.

El vapor que la turbina requiere es producido en los generadores de vapor, los cuales son intercambiadores de calor con agua presurizada del lado de mayor temperatura. Los tubos del generador de vapor en su superficie exterior están en contacto con agua proveniente del condensador a baja presión, la transferencia de calor del agua caliente al agua de alimentación la lleva a su punto de ebullición para producir vapor.

Dado que el agua es en esencia incompresible, un pequeño cambio en el volumen del refrigerante puede dar origen a grandes cambios en la presión pudiendo causar efectos indeseables en el sistema, los lazos de refrigerante de un reactor PWR son equipados con un presurizador, el cual se encarga de mantener la presión a un nivel constante.

El presurizador es un tanque, el cual contiene vapor y agua en sus secciones superior e inferior respectivamente, con un inyector de presión en la tapa y un calentador eléctrico en el fondo. Suponiendo que la potencia de la turbina disminuye temporalmente existe un incremento en la temperatura promedio del refrigerante en el reactor con un correspondiente aumento en su volumen. La expansión de el refrigerante alcanza el nivel del agua en el presurizador, el cual alcanza la presión del vapor y actúan las válvulas de presión de vapor, permitiendo haya un flujo de agua fría hacia el refrigerante.

Este tipo de reactor es utilizado en Estados Unidos, Alemania, Francia y Japón. Su combustible es Uranio enriquecido en Uranio-235. En la Figura 3.9, se muestra un reactor PWR y las partes que lo constituyen.

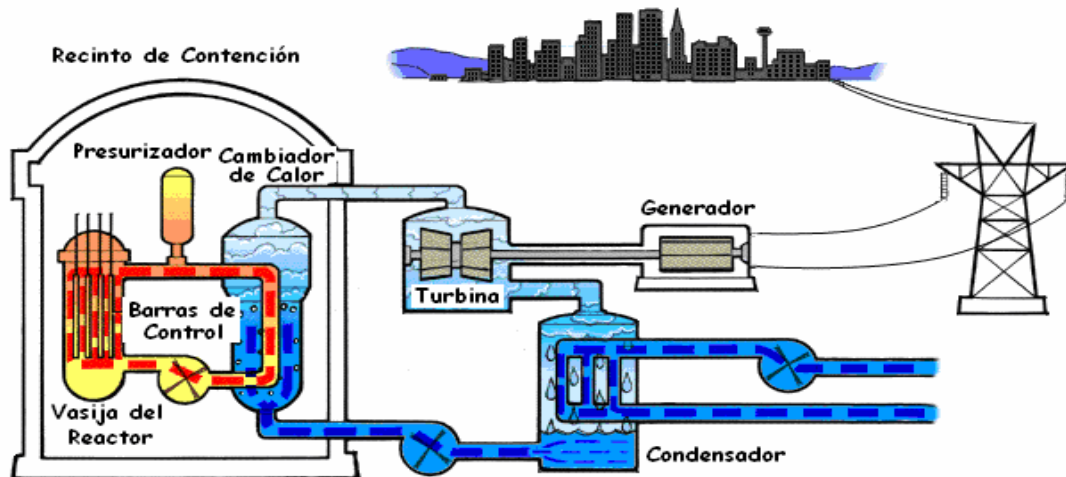


Figura 3.9 Reactor PWR⁵⁴

⁵⁴ Imagen adaptada de: <http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/reactors.html>

3.6.2 Descripción del reactor BWR

El BWR es un reactor de potencia que básicamente permite la ebullición del agua dentro del mismo núcleo. La temperatura de operación es aproximadamente 300 °C, produciendo así vapor a 7 MPa. Al trabajar a estas bajas presiones, el recipiente de presión no necesita ser demasiado grueso, pero sí lo suficientemente grande como para albergar todos los sistemas.

El agua circula por el núcleo llevándose el calor producido en los elementos combustibles, de esta forma actúa como refrigerante (además de moderador y reflector) En el núcleo llega a una temperatura en la cual se convierte a vapor, el cual pasa directamente hacia la turbina-generador. Típicamente el vapor primero pasa por una pequeña turbina de alta presión, luego por un separador de humedad y más tarde a dos o tres grandes turbinas de baja presión. Las turbinas están conectadas entre sí por un eje.

El vapor, luego de haber pasado por las turbinas atraviesa el condensador que está al vacío y es refrigerado por el océano, mar, lago o río. El agua condensada es re-bombada para comenzar el ciclo nuevamente.

Las barras de control se utilizan para apagar el reactor y para mantener una distribución de potencia uniforme. En los BWR las barras de control son insertadas desde el fondo del núcleo por un sistema hidráulico.

Este tipo de reactor es utilizado en países como Estados Unidos, Suecia, Japón, México y Alemania. Como combustible dispone de Uranio enriquecido en Uranio-235. En la Figura 3.10 se muestra un Reactor BWR y las partes que lo constituyen.

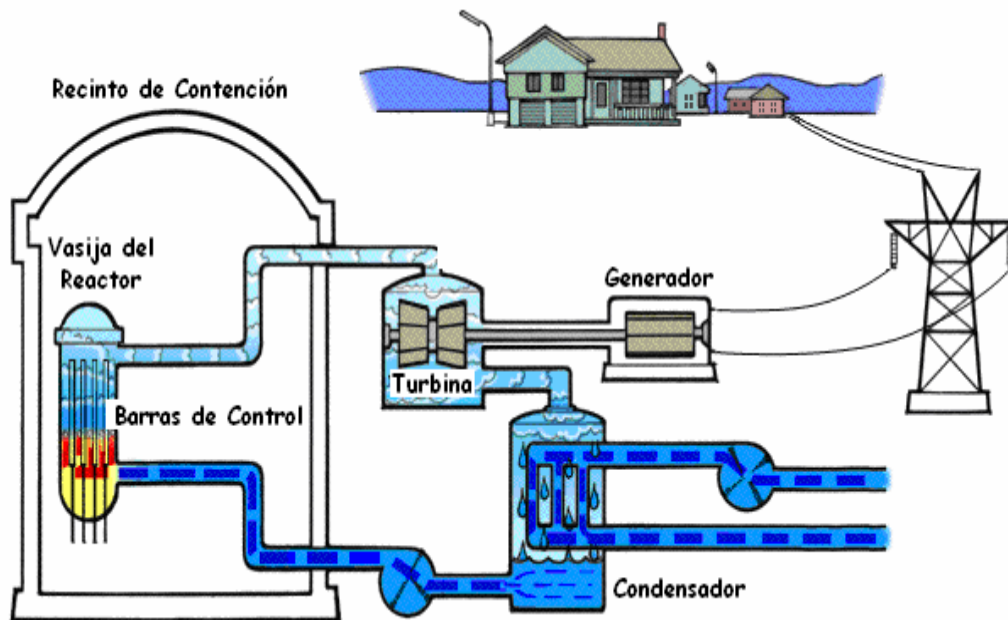


Figura 3.10 Reactor BWR⁵⁵

⁵⁵ Ibid.

La CNLV cuenta con dos unidades, ambas utilizan un reactor del tipo BWR diseñado por la Compañía General Electric, en la Tabla 3.3 se resumen las principales características del reactor de la unidad uno de la CNLV.

Tabla 3.3 Características del reactor BWR de la CNLV⁵⁶

Tipo	BWR/5
Potencia Eléctrica (MW)	682
Potencia Térmica (MWt)	2027
Número de ensambles de combustible	444
Número de barras de control	109
Altura activa del núcleo (cm)	381
Diámetro del núcleo (cm)	362
Generación de potencia lineal (KW/ft):	
Promedio	5.4
Máxima	13.4
Densidad de potencia promedio (KW/l)	49.15
Enriquecimiento promedio (% ²³⁵ U)	
Núcleo inicial	1.86
Recargas	2 a 4
Presión del sistema en el núcleo (psia)	1035
Temperatura del moderador (°F):	549
Temperatura del combustible (°F):	
Promedio	2130
Máxima	3435

3.6.3 Descripción del reactor CANDU⁵⁷

El acrónimo "CANDU" es una marca registrada de Atomic Energy of Canada Limited, de la expresión "CANadá Deuterio Uranio", en referencia a su moderador de neutrones de óxido de deuterio (agua pesada) y su utilización de uranio natural como combustible.

El moderador está contenido en un gran depósito (llamado calandria) atravesado por varios cientos de tubos de presión horizontales, que constituyen los canales para el combustible, refrigerados por un flujo de agua pesada a gran presión en el circuito de refrigeración primario, alcanzando los 290 °C. La alta presión dentro del depósito evita la ebullición del agua pesada. A través de un intercambiador de calor se transfiere la energía térmica a un circuito secundario de agua que sí se evapora y que se envía a la turbina.

⁵⁶ Comisión Federal de Electricidad. Laguna Verde, nucleoelectrica. Recuperado el 17 de abril de 2008 de: <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/visitasvirtuales/lagunaverdenucleoelectrica/>

⁵⁷ CANDU Owners Group Inc. How and Why is CANDU designed the way it is (2003) Recuperado el 29 de octubre de 2008 de: <http://canteach.candu.org/library/20000101.pdf>

En los reactores de tipo CANDU, se puede generar uranio 233 a partir del torio 232. (Ver Figura 3.1) lo cual constituye una ventaja de este tipo de reactores.

Las eficientes instalaciones CANDU son muy cuidadosas en el control de pérdidas de agua pesada de la calandria, y también separan el tritio del regulador para su venta en el mercado médico secundario. Algunas instalaciones CANDU utilizan parte de su energía para hacer funcionar sus pequeñas plantas de separación de deuterio, para actualizar las existencias de agua pesada y reducir costos.

La Figura 3.11 muestra la disposición general de un reactor nuclear de fisión tipo CANDU.

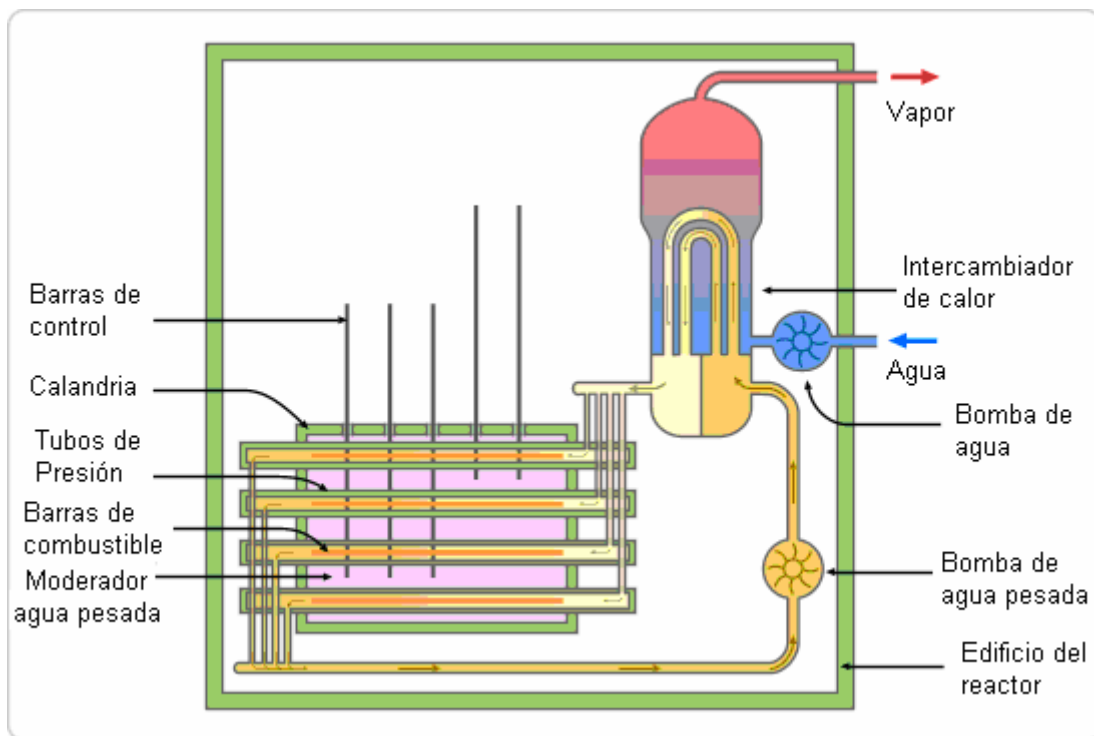


Figura 3.11 Esquema de un reactor CANDU⁵⁸

3.6.4 Reactores de tercera generación

Los reactores de generación III fueron desarrollados más recientemente en los años 90s, con varios diseños revolucionarios que ofrecen avances significativos en seguridad y economía.

A finales del siglo pasado, en 1997 y 1998, en Japón, entraron en operación comercial los dos primeros reactores de tercera generación.

Actualmente, se encuentran en camino avances en la tecnología de los reactores de generación III que se implementarán en la construcción de las nuevas plantas a partir de hoy y hasta el 2030, conocidos como reactores de generación III Plus.

⁵⁸ Imagen adaptada de: <http://canteach.candu.org/library/20000101.pdf>

Los reactores clasificados como de generación III, tienen características técnicas que superan a los reactores comerciales de segunda generación. Sus costos de inversión son inferiores y sus tiempos de construcción también. Sus factores de disponibilidad son superiores. La energía extraída por unidad de masa de combustible es superior. Las eficiencias termodinámicas fueron ligeramente mejoradas. Los sistemas de seguridad tienen mejoras considerables y a la vez son más simples porque se apoyan en fenómenos naturales aplicados a los llamados sistemas pasivos. Algunos se apoyan en sistemas activos de seguridad en forma redundante y todos estos reactores aplican la filosofía de defensa en profundidad.

De un conjunto de aproximadamente quince reactores nucleares de tercera generación ofertados a nivel mundial, tomando en cuenta su estado de avance tecnológico y bajo el supuesto de poder entrar en operación comercial para el año 2015, se describirán solamente los cinco reactores que consideramos tienen características que los convierten en una opción para México. Éstos son: ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) EPR (European Pressurized Water Reactor) ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor) AP1000 y PBMR (Pebble Bed Modular Reactor)

3.6.4.1 Reactor ABWR

El ABWR desarrollado por General Electric, Hitachi y Toshiba, es el reactor avanzado de los BWR. Difiere del BWR convencional en varios aspectos, los cuales son:

El volumen que ocupa la planta es el 70% del que ocupa un BWR convencional, característica que reduce tiempo y costo de construcción. El mecanismo de barras de control es de movimiento fino, característica que permite tener una inserción al 100% en 2.8 segundos⁵⁹. Existen sistemas de control de fibra óptica y un cuarto de control avanzado.

El reactor ABWR cuenta con las siguientes características de diseño: una potencia nominal de 1356 MW, bombas internas de recirculación; barras de control de movimiento fino; sistemas de control multiplexables de fibra óptica. Ciclo de vida de 60 años; tiempo de construcción de 50 meses desde el primer concreto hasta operación comercial⁶⁰; tiene un costo instantáneo (overnight) de 1000-1400 \$/MW; tiene un factor de disponibilidad del 87%; su intervalo de recarga de combustible es cada 24 meses.

El núcleo del reactor cuenta con 872 ensambles de combustible con uranio enriquecido y 205 barras de control de forma cruciforme con mecanismo de movimiento fino, la altura efectiva del núcleo es de 3.7 m, la altura efectiva de la vasija es de 21.1 m maneja un inventario de agua de 88 m³.

Una de las principales ventajas de este tipo de tecnología, es su estado de avance, ya que es el único reactor de tercera generación que se encuentra en operación comercial en el mundo dándole la ventaja de poseer una tecnología probada y madura. Sus principales desventajas son, tener un

⁵⁹ A. Tsuji, A. Endoh, Y. Asada, "Completion of ABWR Plant, Kashiwazaky-Karima Nuclear Power Station Unit; Nos. 6 and 7"; Hitachi Review; Vol. 47, No. 5, p. 5 (1998) http://www.hitachi.com/rev/1998/revoct98/r4_101.pdf.

⁶⁰ United States Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology and Nuclear Energy Research Advisory Committee, "A Roadmap to Deploy New Nuclear Power Plants in the United States by 2010", Near Term Deployment Roadmap, Volume II, p.107, 212, 233 (2001)

factor de disponibilidad relativamente bajo, una eficiencia baja y el quemado de su combustible también bajo con respecto a los reactores ESBWR, AP1000, EPR y PBMR.

3.6.4.2 Reactor ESBWR

El ESBWR es un reactor de tercera generación avanzado desarrollado por General Electric. Evolucionó a partir de las tecnologías ABWR y del Reactor Simplificado de Agua en Ebullición, SBWR (Simplified Boiling Water Reactor) modelo discontinuado.

Este reactor, lo mismo que el ABWR, describe un ciclo Rankine directo. Dentro de sus principales características, tiene una potencia eléctrica de 1390 a 1560 MW, usa sistemas pasivos de seguridad, los cuales aprovechan fenómenos naturales como la fuerza de gravedad y gradiente de densidades del agua para regular la presión y remover el calor en la vasija del reactor, sistemas que le permitieron la eliminación total de las bombas de recirculación.

El ESBWR es un diseño evolutivo que tiene como antecesores a los BWR y por lo tanto comparte muchas características con este tipo de reactores, entre ellas el principio de funcionamiento, aunque con el ABWR comparte la mayor parte de características algunas de las cuales son las siguientes: mecanismo de barras de control de movimiento fino; transmisión de datos por fibra óptica multiplexable y respiraderos horizontales de supresión de presión. Características pasivas de mitigación de accidente severo.

Otras de las características del ESBWR son, diseño modular, disminución del tiempo de construcción, mismo que abarca un intervalo de 46 meses desde el primer concreto hasta la entrada en operación comercial de la planta. Los sistemas pasivos de seguridad disminuyen el tamaño de edificios y el número de sistemas. El tiempo de vida de la planta es de 60 años y el quemado del combustible de 50 GWdía/ton.⁶¹

Las principales características del reactor ESBWR, son los sistemas pasivos de seguridad. Dichos sistemas aprovechan los fenómenos naturales como la fuerza de gravedad y circulación natural del agua a causa del gradiente de densidades, para extraer el calor generado en el núcleo del reactor y aliviar sobrepresiones. Por los sistemas de seguridad pasivos mencionados anteriormente, es difícil que el ESBWR sufra algún accidente severo y por lo tanto su frecuencia de daño al núcleo y frecuencia de accidentes es menor que la del ABWR.

3.6.4.3 Reactor EPR

El EPR es un modelo de tercera generación desarrollado por la compañía francoalemana AREVA surge como resultado de la combinación de las tecnologías: Reactor N4 francés y Reactor Konvoi alemán, ambos diseños basados en el reactor de agua a presión (PWR) cuya tecnología es la más usada a nivel mundial, ya que actualmente existen 209 reactores en operación comercial de un total mundial de 440.⁶²

⁶¹ Nuclear Energy Agency, "Reduction of Capital Cost of Nuclear Power Plants; Organization for Economic Co-Operation and Development. General Electric, "ESBWR", Technology Fact Sheet, p. 1-3.

⁶² Framatome ANP Tour AREVA, "The EPR, a strategic choice", AREVA, www.framatome-anp.com (2005)

El EPR; tiene una potencia de 1600 MW y una eficiencia del 36%, cuenta con sistemas activos de seguridad y colocación estratégica de edificios, además de blindajes para cualquier evento interno o externo que ponga en riesgo la integridad del núcleo.

El EPR describe un ciclo Rankine indirecto en un arreglo de 4 lazos; es decir, el agua presurizada que circula en el núcleo y extrae el calor generado en el combustible, es enviado a 4 generadores de vapor, donde la sustancia de trabajo (agua) es evaporada y enviada directamente a la turbina,. El vapor que sale de la turbina pasa por el condensador donde sufre un cambio de fase de vapor a líquido. El agua que sale del generador de vapor es nuevamente enviada al núcleo, para comenzar el ciclo nuevamente.

El núcleo del reactor usa uranio enriquecido al 5% y puede utilizar combustible reprocesado, el cual es una mezcla de metales pesados como el uranio y el plutonio, y es llamado MOx, en un arreglo 17*17 varillas por cada ensamble de combustible con un total de 241 ensamblajes, con una altura efectiva de 420 centímetros; el núcleo puede ser cargado completamente con MOx.

El EPR se diseñó para un periodo de vida de 60 años. El tiempo de construcción fluctúa entre 57 y 60 meses. Tendrá un factor de disponibilidad del 91%.

El EPR, tiene una eficiencia elevada, parámetro que le otorga cierta ventaja en comparación con otro tipo de tecnologías PWR. Su desventaja principal, es el tiempo de construcción que oscila entre 57 y 60 meses, mayor al ABWR y al ESBWR y por lo tanto un mayor costo instantáneo de inversión. Sin embargo, ya se encuentra en construcción un reactor EPR en Finlandia y se tienen planes de construir otro más en Francia.

3.6.4.4 Reactor AP1000

El AP1000 evolucionó a partir del reactor AP-600, el cual a su vez evolucionó del PWR comercial. Todos éstos fueron desarrollados por la compañía norteamericana Westinghouse.

El AP1000 describe un ciclo Rankine indirecto, lo mismo que el EPR, con una diferencia importante, sólo tiene dos lazos de generación de vapor. Presenta una potencia eléctrica de alrededor de 1100 MW. Tiene rasgos de seguridad pasiva, los cuales permiten reducir el número de componentes, sistemas y edificios. Su diseño de construcción es modular y por lo tanto reduce significativamente el periodo de construcción de la planta. Puede funcionar con combustible MOx.

Los principales componentes del AP-1000, son: 2 generadores de vapor, cada uno conectado a la vasija del reactor por un circuito caliente y 2 circuitos fríos; 4 bombas que proporcionan la circulación del refrigerante en el reactor para remover el calor y un presurizador conectado a la tubería del circuito frío para mantener subenfriado el sistema de refrigeración del reactor (RCS)

Realizando una comparación del AP1000 contra un PWR convencional, se tienen las siguientes ventajas:

Ocupa 50% menos válvulas, 83% menos tubería; 87% menos cableado de control; 35% menos bombas; 50% menos volumen del edificio⁶³, ventajas que proporcionan seguridad sísmica y ahorro en costos y tiempo de construcción

Una de las grandes ventajas del AP-1000 en comparación con los demás reactores competidores, es su corto tiempo de construcción, característica que reduce costos. Esta tecnología ya está licenciada y certificada por la comisión reguladora de los Estados Unidos. Por lo tanto ya está lista para comenzar a competir en el mercado mundial.

Entre sus principales desventajas se encuentra su baja eficiencia (32-35%) en comparación con la de su principal competidor, el EPR.

3.6.4.5 Reactor PBMR

El reactor nuclear de cama de esferas, PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) está siendo desarrollado por la compañía sudafricana Eskom. El PBMR es un reactor nuclear de tercera generación que tiene como antecedente al reactor nuclear alemán THTR-300, el cual estuvo en servicio entre los años 1983-89.

El PBMR es un diseño bastante diferente de los reactores de agua ligera. Sus principales características son: Esferas de combustible de bióxido de uranio enriquecido al 9.6 % del tamaño de una pelota de tenis (6 cm de diámetro) Grafito como moderador y reflector. Gas helio como refrigerante, el cual también es usado como sustancia de trabajo en un ciclo cerrado de turbinas de gas (ciclo Brayton) Eficiencia termodinámica superior al 40%, ya que maneja altas temperaturas (900°C) y presiones (6.9 MPa)⁶⁴. Potencia térmica de 400 MW y una potencia eléctrica de 165 MW por módulo⁶⁵. El tiempo de vida del reactor es de 40 años, durante los cuales cada seis años sale de operación 30 días para darle mantenimiento. Factor de capacidad de 94%.

El PBMR describe un ciclo cerrado de turbinas de gas; es decir, usa gas a alta presión y temperatura para generar energía eléctrica. El refrigerante entra a la vasija del reactor a 500°C y 9 Mpas, mismo que fluye hacia abajo a través de las esferas calientes, después deja la vasija a 900°C de temperatura y entra a un sistema de potencia turbina-compresor generador, todos acoplados a la misma flecha donde eleva su presión para después expandirse en la turbina, hecho que reduce su temperatura (500°C) y su presión (3 MPa) Entonces pasa a través de un recuperador de alta eficiencia donde cede su energía al helio que ya ha pasado por dos etapas de compresión-refrigeración, para aumentar su temperatura hasta los 500°C antes de entrar nuevamente al núcleo del reactor.

El ciclo de potencia usado es un ciclo Brayton estándar con un circuito inter-enfriador cerrado de agua y preenfriador. El objetivo de la alta presión y temperatura del helio es para aumentar la eficiencia del ciclo, logrando una eficiencia de más de 40% para el diseño base del PBMR y realizando algunas mejoras de combustible y materiales, la eficiencia podría aumentar a 50%

⁶³ R. Mayson, "Reactor developments the AP-1000", Nuclear Congress 2003, <http://www.bnes.com/Events/Past/2003-06-19-Visions2003/Mayson.pdf>

⁶⁴ Pebble Bed Reactor Technology; Future Pebble Bed Reactor Technology PBMR Development Eskom Holdings Limited Reg No 2002/015527/06.

⁶⁵ Uranium Information Centre A.B.N., "Advanced Nuclear Power Reactors, Nuclear Issues Briefing", Paper 16, HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTORS, PBMR, <http://www.uic.com.au/nip16.htm>.(2005)

El reactor nuclear PBMR es una posible alternativa para competir con los otros reactores, es inherentemente seguro, modular, pequeño, eficiente, y "barato". La mayoría de los estudios manejan costos overnight de \$1000 dólares por kW. Sin embargo, este costo overnight es incierto, ya que podría presentar una variación de \$1000 a \$1200 dólares por kW.⁶⁶

3.6.5 Reactores de cuarta generación

En un esfuerzo internacional de cooperación e investigación, actualmente se desarrollan las nuevas tecnologías de reactores nucleares conocidas como Generación IV. Después del 2030, las perspectivas de avances innovadores, a través de una investigación y desarrollo renovados, ha estimulado al mundo entero en el interés de la cuarta generación de reactores nucleares.⁶⁷

Los objetivos que persiguen los reactores de cuarta generación son:

1. Sustentabilidad
2. Economía
3. Seguridad
4. Confiabilidad
5. No proliferación de armamento

Los reactores propuestos para la cuarta generación son:

3.6.5.1 Reactor rápido enfriado por gas (GFR)

El GFR (Gas-cooled Fast Reactor) utiliza neutrones rápidos y un ciclo cerrado del combustible, para un manejo eficiente de los actínidos y para la conversión del uranio fértil. El combustible puede ser del tipo de ensamble de barras o placas, o de bloques prismáticos. La potencia del diseño de referencia es de 288 MW. El GFR se caracteriza por una alta sustentabilidad debido a su ciclo de combustible cerrado y un excelente desempeño en el manejo de los actínidos. Está destinado principalmente a la producción de energía eléctrica y manejo de actínidos, aunque también es muy buen candidato para producir hidrógeno de manera económica. El GFR requiere avances significativos en investigación y desarrollo en combustibles y materiales sometidos a alta temperatura en un espectro rápido de neutrones, así como en lo relacionado con la tecnología del reciclado de combustible. También requiere investigación en el diseño de la planta en aspectos relacionados con la seguridad en condiciones de operación fuera de lo normal. En la Figura 3.12 se presenta un diagrama del GFR.

⁶⁶ S. Thomas, "The Economic Impact of the Proposed Demonstration Plant for the Pebble Bed Modular Reactor Design", *Public Service International Research Unit University of Greenwich UK*, (2005)

⁶⁷ Foro de la Industria Nuclear Española. Centrales Nucleares Avanzadas (2003) Obtenido el 29 de octubre de 2008 de: http://www.foronuclear.org/detalle_articulo_nucleo.jsp?id=10

Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)

Characteristics

- He coolant
- 850°C outlet temperature
- Direct gas-turbine conversion cycle – 48% efficiency
- 600 MW_{th}/288 MW_e
- Several fuel options and core configurations

Benefits

- Waste minimization and efficient use of uranium resources

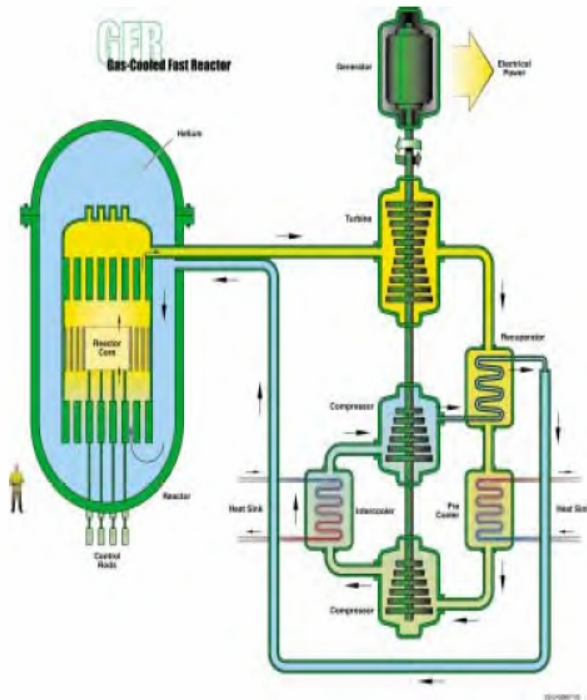


Figura 3.12 Reactor rápido enfriado con gas⁶⁸

3.6.5.2 Reactor rápido enfriado por Plomo (LFR)

El LFR (Lead-cooled Fast Reactor) usa también neutrones rápidos y un ciclo cerrado del combustible para un manejo eficiente de los actínidos y para la conversión del uranio fértil. Utiliza un refrigerante de metal líquido eutéctico de plomo o de plomo-bismuto. El reactor es enfriado por circulación natural y tendrá una potencia entre 120 y 400 MW, con una temperatura del refrigerante entre 550°C y 800°C, dependiendo del éxito en investigación y desarrollo de los materiales. El LFR se caracteriza por una alta sustentabilidad debido a su ciclo de combustible cerrado y una buena resistencia a la proliferación y protección física, debido al empleo de un núcleo de vida larga, de entre 15 y 30 años. La seguridad es mejorada por el uso de un refrigerante relativamente inerte. Está destinado principalmente a la producción de energía eléctrica y de hidrógeno y al manejo de actínidos con una muy buena resistencia a la proliferación. El LFR requiere avances significativos en investigación y desarrollo en combustibles y materiales sometidos a un ambiente corrosivo de alta temperatura, así como en lo relacionado con la tecnología del reciclado de combustible. También requiere investigación en el diseño de la planta en aspectos relacionados con la operación. En la Figura 3.13 se presenta un diagrama del LFR.

⁶⁸ Imagen adaptada de: <http://nuclear.inl.gov/gen4/gfr.shtml>

Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)

Characteristics

- *Pb* or *Pb/Bi* coolant
- 550°C to 800°C outlet temperature
- 120-400 MW
- 15-30 year core life

Benefits

- *Distributed electric energy generation*
- *Hydrogen and potable water*
- *Cartridge core for regional fuel processing*
- *High degree of passive safety*
- *Proliferation resistance through long-life cartridge core*

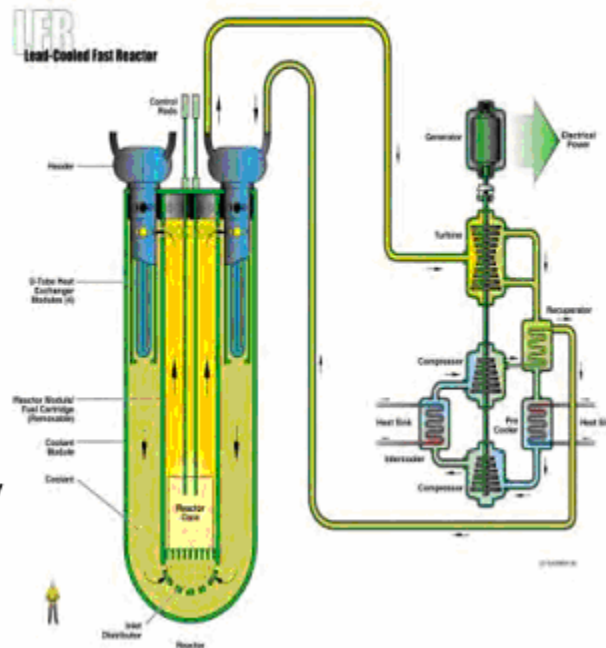


Figura 3.13 Reactor rápido enfriado con plomo⁶⁹

3.6.5.3 Reactor de sal fundida (MSR)

El MSR (Molten Salt Reactor) usa un espectro de neutrones de térmico a epitérmico y un ciclo cerrado del combustible, para la utilización eficiente del plutonio y de los actínidos menores. En el MSR el combustible es una mezcla líquida "circulante" de fluoruros de sodio, zirconio y uranio. La planta de referencia es de 1000 MW. El sistema opera a baja presión (5 atmósferas) con una temperatura de salida del refrigerante de 700°C, mejorando con esto la eficiencia térmica. El MSR se caracteriza por una alta sustentabilidad debido a su ciclo de combustible cerrado y una excelente flexibilidad para la destrucción de actínidos. La economía de este sistema no es muy favorable, debido al gran número de subsistemas para el mantenimiento del combustible y refrigerante. Está destinado principalmente a la producción de energía eléctrica y a al quemado de plutonio y de actínidos menores. El MSR requiere avances significativos en sus procesos químicos y en el diseño de la planta. En la Figura 3.14 se presenta un diagrama del MSR.

⁶⁹ Ibid.

Molten Salt Reactor (MSR)

Characteristics

- Fuel: liquid Na, Zr, U and Pu fluorides
- 700-800°C outlet temperature
- 1000 MW
- Low pressure (<0.5 MPa)

Benefits

- Waste minimization
- Avoids fuel development
- Proliferation resistance through low fissile material inventory

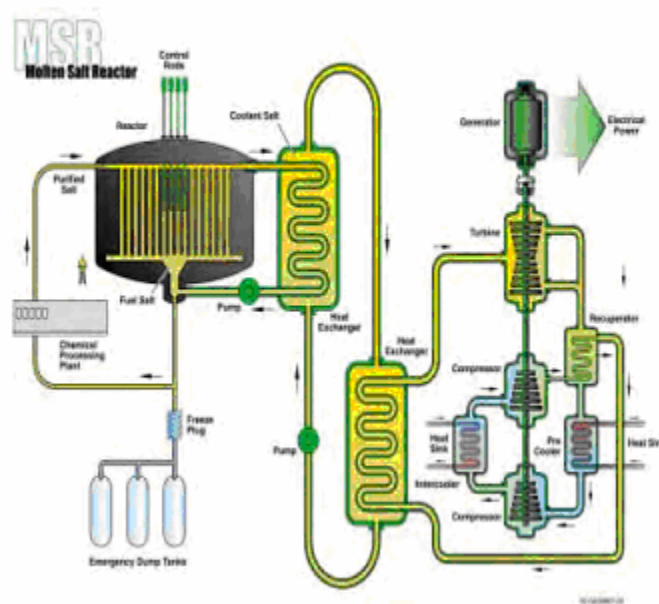


Figura 3.14 Reactor de sales fundidas⁷⁰

3.6.5.4 Reactor rápido enfriado por sodio (SFR)

El SFR (Sodium-cooled Fast Reactor) utiliza también neutrones rápidos y un ciclo cerrado del combustible, para un manejo eficiente de los actínidos y para la conversión del uranio fértil. Con este sistema se pretende tener un ciclo de combustible con reciclado total de actínidos, mediante dos opciones:

- a) Reactor de tamaño intermedio (150 a 500 MW) con refrigerante de sodio y un combustible de aleación metálica de zirconio con uranio, plutonio y actínidos menores. El proceso de reciclado se basa en un proceso pirometalúrgico, ubicado en una instalación contigua al sistema SFR.
- b) Reactor de tamaño mediano a grande (500 a 1500 MW) con refrigerante de sodio y un combustible de óxidos mixtos de uranio y plutonio (MOx). El proceso de reciclado se basa en un proceso acuoso avanzado, ubicado en una instalación central sirviendo a varios reactores.

La temperatura de salida del refrigerante es de 550°C para los dos tipos de reactores. El SFR se caracteriza por una alta sustentabilidad debido a su ciclo de combustible cerrado y un excelente desempeño en el manejo de los actínidos. Está destinado principalmente a la producción de energía eléctrica y al manejo de actínidos. El SFR requiere avances significativos en la simplificación de la planta y la demostración de la tecnología del reciclado del combustible. En la Figura 3.15 se presenta un diagrama del SFR.

⁷⁰ Ibid.

Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR)

Characteristics

- Sodium coolant
- 550°C Outlet Temp
- 150 to 500 MW
- Metal fuel with pyro processing / MOX fuel with advanced aqueous

Benefits

- Consumption of LWR actinides
- Efficient fissile material generation

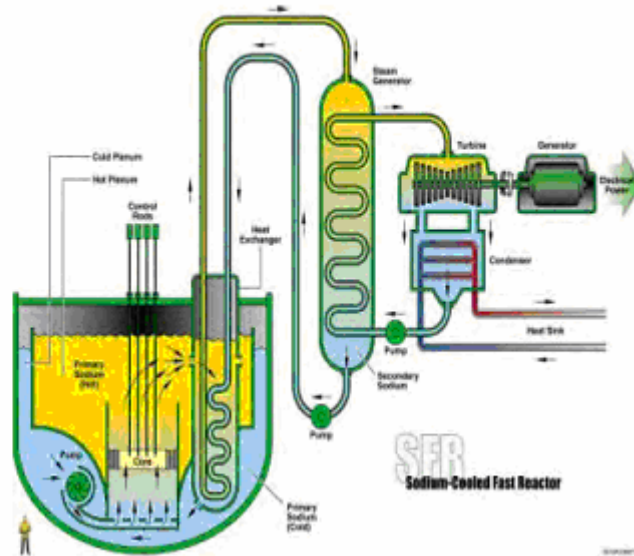


Figura 3.15 Reactor rápido enfriado con sodio⁷¹

3.6.5.5 Reactor supercrítico enfriado por agua (SCWR)

El SCWR (Supercritical Water-cooled Reactor) utiliza neutrones térmicos y un ciclo de combustible abierto o de un solo paso, de uranio. El sistema utiliza como refrigerante agua a altas presiones y temperaturas (25 MPa y 550°C) operando arriba del punto crítico del agua para alcanzar una eficiencia termodinámica cercana al 44%. La planta de referencia tiene una potencia de 1700 MW. Este sistema se considera que será económico por su alta eficiencia y su simplificación (equipos y componentes) Está destinado principalmente a la producción de energía eléctrica, aunque se podría considerar también para el proceso de electrólisis a alta temperatura en la producción de hidrógeno. El SCWR requiere avances significativos en investigación y desarrollo en materiales y estructuras para ser utilizados en un ambiente corrosivo de alta temperatura del agua supercrítica, así como en aspectos de operación y seguridad relacionados con el diseño propio de la planta. En la Figura 3.16 se presenta un diagrama del SCWR.

⁷¹ Ibid.

Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR)

Characteristics

- Water coolant at supercritical conditions
- 550°C outlet temperature
- 1700 MW
- Simplified balance of plant

Benefits

- Efficiency near 45% with excellent economics
- Thermal or fast neutron spectrum

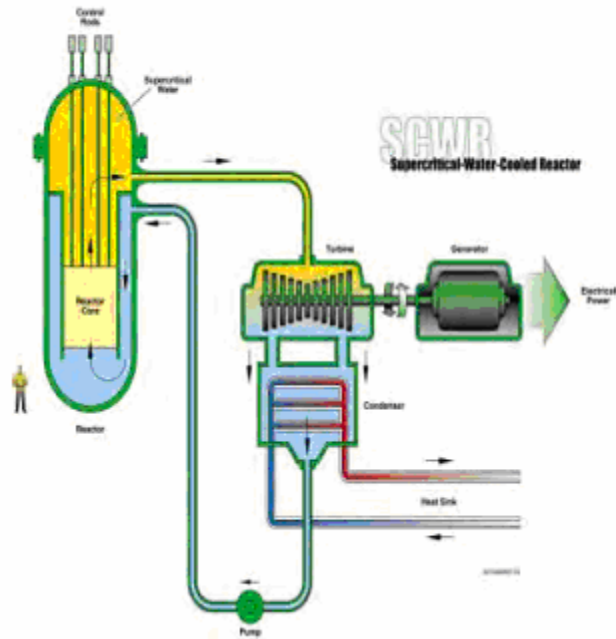


Figura 3.16 Reactor supercrítico enfriado con agua⁷²

3.6.5.6 Reactor de gas a muy alta temperatura (VHTR)

El reactor VHTR (Very High Temperature gas Reactor) utiliza neutrones térmicos y un ciclo de combustible de uranio abierto (un solo paso). Se espera que su implantación tecnológica sea en un plazo cercano, alrededor del año 2020 y está destinado para la producción de energía eléctrica de alta eficiencia y/o para producción de hidrógeno mediante procesos termoquímicos sin emisión de carbono, gracias a que tiene una temperatura de salida del refrigerante arriba de los 1000°C. Su eficiencia termodinámica es alrededor del 50%. También podría producir hidrógeno mediante la electrólisis de vapor a alta temperatura, en caso de que este proceso demuestre tener un buen desempeño. El diseño de referencia tiene una potencia de 600 MW con un refrigerante de helio y combustible de uranio-grafito. El VHTR requiere avances significativos en investigación y análisis del desempeño del combustible y en materiales sometidos a altas temperaturas, así como en aleaciones de alta temperatura como cerámicas reforzadas con fibras y materiales compuestos. Los procesos termoquímicos de separación de agua y de electrólisis a alta temperatura necesitan aún bastante investigación e integración al sistema. En la Figura 3.17 se presenta un diagrama del VHTR.

⁷² Ibid.

Very-High-Temperature Reactor (VHTR)

Characteristics

- He coolant
- 1000°C outlet temperature
- 600 MW
- Solid graphite block core based on GT-MHR

Benefits

- High thermal efficiency
- Hydrogen production
- Process heat applications
- High degree of passive safety

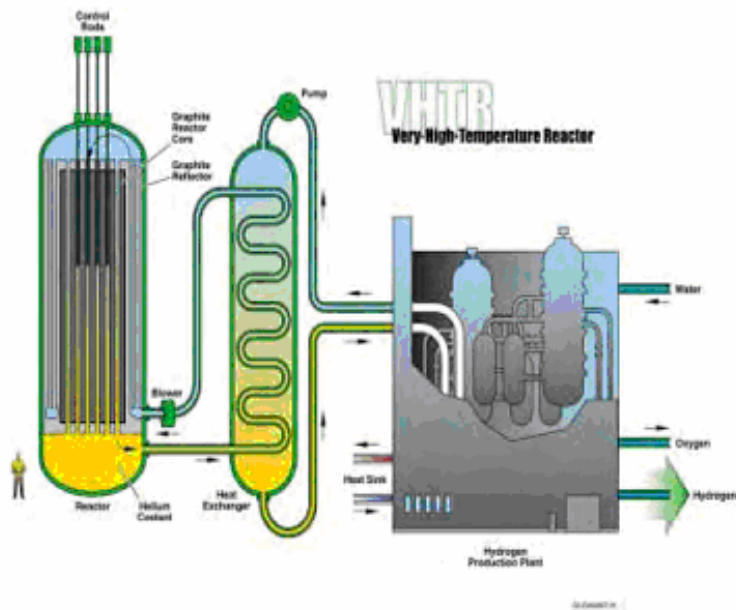


Figura 3.17 Reactor de gas a muy alta temperatura⁷³

3.7 Recursos energéticos

El uranio, descubierto en muestras de pechblenda de Alemania en 1789 y cuyo nombre deriva del planeta Urano, alcanzó gran prominencia hasta el desarrollo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Los minerales primarios de uranio con carácter económico industrial son: uraninita, pechblenda y davidita. Los minerales secundarios más comunes son: carnotita, tyuyamunita, torbenita y metatorbenita, autunita y metaautunita, uranofana y schröckingerita.

En la Tabla 3.4 pueden observarse las equivalencias energéticas entre los combustibles más utilizados, para producir energía eléctrica en el mundo.

⁷³ Ibid.

Tabla 3.4⁷⁴ Energía nuclear y fuentes fósiles. Equivalencias energéticas

Combustible	Uranio-235	Petróleo	Carbón	Gas natural
U-235	1 g	13 barriles	2.8 ton	2.5 millones de litros
Petróleo	76 mg	1 barril	215 kg	192 mil litros
Carbón	350 mg	4.5 barriles	1 tonelada	892 mil litros
Gas	0.4 mg	0.8 mL	1.12 gr	1 litro

En la Tabla 3.5 se muestra un comparativo de las cantidades requeridas por tipo de combustible para la generación de mil megawatts año.

Tabla 3.5⁷⁵ Requerimientos de combustible para la generación eléctrica

Combustible	Cantidad para producir 1000 MW(e) año (* incluye factores de eficiencia)
U-235	3.6 toneladas
Petróleo	15 millones de barriles
Carbón	3 millones de toneladas
Gas	2.4×10^{12} litros

En este marco y dadas las características de la energía nuclear (cero emisiones de gases invernadero durante la generación; emisiones equiparables con las de las llamadas fuentes renovables en otras fases de la cadena de generación; densidad de energía para alimentar cargas base; entre otras) esta opción se apunta como una de las que habrán de ser consideradas en los planes de expansión eléctrica para el mediano plazo. De hecho, algunos escenarios de previsión energética en el mundo ya postulan crecimientos de la capacidad nuclear instalada del orden del 70% o más.

Para poder aprovechar el uranio y valorarlo como un recurso sustentable, deben considerarse factores como el ciclo de combustible nuclear y su situación actual en el mundo, los recursos disponibles, las capacidades tecnológicas y los aspectos económicos que impactan la generación de la nucleoelectricidad.

Con base en las definiciones formales de recursos establecidas por la Agencia de Energía Nuclear (AEN) de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y avaladas por el

⁷⁴ José Raúl Ortiz Magaña. (2006) Reservas de Uranio y los factores económicos para su transformación en electricidad. Obtenido el 15 de abril de 2008 de:

<http://omega2.inin.mx/publicaciones/documentospdf/44%20URANIO.pdf>

⁷⁵ Ibid

Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) los recursos uraníferos pueden categorizarse en cuatro:

1. Recursos Razonablemente Asegurados (RRA) Uranio que existe en depósitos minerales conocidos, de tamaño delineado; es susceptible de ser recuperado mediante las tecnologías de extracción y procesamiento ya probadas en la actualidad.
2. Recursos Adicionales Estimados Categoría I (RAE-I) Uranio adicional al RRA, cuya existencia es inferida a partir de una evidencia geológica directa. Se encuentra en extensiones de depósitos geológicos bien explorados, o cuya continuidad geológica ha sido establecida.
3. Recursos Adicionales Estimados Categoría II (RAE-II) Uranio adicional a RAE-I que se espera exista en depósitos para los cuales la evidencia es principalmente indirecta. Se ubica en tendencias geológicas bien definidas o áreas de mineralización con depósitos conocidos.
4. Recursos Especulativos. Uranio adicional al RAE-II que se piensa existen sobre la base de una evidencia indirecta y extrapolaciones geológicas. Está en depósitos susceptibles de ser descubiertos con las técnicas de exploraciones existentes.

También con base en las compilaciones de las dos organizaciones mencionadas, los recursos convencionales de uranio en el mundo son de 14.4 millones de toneladas. Pero también existen recursos no convencionales cuyo volumen extraíble asciende a 434.2 millones de toneladas que pueden obtenerse de fosfato y de agua de mar. En una estimación de su duración al ritmo de consumo de 2005 y de acuerdo con las modalidades de utilización actuales de energía eléctrica, los recursos uraníferos convencionales y no convencionales serían suficientes para 6 mil 150 años.⁷⁶

Finalmente, es necesario considerar otras modalidades tecnológicas que hasta el momento sólo se han utilizado de manera incipiente, como el aprovechamiento del torio para la producción de uranio 233 y/o del uranio 238 para la producción de plutonio (Capítulo 3.2)

Desafortunadamente en México las actividades de cuantificación de reservas de uranio y de torio se abandonaron hace casi 25 años; sin embargo, se cuenta con la siguiente información:

Las reservas probadas de uranio en México, son de 14,600 toneladas, de las cuales 10,600 son económicamente explotables. Estas reservas asegurarían el combustible necesario para abastecer los dos reactores de la CNLV durante toda su vida, con un excedente del 30%.⁷⁷

Los yacimientos que sobresalen por sus concentraciones de uranio en el país están localizados en los estados de Sonora, Durango, Chihuahua, Coahuila y Oaxaca. Las principales especies minerales de uranio explotables son: pechblenda, carnotita, autunita, uranofana y uraninita. En la Figura 3.18 se muestra un mapa de México con los principales yacimientos minerales radiactivos.

⁷⁶ Ibid

⁷⁷ Isabel Domínguez Trejo, Nora Alejandra Hernández Barroso, Gloria Arango Solano, Jacobo Medina Gutiérrez (2006) Yacimientos de uranio en México. Recuperado el 15 de abril de 2008 de: http://smm.iim.umich.mx/12_Dominguez_U.pdf

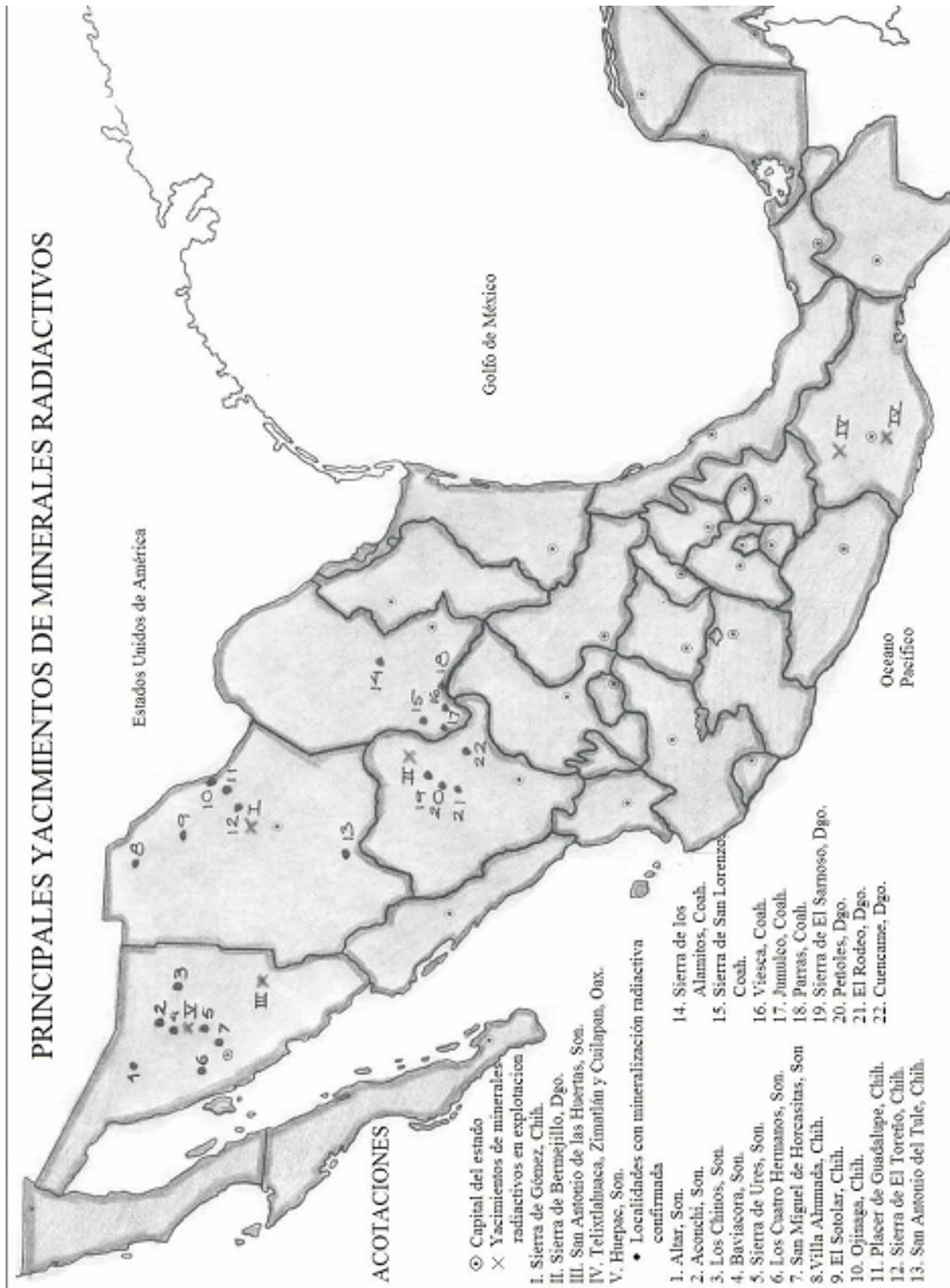


Figura 3.18 Principales yacimientos de minerales radiactivos en México⁷⁸

⁷⁸ Ibid.

Aunque en el país hay numerosos yacimientos potenciales, como los que se encuentran en el estado de Chihuahua, éstos no son explotados, quizás por cuestiones económicas, políticas o ambientales, pero que no permiten un avance en el aprovechamiento de los recursos minerales.

México tiene diferentes estructuras geológicas donde es probable encontrar minerales uraníferos que podrían ser exploradas. Sin embargo, los proyectos actuales encaminados a este propósito no son totalmente del dominio público y nos limitamos a información antigua y que quizá pueda ser obsoleta. En la Tabla 3.6 se muestra la evolución de las reservas de uranio en México entre los años de 1959 a 1971.

Tabla 3.6 Evolución de las reservas de uranio en México. Periodo 1959-1971⁷⁹

Año	Toneladas U₃O₈	Incremento anual U₃O₈
1959	250	-
1960	280	30
1961	840	560
1962	1020	180
1963	1040	20
1964	1540	300
1965	1790	250
1966	2070	280
1967	2305	235
1968	2460	155
1969	2820	560
1970	3160	340
1971	3160	-
1972	1200	-1960
1973	3980	820
1974	5800	1820
1976	8133	160
1977	7741	-392

3.8 Ciclo de combustible nuclear e impactos ambientales

En el caso de la energía nuclear es muy frecuente hablar de ciclo de combustible nuclear para hablar de la cadena energética completa. El ciclo de combustible es el conjunto de operaciones necesarias para procesar y fabricar el combustible nuclear, utilizado en los reactores de fisión, así como para recuperar materiales físi les del combustible irradiado, y el depósito temporal o definitivo de los residuos radiactivos (ver Figura 3.19)

La recuperación de material físi l y fértil del combustible irradiado se llama reprocesamiento. Cuando este proceso sí está incluido como una etapa en la cadena energética se hace realmente un ciclo de combustible nuclear pues el material recuperado es reutilizado en la fabricación de combustible. Se

⁷⁹ Ibid.

habla de ciclo de combustible nuclear abierto sin reprocesamiento cuando no se realiza el reciclaje de combustible. En resumen:

Ciclo de combustible abierto: no tiene reprocesamiento y es el que utilizan la mayoría de los países.

Ciclo de combustible cerrado: incluye reprocesamiento, parte del combustible es reciclado. El ciclo de combustible cerrado representa una fuente energética sustentable, actualmente se utiliza en algunos países como Francia, Suiza, Bélgica y Japón.

De manera general, el ciclo de combustible nuclear se puede dividir en tres fases:

1. Fase de preirradiación. Es la primera fase del ciclo de combustible, incluye desde la minería hasta la inserción de los elementos combustibles en el núcleo del reactor.
2. Fase de irradiación. Es la fase en la que se extrae la energía del combustible durante la operación del reactor.
3. Fase de postirradiación. Incluye desde la descarga de combustible del núcleo hasta la disposición final del combustible irradiado.

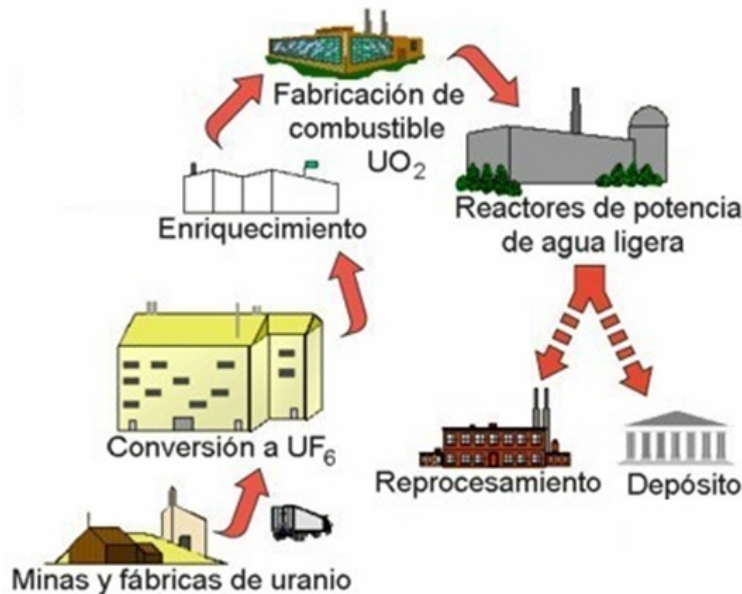


Figura 3.19 Ciclo de combustible nuclear⁸⁰

3.8.1 Etapas del ciclo de combustible nuclear incluyendo todas las actividades:

3.8.1.1 Exploración

Un depósito de uranio, descubierto mediante técnicas geofísicas, es evaluado y muestreado para determinar las cantidades de materiales de uranio que son extraíbles a unos costos específicos. Las

⁸⁰ Imagen adaptada de: http://mit.ocw.universia.net/22.351/NR/rdonlyres/6588654C-49C9-495D-81D6-5F003B3CAE6E/0/chp_nuclearfuelcycle1.jpg

reservas de uranio son las cantidades de mineral que se estima se pueden extraer a costos especificados. El uranio que se obtiene naturalmente contiene aproximadamente el 99.28% de U-238 y el 0.71% de U-235 y el restante es U-234. Los impactos de esta etapa son similares a los de la exploración de otros recursos, pero se manejan cantidades muy inferiores a las de carbón e hidrocarburos para producir la misma cantidad de energía.⁸¹

3.8.1.2 Minería

El mineral de uranio (ver Figura 3.20) puede obtenerse en excavaciones a cielo abierto o subterráneas, con métodos similares a la minería de otros metales. Las minas de uranio en los Estados Unidos contienen normalmente de un 0.05 a un 0.3% de óxido de uranio (U_3O_8). Algunos depósitos de uranio explotados en otros países son de mayor porcentaje y también más grandes que los de Estados Unidos. El uranio también está presente en reducidas proporciones (de 50 a 200 partes por millón) en algunos depósitos que contienen fosfatos de origen marino.



Figura 3.20 Mineral de uranio – la materia prima principal del combustible nuclear⁸²

La minería y procesamiento de los minerales de uranio produce grandes cantidades de residuos que deben ser gestionados en forma segura. Estos residuos constituyen fuentes potenciales de repercusión química y radiológica, tanto para las personas que trabajan en la industria como para los individuos del público que pueden resultar expuestos, si los mismos se dispersaran en el ambiente. Dada los largos períodos de vida de los radionucleidos que contienen los residuos, y las características físicas y químicas de los mismos, deberán estudiarse las repercusiones a largo plazo de los procesos ambientales (erosión, inundaciones, sismicidad, etc.) sobre los sistemas destinados al emplazamiento final de estos residuos.

En general, la minería del uranio es bastante similar a la de cualquier otro mineral. La diferencia fundamental consiste en que al extraer uranio, se liberan sustancias radiactivas que causan irradiación de los trabajadores mineros, pudiendo además causar contaminación interna, sobre todo de las vías respiratorias. En el caso de la minería, al igual que en el beneficio del uranio, las personas que trabajan directamente con el uranio están expuestas a la irradiación pulmonar por el gas radón y sus productos de decaimiento. En el caso de los trabajadores de mina, el riesgo involucrado se traduce en un incremento en la incidencia de cáncer en las vías respiratorias. Por estas razones, es de suma importancia contar con una buena ventilación en los túneles de las

⁸¹ Comisión Nacional de Energía Atómica. Ciclo de combustible nuclear (2005) Recuperado el 30 de octubre de 2008 de: http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/CAPITULO_6_Difusion/CICLO_COMB_NUCL/Ciclo_combustible.htm

⁸² Imagen recuperada de: <http://resourcescommittee.house.gov/subcommittees/emr/usgsweb/photogallery/images/Uranium>

minas, así como con un sistema de control de personal que trabaje directamente con el material radiactivo. Estas medidas, reducen a niveles mínimos los riesgos inherentes a estas actividades.

3.8.1.3 Beneficio y purificación

La planta de beneficio y purificación se instala en las cercanías de la mina. El uranio extraído normalmente se procesa para reducir el material a un tamaño uniforme de partícula, para, a continuación, tratar el mineral para extraer el uranio mediante lixiviado químico. Se lixivia el mineral y los licores de lixiviación se purifican por intercambio iónico o extracción por solventes. Este proceso en ocasiones llamado simplemente "molienda", produce un concentrado, que puede ser un diuranato de sodio o amonio y tiene una pureza del orden de 85% en U_3O_8 . La forma en que el uranio se comercializa en el mercado mundial es este concentrado, llamado también "yellowcake," (torta amarilla por ser un polvo seco de color amarillo (ver Figura 3.21)



Figura 3.21 Yellowcake (Torta amarilla) – la forma en la que el uranio es vendido como U_3O_8 ⁸³

3.8.1.4 Conversión del uranio

El óxido de uranio molido, U_3O_8 , debe ser convertido en hexafluoruro de uranio, UF_6 , el cual es la forma requerida actualmente por la mayoría de las plantas de enriquecimiento de uranio en funcionamiento. Obviamente, el producto UF_6 convertido contiene sólo uranio natural.

La conversión consiste en que el uranio natural se envía en forma de diuranato de amonio o sodio a las plantas industriales de conversión, donde inicialmente se convierte en UO_2 para luego ser hidrofloreinado y transformado en UF_4 , que finalmente se hace reaccionar con flúor gaseoso para producir UF_6 (ver Figura 3.22) Este compuesto, tiene el problema de que reacciona fácilmente con agua y materiales orgánicos por lo que se envía a las plantas de enriquecimiento en cilindros de acero diseñados para evitar el contacto con el aire húmedo.



Figura 3.22 UF_6 – Forma en que el uranio es convertido para el enriquecimiento⁸⁴

⁸³ Ibid.

⁸⁴ Ibid.

3.8.1.5 Enriquecimiento

Como ya se mencionó, en los núcleos de los reactores de agua ligera, la concentración del isótopo físil que existe en el uranio natural, es inferior a la requerida para mantener una reacción nuclear en cadena. Por lo tanto estos reactores requieren de uranio ligeramente enriquecido; es decir, con una concentración de U-235 elevada con respecto a la del uranio natural. El UF_6 natural, por tanto, debe ser enriquecido con el isótopo físil para que pueda utilizarse como combustible nuclear. Los diferentes niveles de enriquecimiento requeridos para una aplicación concreta como combustible nuclear son especificados por el cliente: el combustible para un reactor de agua ligera normalmente tiene diferentes enriquecimientos que pueden llegar hasta cerca del 5% de U-235.

El proceso llamado "enriquecimiento de uranio" consiste en la separación isotópica del uranio, con el objeto de obtener dos productos con diferentes composiciones isotópicas, uno llamado "uranio enriquecido", con un porcentaje de U-235 más alto que el del uranio natural y el otro llamado "colas", con un porcentaje de U-235 menor que el del uranio natural, al cual también se le llama empobrecido,

Vista como una caja negra, una planta de enriquecimiento de uranio es algo a lo que hay que alimentar con uranio (generalmente uranio natural) y con energía, y produce uranio enriquecido y uranio empobrecido (colas)

Los dos procesos utilizados hoy en día de manera industrial son el de difusión gaseosa y el de centrifugación gaseosa.

El enriquecimiento del UF_6 por difusión gaseosa consiste en bombear este compuesto del uranio a través de una membrana porosa que favorece la difusión selectiva del U-235 sobre la del U-238. Una planta de enriquecimiento de uranio consiste de un arreglo de muchas etapas unidas en serie, siendo una etapa la unidad más pequeña de enriquecimiento. Como se muestra en la Figura 3.23, en una etapa, el flujo de alimentación se divide en dos corrientes, una ligeramente enriquecida y la otra ligeramente empobrecida.

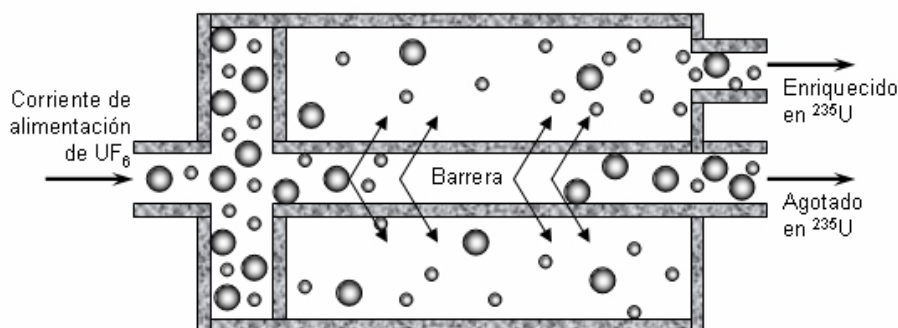


Figura 3.23 Funcionamiento de una etapa en el proceso de difusión gaseosa⁸⁵

El enriquecimiento del UF_6 por centrifugación gaseosa está basado en el hecho de que el gradiente de presión en un cilindro giratorio, lleno de gas UF_6 , es más acentuado para las moléculas con U-

⁸⁵ Ibid.

238 que para las moléculas con U-235. Como consecuencia de esto, la distribución geométrica de estas especies en el cilindro giratorio es diferente. Las moléculas pesadas se agrupan hacia la pared del rotor, entonces, la fracción con moléculas ligeras puede extraerse mediante una toma cerca del centro, mientras que la fracción con moléculas pesadas se extrae por una toma localizada cerca de la pared del rotor. La eficiencia de separación de una centrífuga se puede incrementar considerablemente provocando un flujo de gas-corriente, por lo que se logra un efecto de separación axial que se suma al radial. La Figura 3.24 muestra el diagrama de funcionamiento de una etapa centrífuga y la Figura 3.25 muestra una foto de una planta de centrifugación gaseosa.

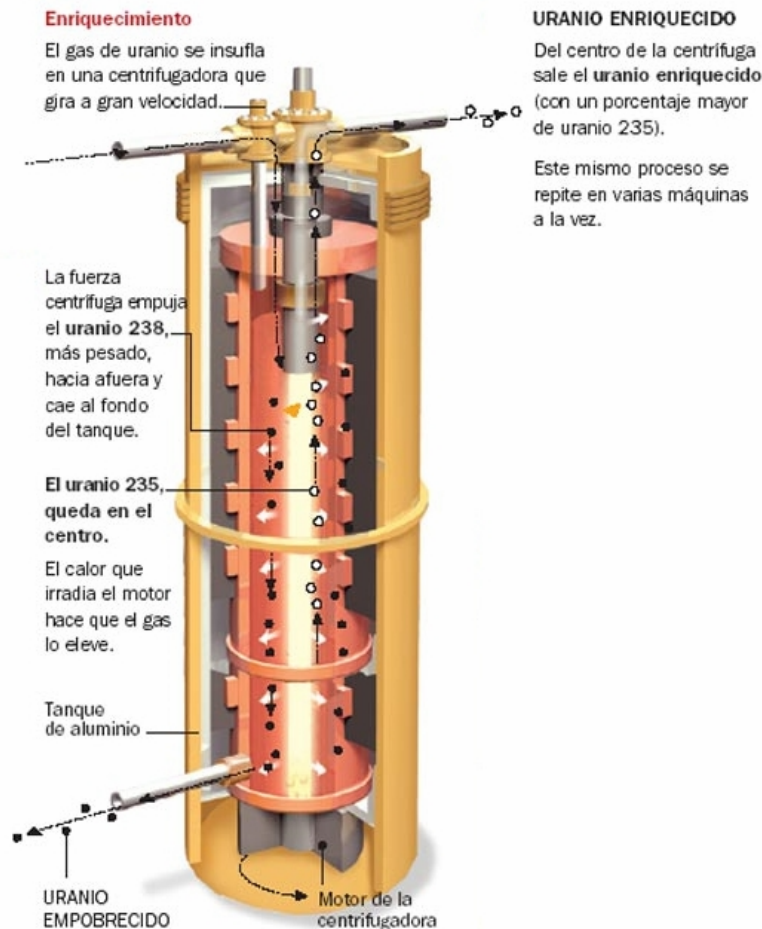


Figura 3.24 Diagrama de funcionamiento de una centrífuga⁸⁶

⁸⁶ Ibid.

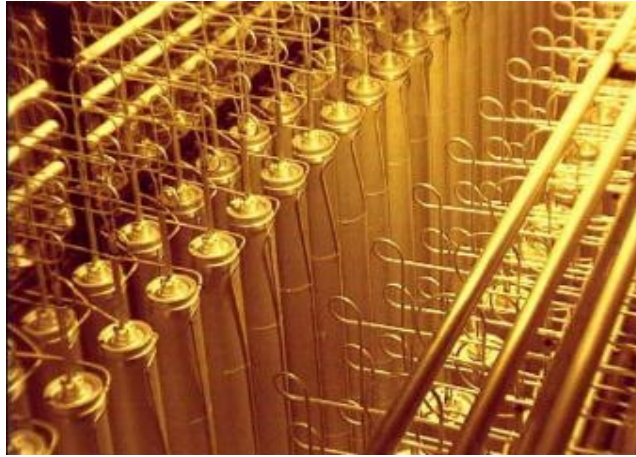


Figura 3.25 Planta de centrifugación gaseosa⁸⁷

El impacto ambiental de la etapa de enriquecimiento se debe precisamente al consumo energético y en el caso de utilizarse combustibles fósiles se tienen emisiones de gases de combustión, pero si la energía proviene de potencia nuclear, esta etapa es también limpia de emisiones.

3.8.1.6 Fabricación

Para su uso como combustible nuclear, el UF_6 enriquecido se convierte en polvo de dióxido de uranio (UO_2) el cual posteriormente se procesa en forma de pastillas (pellets). Éstas son horneadas a alta temperatura para crear pastillas cerámicas. Éstas se introducen en tubos de una aleación metálica (por ejemplo de zircaloy) resistente a la corrosión, los cuales son sellados en sus extremos. A estos tubos se les llama "barras de combustible" (fuel rods) (ver Figura 3.26)



Figura 3.26 Barra de combustible compuesta por pastillas⁸⁸

Finalmente, estas barras se agrupan en "ensambles de combustible" (fuel bundles) guardando distancias precisas. La Figura 3.27 muestra un ensamble de reactor tipo BWR.

⁸⁷ Imagen tomada de: <http://www.world-nuclear.org/ecsgallery/imageDisplay.aspx?id=10826&Page=1>

⁸⁸ Imagen recuperada de: <http://www.world-nuclear.org/ecsgallery/imageDisplay.aspx?id=10818&Page=1>

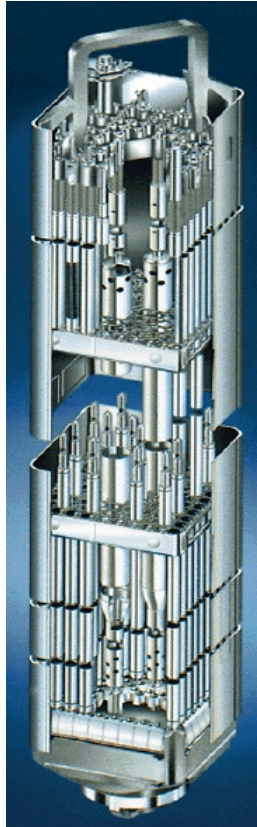


Figura 3.27 Ensamble de combustible (Caso del BWR) [30]

Los ensambles de combustible son utilizados para constituir el núcleo del reactor y a cada ensamble se le asigna una identificación única, que permite su seguimiento desde su fabricación hasta su disposición final.

3.8.1.7 Irradiación

La irradiación consiste en la utilización del combustible en el reactor para generar potencia. El núcleo de un reactor está compuesto por cientos de ensambles combustibles (444 en el BWR de Laguna Verde) y de barras de control (109 en Laguna Verde) como se muestra en la Figura 3.28

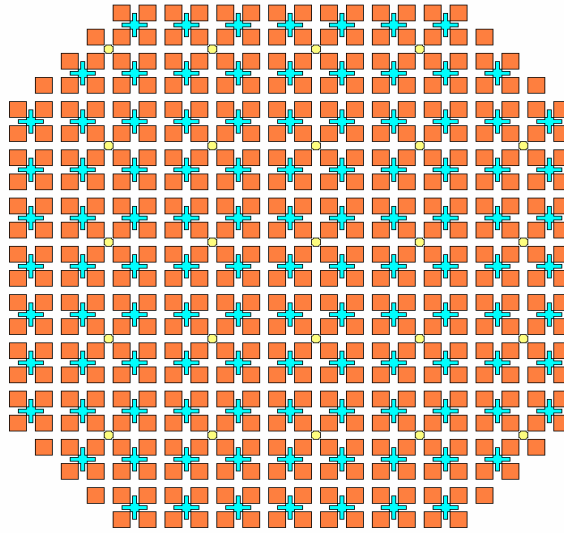


Figura 3.28 Arreglo de ensamblajes combustibles en el núcleo del reactor

Recarga de combustible

Para la alimentación de combustible, en los reactores que contienen el núcleo dentro de una vasija, como el BWR y el PWR, deben ser parados periódicamente para recargar combustible. En esta operación se retiran los combustibles más gastados; es decir, los que ya no pueden entregar más energía y se introducen combustibles nuevos buscando el acomodo más adecuado para el funcionamiento del reactor.

Algunos diseños de reactores, tales como el CANDU y el RBMK pueden ser realimentados de combustible sin detener su funcionamiento y la entrega de energía eléctrica.

3.8.1.8 Almacenamiento provisional

Después de su ciclo de funcionamiento, el reactor es detenido para su realimentación. El combustible descargado en ese momento (combustible gastado) es almacenado en el propio emplazamiento del reactor en una alberca de combustible gastado. La alberca de agua proporciona a la vez refrigeración (el combustible gastado sigue generando calor como resultado de la radiactividad residual) y protección (para proteger el entorno de radiación residual ionizante)

3.8.1.9 Reprocesamiento

El combustible gastado descargado de los reactores contiene cantidades apreciables de isótopos fisiles (U235, Pu239) del isótopo fértil (U238) y de otros materiales radiactivos, incluidos venenos nucleares. Estos materiales fisiles o fértiles pueden ser separados químicamente y recuperarse del combustible gastado en una planta de reprocesamiento.

El uranio y el plutonio recuperados pueden, si las condiciones institucionales y económicas lo permiten, ser reciclados para su uso como combustible nuclear. Como ya se mencionó, el óxido de mezcla, o combustible MOx, es una mezcla de uranio y plutonio recuperados y uranio empobrecido,

que se comporta de forma similar (aunque no idéntica) a la alimentación con uranio enriquecido, para la cual fueron diseñados muchos reactores. El combustible MOx es una alternativa al uranio de bajo enriquecimiento (LEU, Low Enrichement Uranium) utilizado en los reactores de agua ligera, los cuales son predominantes en la generación de energía nuclear.

3.8.1.10 Transporte de materiales radiactivos

El transporte es una parte integrada en el ciclo del combustible nuclear. Hay reactores de energía nuclear en funcionamiento en varios países, pero la minería del uranio sólo es viable en unas pocas áreas. Además, en el curso de alrededor de cincuenta años de funcionamiento de la industria nuclear, se han creado un número de establecimientos específicos en varias partes del mundo para prestar servicios relacionados con el ciclo de combustible nuclear y se ha creado la necesidad de transportar los materiales nucleares a y desde estos establecimientos. La mayoría de los transportes tienen lugar entre las diferentes etapas del ciclo, pero en ocasiones el material puede ser objeto de transporte entre establecimientos similares. Con alguna excepción, los materiales del ciclo de combustible nuclear se transportan en forma sólida, siendo la excepción el hexafluoruro de uranio (UF_6) que es un gas. La mayoría del material utilizado en el combustible nuclear es transportado varias veces durante el ciclo. Los transportes son, a menudo internacionales y frecuentemente de grandes distancias, siendo efectuados normalmente por compañías de transporte especializadas. La Figura 3.29 muestra un barco para transporte de combustible gastado.

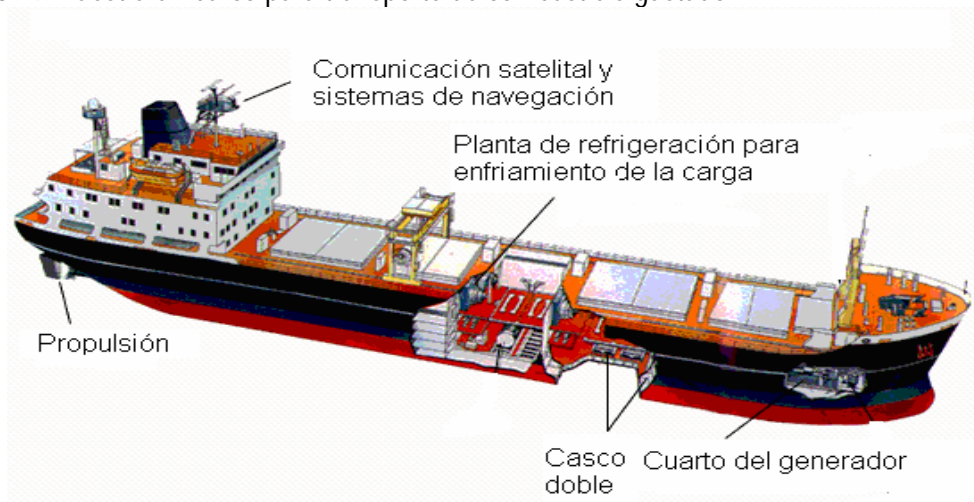


Figura 3.29 Barco para transporte de combustible gastado⁸⁹

Puesto que los materiales nucleares son radiactivos, es importante asegurar que la exposición a la radiación sea limitada, tanto para las personas que realizan el transporte como para la población en general a lo largo de las vías de transporte. El embalaje del material nuclear incluye la protección para reducir las potenciales exposiciones a la radiación. En el caso de algunos materiales, tales como los ensambles de uranio combustible nuevo, los niveles de radiación son despreciables y no requieren protección especial. Otros materiales, tales como el combustible usado y los residuos de alto nivel, son altamente radiactivos y requieren un manejo especial. Para limitar el riesgo en el transporte de materiales altamente radiactivos, se utilizan contenedores conocidos como "cascos para el transporte de combustible nuclear gastado" los cuales están diseñados para mantener su

⁸⁹ Imagen adaptada de: <http://www.world-nuclear.org/ecsgallery/imageDisplay.aspx?id=10790&Page=2>

integridad en condiciones de transporte normal y también en caso de hipotéticos accidentes. La Figura 3.30 muestra un contenedor para almacenamiento de combustible gastado de reactores PWR.

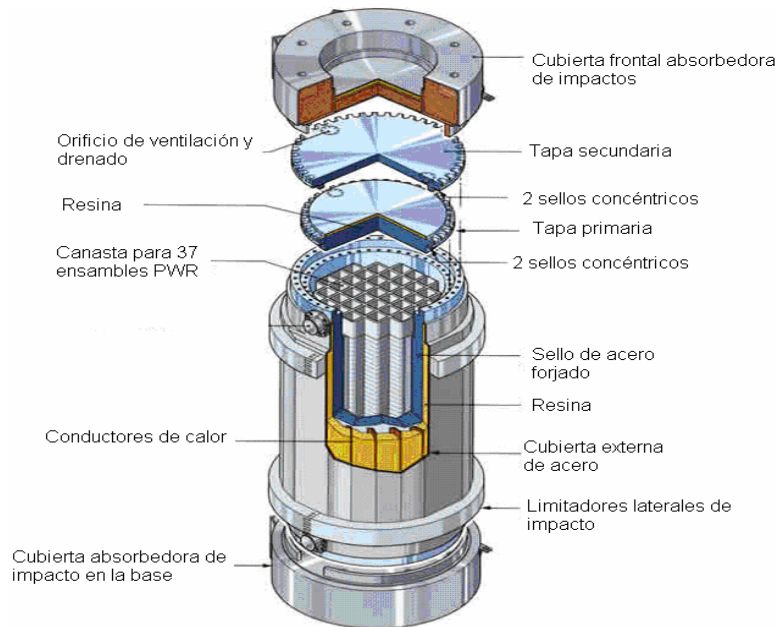


Figura 3.30 Contenedor para almacenamiento de combustible gastado de reactores PWR [30]

3.8.1.11 Disposición de los residuos

Una preocupación actual en el campo de la energía nuclear es la disposición segura y el aislamiento del combustible gastado de los reactores, y de los residuos de las plantas de reprocesado, si se utilizara la opción de reprocesado. Estos materiales deben aislarse de la biosfera hasta que la radiactividad que contengan haya disminuido hasta un nivel seguro. En los Estados Unidos, según la Nuclear Waste Policy Act de 1982, el Departamento de Energía tiene la responsabilidad de desarrollar un sistema de disposición para el combustible nuclear gastado y los residuos de alto nivel de radiactividad. Los planes actuales aluden a una disposición final de los residuos en forma sólida en un almacenamiento geológico profundo, dentro de estructuras geológicas estables (ver Figura 3.31)

Barreras de Ingeniería

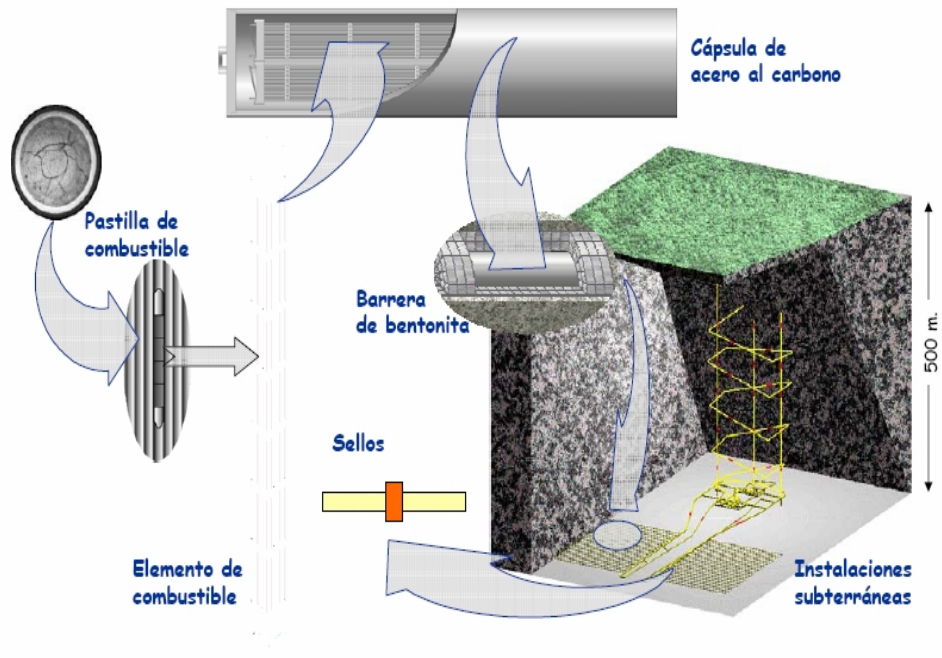


Figura 3.31 Almacenamiento Geológico Profundo [30]



CAPÍTULO 4

Fusión Nuclear

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MEXICO

Capítulo 4

4 Fusión Nuclear

4.1 Introducción

La tercera clase de reacciones nucleares que ofrece posibilidades como fuente de energía en gran escala es la fusión. La fusión termonuclear controlada es una de las pocas opciones energéticas con capacidad potencial de suministro a gran escala para el siglo XXI y posteriores. Sin embargo, es necesario superar el problema de la complejidad tecnológica de los dispositivos para llevar a cabo la fusión controlada y tener posibilidad de recuperar la energía producida.⁹⁰

El objetivo de este capítulo es describir con un lenguaje científico, no necesariamente de especialista en el área de la fusión nuclear, los principales conceptos que nos pueden ayudar al entendimiento de las características de la tecnología del aprovechamiento de la energía de la fusión nuclear, para poder ser comparada con la energía obtenida de la fisión nuclear descrita en el capítulo precedente.

La reacción de fusión nuclear requiere que dos núcleos se acerquen lo suficiente, para que la fuerza nuclear atractiva se haga sentir y los dos iones se fundan en uno solo con la consecuente ganancia de energía. Sin embargo, los núcleos tienen carga positiva y se repelen eléctricamente; esta repulsión actúa a distancias mucho mayores que el alcance de la interacción fuerte. Como la repulsión eléctrica es proporcional al producto de las cargas que se repelen, el acercamiento es más fácil para los núcleos ligeros, pues llevan menos carga. Para conseguir la fusión nuclear debemos usar, entonces, el hidrógeno y sus isótopos. De todas formas, el rechazo entre las cargas significa una fuerte barrera que se opone a la fusión y que deberá ser vencida.

Analicemos primero cuáles son las posibilidades de que se produzca la fusión en las condiciones habituales de temperatura y presión. Aunque los núcleos normalmente se hallan alejados uno del otro y separados por la barrera de repulsión eléctrica, la mecánica cuántica permite penetrarla. En otros términos, en el mundo microscópico las barreras no son insalvables debido al principio de incertidumbre y a las propiedades ondulatorias de la materia. En una molécula diatómica de un gas a la temperatura ambiente, por ejemplo, la distancia media entre los dos núcleos es del orden de 10^{-8} cm. Sin embargo, la posición no se puede conocer con precisión absoluta. Por lo tanto, la probabilidad de que los dos núcleos se encuentren en el mismo sitio y que choquen, no es nula desde un punto de vista cuántico. Sin embargo, este proceso de fusión, que bien podríamos catalogar como "fría", tiene una probabilidad de ocurrencia insignificante. Las estimaciones más optimistas predicen que para que ocurriera un solo proceso de fusión en un litro de gas de hidrógeno a presión atmosférica y temperatura ambiente (del orden de 20°C) habría que esperar un tiempo mucho mayor que el transcurrido desde el origen del Universo.⁹¹ ¿Cómo acelerar el proceso? Conceptualmente, la manera más simple de inducir la fusión es aumentar, por algún método, la energía cinética de los núcleos a un valor superior a la energía de repulsión eléctrica, para que así se acerquen mucho unos a otros. Una posibilidad es utilizar aceleradores de partículas, aparatos

⁹⁰ Thomas J. Connolly, *Fundamentos de ingeniería nuclear*. Op.Cit.

⁹¹ Jorge Flores Valdés, Arturo Menchaca Rocha (1991) La Gran Ilusión 4. La Fusión Fría. Obtenido el 19 de agosto de 2008 de:

<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/110/htm/lagran4.htm>

que con inmensos campos eléctricos y magnéticos pueden lograr que las partículas alcancen altas velocidades. Con estos aparatos se ha podido estudiar no sólo el proceso de fusión sino la estructura interna misma de los núcleos. Sin embargo, para producir energía mediante la fusión nuclear; el uso de los aceleradores resulta inoperante, pues para acelerar cada núcleo necesitamos invertir mucho más energía de la que se obtiene de la fusión. En consecuencia, otros caminos son actualmente investigados.

Como ya hemos visto, la reacción de fusión es más probable mientras menor sea la carga de los núcleos que se unen, pues entonces la barrera repulsiva es más pequeña. En consecuencia, recurrimos al hidrógeno y entre los isótopos de éste al deuterio o al tritio, cuyas fusiones son muy favorables energéticamente. En la Tabla 4.1 se ve que Q es positiva, o sea que los productos finales de las reacciones posibles de fusión emergen con energías mayores de las que se impartieron a los núcleos iniciales.

En la Tabla 4.1 además del valor Q para cada reacción se da, en la tercera columna, la probabilidad relativa con la que puede ocurrir cada uno de los procesos. Así, las reacciones entre deuterones que producen ya sea ${}^3\text{He}$ más neutrones o tritio más protones, se presentan con la misma frecuencia, pero aquella reacción entre dos núcleos de deuterio que produce ${}^4\text{He}$ y rayos gamma es diez millones de veces menos probable que las dos reacciones anteriores. Por otro lado, las que hemos marcado en la tercera columna, como "secundarias", también son poco probables, pues es necesario que alguna otra reacción "primaria" haya tenido lugar anteriormente. En particular, las que incluyen deuterio y tritio, obviamente, requieren que este último ya se haya generado.

Tabla 4.1 Características de las reacciones de fusión nuclear ⁹²

<i>Reacción</i>	<i>Valor de Q en MeV</i>	<i>Probabilidad relativa</i>
$D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	3.3	1
$D + D \rightarrow T + p$	4.0	1
$D + D \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	23.9	10^{-7}
$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17.6	secundaria
$p + D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.5	secundaria
$p + T \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19.8	secundaria

⁹² Ibid

El uso del deuterio presenta varias ventajas adicionales. La primera, que es muy abundante como energético, pues puede extraerse del agua de mar con tecnologías ya maduras. El tritio, por su parte, no existe en la naturaleza y por lo tanto es más escaso, aunque es un subproducto de las mismas reacciones de fusión además de que se produce por la captura neutrónica del hidrógeno en los reactores de fisión nuclear. Cabe señalar que el riesgo radiológico del tritio es pequeño si se le compara con el que implican los residuos de los productos de la fisión, hoy empleada en los reactores nucleares. Por un lado, la vida media del tritio es de 12.2 años y por tanto mucho más corta que la de los productos de fisión, que es de miles de años. Por otro lado, el tritio al decaer emite un electrón con energías pequeñas, comparables a las producidas en un televisor a color; por lo que su penetración en el aire es apenas de unos cuantos centímetros. Sin embargo, el principal riesgo asociado al tritio es que lo inhalamos o ingerimos, pues reemplaza al hidrógeno del agua que hay en el organismo y causa irradiación interna.⁹³

La fusión nuclear es una fuente alterna de energía con grandes posibilidades a futuro y muchas ventajas sobre otros métodos, incluida la discutida fisión nuclear. Pero en la práctica las cosas no resultan tan simples. Fabricar un reactor de fusión nuclear controlada ha sido el objetivo de muchos años de investigación científica y tecnológica y ha requerido de inversiones astronómicas. Algunos problemas se han resuelto ya, pero muchos restan aún. El gran reto es construir reactores de fusión para reproducir en la Tierra las reacciones que se producen en el interior de las estrellas. Por ejemplo, en el centro del Sol los átomos se encuentran muy cerca unos de otros gracias a la fuerza de gravedad, existen temperaturas de 10 a 15 millones de grados Celsius, altas presiones del orden del cuarto de millón de millones de atmósferas, densidades ocho veces superiores a la del oro y por lo tanto la materia es capaz de fusionarse y convertirse en grandes cantidades de energía.

Hablemos ahora de la posibilidad de la fusión nuclear en la Tierra:

- a) El combustible es abundante: el deuterio forma parte del agua de mares y océanos, el tritio se podría producir a partir del litio, en el mismo reactor, en el llamado manto fértil.
- b) El sistema es seguro: un reactor sólo contiene combustible para unos segundos de operación.
- c) La fusión es respetuosa con el medio ambiente al no producir gases contaminantes. Además, escogiendo materiales de construcción de baja activación se evitaría almacenar residuos estructurales durante centenares de años.

Actualmente se encuentra en desarrollo el proyecto más ambicioso en la historia de la humanidad para construir un reactor de fusión nuclear, se trata del proyecto ITER el cual será abordado más adelante.

⁹³ Ibid

4.2 La fusión caliente y fría

4.2.1 La fusión caliente

En nuestro Sol las reacciones de fusión nuclear ocurren de manera sostenida, sin que sea preciso inyectarle energía del exterior. Que éstas sean reacciones autosostenidas, se debe a que el gas en el Sol se encuentra a muy altas presiones y temperaturas. Así, los núcleos en la estrella chocan con mucha frecuencia y gran velocidad, lo que les permite superar la barrera de repulsión eléctrica que los separa. Algo análogo ocurre en la vecindad de objetos cósmicos, como los pulsares y los cuasares, donde se producen campos electromagnéticos de gran intensidad.

En un gas a alta temperatura, la velocidad promedio de las moléculas es grande. Por ejemplo, en el centro del Sol se tiene una temperatura de 15 millones de grados y la velocidad promedio de las moléculas es de 30,000 km/s, un décimo de la velocidad de la luz. Desde luego, hay algunas moléculas que son más rápidas que otras. Al aumentar la presión y comprimir al gas, acercamos más a las partículas, que ahora chocan con mayor frecuencia. Cuando el gas se halla a muy alta temperatura, los choques son muy violentos y pueden disociar las moléculas en átomos, o aun desprender de éstos a los electrones. Se produce, pues, materia ionizada en forma de gas. Éste es el estado en que se encuentra el Sol, y se le conoce como plasma, la cuarta fase de la materia.

En las estrellas, gracias al colapso gravitacional, la fusión es posible a temperaturas significativamente menores que en la Tierra.⁹⁴ En ésta para vencer la repulsión eléctrica en un gas formado por una mezcla de tritio y deuterio es necesaria una energía cinética mínima de alrededor de 100 000 eV. Ello implica una temperatura equivalente a mil millones de grados. Como antes dijimos, la temperatura es proporcional a la energía cinética promedio de las moléculas de un gas. Sin embargo, siempre hay moléculas más rápidas que el promedio correspondiente a una temperatura dada. Este hecho permite que a una temperatura considerablemente menor que esos mil millones de grados pueda haber una actividad de fusión razonable y suficiente. Así, se ha encontrado que a unos 60 millones de grados la fusión nuclear puede autosostenerse.⁹⁵

El otro parámetro importante para mantener la fusión nuclear sostenida es la cercanía entre los núcleos, pues mientras más juntos se encuentren, es más probable que se unan. Los físicos e ingenieros que intentan controlar el plasma usan el llamado parámetro de confinamiento, que es igual al producto de la densidad del gas por el tiempo que la densidad puede sostenerse. La condición mínima para la reacción de fusión autosostenida es que el parámetro de confinamiento sea mayor que 3×10^{14} partículas \cdot s/cm³. Si el valor es menor, se requiere inyectar energía al plasma, lo que se logra calentándolo. Si se agrega una energía $E_{\text{Calentamiento}}$, se obtiene del plasma una energía $QE_{\text{Calentamiento}}$, donde Q es un cierto factor de ganancia. Cuando Q sobrepasa el valor unidad, el reactor se comporta ya como un amplificador de energía.

⁹⁴ Julio Herrera Velázquez. La Fusión Nuclear como Opción Energética para el siglo XXI. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, 2007, No. 21, Año 2, Pag. 84

⁹⁵ Jorge Flores Valdés. La Gran Ilusión 4. La Fusión Fría. Op. Cit.

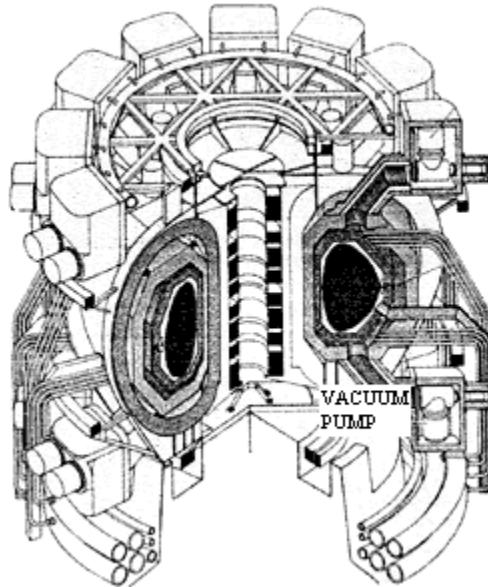


Figura 4.1 El reactor Tokamak (de las palabras rusas toroid = toroide, kamera = cámara, magnit = imán y katushka = bobina) para controlar la fusión caliente [41]

El problema tecnológico que plantea la fusión caliente es realmente de gran magnitud: se debe confinar un plasma muy caliente durante un cierto tiempo. Debemos producirlo, calentarlo y todavía confinarlo. Para ello se requieren máquinas enormes, como el Tokamak, que se muestra en la Figura 4.1 y que semeja una inmensa dona. En este aparato, el plasma se confina por la acción de campos magnéticos muy intensos y se le calienta por diversos medios, según su diseño.

Entre las técnicas del siglo XXI, alternas a los reactores Tokamak, se halla la fusión inducida por láser. En ella, una mezcla de tritio y deuterio se calienta al concentrar varios haces de luz láser sobre una pelotita, de un milímetro de diámetro, que contiene el combustible. La luz ultravioleta, que se obtiene después de pasar la radiación láser infrarroja a través de un cristal perfecto, fuerza a los electrones a oscilar y éstos calientan el plasma cuando chocan con sus iones. Al recibir tanta energía, el plasma en la periferia de la pelotita explota y, a causa de la tercera ley de Newton, ejerce una gran fuerza sobre el plasma en el interior de la bolita. En consecuencia, ésta se comprime mucho y entonces, las reacciones termonucleares pueden llevarse a cabo.

4.2.2 La fusión fría⁹⁶

Hasta la fecha el mayor esfuerzo para controlar la fusión nuclear se ha concentrado en el método caliente. Como ya vimos, ésta no es la única línea de investigación activa. Motivados por el alto costo de proyectos como el Tokamak, varios investigadores en diversas partes del mundo buscan otros métodos.

En algunas circunstancias, los núcleos pueden acelerarse de manera natural hasta alcanzar las energías necesarias para lograr la fusión. Así, en el Sol y en la vecindad de objetos cósmicos como los cuasares y los pulsares, los núcleos se aceleran grandemente. Aunque es difícil sacar provecho

⁹⁶ Ibid.

práctico de estas situaciones, es factible que en la Tierra puedan hallarse campos de fuerza igualmente enormes. En efecto, en un laboratorio de la Unión Soviética se encontró que la fractura de algunos sólidos produce enormes potenciales eléctricos que pueden comunicar grandes aceleraciones a los núcleos de hidrógeno inmersos en el sólido. Tal mecanismo, denominado fracto-fusión, ha permitido inducir en forma intermitente la fusión de millones de núcleos de deuterio en cada fractura. La fracto-fusión es todavía una curiosidad académica.

Otro mecanismo que podría inducir de manera natural la fusión de dos núcleos ya lo mencionamos: se basa en el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, parte de la física que rige el comportamiento de moléculas, átomos y núcleos. Si entre dos núcleos que se repelen colocamos una carga negativa, la repulsión disminuye porque la carga de los núcleos se ve apantallada. Éste es el mecanismo que mantiene unidos a los átomos cuando forman las moléculas, en las que los núcleos se mantienen a distancias promedio del orden de 10^{-8} cm. En particular; la incertidumbre en la separación de los núcleos implica que a veces puedan acercarse mucho y entonces fusionarse. Este mecanismo de fusión fría ocurre en condiciones normales con una probabilidad muy pequeña. De no ser así, el deuterio en nuestro planeta no sería tan abundante, puesto que la fusión ya lo habría agotado al transformarlo en núcleos más pesados. El cálculo más optimista al respecto predice que habría que esperar 10^{37} años para que los núcleos de una de las 10^{22} moléculas de deuterio en una muestra de 1 cm^3 de agua pesada, se fusionaran. Según la cosmología moderna, este tiempo es 10^{27} veces mayor que la vida del Universo.

Otra posibilidad más de obtener la fusión fría, sugerida en 1947 por los físicos rusos A. Sakharov y F.C. Frank, es la llamada fusión catalizada por muones. La distancia promedio entre núcleos a que hicimos referencia en el párrafo anterior disminuye si la masa de la carga intermediaria es mayor. En las moléculas normales la carga intermediaria es un electrón. Por tanto, una manera de acelerar el proceso de fusión fría consiste en sustituir uno de los electrones de la molécula de deuterio por un muon negativo. Esta partícula, aunque posee la misma carga que el electrón y tiene muchas propiedades idénticas a él, es doscientas veces más masiva. En consecuencia, los núcleos ligados por muones se acercan mucho y la probabilidad de que se fusionen aumenta considerablemente. Así, el tiempo que habría que esperar para que ocurriera una fusión en una muestra de 1 cm^3 de agua pesada a cuyas moléculas se les hubiera cambiado un electrón por un muon, es en este caso pequeñísimo, tan sólo 10^{-31} segundos. El problema; sin embargo, consiste en obtener al mismo tiempo los 10^{22} muones necesarios. Los muones son partículas inestables cuya vida media, de 2.2 microsegundos, es comparable al tiempo que requiere el proceso de sustitución de electrones por muones en el hidrógeno. Peor aún, su escasez implica que los muones que se utilizarían en un posible reactor de este tipo deberían ser producidos como residuo de reacciones nucleares a altas energías, con un costo energético por muon mil veces superior a la energía que se obtendría de cada fusión.

La sugerencia de Sakharov y Frank permaneció por eso al margen durante una década hasta que, en 1956, el físico norteamericano Luís Álvarez descubrió accidentalmente la fusión en frío inducida por muones en una cámara llena de hidrógeno y deuterio líquidos. En el aparato, que se utilizaba para detectar partículas producidas en reacciones nucleares, aparecían de vez en cuando unos destellos inesperados. Un estudio más detallado llevó a concluir que se trataba de residuos de la fusión de núcleos de hidrógeno con núcleos de deuterio inducida por muones de origen cósmico. Años después, en 1968, al recibir el premio Nobel por otras investigaciones, Álvarez relató su enorme excitación al creer que había descubierto la solución ideal al problema energético mundial.

Sin embargo, al poco tiempo se convenció de lo insignificante de la energía que se obtiene en este proceso debido a la reducida vida media de los muones y al escaso flujo de muones cósmicos.

Por todas estas dificultades la fusión catalizada por muones había quedado en el olvido. El tema resurgió gracias a las aportaciones de varios científicos soviéticos. En 1966, V. P. Dzelepov demostró que en determinadas condiciones los muones son capaces de producir más de una fusión antes de decaer; especialmente si se eleva la temperatura de la muestra de deuterio. Al año siguiente, el físico teórico E.A. Vesman se percató de que las dimensiones reducidas de una molécula de deuterio unida por un muon ($D\mu-D$) permiten la captura de un nuevo núcleo de deuterio, formándose así una molécula triatómica, que está tomada de un artículo de Steven Jones, aparecido en 1986. En esta configuración, los núcleos se acercan y la tasa de reacciones de fusión aumenta. De existir; este fenómeno ocurriría principalmente a una cierta temperatura privilegiada. En 1977 otros físicos rusos, S.S. Gerhtein y L. I. Ponomarev, descubrieron que el fenómeno predicho por Vesman también debería presentarse en mezclas de deuterio y tritio. De ser así, predijeron que a 260 grados centígrados podría producirse un aumento espectacular (por un factor de cien) en la tasa de reacciones. Dos años más tarde, V. M. Bystritsky demostró que las predicciones de Gerhtein y Ponomarev eran ciertas. Desgraciadamente, pocos meses después el acelerador del laboratorio de Dubna con el que se producían los muones para realizar estas pruebas fue cerrado y esta línea de investigación se vio interrumpida en consecuencia.

Los resultados soviéticos recién descritos motivaron al norteamericano Steven E. Jones a realizar una serie de estudios sobre este tema. Utilizando el acelerador LAMPF (Los Alamos Meson Physics Facility) en 1986 encontró que en mezclas de deuterio y tritio comprimido hasta 3 000 atmósferas, los tiempos de captura del muon se reducen tanto que cada μ^- es capaz de catalizar hasta 150 fusiones antes de decaer. Una eficiencia tal significa ganancias de energía de 3 000 MeV por muon; es decir, casi treinta veces la masa del μ^- . Puesto que en los aceleradores actuales se invierten 5000 MeV por cada muon producido, existe sólo un factor de dos entre gasto y producción de energía. Tomando en cuenta que un reactor rentable requiere un factor de ganancia de 20, vemos que aunque la meta se encuentra ahora más cercana todavía no la alcanzamos.

Existe otra alternativa para conseguir la fusión fría. Consiste en aprovechar la propiedad que tienen algunos metales de absorber grandes cantidades de hidrógeno. En particular, el titanio, el paladio y el platino pueden contener hasta un átomo de hidrógeno por cada uno de sus propios átomos. Una densidad tan alta sólo se podría lograr comprimiendo mucho el hidrógeno. Aunque luego se retractaron, en 1926 los científicos alemanes E. Paneth y K. Peters fueron los primeros en sugerir este método.

El 23 de marzo de 1989 los químicos Stanley Pons y Martin Fleischmann de la Universidad de Utah realizaron una conferencia de prensa en la que anunciaron la producción de fusión fría con la consiguiente liberación de energía. El anuncio fue considerado sorprendente al tenerse en cuenta el sencillo equipamiento necesario para producir tal reacción: un par de electrodos conectados a una batería y sumergidos en un recipiente de agua pesada rica en deuterio. Habiendo trabajado Pons y Fleischmann en su experimento desde el año 1984, consiguieron fondos del Departamento de Energía de los Estados Unidos en el año 1988 para una larga serie de experimentos. El término fusión fría había sido acuñado por el Dr. Paul Palmer de la Universidad Brigham Young en 1986 en investigaciones sobre la posibilidad de la producción de reacciones de fusión atómica en el interior

de un núcleo planetario. El término fue entonces aplicado al experimento de Fleischmann y Pons en 1989.

En tan sólo unos días, científicos de todo el mundo intentaron repetir los resultados de los experimentos. Durante unas seis semanas se produjeron anuncios de verificación, retractación y explicaciones alternativas que mantuvieron el interés de los periódicos sobre el tema, sin conseguir resultados definitivos. Poco después, el escepticismo sobre la fusión fría fue aumentando a medida que diferentes investigadores eran incapaces de reproducir los resultados del experimento de Pons y Fleischmann. A finales de mayo, el Departamento de Energía de los Estados Unidos formó un grupo especial de investigadores para determinar la veracidad o no de la fusión fría. El comité de expertos trabajó durante cinco meses en un estudio en el que se afirmaba que no existía evidencia alguna de fusión fría, y que tales efectos contradirían todo el conocimiento adquirido sobre las reacciones nucleares durante la última media década. El comité recomendaba específicamente no financiar investigaciones costosas sobre este tema.

Hoy en día se siguen realizando esfuerzos en la búsqueda de reacciones nucleares del tipo de la fusión fría, a pesar de que el engaño de los años 80 quedó marcado en la comunidad científica. Estos esfuerzos son realizados por una parte minoritaria aunque significativa de dicha comunidad.

Una de las vías que más dan que hablar en la actualidad se basa en experimentos sobre la Sonoluminiscencia. Este fenómeno fue descubierto por D.F. Gaitan y otros, a principios de los 90 en la universidad de Missisipi, y se basa en la emisión de luz (entre otros tipos de radiación) del interior de burbujas sometidas a excitaciones acústicas. El fenómeno ha sido intensamente estudiado por la comunidad y siguen encontrándose publicaciones al respecto.

En el año 2002, el profesor Rusi P. Taleyarkhan junto a otros miembros del Oak Ridge National Laboratory publicaron en la revista Science un artículo llamado "Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation" afirmando que observan emisiones de neutrones de alta energía en este tipo de experimentos. Sin embargo, este artículo ha levantado las voces de numerosos escépticos que no reproducen sus resultados, recordándonos a los tristes acontecimientos de Pons y Fleischmann.

En el 2006, el profesor Taleyarkhan volvió a publicar nuevas pruebas para ratificar su interpretación de los experimentos, con nuevas reacciones desde la misma revista Nature. Ciertamente, la comunidad científica, escarmentada después de tantos años, se encuentra poco receptiva para nuevos avances a este respecto.

En 2004 se comentó, debido a la continuidad de los experimentos de Pons y Fleischmann por parte de la armada de Estados Unidos de América, que una posible razón del fiasco al intentar reproducir el experimento original podría ser que se requiere de un agua pesada de una gran pureza, que sobrepasa los niveles habituales. Pons y Fleischmann disponían de un agua pesada de gran pureza. Parece que finalmente la investigación sigue abierta, si bien no se han publicado los resultados puesto que los científicos son más cautos que nunca tras la experiencia de 1989.

Recientemente, en mayo del 2008 se publicó un artículo en la revista italiana *Il sole 24 ore*, donde se afirma que el científico Japonés Yoshiaki Arata, ha logrado la fusión fría utilizando presión para introducir gas deuterio en una pila que contenía paladio (Pd) y óxido de zirconio (ZrO_2) provocando

que los átomos de deuterio se fusionaran en átomos de Helio, produciendo en el proceso una cantidad considerable de calor.

El interés en la fusión fría producida en experimentos como el que causó el escándalo en 1989 ha decaído mucho. En este presente trabajo, se considera como fusión nuclear a la fusión caliente; además de ser éste el campo en el que más recursos se han invertido y que más logros ha alcanzado; sin embargo, en el ambiente científico flotará siempre la esperanza de un mecanismo simple.

4.3 La física de la fusión

Como ya se mencionó, en los procesos de fusión, dos núcleos de átomos ligeros se combinan o fusionan para dar lugar a uno más pesado, con mayor energía de enlace por nucleón.

Para que dos núcleos se fusionen es preciso que ambos se acerquen a distancias del orden del alcance de las fuerzas nucleares. Para superar las fuerzas de repulsión coulumbiana, dos protones tendrán que superar dicha fuerza que actúa como barrera, antes de que la atracción de las fuerzas nucleares entre en juego. Las fuerzas de repulsión coulumbianas son proporcionales a la carga de los núcleos que interactúan, y por ello, los plasmas de la familia del hidrógeno son los más adecuados para conseguir fusión. Los isótopos del hidrógeno, el deuterio y el tritio, por tener núcleos con carga eléctrica baja (un solo protón) son los más relevantes para la fusión.⁹⁷

Así como en el proceso de fisión, en la fusión también se libera una gran cantidad de energía, equivalente a la disminución de la masa de los productos finales con relación a los átomos iniciales. Esto se puede observar en forma esquemática en la Figura 4.2

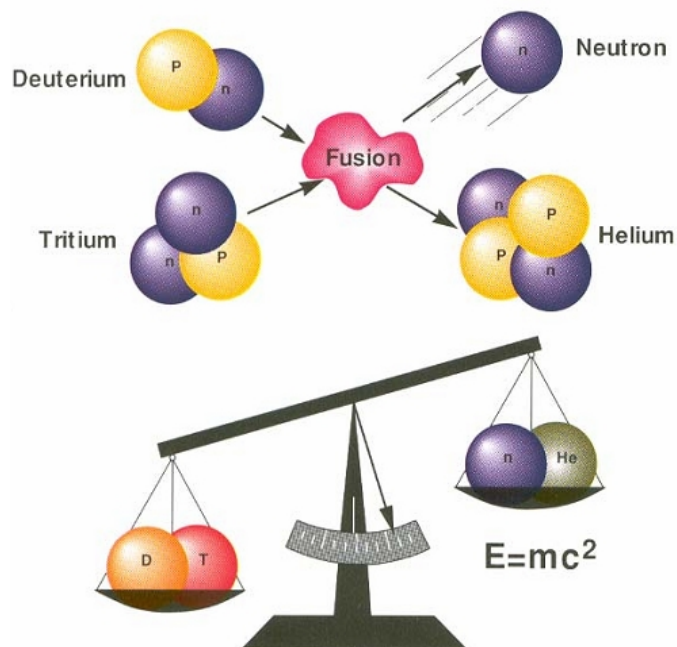


Figura 4.2 Representación de la energía liberada en la reacción nuclear de fusión [45]

⁹⁷ La Fusión Nuclear (2007) Obtenido el 24 de agosto de 2008 de: <http://www.inin.mx/paraconocer/fusionnuclear.cfm>

Existen diversos tipos de reacciones de fusión aprovechables desde el punto de vista energético. En la Figura 4.3 se muestra una síntesis de las reacciones de fusión que se pueden producir con mayor facilidad. Se muestran tres diferentes reacciones; en la primera columna se muestra el combustible; es decir, los reactivos, en la segunda columna se muestra el producto de la reacción, en la tercera columna se muestra la energía liberada por reacción en unidades de keV y en la cuarta columna se indica la temperatura necesaria para poder realizar la reacción en la Tierra.





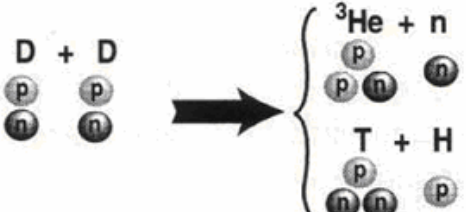


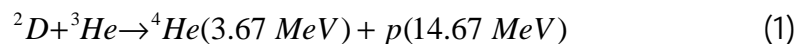
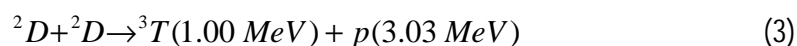
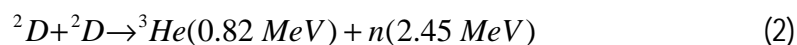
REACCIÓN		ENERGÍA LIBERADA keV	TEMPERATURA TÍPICA DE FUSIÓN Millones de K
Combustible	Producto		
$D + T$ 	${}^4\text{He} + n$	 17,600	~50
$D + {}^3\text{He}$ 	${}^4\text{He} + p$	 18,300	350
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$	 3,250	400
	$T + H$	 4,000	400

Figura 4.3 Esquema de las diferentes reacciones de fusión [40]

La reacción deuterio-helio-3 es atractiva porque no produce neutrones (ver ecuación (1)) y es la que más energía produce; sin embargo, el helio-3 es muy escaso en la Tierra, aunque existen grandes cantidades en la Luna.



El uso de deuterio puro como combustible (reacción deuterio-deuterio) es un objetivo a largo plazo que tiene las siguientes ventajas: no es radiactivo, no se necesita un manto fértil para producirlo, e induce radiactividad de bajo nivel en la estructura. La reacción produce helio-3 y un neutrón de acuerdo con la ecuación (2), o tritio y un protón según a la ecuación (3).



De entre todas las reacciones de fusión, la reacción deuterio-tritio, mostrada en la ecuación (4), es la que más fácilmente se puede llevar a cabo para temperaturas relativamente bajas y, por tanto, es

la más fácil de obtener de manera controlada. La reacción genera un neutrón de alta energía y helio. Esta reacción se ilustra en la Figura 4.4.

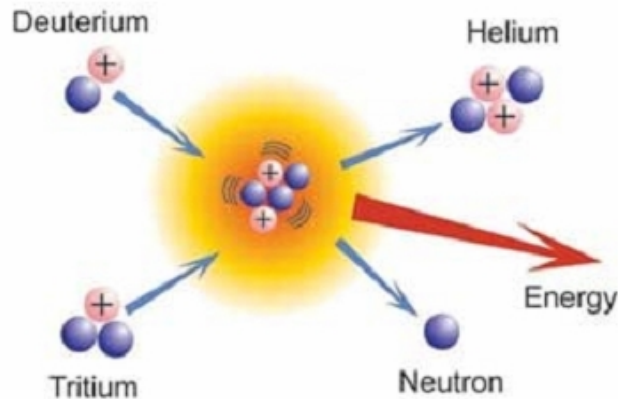
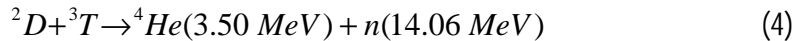


Figura 4.4 El deuterio y el tritio se fusionan y se forma helio, se libera un neutrón y energía⁹⁸

Ya se sabía desde el primer tercio de este siglo que la fusión es la fuente de energía del Sol, pero el primer ejemplo concreto que se tuvo de que esta fuente, capaz de producir grandes cantidades de energía, puede de verdad estar a nuestro alcance fue, lamentablemente, como en muchos otros casos, en el ramo militar: la aparición de la bomba de hidrógeno o bomba H. Para obtener una gran cantidad de reacciones de fusión en un tiempo muy corto y que la energía se libere de manera explosiva; lo que se hace es comprimir un gas de deuterio (hidrógeno pesado) encerrado en una cavidad produciendo una implosión. Con esto se transmite gran cantidad de energía a los núcleos de deuterio y se obtienen temperaturas extremadamente altas, de modo que es posible traspasar la barrera de Coulomb y producir la fusión. En el caso de la bomba H, esto se logra mediante la detonación previa de otra bomba, una bomba de fisión nuclear. La energía impartida por ésta es suficiente para que los núcleos de deuterio produzcan reacciones de fusión en número bastante elevado. Cuando las temperaturas son muy altas no se tiene el problema de las colisiones atómicas y coulombianas mencionado anteriormente porque su sección eficaz de reacción decrece al aumentar la velocidad (proporcional a la temperatura) En este proceso las densidades son relativamente grandes, lo que aumenta la probabilidad de interacción nuclear.⁹⁹

Las bombas mostraron que es posible tener energía de fusión, pero esta energía no puede ser aprovechada con fines pacíficos ya que se produce sin control alguno. La finalidad de la investigación actual sobre la fusión es lograr un mecanismo que la controle, de manera que pueda ser utilizada a voluntad y que exista la posibilidad de recuperar la energía con alguna aplicación

⁹⁸ Imagen tomada de:

http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/sun/Solar_interior/Nuclear_Reactions/Fusion/fusion_reactions.sp.html

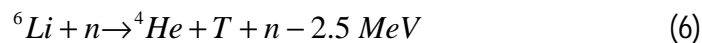
⁹⁹ Julio Martinell Benito (2006) Los prometeos modernos o el esfuerzo por controlar la fusión nuclear. Recuperado el 17 de agosto de 2008 de:

<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/prometeo.htm>

benéfica. En este caso la idea sigue siendo calentar un gas hasta temperaturas muy altas, pero manteniendo el control del número de reacciones de fusión. A esta aproximación a la fusión se le llama fusión termonuclear, ya que se aprovecha el movimiento térmico de las partículas para que las colisiones entre ellas den lugar a la fusión. Lograr la fusión termonuclear controlada es el gran objetivo de muchos científicos.

4.4 Combustible para la fusión

En nuestro planeta el deuterio es abundante en el agua de mar (30 g/m³) pero el tritio no existe en estado natural, hay que producirlo y además es radiactivo con una vida media de 12.36 años. Una posibilidad es extraer tritio del agua pesada de los reactores de fisión. Sin embargo, la opción más viable es producirlo en el reactor de fusión utilizando una cobertura o manto fértil de litio. Cuando los neutrones de la reacción de fusión chocan con átomos de litio-6 o litio-7 se produce helio y tritio de acuerdo con las ecuaciones (5) y (6)



El litio natural (92.5% ⁷Li y 7.5% ⁶Li) es un elemento abundante en la corteza terrestre y en menores concentraciones en el mar. El espesor del manto debería ser lo suficientemente grande (del orden de un metro) para frenar los neutrones (de 14 MeV) producidos por las reacciones de fusión. Los neutrones se combinan con el litio para producir tritio.

Al frenar los neutrones, el manto fértil se calienta y el refrigerante que circula en su interior, transfiere el calor fuera del área del reactor, para producir vapor de agua que podría generar finalmente energía eléctrica de un modo convencional.

Los cálculos indican que utilizando reactores de fusión que funcionen con la reacción deuterio-tritio las existencias de combustible alcanzarían para varios millones de años.

4.5 Plasma para la fusión

El proceso para lograr una reacción de fusión a partir del hidrógeno es la siguiente: el deuterio y el tritio comenzarán a fusionarse a temperaturas superiores a los 60 millones de grados centígrados, así los átomos chocan con tanta fuerza que se rompen, separándose el núcleo (positivo) de los electrones (negativos) Este gas ionizado que consiste en una mezcla de partículas con carga eléctrica positiva y negativa en cantidades aproximadamente iguales, se conoce como plasma. (Ver Figura 4.5)

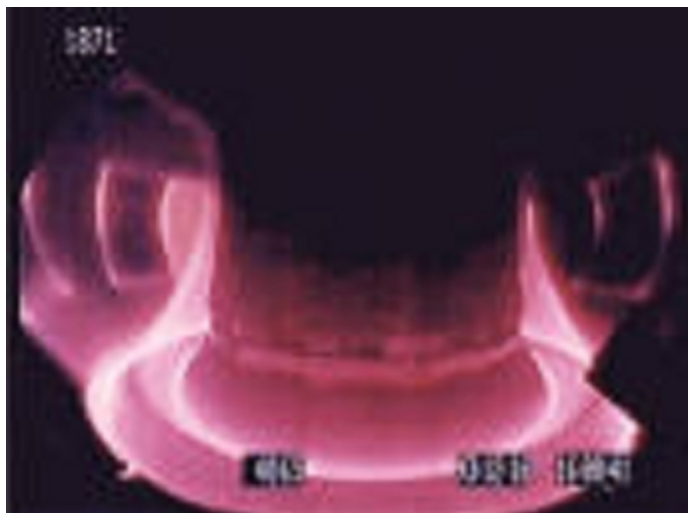


Figura 4.5 Imagen de un material en forma de plasma¹⁰⁰

Un plasma es un conjunto significativo de partículas cargadas (iones) libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas. Con frecuencia se habla del plasma como un estado de agregación de la materia con características propias, diferenciándolo de este modo de la fase gaseosa, en el que no existen efectos colectivos importantes.

El nombre que dan los físicos al gas ionizado es plasma. Éste en conjunto es por lo general eléctricamente neutro, pero debido a que contiene dos especies de partículas cargadas su comportamiento es muy diferente y más complejo que el de un gas sin ionizar. El estudio del plasma es fundamental para la investigación sobre la fusión termonuclear, y por ello el desarrollo de estas dos disciplinas ha ido de la mano durante los últimos 30 años. Antes de que comenzara el gran interés por la fusión el conocimiento de los plasmas era muy limitado, habiéndose estudiado sólo en relación con problemas de física espacial y tubos de descargas eléctricas.

Tanto en los gases no ionizados como en los plasmas, las partículas componentes se mueven continuamente, con velocidades muy variadas. Si uno pudiera contar cuántas partículas se mueven con una velocidad dada y se trazaran gráficas de estos números para todas las velocidades se obtendría una curva como la de la Figura 4.6 que muestra la distribución de velocidades para un gas en equilibrio térmico. A esta distribución se le llama función de distribución de Maxwell o simplemente maxwelliana. La característica es que presenta un pico que indica que gran parte de las partículas se mueven con velocidades muy parecidas, alrededor de la llamada velocidad térmica, v_t . Su posición y anchura dependen de la temperatura del gas. Sin embargo, hay que hacer notar que también existen partículas con velocidades muy altas en la cola de la distribución. Aunque en bajo número, su presencia es importante en la fusión.

¹⁰⁰ Imagen recuperada de "Fusion and Plasma Physics" (2007) Obetnida el 25 de enero de 2009 de: <http://www.tkk.fi/Units/AES/fusion.htm>

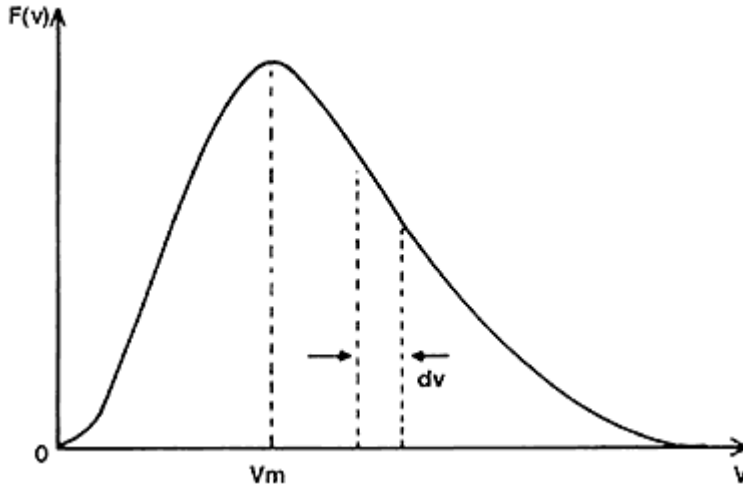


Figura 4.6 Distribución de las velocidades para un gas en equilibrio térmico [41]

En la Figura 4.7 se muestran las secciones eficaces de las diferentes reacciones mencionadas como función de la energía cinética de los núcleos antes de la reacción. Se puede apreciar que la reacción D-T es, con mucho, la más fácil de conseguir (nótese la escala logarítmica, o sea, en potencias de diez) sobre todo a bajas energías.

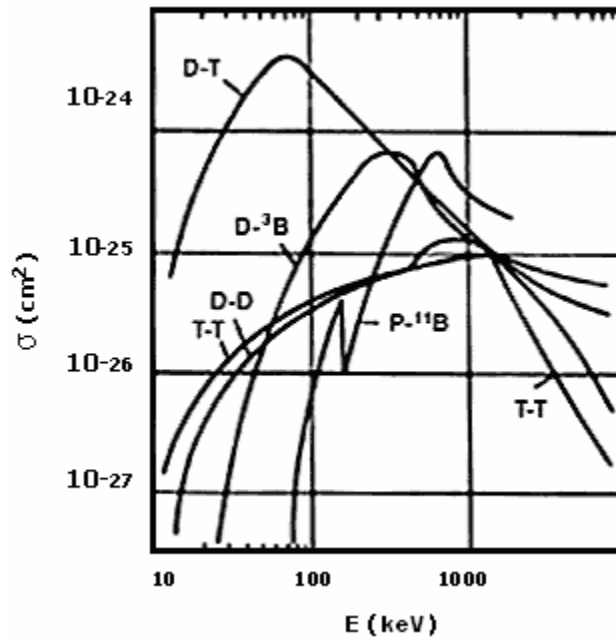


Figura 4.7 Sección eficaz de las diferentes reacciones en función de la energía cinética de los iones antes de la reacción [41]

La probabilidad de fusión para un plasma maxwelliano tiene que ser obtenida considerando todas las partículas, así que hay que promediar la sección eficaz (que nos mide la probabilidad de reacción para una velocidad dada) sobre una distribución maxwelliana. En realidad el promedio que más interesa es el del producto de la sección eficaz σ por la velocidad de las partículas v , que

denotamos por $\langle \sigma v \rangle$, pues esto mide la probabilidad de reacción por unidad de tiempo. En la Figura 4.8 se muestra esta cantidad en función de la temperatura obtenida de la maxwelliana utilizada en el promedio, para las mismas reacciones consideradas previamente. En el caso de la temperatura se emplean unidades de energía en lugar de grados pues hacerlo da una mejor idea del nivel de agitación que tienen las partículas que componen el plasma y además permite compararla con las energías de las partículas individuales. Comparando esta gráfica con la de la Figura 4.7 se nota que el pico en la probabilidad de reacción ocurre a temperaturas mucho menores que las energías del pico de la sección eficaz; por ejemplo, para D-T se tiene 60 keV contra 120 keV, respectivamente. Se observa también que la probabilidad de reacción para D-T se mantiene alta entre temperaturas de 1000 a 10000 eV.

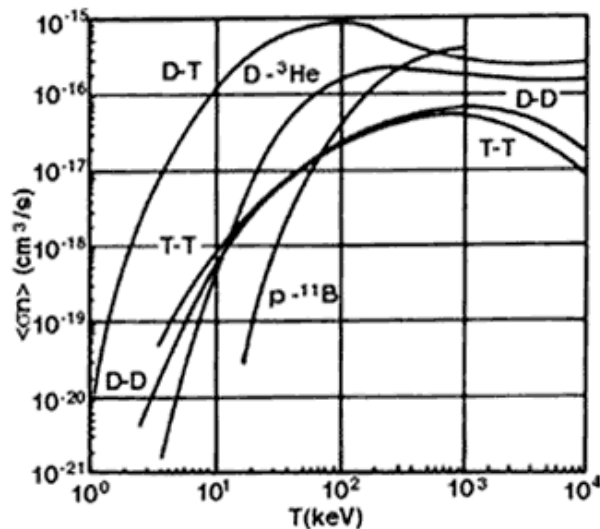


Figura 4.8 Probabilidad de reacción por unidad de tiempo de las diferentes reacciones en función de la temperatura de los iones [41]

La potencia de fusión generada en un plasma termonuclear será proporcional al número promedio de reacciones por unidad de tiempo y a la energía liberada por la reacción. Según el combustible utilizado, la potencia será mayor o menor; otra vez, la máxima potencia se alcanza con la mezcla D-T, ya que la probabilidad de fusión y la energía generada son grandes en relación con otras reacciones. Parte de esta potencia será utilizada para mantener al plasma caliente, y generalmente es la que llevan las partículas alfa, ya que son las más fáciles de detener. La potencia restante puede ser utilizada para generar energía eléctrica.

4.6 El reactor de fusión nuclear

4.6.1 El criterio de Lawson

En 1955, John D. Lawson, un ingeniero que trabajaba en el diseño de aceleradores en Harwell, Reino Unido, motivado por "las expectativas poco realistas de sus entusiastas compañeros físicos," estableció los criterios necesarios para que la energía de las reacciones de fusión compensara las

pérdidas de energía.¹⁰¹ Para conseguir un rendimiento positivo en una reacción de fusión es necesario calentar un plasma a temperaturas suficientemente altas y alcanzar densidades, n , del orden de 10^{20} partículas/m³, durante tiempos T_E del orden de segundos. Es decir, el producto nT_E debe superar una cota mínima, denominada criterio de Lawson, a temperaturas del orden de 100 millones de grados. (Ver Figura 4.9)

Es necesario señalar que las altas temperaturas requeridas en el plasma hacen que toda esta energía térmica no pueda ser contenida más que por un tiempo finito, al que se llama tiempo de confinamiento de energía, T_E . En términos de T_E se puede establecer la condición para que la ganancia de energía se empareje con las pérdidas. La energía perdida viene de la energía térmica que se escapa y de la radiación electromagnética emitida, mientras que la única fuente de energía es la que se genera por fusión. Si toda la energía que llega a la pared del aparato (la perdida más la generada) es captada y se convierte en energía útil con una cierta eficiencia, el resultado de este proceso tendrá que ser mayor o igual que la energía que hay que suministrar al plasma para mantenerlo activo, a fin de que las pérdidas no superen a las ganancias.

Otro concepto que se maneja con frecuencia es el de ignición o encendido de un plasma. Se dice que un plasma termonuclear ha alcanzado el estado de encendido cuando la energía de fusión producida (o parte de ella) puede ser reabsorbida manteniendo la temperatura constante. El plasma habrá llegado entonces a una situación autosostenida, donde ya no es necesario que se suministre energía del exterior. La condición de encendido es más fuerte que el criterio de Lawson para el balance de pérdidas y ganancias. En un reactor deuterio-tritio (D-T) la energía cinética de las cenizas de helio mantendrán la temperatura necesaria para que las reacciones se sigan produciendo y no se requiera calentamiento exterior.

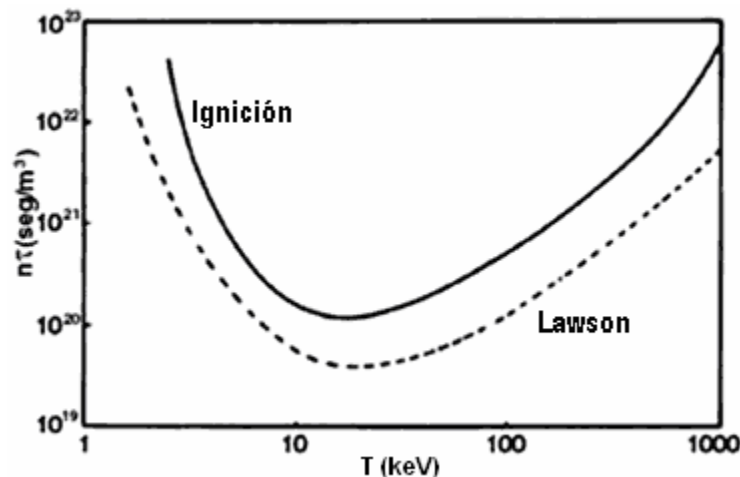


Figura 4.9 Criterio de Lawson y estado de ignición del plasma [41]

Definiendo Q como el cociente de energía de fusión respecto a la energía empleada para calentar al plasma desde el exterior, esto significa que $Q = \infty$. Sin embargo, para un reactor sería aceptable tener valores finitos de Q , siempre que sea suficientemente alta para compensar las pérdidas debidas a la conversión de energía de fusión a energía eléctrica.

¹⁰¹ Julio Herrera Velázquez. La Fusión Nuclear como Opción Energética para el siglo XXI. Pag. 85. Op. Cit.

$$Q = \frac{\text{Energía Fusión}}{\text{Energía Calentamiento}}$$

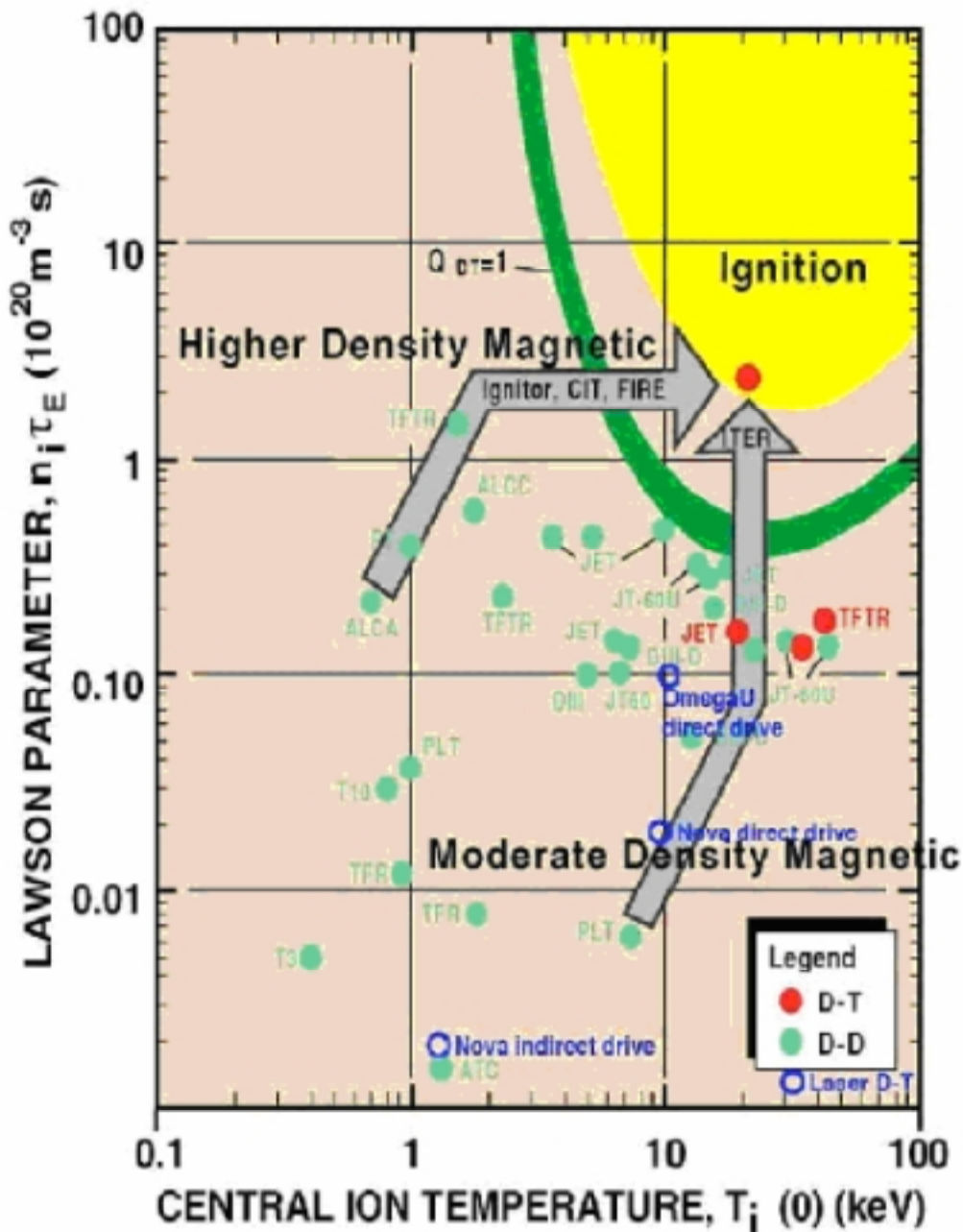


Figura 4.10 El camino a la ignición de los diferentes proyectos de reactores nucleares [39]

En la Figura 4.10 se muestran los diferentes proyectos de reactores de fusión, y la Q de cada uno de ellos. Se observan los tres proyectos que pretenden llegar a la condición de ignición: CIT, FIRE, IGNITOR e ITER.¹⁰²

¹⁰² Ibid. Pag. 87

4.6.2 Confinamiento inercial y magnético

Actualmente se estudian dos vías experimentales para llegar al objetivo de la condición de ignición.

La fusión por confinamiento inercial, en la que una diminuta cápsula de combustible se comprime fuertemente (más de mil veces la densidad de un líquido) hasta que se inicia la ignición en el centro y se propaga hacia el exterior, donde el combustible está a menor temperatura. La ignición dura mientras el combustible se mantiene confinado por su propia inercia. En este esquema se tiene: $n = 10^{31} \text{ m}^{-3}$ y $T_E = 10^{-11} \text{ s}$. (Ver Figura 4.11)

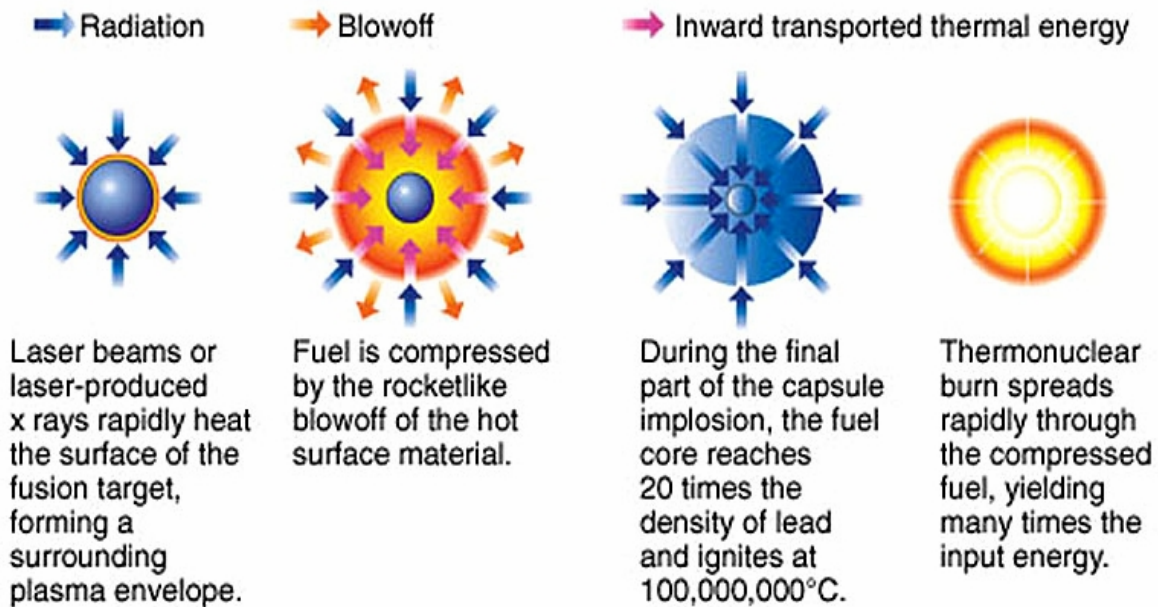


Figura 4.11 Ejemplo de fusión por confinamiento inercial, empleando láser¹⁰³

La fusión por confinamiento magnético, en la cual el plasma caliente se confina mediante campos magnéticos que actúan como una trampa magnética para las partículas cargadas del plasma, en este esquema $n = 10^{20} \text{ m}^{-3}$ y $T_E = 1 \text{ a } 5 \text{ s}$.

La investigación en el campo de la fusión por confinamiento magnético es, en la actualidad, la más avanzada de cara a la construcción de un futuro reactor de fusión. Se consigue crear y mantener la reacción gracias a grandes cargas magnéticas que hacen las veces de muros de contención de las cargas nucleares. Consiste en contener el material a fusionar en un campo magnético mientras se le hace alcanzar la temperatura y presión necesarias. En la Figura 4.12 se muestra un esquema de un confinamiento magnético en forma de toroidal.

¹⁰³ Imagen recuperada de: <http://www.coppermask.com/fusion/FusionS5/s5-blank.html>

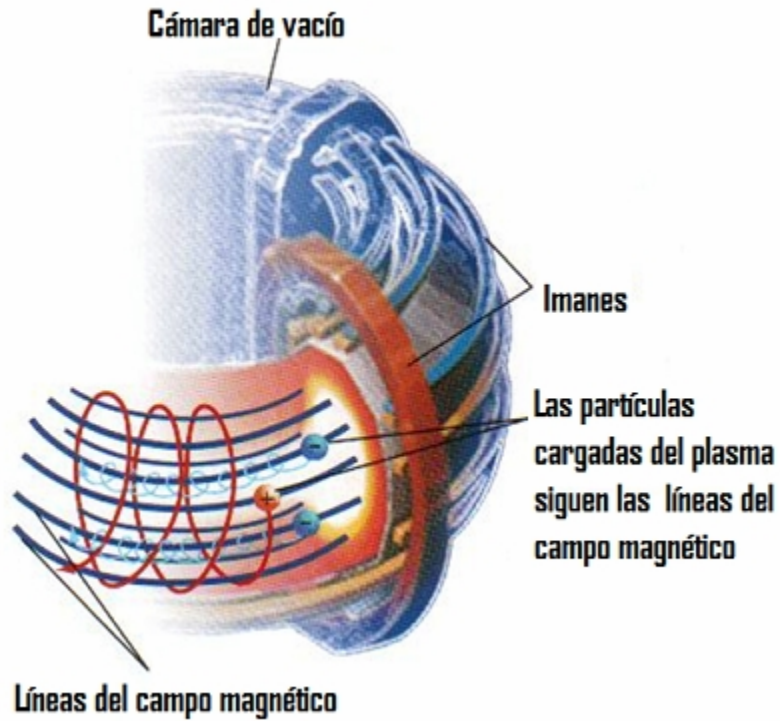


Figura 4.12 Esquema de un confinamiento magnético toroidal [45]

4.6.3 Funcionamiento

En general, el esquema de un reactor termonuclear de fusión se ilustra de manera simplificada en la Figura 4.13.

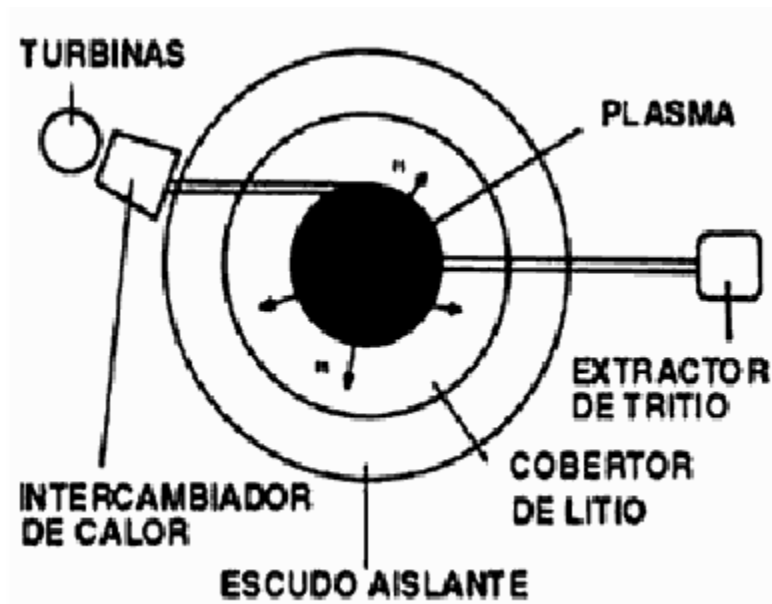


Figura 4.13 Esquema simplificado de un reactor de fusión [41]

En el núcleo del reactor se encuentra el plasma encendido, que se confina magnéticamente. El plasma está compuesto por partes iguales de deuterio y tritio y colocado dentro de una cámara envuelta por un cobertor o manto de litio. Las partículas alfa producidas en la fusión permanecen en la cámara dándole su energía al plasma para mantener la temperatura, mientras que los neutrones atraviesan la pared y reaccionan con el litio para producir tritio. El tritio es extraído para poder ser utilizado en el reabastecimiento de combustible para el reactor, junto con el deuterio. Todo este conjunto debe estar contenido dentro de paredes blindadas que permitan su aislamiento del exterior, pues el tritio es radiactivo y los neutrones que escapan producen radiaciones peligrosas. El sistema de bobinas magnéticas estará también en el exterior, procurándose que los campos magnéticos penetren al interior del plasma con la menor modificación posible.

Una vez que el reactor se halla funcionando, debe extraerse la energía que genera para poder utilizarla en la producción de energía eléctrica. Para ello se instala un sistema de extracción que haga circular un fluido del interior al exterior del reactor para que absorba el calor y lo entregue a un intercambiador de calor. Este último podrá dar lugar a vapor a alta presión el cual activará una turbina que genera energía eléctrica. Para que una planta de este tipo pueda funcionar adecuadamente se necesita que la fuente de energía sea más o menos constante, lo cual no es posible obtener, directamente, con un reactor que funcione a pulsos, como ocurre cuando la corriente de un Tokamak se produce por inducción. En tal caso se tendría que usar un mecanismo de almacenamiento de energía donde se vaya acumulando la que se genera en los pulsos, y tenerla disponible para uso continuo.

4.6.4 Operación del reactor Tokamak

En un Tokamak el plasma se calienta en un anillo en forma de toroide y los componentes básicos del su sistema de confinamiento magnético (Ver Figura 4.14) son los siguientes:

El campo toroidal - este campo se produce en todo en interior del toroide, gracias a las bobinas de campo magnético toroidal que rodean al Tokamak. El campo toroidal proporciona el principal mecanismo de confinamiento del plasma de partículas.

El campo poloidal - el cual produce un campo alrededor de la sección transversal del plasma. El campo poloidal se induce tanto a nivel interno, por medio de una corriente en el plasma (que servirá como uno de los mecanismos para calentar el plasma) y externamente, por las bobinas que se colocan alrededor del perímetro del toroide.

Transformador - la principal corriente del plasma se genera por la acción de un gran transformador, el cual por medio de un devanado primario induce una poderosa corriente eléctrica en el plasma, que actúa como circuito secundario del transformador. Dicha corriente, generará un campo magnético poloidal y servirá también como mecanismo para calentar el plasma gracias al efecto Joule.¹⁰⁴

¹⁰⁴ Magnetic plasma confinement - the Tokamak. Recuperado el 5 de octubre de 2008 en: <http://www.jet.efda.org/pages/fusion-basics/fusion3.html>

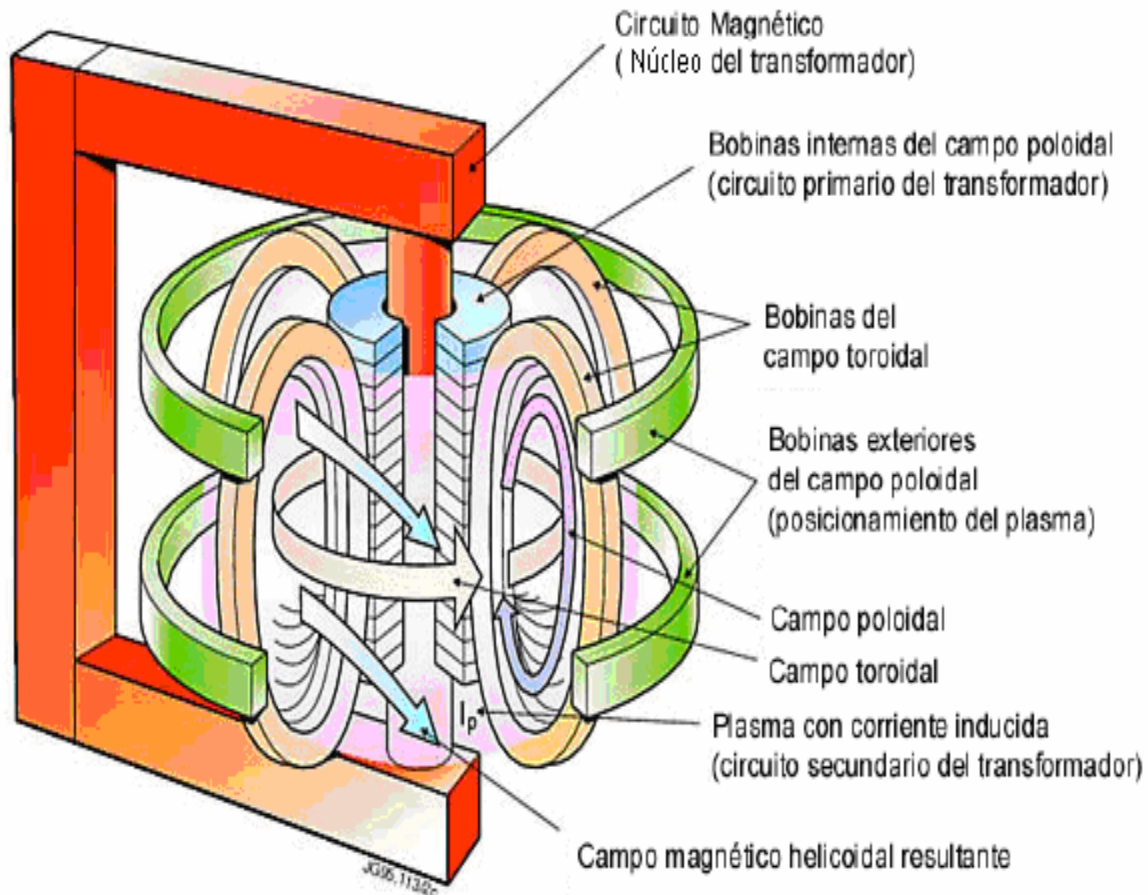


Figura 4.14 Bobinas de campo y transformador en el Tokamak¹⁰⁵

Desde luego, mientras mayor sea la velocidad de las partículas; es decir, mientras más caliente esté el plasma, los campos magnéticos habrán de ser mayores para guiar a los iones. Se obtiene entonces un campo magnético resultante, en el interior del Tokamak las partículas se ven forzadas a viajar en trayectorias helicoidales a lo largo de las líneas del campo magnético toroidal que han generado los electroimanes.

Desgraciadamente, las partículas del plasma son muy caprichosas y tienden a escaparse del campo magnético, produciendo lenguas de plasma que evitan el confinamiento y producen inestabilidad. Uno de los mayores esfuerzos técnico y científico reside, en este momento, en evitar las inestabilidades del plasma.

El otro tipo de reactores de fusión que emplean el confinamiento magnético son los Stellarators. En los Stellarators, el campo magnético poloidal es creado por bobinas externas al plasma. Todos los campos magnéticos de esta configuración son creados por bobinas exteriores, de modo que no se induce corriente en el plasma, pudiéndose obtener un funcionamiento continuo de la máquina. (Ver Figura 4.15)

¹⁰⁵ Imagen adaptada de: <http://www.splung.com/content/sid/5/page/fusion>

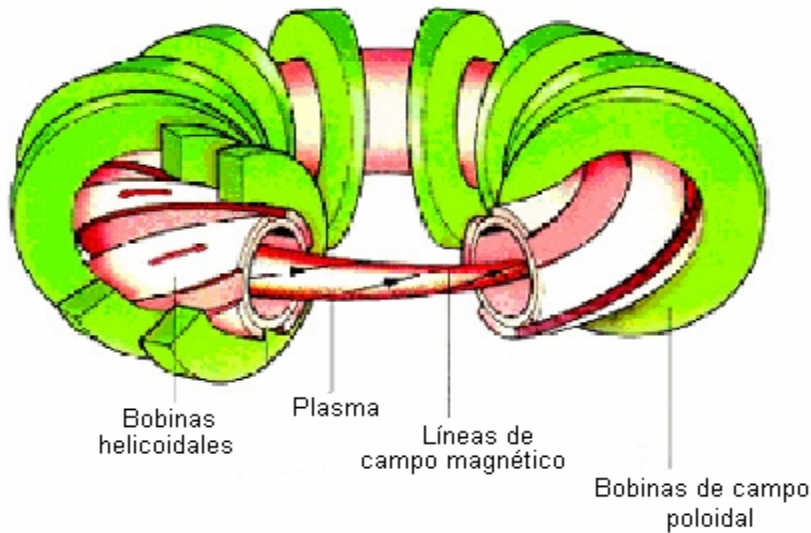


Figura 4.15 Bobinas de campo toroidal y poloidal en el Stellerator¹⁰⁶

En los reactores Tokamak, el campo magnético se varía lentamente en el tiempo, subiendo y bajando de manera cíclica. Esto induce una corriente en el plasma, que así se calienta por efecto Joule. Ya que el campo magnético no puede ser elevado indefinidamente, la actividad nuclear se debe interrumpir cuando el campo magnético baja para reiniciar el ciclo, disminuyendo así la eficiencia del reactor de fusión. Para evitar esas interrupciones de las reacciones nucleares, y con ellas la pérdida en eficiencia del reactor; hoy se busca producir la corriente en el plasma por medio de un haz rasante de ondas de radiofrecuencia. En este método, el ímpetu de los fotones del haz se transmite a las partículas del plasma, forzando la corriente necesaria (ver Figura 4.16)

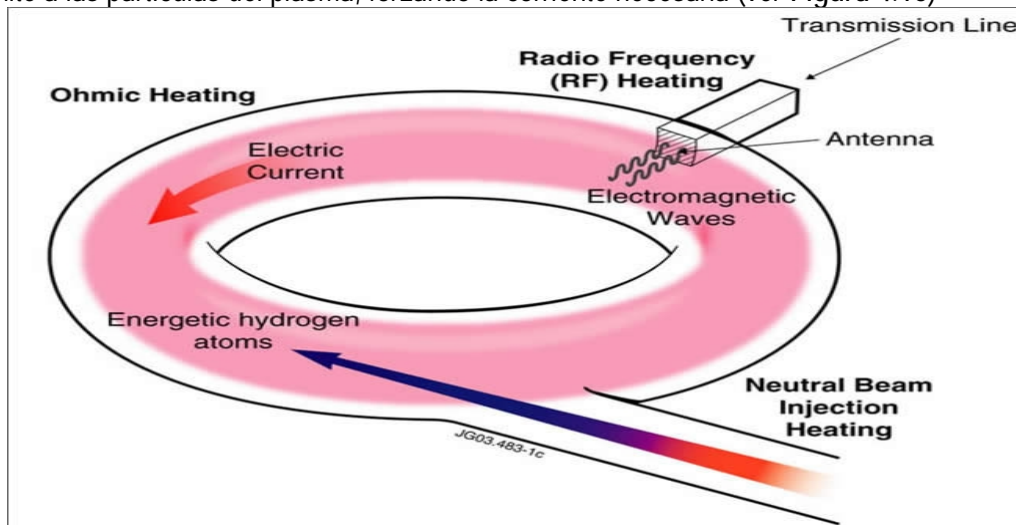


Figura 4.16 Para obtener una corriente continua en el plasma, es necesario inyectar un haz de ondas de radiofrecuencia [44]

¹⁰⁶ Imagen adaptada de:

http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/images/stellerator.jpg&imgrefurl=http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/s/stellarator.htm&usq=__Zp8fQIHicuxdop0eGSxnhWeRwnk=&h=218&w=324&sz=49&hl=es&start=3&tbnid=cTMAeXj3HwYXuM:&tbnh=79&tbnw=118&prev=/images%3Fq%3Dstellerator%26hl%3Des

4.6.5 Tecnología para la fusión nuclear

La idea de desarrollar un reactor de fusión se remonta a 1947, cuando se planteó en Inglaterra la idea de producir un plasma termonuclear en una descarga toroidal, confinada y constreñida por el campo magnético producido por una corriente inducida en éste (Z-pinch) La idea esencial es bastante simple a primera vista; la corriente juega el doble papel de producir el campo necesario para confinar al plasma, y calentarlo mediante efecto Joule. Ideas semejantes surgieron en la Unión Soviética, en donde propusieron el Tokamak en 1950, y en Estados Unidos, en donde se propuso el Stellerator en 1951. Aunque los detalles varían considerablemente, estos conceptos se basan en la misma idea esencial de producir un plasma toroidal con una simetría (toroidal en el caso del Z-pinch y del Tokamak, y helicoidal en el caso del stellerator) que permite una configuración cuasi bidimensional, necesaria para la existencia de superficies de campo magnético robustas.

El entusiasmo llegó a los medios, y se llegó a afirmar que en 20 años sería posible contar con reactores de fusión nuclear. Desafortunadamente, al poco tiempo se descubrió que el plasma no era termonuclear, y que las reacciones eran inducidas por un efecto haz-blanco, debido a que las inestabilidades en el plasma eran capaces de acelerar a los iones.

Sin embargo, ha sido un gran éxito de los pasados 50 años de investigación en fusión, el dominar en el laboratorio una amplia variedad de inestabilidades. Comprender tales problemas y la naturaleza de las dificultades, tales como el transporte de energía en el plasma, ha llevado en el proceso al desarrollo de la física de plasmas como una rama sumamente activa. Sin embargo, el poder controlar un aparato de fusión nuclear ha resultado ser considerablemente más difícil de lo que se previó en un principio. En términos de física e ingeniería, el Tokamak es el aparato más avanzado y mejor comprendido. Las contribuciones del Joint European Torus (JET) Figura 4.17, junto con las de una enorme flota de aparatos, principalmente en Estados Unidos, Europa, Japón y Rusia, han sido cruciales para coleccionar una amplia base de datos, la cual resume una comprensión profunda de la física y de los escenarios de operación para los experimentos construidos hasta la fecha. Hoy en día es posible producir descargas de varios segundos de duración en Tokamaks, con valores de Q del orden de 0.6. El equilibrio y la estabilidad del plasma son "controlados" satisfactoriamente.

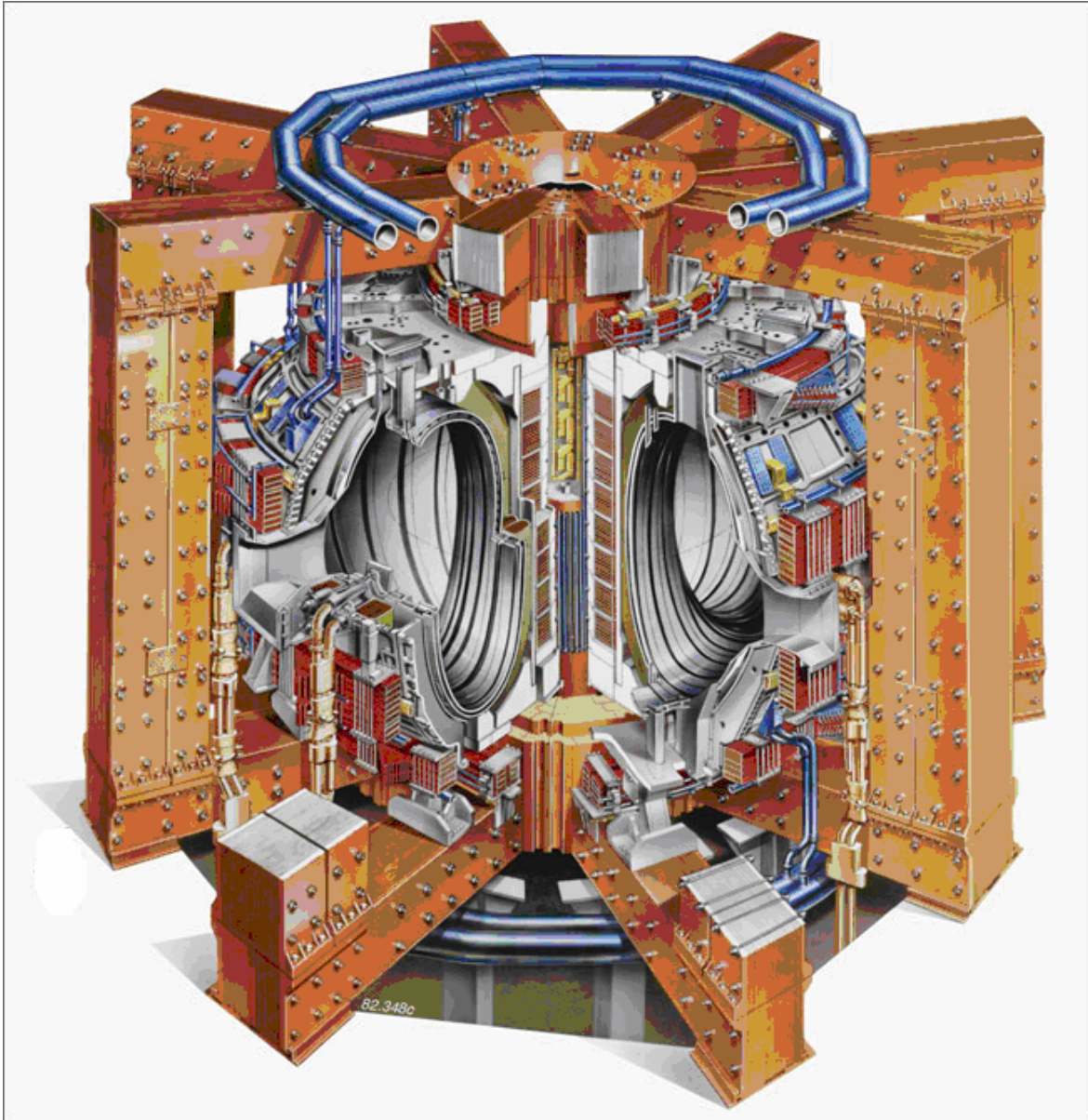


Figura 4.17 Diagrama simplificado del JET [44]

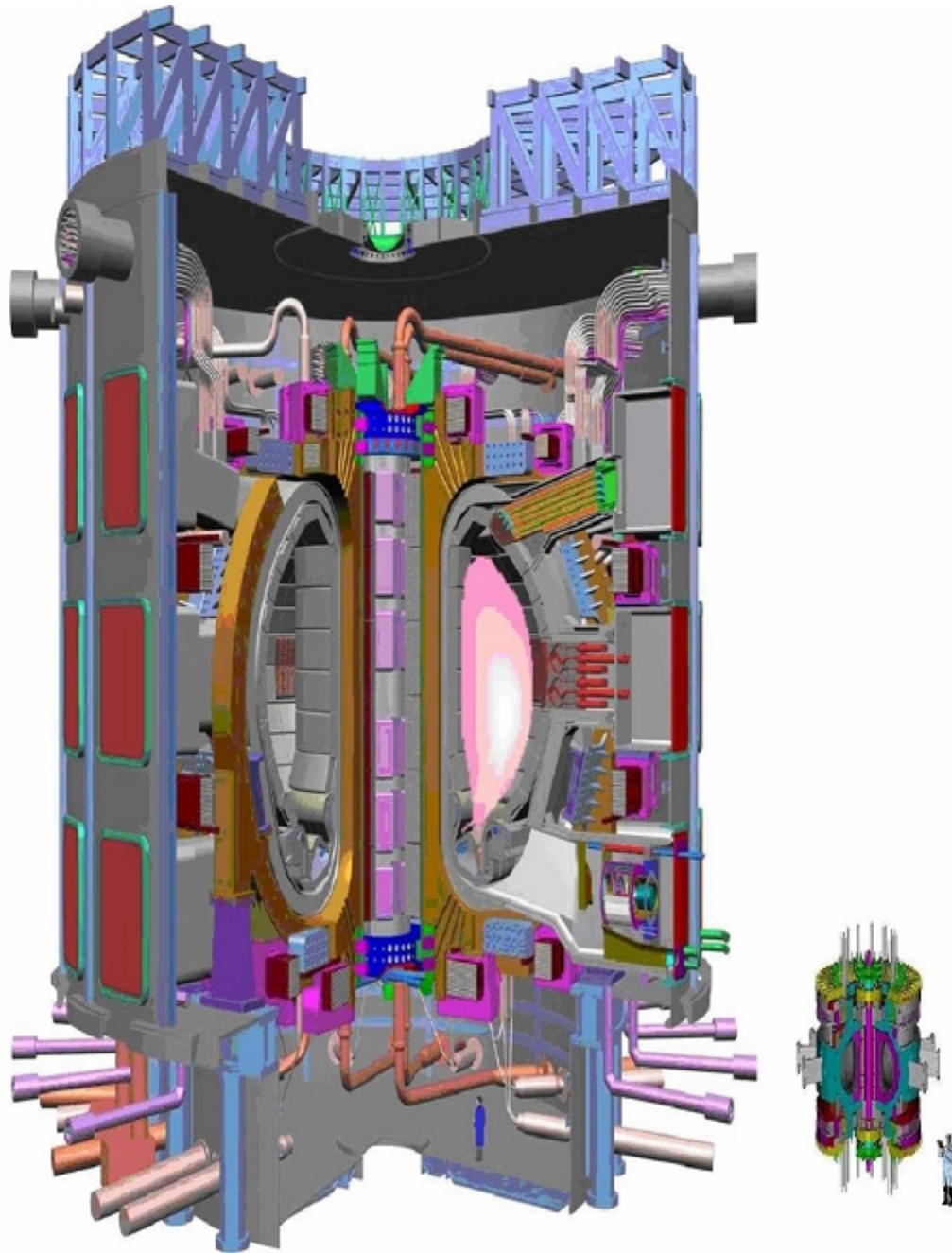


Figura 4.18 Los tamaños a escala del proyecto ITER a la izquierda y el JET a la derecha [44]

IGNITOR es el primer experimento que llegará a la ignición concebido y diseñado sobre la base de las tecnologías existentes y el conocimiento de la física del plasma. IGNITOR se mantiene en progreso en Italia, aunque a un paso lento marcado por el financiamiento disponible. Esto es consecuencia de la premisa inicial de que es preferible invertir en un sólo diseño, más ambicioso y flexible. Pero ha llevado a perder un eslabón entre dos generaciones de experimentos de Tokamaks, que hubiera producido información importante sobre el comportamiento de plasmas en combustión.¹⁰⁷

¹⁰⁷ Julio Herrera Velázquez. La Fusión Nuclear como Opción Energética para el siglo XXI. Pag. 84. Op. Cit.

En la siguiente Tabla 4.2 se hace una comparación entre tres de los más importantes proyectos de reactores termonucleares de fusión.

Tabla 4.2 Principales parámetros de JET, IGNITOR e ITER¹⁰⁸

Parámetro	JET	IGNITOR	ITER
R (Radio mayor) [m]	3	1.32	6.2
r (Radio menor) [m]	1.25	0.47	2
Volumen [m ³]	100	10	840
Duración del pulso [s]	60	8	400
Corriente de plasma [MA]	7	11	15
Campo toriodal [T]	4	1.3	5.3
Densidad central [m ⁻³]	2x10 ²⁰	10 ¹¹ (En ignición)	10 ²⁵
Temperatura de electrones 10 ⁶ [K]	320	184 (En ignición)	336
Temperatura de iones 10 ⁶ [K]	640	168 (En ignición)	288
Q	0.6	∞	10

Como resultado de estos avances, se ha diseñado un Tokamak de siguiente generación; el International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) Figura 4.18

4.7 Proyecto ITER

El siguiente paso es construir un reactor que demuestre la viabilidad tecnológica para producir energía eléctrica a partir de la de fusión. Este reactor será el ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, en español: Reactor Termonuclear Experimental Internacional) actualmente en fase de diseño. Para el diseño y construcción de este gran reactor se han asociado Rusia, la Unión Europea, Japón, Corea, China, India y USA (ver Figura 4.20) ya que el esfuerzo tecnológico y económico no puede ser afrontado por un solo país. El ITER está siendo construido en Cadarache, al sur de Francia Figura 4.19.

ITER será el primer experimento que opere con un plasma en combustión; es decir, en el que la mayor parte de la energía provenga de las reacciones de fusión, y por ello proporcionará información nueva, necesaria para el futuro del programa. También proporcionará los medios necesarios para probar componentes de ingeniería esenciales. Desafortunadamente, el tiempo tomado para diseñar y construir dicha máquina, ha retrasado considerablemente el programa de fusión. Después de habersele concebido inicialmente en 1985, no producirá su primer plasma sino hasta el 2016. Su

¹⁰⁸ Ibid Pag. 88

costo de construcción se estima en cinco mil millones de euros, mientras que su costo de operación en los siguientes 20 años será aproximadamente la misma cantidad.¹⁰⁹



Figura 4.19 Mapa de Cadarache, Francia, lugar escogido como sede de ITER [43]



Figura 4.20 Países que participan en el proyecto ITER [43]

Este reactor experimental de fusión nuclear se basa principalmente en el diseño ruso, Tokamak. Su funcionamiento es el siguiente: en su interior posee unas bobinas magnéticas superconductoras situadas alrededor del recipiente contenedor, que confinan el plasma e inducen una corriente eléctrica a través de éste. Las reacciones de fusión se producen cuando el plasma está bastante caliente y se encuentra lo más denso posible, así puede contener durante suficiente tiempo los

¹⁰⁹ Ibid Pag. 84

núcleos atómicos para que se empiecen a fusionar. El volumen de plasma tiene que ser lo bastante grande para conseguir las condiciones de multiplicación de energía. Este gas de plasma se calienta a 288 millones de grados centígrados. Una vez caliente, el plasma se mantiene confinado en el interior por medio de campos magnéticos. Se obtiene entonces una "masa" en forma de "dona" que generará de 400 a 700 MW de calor; esto sucede sólo en los pocos minutos en que permanece estable.¹¹⁰

En la Figura 4.21 se muestra un esquema de la maquinaria del ITER, en la cual en la parte inferior se muestra la imagen de una persona para que se pueda apreciar la escala de la maquinaria.

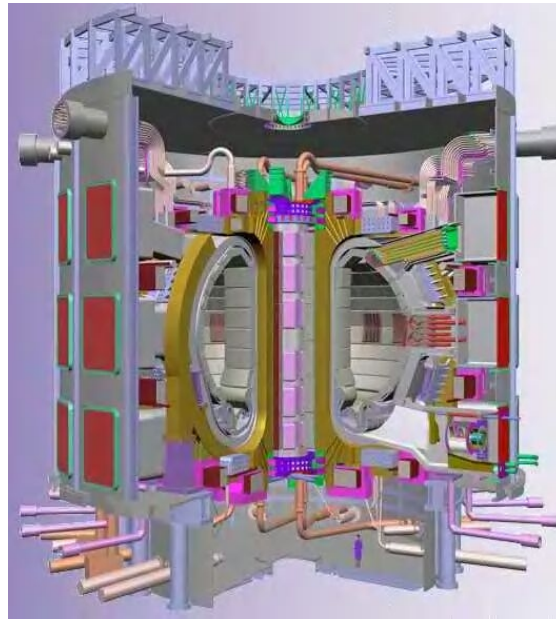


Figura 4.21 Esquema del ITER [43]

En el ITER, las dimensiones que se están considerando son: radio mayor de 6.2 m, y radio menor de 2 m. El campo magnético toroidal, en cambio, no se planea incrementar substancialmente en relación con los usados en la actualidad; será del orden de 5.3 T. La corriente del plasma se aumentará hasta 15 MA.

4.7.1 El reto de la ingeniería y de los materiales

Un reactor de fusión es en realidad un ejemplo auténtico de ingeniería extrema. Mientras que el núcleo confina un plasma con temperaturas mucho mayores que las del interior del Sol (aunque a densidades mucho menores) el confinamiento se consigue mediante campos magnéticos producidos por bobinas superconductoras a temperaturas del orden de 4 K. Para confinar plasmas muy calientes, resulta necesario que los campos magnéticos sean muy intensos. Las bobinas que los producen han de ser por tanto muy potentes. Las mejores que se conocen están construidas de material superconductor; cuya resistencia eléctrica se reduce enormemente si se les enfría a temperaturas muy bajas, del orden de -250 grados celsius (1K = - 273.15 °C) Los campos

¹¹⁰ The ITER Device, Research and Development (2008) Obtenido el 7 de junio de 2008 de: http://www.iter.org/a/index_nav_4.htm

magnéticos producidos por estos imanes superconductores son enormes, 100 000 veces más intensos que el campo magnético terrestre. Sin embargo, mantener frías estas bobinas agrega un problema técnico más; para evitar que dejen de ser superconductoras, las bobinas están hechas de alambres huecos por cuyo interior se hace circular helio líquido en grandes cantidades.¹¹¹

La energía de los neutrones será absorbida por un cobertor de litio que rodea al aparato, el cual se emplea para generar tritio, y es calentado. Este cobertor, del cual se absorbe la energía mediante un intercambiador de calor; también debe proteger de radiación de neutrones al equipo más costoso, incluyendo a las bobinas. El sistema debe ser diseñado de tal modo que nunca ocurran fugas de tritio o incendios de litio. Además, puesto que la primera pared en la cámara de vacío será activada por la radiación de neutrones, cualquier reparación se deberá hacer de manera remota, por lo que robótica de precisión, actualmente desarrollada en JET, es muy necesaria.

Todo esto significa que se requiere de una ingeniería muy precisa, bien planeada y disciplinada para operar un reactor de fusión de manera confiable. Existen buenos ejemplos en los que esto puede conseguirse, no sólo en la industria nuclear, sino también en las líneas aéreas, las cuales pueden mantener en vuelo confiablemente aviones complejos durante periodos largos de tiempo, cumpliendo con itinerarios precisos, y en condiciones económicamente rentables en la mayoría de los casos.

Por otra parte, debe reconocerse que la tecnología mejorará con el tiempo. Aprovechando nuevamente como ejemplo los logros de la industria aeroespacial, cabe señalar que las aeronaves actuales, con toda su complejidad y comodidad hubieran sido inimaginables con costos accesibles, hace apenas unas cuantas décadas.

Puesto que la primera pared será sujeta a altos flujos de radiación, su capacidad de transferencia de calor juega un papel muy importante en la determinación del tamaño del reactor. Los materiales que se encuentran bajo desarrollo podrán soportar 6 veces más calor que los empleados actualmente, lo que significa que el tamaño será determinado por la física, y no por la ingeniería. En la mayoría de los Tokamaks actuales, la primera pared está recubierta de compuestos de carbón (ver Figura 4.22) Puesto que éste tiene un número atómico bajo, reduce las pérdidas por radiación si se introduce como una impureza al plasma. Sin embargo, como tiende a reaccionar con los isótopos del hidrógeno, también absorbería enormes cantidades de tritio en un reactor, de modo que éste podría remontar el inventario de tritio permitido por el licenciamiento de la planta. Por ello es importante reemplazar el carbón por otros materiales. El tungsteno y el molibdeno están siendo considerados como opciones.

¹¹¹ Julio Martinell Benito. Los prometeos modernos o el esfuerzo por controlar la fusión nuclear. Op. Cit.

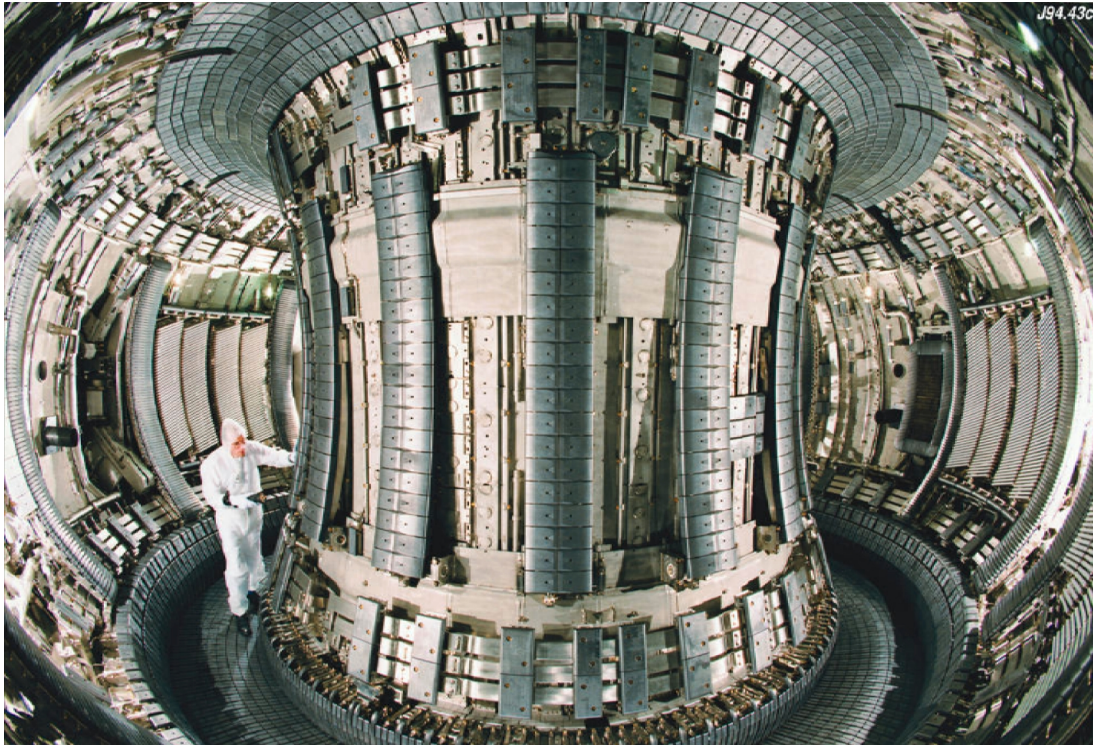


Figura 4.22 Interior de un reactor Tokamak [39]

Debido a la activación de la primera pared por el flujo de neutrones, la frecuencia con la que deberá ser reemplazada y la razón de producción de desechos radiactivos dependerán del material que se emplee. Esto, junto con los problemas mencionados en la sección anterior, hacen de la investigación de materiales, una actividad crucial para un diseño exitoso de los reactores de fusión.

Se estima que empleando acero ferrítico de activación reducida, la radiactividad producida 10 años después del cierre del reactor estará sobre los 10^{-2} Curies por Watt de energía térmica generada durante la vida del reactor. Aunque esta cifra sería sólo ligeramente menor a la de un reactor convencional de agua ligera de fisión, los desechos serían de vida media corta, de modo que 100 años después del cierre decaería a 10^{-6} Curies/Watt, mientras que para un reactor de fisión decaería tan sólo un orden de magnitud. Si en cambio se emplearan aleaciones de vanadio, la radiación sería de 10^{-6} y 10^{-8} Curies/Watt a los 10 y 100 años del cierre, respectivamente.¹¹²

Aún cuando la primera pared deba ser reemplazada frecuentemente, será capaz de blindar el equipo más costoso, tal como la cámara de vacío y las bobinas superconductoras, las cuales serían diseñadas para durar la vida entera del reactor. Hasta el momento éste se reconoce como el mayor problema que queda por resolver, puesto que no se tiene un material ideal. El desviador poloidal es considerado el componente esencial en un Tokamak convencional. Su papel principal es crear un campo magnético abierto que permita la recolección de partículas alfa, una vez que hayan depositado su energía en el plasma, así como desviar impurezas de número atómico mayor. Reside en una cámara separada pero conectada con la cámara principal del plasma. En el caso de ITER, operando con $Q=10$, una superficie de 4 m^2 de la cámara del desviador serán sujetas a descargas de 30 MW, cuando se presentan cierto tipo de fenómenos denominados modos localizados en el

¹¹² Julio Herrera Velázquez. La Fusión Nuclear como Opción Energética para el siglo XXI. Pag. 89. Op. Cit.

borde (ELMs por su nombre en inglés *Edge Localized Modes*) Esto será suficientemente para derretir o evaporar pequeñas gotas de la placa, si ésta es de cobre o tungsteno, por ejemplo. Dichas gotas capturarán tritio y se redepositarán como polvo sobre las placas, creando un problema de inventario de material radiactivo. La solución actual consiste en reemplazar con frecuencia las placas. Para resolver este problema se están proponiendo soluciones interesantes, tales como diseñar limitadores de litio líquido, con un desviador fuera de la cámara del plasma. En los últimos años se han realizado experimentos de prueba de principio en esta línea, con un simulador en el Laboratorio Nacional de Argonne (IMPACT) y en el Tokamak CDX-U de Princeton (actualmente renombrado LTX por *Lithium Tokamak Experiment*) En el Tokamak T-II del Instituto de Investigaciones e Innovaciones Termonucleares en Troitsk, Rusia se ha llegado más lejos, probando un limitador activo en el que el tritio líquido es recirculado a través de poros en una placa. Más recientemente se ha iniciado trabajo en esta dirección en el Tokamak FT de la ENEA en Frascati, Italia. Aunque se han obtenido resultados interesantes, queda por verse si los responsables de ITER e IGNITOR estarán dispuestos a incorporar estos conceptos en experimentos de plasmas en ignición.¹¹³

El vaivén del campo magnético produce grandes tensiones mecánicas sobre los alambres del embobinado. Éstas, que pueden llegar a ser de varias toneladas por centímetro cuadrado en campos magnéticos grandes y variables, producen fatiga mecánica en los materiales. El problema de resistencia de materiales que así se presenta no ha sido aún resuelto.

Como en los reactores de fisión, en los de fusión también existen problemas de seguridad radiológica. El de los desechos radiactivos es casi despreciable, si se compara con el de los reactores de fisión. El problema reside, más bien, en el gran volumen de tritio que se maneja en los reactores de fusión, que alcanza casi un kilogramo, lo que produce 10^{17} desintegraciones nucleares cada segundo. En efecto, como combustible del reactor de fusión se inyectan cristales fríos de deuterio y tritio a gran velocidad para que lleguen al interior del plasma, donde se ionizan. El proceso no es cien por ciento eficiente y el combustible debe ser recuperado bombeándolo por medio de sistemas de vacío. El gran flujo de neutrones hace necesario el uso de múltiples sistemas de blindaje. Como ya dijimos, la camisa debe desmantelarse cada dos o tres años. El reactor mismo, al acabar su vida útil, que será tal vez de dos o tres decenios, también debe deshacerse, recuperar lo que sea conveniente y darle disposición final a los residuos no recuperables.. Todos los elementos que lo formaron podrían quedar radiactivos, con vidas medias tan largas como años, pues han sido activados por neutrones. A pesar de todo lo anterior; el problema de los desechos radiactivos es mucho menor que en los reactores de fisión actuales.

Con las incertidumbres que se tienen actualmente, puesto que aún queda mucha investigación por realizar, aún es difícil estimar de manera confiable el costo de la energía eléctrica para los reactores de fusión. Sin embargo, existe una gran cantidad de trabajo sobre el tema, que permite tener una buena idea en primera aproximación. Conforme avancen las investigaciones, es probable que los costos disminuyan. De acuerdo con las proyecciones actuales, el costo de la energía eléctrica de un reactor de fusión sería 25% mayor que para una termoeléctrica de carbón, 50% mayor que para un reactor de fisión de agua hirviente, y 100% mayor que para una planta de gas natural. Sin embargo, estas estimaciones no toman en cuenta el impacto producido por CO₂, en el caso de los

¹¹³ Ibid. Pag. 89

combustibles fósiles, o los costos de disposición de desechos radiactivos, en el caso de los reactores de fisión.¹¹⁴

Los plasmas en combustión son un territorio aún desconocido para la ciencia. La naturaleza del problema se puede apreciar si nos percatamos de que en los experimentos realizados hasta la fecha no se ha alcanzado aún el régimen de balance de energía ($Q=1$) En ITER, por otra parte, se esperan alcanzar valores de $Q=5$ y posiblemente de $Q=10$. El único aparato diseñado para alcanzar la ignición ($Q=\infty$) es IGNITOR, pero aunque se ha realizado un esfuerzo considerable en la construcción de componentes y sistemas para él, aún es incierto cuándo entrará en operación, debido a la falta de financiamiento suficiente. Debe enfatizarse; sin embargo, que las metas y misiones de ambas máquinas son bastante diferentes, y no son mutuamente excluyentes. Por el contrario, puesto que ambas proporcionarían información importante precisamente por dichas diferencia, son complementarias. Mientras que se espera que ITER sea suficientemente flexible para probar los componentes de ingeniería necesarios en un reactor de fusión, en pulsos prolongados, se espera que IGNITOR proporcione información sobre el plasma en combustión en la trayectoria hacia la ignición, en pulsos más cortos. Cuando $Q>5$ se espera observar efectos de las partículas alfa sobre la estabilidad y turbulencia. Con $Q>10$, puede ocurrir un acoplamiento no lineal entre las partículas alfa, la corriente originada por gradientes de presión, el transporte turbulento, y la estabilidad magnetohidrodinámica se vería afectada. Hasta ahí llegaría la investigación de ITER, cuando alcance su operación completa hacia el 2021. En un aparato con $Q>20$, será necesario controlar la alimentación del combustible, al propagarse la combustión, y aparecer transitorios de ignición. Únicamente IGNITOR será capaz de explorar este régimen. En pocas palabras, se abre un nuevo territorio inexplorado para la investigación en fusión, al realizar experimentos sobre plasmas en combustión, y como frecuentemente ocurre, es difícil predecir qué sorpresas, tanto en la forma de obstáculos como de soluciones pueden surgir. Es importante observar que rara vez la teoría ha sido capaz de predecir los principales descubrimientos en la investigación de fusión, y éstos se han logrado sólo realizando los experimentos necesarios.¹¹⁵

DEMO (DEMOstration Power Plant, Planta de Energía de DEMOstración) es un proyecto prototipo de reactor comercial, posterior a ITER, que estará construido sobre el éxito esperado de ITER. El objetivo de DEMO es mostrar que la generación de energía eléctrica es viable, empleando un reactor de fusión. Para ello tendrá que lograr lo siguiente:

Las necesidades operacionales de DEMO superan considerablemente aquellas de ITER. Para generar 1 GW, la energía nuclear de Fusión en DEMO debe producir aproximadamente 2500 MW con una $Q \sim 25$ y demostrar las técnicas para lograr un factor de disponibilidad medio de aproximadamente 75%. Así, el reto de Demo es de enormes proporciones, en comparación con la operación de ITER en 500 MW, $Q = 10$ y un máximo promedio previsto de 15% para el factor de carga. El plasma en DEMO debe aceptar aproximadamente cuatro veces mayor potencia y operar durante períodos prolongados en aproximadamente cinco veces más que el factor de disponibilidad de ITER. Además, debido a la amplia diferencia en los requisitos de rendimiento para ITER y DEMO, ITER usará soluciones científicas y tecnológicas que no pueden extrapolarse a DEMO, como una moderada fracción de potencia radiada y el agua de refrigeración de la primera pared y desviador. En particular, la baja temperatura de la primera pared de ITER (~ 200 °C) en comparación con

¹¹⁴ Ibid. Pag. 89

¹¹⁵ Ibid. Pag. 88

DEMO (~ 700 °C) presenta un entorno diferente con respecto al tritio, principalmente retención de éste. Mientras que el bajo factor de disponibilidad y los pulsos relativamente cortos de ITER, dan la oportunidad de eliminar este tritio retenido, esto no será una opción para DEMO.¹¹⁶

Como podemos ver de esta breve descripción de un reactor caliente de fusión nuclear; los retos tecnológicos son gigantescos. No asombra, entonces, que en cuarenta años de investigación se hayan invertido más de cinco mil millones de dólares para conseguir un reactor de fusión nuclear eficiente y que este proceso de diseño aún no toque fin. Aunque esta línea de trabajo es la más avanzada y la más prometedora, debido a los altos costos y a la complejidad tecnológica se han explorado otros caminos para producir la fusión nuclear, de todos, la fusión fría es la vía más socorrida.

4.8 Los reactores híbridos Fusión- Fisión¹¹⁷

Como se mencionó anteriormente, se espera que ITER opere en la región de $Q = 10$, Y aún si IGNITOR llegase a operar con éxito, sus resultados serán insuficientes para pasar a construir un reactor de fusión, ya que su misión es investigar y comprender los procesos de un plasma en combustión, así como su camino hacia la ignición, pero quedarían importantes problemas de ingeniería por resolver.

Por otra parte, como se mencionó anteriormente, el terreno de los plasmas en combustión es aún territorio inexplorado, por lo que pueden aparecer cuestiones que sólo se pueden conocer al realizar los experimentos. Para un reactor basado en fusión pura, trabajando con deuterio y tritio, se requiere de al menos $Q = 50$, tomando en cuenta que parte de la energía se perderá al convertir la energía de los neutrones en energía térmica, y también en convertir la energía térmica en eléctrica. Bajo tales circunstancias, es incierto si será posible tener reactores de fusión pura en un futuro previsible.

Sin embargo, si se analizan escenarios en los que se empleen la fisión y la fusión de manera simbiótica, éstos parecen promisorios, aunque se les debe enfocar con gran cuidado. Bajo este esquema, la fusión contribuiría de dos maneras: a) como un elemento de cría para producir combustible fisible, y b) como una fuente de neutrones rápidos para transmutar desechos radiactivos de vida media larga, lo cual representaría una solución prometedora al problema de los desechos radiactivos producidos por la nucleoelectricidad.

a) Para crianza de material fisible, los neutrones de un reactor de fusión con Q menor o ligeramente mayor a 1, se pueden multiplicar en un cobertor, con objeto de convertir material fértil en fisible, ya sea empleando ^{238}U o ^{232}Th en las reacciones, se pueden producir ^{233}U y ^{239}Pu (Tema 3.2, Figura 3.1) Mientras que hay serias objeciones respecto a producir ^{239}Pu , debido a su posible empleo en proliferación de armas nucleares, la segunda reacción, en la que el isótopo fisible es ^{233}U podría ser más aceptable.

b) En la transmutación, los neutrones se emplean para degradar desechos radiactivos de vida media larga (~ 10^4 años) en desechos de vida media más corta (~100 años) Se pueden emplear cuatro

¹¹⁶ R.J. Goldstone, *An Experiment to Tame the Plasma Material Interface*. Princeton Plasma Physics Laboratory. Princeton NJ. 2008

¹¹⁷ Julio Herrera Velázquez. La Fusión Nuclear como Opción Energética para el siglo XXI. Pag. 90. Op. Cit.

posibles fuentes de neutrones para este propósito: neutrones térmicos de reactores de agua ligera (Light Water Reactors (LWR) 6×10^{-3} neutrones/MeV) neutrones rápidos de reactores avanzados de metal líquido (Advanced Liquid Metal Reactors (ALMRs) 7.5×10^{-3} neutrones/MeV) aceleradores de protones sobre blancos de plomo (Spallation, 1.5×10^{-2} neutrones/MeV) y reactores de fusión (4.5×10^{-2} neutrones/MeV) Más aún, los neutrones de un reactor de fusión se pueden moderar de modo que pueden generarse tanto neutrones rápidos como térmicos, según sea la necesidad. Sin embargo, cabe aclarar que los reactores de fusión no deben emplearse para quemar material fisiónable, lo que podría ser catastrófico en la eventualidad de una disrupción del plasma.

Una tercera idea es que tecnología de fisión contribuya con la fusión, la idea sería introducir litio en el núcleo de los reactores de fisión, de modo que los neutrones contribuyan a la cría de tritio para los reactores de fusión.

Se tiene un amplio espectro de escenarios de fisión-fusión, que van desde un reactor híbrido, cuyo diseño sería sumamente complejo, y poco recomendable por la razón señalada en el párrafo anterior, hasta los que permitirían emplear la tecnología disponible en ITER, en la que los reactores de fisión y fusión operarían separadamente de manera simbiótica. Pueden imaginarse "parques nucleares" en los que no sería necesario ingresar combustible enriquecido, y en donde los desechos radiactivos serían transmutados y tratados en el interior del mismo parque.

4.9 Recursos energéticos

4.9.1 Deuterio

En nuestro planeta el deuterio es abundante en el agua de mar (30 g/m^3) el óxido de deuterio, D_2O , se obtiene, principalmente, por electrólisis de agua. Cuando se electroliza una gran cantidad de agua, el H_2 se libera más rápidamente que el D_2 lo que produce un enriquecimiento progresivo en D_2O en el líquido remanente. Si se electrolizan 30L de agua normal, hasta un volumen final de 1 mL, este tiene una riqueza aproximada del 99% en D_2O

4.9.2 Tritio

El tritio no existe en estado natural, hay que producirlo y además es radiactivo con una vida media de 12.36 años. Una posibilidad es extraer tritio del agua pesada de los reactores de fisión. Sin embargo, la opción más viable es producirlo en el reactor de fusión utilizando una cobertura o manto fértil de litio (Ecuaciones 6 y 7)

Existe una significativa demanda de tritio como marcador radiactivo para usos médicos dado que emite electrones de baja energía (sólo radiación β sin radiación γ) que apenas dañan los tejidos biológicos. Pero su demanda más importante parte de su uso militar. Las denominadas bombas de hidrógeno son en realidad bombas de tritio.

4.9.3 Litio

El litio natural (92.5% ${}^7\text{Li}$ y 7.5% ${}^6\text{Li}$) es un elemento relativamente abundante en la corteza terrestre y en menores concentraciones en el mar. No se presenta en estado libre sino únicamente en

compuestos, que se encuentran ampliamente difundidos. Sus minerales más importantes son: espodumeno, ambligonita y lepidolita, un fluosilicato hidratado complejo. Las cenizas de plantas como la remolacha y el tabaco contienen una pequeña proporción de litio, que también puede encontrarse en algunas aguas minerales.

4.10 Impactos ambientales

La fusión nuclear es un recurso energético potencial a gran escala, que puede ser muy útil para cubrir el esperado aumento de demanda de energía a nivel mundial, en los próximos siglos.

La ventaja más importante de este tipo de energía es que es benigna con el medio ambiente, pues no contamina con gases relacionados con la lluvia ácida ni con el efecto invernadero. Los combustibles primarios son baratos, abundantes, no radiactivos y repartidos geográficamente de manera uniforme (el agua de los lagos y los océanos contiene hidrógeno pesado suficiente para millones de años, al ritmo actual de consumo de energía)

El problema reside, más bien, en el gran volumen de tritio que se maneja en los reactores de fusión, un kilogramo produce 10^{17} desintegraciones nucleares cada segundo. El gran flujo de neutrones hace necesario el uso de múltiples sistemas de blindaje. Como ya dijimos, la camisa debe desmantelarse cada dos o tres años. El reactor mismo, al acabar su vida útil, que será tal vez de dos o tres decenios, también debe deshacerse. Todos los elementos que lo formaron podrían quedar radiactivos, con vidas medias tan largas como años, pues han sido activados por neutrones. Por otro lado, el tritio al decaer emite un electrón con energías pequeñas, comparables a las producidas en un televisor a color; por lo que su penetración en el aire es apenas de unos cuantos centímetros. Sin embargo, el principal riesgo asociado al tritio es que lo inhalamos, pues reemplaza al hidrógeno del agua que hay en el organismo y causa irradiación interna. Sin embargo, la radiactividad de la estructura del reactor, producida por los neutrones emitidos en las reacciones de fusión, puede ser minimizada escogiendo cuidadosamente los materiales, de baja activación. Por tanto, no es preciso almacenar los elementos del reactor durante centenares y millares de años.

La complejidad tecnológica de este tipo de energía, obliga, en la actualidad, a hacer proyectos internacionales para poder afrontar los costos de las instalaciones. Por el momento es difícil saber con precisión cuándo se tendrá a la energía de fusión operando de manera comercial.



CAPÍTULO 5

Análisis de la Sustentabilidad de la Fisión y la Fusión para la Generación Eléctrica

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Capítulo 5

5 Análisis de la Sustentabilidad de la Fisión y la Fusión para la Generación Eléctrica

5.1 Introducción

Una vez entendido los conceptos básicos de la física, el aspecto tecnológico, así como también el político-social y el contexto de cada uno de los dos fenómenos en cuestión, en el presente capítulo, se desarrollará un estudio de sustentabilidad de las tecnologías de fisión y de fusión nuclear. El objetivo es decidir cuál de las dos tecnologías es más sustentable, para su aplicación en la búsqueda de satisfacer las necesidades energéticas del mundo y en particular de México. El análisis está basado en las dimensiones del desarrollo sustentable; es decir, en la económica, ambiental y social-política.

Como ya se dijo, ambas tecnologías se encuentran en desarrollo, a pesar de que en la actualidad la fisión nuclear ya se aplica comercialmente para la generación de energía eléctrica, como ya se mencionó, aún se esperan avances significativos sobre los reactores de cuarta generación. Por otra parte el hombre, no ha sido capaz aún, de desarrollar la tecnología necesaria, ya no digamos para su aplicación comercial, sino tan siquiera experimental, con la cual generar energía nuclear de fusión de manera eficiente y controlada. En este sentido el proyecto ITER, se espera brinde grandes avances sobre el dominio tecnológico de la fusión.

Dadas estas cuestiones, de desarrollo tecnológico para ambas energías, el presente estudio se realizará en dos diferentes escenarios: a) el primero se realizará en el mediano plazo, 30 años; b) el segundo, a largo plazo, 60 años. Con el planteamiento de estos dos escenarios se incluirán, entonces, los avances tecnológicos de ambas tecnologías.

Al final de este capítulo, se llegará a una conclusión en cuanto a qué tipo de energía es mejor en términos de sustentabilidad, en el mediano y largo plazo, y por ende cuál de ellas puede ser aplicada en el mundo y en México. Aun y cuando ante los ojos de muchos, la respuesta parecería ser evidente, este trabajo nos brindará una visión más cercana a la realidad, además de darle un soporte teórico en la ayuda de la toma de decisiones que se tendrán que hacer, con miras en el futuro de la generación eléctrica del país. El costo mínimo y el bajo nivel de emisiones podrían ser suficientes para convencer a los encargados de tomar decisiones para construir nuevas plantas de energía nuclear en México. Sin embargo, es más adecuado utilizar una metodología para la evaluación comparativa de las opciones de energía nuclear sobre la base de los criterios del desarrollo sustentable.

5.2 Desarrollo sustentable

Como ya se mencionó en capítulos anteriores, la energía es un recurso esencial para todas las actividades de desarrollo social y económico. Los países con un alto nivel de desarrollo económico (Producto Interno Bruto per cápita, PIB/cápita) cuentan con índices de "bienestar" altos y por supuesto tienen niveles de consumo de energía (y en general de recursos) altos.

Desafortunadamente todos los procesos de producción y consumo de energía generan desechos que deberán ser tratados o guardados adecuadamente para causar el menor impacto sobre el medio ambiente. La mayor parte de los recursos energéticos son no-renovables por lo que deberán ser utilizados eficientemente para obtener de ellos el mejor provecho y retardar lo más posible su agotamiento. Por otro lado, las energías renovables son bastante dispersas por lo que será necesario encontrar la manera de utilizarlas, sin que ello implique mayores consumos de energía o la utilización a gran escala de superficie y materiales.

El planeta Tierra es un conjunto de ecosistemas en los cuales se producen cambios naturales que no dependen de la acción del hombre. Sin embargo, las actividades humanas producen desechos que pueden tener impactos (positivos o negativos) sobre los ecosistemas. Dependiendo del tipo de desecho y de la cantidad liberada al ambiente los ecosistemas son capaces de asimilar esos desechos sin obtener un daño considerable. Ésta es la razón de estudiar las tecnologías de producción y uso de energía en el contexto de un desarrollo sustentable.

5.2.1 Definiciones de desarrollo sustentable

Este término, fue utilizado por primera vez en 1987 en el informe Nuestro Futuro Común¹¹⁸ de la Comisión Mundial sobre Desarrollo y Medio Ambiente de las Naciones Unidas, también denominado Informe Brundtland, por haber sido dirigido por la ex Ministra Noruega Gro Hariem Brundtland. De este informe surge la siguiente definición.

"Desarrollo sustentable es aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades".

En este informe se pone de manifiesto que diversos efectos derivados de nuestro modus vivendi y nuestro progreso actual pudieran ser contraproducentes para generaciones venideras, que podrían encontrar un hábitat natural no totalmente adecuado.

Dos de las situaciones más graves que hoy enfrenta la sociedad son: las grandes necesidades de una población creciente y la degradación del ambiente y de los recursos naturales. Estos problemas están en conflicto ya que para satisfacer tales necesidades se requiere aumentar la capacidad productiva de los recursos naturales, la cual ya tiene sus límites. La clave de un crecimiento sustentable no es producir menos, sino hacerlo de forma diferente.

El desarrollo sustentable se propone, entonces, como el mecanismo que puede evitar tal conflicto y permitir a las sociedades actuales y futuras, mantener y/o elevar su calidad de vida, además de conservar y restaurar los recursos naturales. Entendiéndose por calidad de vida, el bienestar material, cultural, moral, social y ambiental de los seres humanos.

Esta visión del desarrollo sustentable plantea tres enfoques básicos:

1. El económico
2. El ecológico
3. El político - social

¹¹⁸ World Commission on Environment and Development (WECD) Our Common Future. New York Oxford. 1987

Otra manera equivalente de ver la sustentabilidad es a través de sus tres dimensiones: Económica, Ambiental y Social-política (ver Figura 5.1)

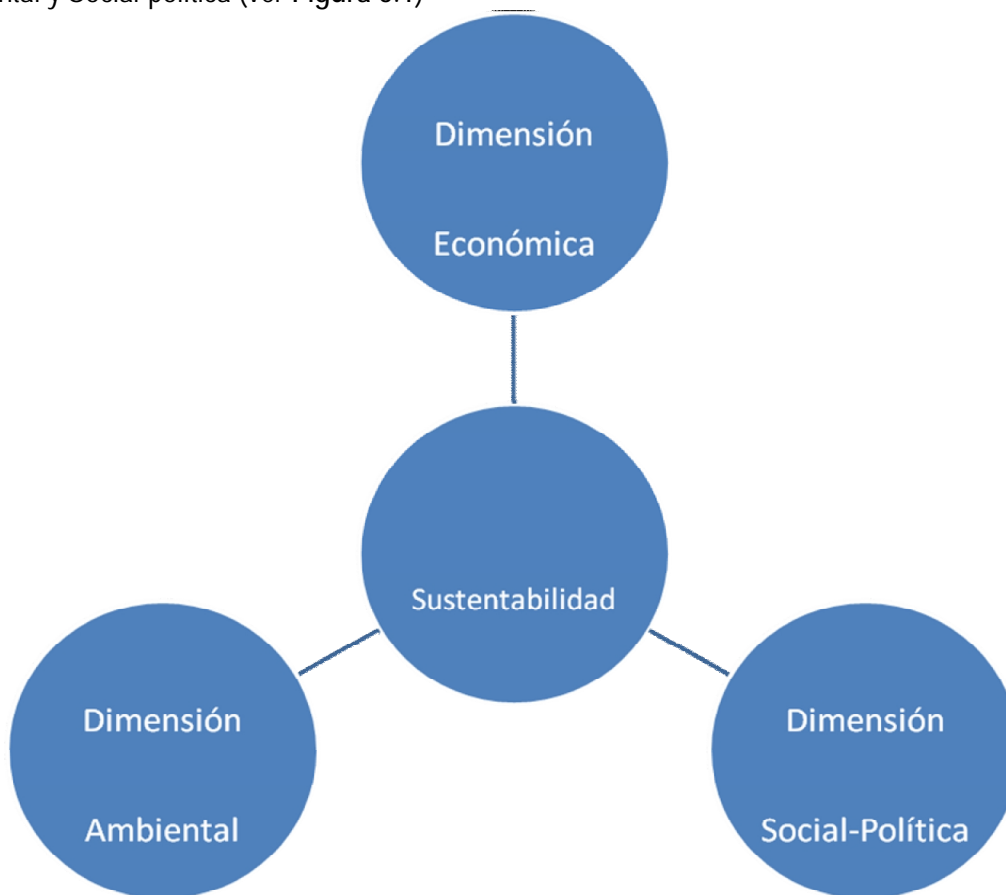


Figura 5.1 Dimensiones del desarrollo sustentable

5.3 Metodología

5.3.1 Descripción

No sólo el aspecto tecnológico tiene una importancia fundamental sobre la base de todos los indicadores; por ello es necesario aplicar un método para abarcar todos los indicadores, teniendo en cuenta su importancia relativa en la decisión. De los diferentes métodos que existen para la toma de decisiones, en el presente trabajo se seleccionó la Lógica Difusa, porque puede combinar e integrar todos los elementos de decisión en un sistema lógico de inferencia, toma en cuenta las ponderaciones de los diferentes indicadores y puede resolver matemáticamente situaciones difusas acerca de algunos indicadores, como se describe a continuación.

1. El primer paso consiste en la búsqueda de indicadores para ser evaluados en los tres pilares de la sustentabilidad: económico, ambiental y social
2. El segundo paso es obtener los valores de los indicadores para cada una de las opciones.
3. El tercer paso es integrar todos los indicadores comprendidos en cada dimensión. La Lógica Difusa se utilizará para realizar esta agregación.

5.3.2 Selección de criterios e indicadores

Hay muchos ejemplos de criterios e indicadores relevantes para el desarrollo sustentable, que han sido establecidos y analizados por organizaciones internacionales. Después de una revisión de varios documentos, dos de ellos (S. Hirschberg et al., 2005) y (Kroger, 2001) sirvieron de guía en este estudio, para definir el conjunto básico de indicadores. La **Tabla 5.1** presenta las áreas de impacto consideradas en cada dimensión de sustentabilidad y los indicadores asociados a cada área. La descripción de cada indicador se presentará en la sección 5.3.3.

Tabla 5.1 Matriz de indicadores de sustentabilidad

	<i>Área de impacto</i> (Importancia en %)	<i>Indicador</i> (Importancia en %)	<i>Importancia en %</i>
Económico	Recursos (20)	Disponibilidad de reservas de combustible (50)	3.33
		Consumo de material no-combustible (30)	2.00
		Disponibilidad (20)	1.33
	Necesidades financieras (50)	Costos de producción (75)	12.50
		Sensibilidad al incremento del precio del combustible (25)	4.17
	Tecnología (30)	Madurez de la tecnología (70)	7.00
Dependencia del exterior (30)		3.00	
Medio Ambiente	Efectos no contaminantes (15)	Extensión de tierra perdida (100)	5.00
	Impacto regional (30)	Niveles de radiación en la región vecina (100)	10.00
	Producción de residuos (35)	Desechos radiactivos de alta y mediana actividad (100)	11.67
	Accidentes severos (20)	Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos (100)	6.67
Social	Aversión al riesgo (15)	Máximo número creíble de muertes por accidente (100)	5.00
	Confinamiento crítico de residuos (25)	Tiempo necesario de confinamiento (100)	8.33
	Proliferación (20)	Posibilidad relativa a la proliferación (100)	6.67
	Empleo (15)	Oportunidades de empleo (100)	5.00
	Repercusiones sobre la salud Humana (Operación normal) (20)	Mortalidad (Reducción de la esperanza de vida) (100)	6.67
	Perturbaciones locales (5)	Ruido y contaminación visual (100)	1.67

Es obvio que la importancia que debe tener cada indicador sobre la evaluación de la sustentabilidad no es uniforme y que cada analista podría establecer su propia jerarquización. Tan sólo este asunto podría ser motivo de un análisis de sensibilidad. Sin embargo, en este trabajo se decidió definir los pesos tomando como guía un estudio anterior (S. Hirschberg et al., 2005) así como teniendo en cuenta el tema específico de comparar dos tecnologías, que si bien son nucleares, se basan en un fenómeno físico diferente con requerimientos tecnológicos específicos. En la misma Tabla 5.1, se muestra entre paréntesis, la importancia relativa de cada área de impacto en la dimensión y de cada indicador en su área, que fueron definidos para este trabajo.

5.3.3 Matriz de indicadores

Una vez seleccionados los indicadores de acuerdo con lo señalado en el Tema 5.3.2; se construyó una matriz, en las columnas se colocaron las tecnologías a comparar y en las filas los diferentes indicadores. Las evaluaciones se realizaron para dos momentos en el tiempo: escenario a 30 y a 60 años.

El siguiente paso, es el de evaluar cada uno de los indicadores con base en lo estudiado en los pasados 4 capítulos. La evaluación es en su mayor parte subjetiva, pero alcanza su fundamento en la investigación realizada.

5.3.3.1 Dimensión Económica

Los valores de los indicadores de la Dimensión Económica se muestran a continuación:

Disponibilidad de reservas de combustible

Importancia: 3.33%

Unidades: años

- Escenario 30 años

Fisión

De acuerdo con Kroeger, la disponibilidad de reservas de combustible en la actualidad es de entre 140 a 400 años. Tomando en cuenta esta consideración y pensando en los reactores de cría que en 30 años puedan estar en operación se pensará una reserva en años de 400 años. Se considera como combustibles al uranio, al plutonio y posiblemente se comience a utilizar el torio.

Fusión

El deuterio es un elemento abundante en el mar, el litio, por su parte, es relativamente abundante en la corteza terrestre. El tritio hay que producirlo, pero éste será producido dentro del reactor de fusión, empleando el manto de litio. Se menciona recurrentemente que el combustible para la fusión nuclear es infinito. Para fines de este trabajo se considerará para el mediano plazo una reserva de combustible de 4000 años.

- Escenario 60 años

Fisión

Uno de los grandes avances que se esperan tener en materia de tecnología nuclear, es la eficiencia en la utilización del combustible. Se pretenden alcanzar eficiencias altas en los reactores de cuarta generación, que para algunos optimistas estarían entrando en operación en 60 años. Además de este aspecto, podemos considerar que las reacciones de conversión y los reactores de cría estarán dando un plus en materia de reservas de combustible, sumado a que los reactores de IV generación serán todos ellos de ciclo cerrado. Tomando en cuenta, entonces, a largo plazo al uranio, al plutonio, al torio y demás actínidos, la reserva de combustible para la energía nuclear de fisión se estima en 1000 años.

Fusión

Considerando los mismos aspectos que para el mediano plazo y tomando en cuenta las innovaciones para la producción del deuterio y del tritio, se considerará que a largo plazo se contará con reservas de combustible para la fusión para 8000 años.

Consumo de material no-combustible

Importancia: 2.00%

Unidades: Factor de 0 (No consumo) a 1 (Mucho consumo)

- Escenario 30 años

Fisión

En una escala de 0 a 1, se le da una calificación de 0.3, esto tomando en cuenta que se requerirá de cantidades no muy significativas de acero y cobre para la fabricación de reactores de tercera generación.

Fusión

En una escala de 0 a 1, se considerará 1. Los materiales para la construcción de reactores de fusión es un tema vital. Como ya se vio, la ingeniería de los materiales es un problema aún no resuelto, para la implementación de este tipo de reactores. En especial hablando de ITER, se podría usar carbón, tungsteno o molibdeno para la primera pared del reactor. Lo anterior sumado al requerimiento de materiales superconductores, hace que el consumo de materiales no combustibles, se incremente considerablemente.

- Escenario 60 años

Fisión

Con la posible llegada de los reactores de cuarta generación, se requerirán de nuevos materiales capaces de soportar temperaturas más altas que la de los reactores actuales; sin embargo, no se prevé un aumento crítico en los materiales que se emplearán para su construcción. Se toman en cuenta materiales como acero y cobre y ciertas aleaciones. La calificación que se considera es de 0.4.

Fusión

Para el mediano plazo, probablemente se encuentre ya en operación el reactor DEMO, para el cual los retos de ingeniería serán más grandes que para ITER, los materiales seguirán siendo un tema de gran importancia, el valor de la calificación se mantiene en 1. La primera pared es un asunto

complicado en el diseño de ITER, probablemente el flujo de neutrones de las reacciones de fusión deuterio-tritio provoquen que esta pared tenga que ser cambiada recurrentemente. Esto aumenta el consumo de materiales no combustibles.

Disponibilidad

Importancia: 1.33%

Unidades: %

- Escenario 30 años

Fisión

La disponibilidad de los actuales reactores de fisión está en el orden de 85%. Uno de los retos de los reactores de tercera generación los cuales estarán operando a mediano plazo, es alcanzar una disponibilidad de 95%. Se tomará este valor, para hacer la evaluación.

Fusión

El proyecto ITER, es un proyecto que pretende recabar información necesaria para la construcción del primer reactor que generará energía eléctrica (DEMO) por lo tanto el tiempo entre disparos, no tendrán la misma importancia que en DEMO; según estimaciones alentadoras el tiempo de disparo que pretende alcanzar ITER es de 400 segundos. Después de cada disparo vendrán los análisis pertinentes, para estudiar lo ocurrido dentro del reactor. Este reactor experimental, no llegará a tener grandes factores de disponibilidad, de hecho se piensa que ITER alcanzará un factor de disponibilidad máximo de 15%.

- Escenario 60 años

Fisión

A mediano plazo los reactores de cuarta generación podrían estar presentes en la escena de la generación eléctrica mundial. Su eficiencia tanto de ciclo termodinámico, como de aprovechamiento de combustible, aumentarán considerablemente. De la misma forma, se espera que sus factores de disponibilidad crezcan. El valor de disponibilidad que se le otorgará es del 97%.

Fusión

La construcción de DEMO tiene por objetivo demostrar la viabilidad de la generación de energía eléctrica por medio de la energía nuclear de fusión. Debido a lo anterior, en este reactor, el factor de disponibilidad adquiere un significado diferente al de ITER. Con todavía mucha incertidumbre, se plantea la idea de que para lograr su cometido, DEMO deberá tener una Q aproximada de 25, disparos más duraderos y un factor de disponibilidad de 75%. En un escenario a largo plazo, DEMO estará probablemente en operación.

Costos de producción

Importancia: 12.50%

Unidades: \$/kWh

- Escenario 30 años

Fisión

Los costos de producción actuales para la energía nuclear de fisión, son de aproximadamente 47.4 \$/kWh. En el presente trabajo se estima que en unos 30 años el costo se incremente a aproximadamente 50 \$/kWh.

Fusión

En el escenario a mediano plazo, ITER estará terminando su cometido, dando lugar al nuevo proyecto DEMO. ITER no generará energía eléctrica, por lo que no se puede establecer un costo de producción por unidad de kWh generada. Sin embargo, con fines de comparación, se considerará un costo de producción del doble del correspondiente al de la fisión; es decir, de 100 \$/kWh.

- Escenario 60 años

Fisión

Una de las principales ventajas de la llegada de los reactores de generación cuarta, es que harán un uso más eficiente del combustible, como ya he mencionado. Sin embargo, no se espera una reducción en los costos de producción, debido a la alta tecnología que emplearán estos reactores. Por lo tanto el costo de producción se estima será de 50 \$/kWh.

Fusión

De acuerdo con lo visto en el Tema 4.7.1, el costo de la energía eléctrica de un reactor de fusión sería 50% mayor que para un reactor de fisión. Sin embargo, conforme avancen las investigaciones, es probable que los costos disminuyan. Conforme con este dato se considera 75 \$/kWh el costo de producción para el reactor de fusión.

Sensibilidad al incremento del precio del combustible

Importancia: 4.17%

Unidades: Factor de 0 (No sensible) a 1 (Totalmente sensible)

- Escenario 30 años

Fisión

Como ya se ha visto, las reservas de combustible son relativamente grandes, por lo que es difícil que exista una variación grande del precio del combustible. Sin embargo, en el caso de la fisión estos incrementos pudieran ser más dependientes del aspecto político-social que el que tiene que ver directamente con las reservas del combustible. Se considera un factor de 0.6.

Fusión

No se estiman grandes variaciones en el precio del combustible, debido principalmente a su abundancia y a su resistencia a la proliferación. Por lo tanto 0.3 es el factor que se considera.

- Escenario 60 años

Fisión

En este indicador en el escenario a largo plazo no se vislumbran grandes diferencias con respecto al de mediano. Sin embargo, tomando en cuenta el aumento en los años de reservas de combustible,

sumado al hecho de que los reactores de cuarta generación serán todos ellos de ciclo cerrado, se considerará un factor de 0.5.

Fusión

Misma situación que en el caso de 30 años; sin embargo, lo que podría ser distinto, es que existan más reactores de fusión en operación, lo que de alguna manera podría hacer que sea un poco más sensible la fusión a los incrementos del precio del combustible. El factor considerado es 0.4.

Madurez de la tecnología

Importancia: 7.00%

Unidades: Factor de 0 (Inmadura) a 1 (Completamente madura)

- Escenario 30 años

Fisión

La madurez de la tecnología de fisión nuclear hoy en día es sólida, pues ya se tiene en el mundo la experiencia de 50 años operando reactores de fisión. Los avances que se han presentado en cuanto a eficiencia y seguridad han sido mayúsculos en comparación con otras fuentes de energía. Los reactores de tercera generación son una muestra de lo anterior. Se estima que en treinta años la mayoría de los reactores que se encuentren en operación sean de este tipo. Por ello se considera un factor de 1 en este indicador.

Fusión

En treinta años, ITER estará saliendo de operación, habrá dejado un cúmulo de conocimiento aplicable a su sucesor DEMO, pero no se habrá alcanzado aún la generación de energía eléctrica. Por tanto se le da un factor de 0.3.

- Escenario 60 años

Fisión

Es difícil estimar cuándo entrarán en operación los reactores de IV generación, pues aún se requiere de mucha investigación y desarrollo; sin embargo, se espera que dentro de 60 años, se tenga el dominio de dicha tecnología. Para estas fechas los reactores de tercera generación estarán de salida y el dominio sobre ellos será prácticamente total. El factor que se le da es 1.

Fusión

Se estima que DEMO genere energía eléctrica; sin embargo, la $Q = 50$ que se requiere para generar energía eléctrica de manera rentable, tomando en cuenta que parte de la energía se perderá al convertir la energía de los neutrones en energía térmica, y también en convertir la energía térmica en eléctrica, estará muy lejos aún de la Q de 25 a la que pretende llegar DEMO. La madurez de la tecnología de fusión en un futuro a 60 años, se estima en un factor de 0.6.

Dependencia del exterior

Importancia: 3.00%

Unidades: Factor de 0 (Independencia) a 1 (Dependencia total)

- Escenario 30 años

Fisión

Para México en cuanto a los reactores de III generación, la dependencia del exterior es prácticamente total, no obstante, al igual que en el caso de la CNLV, el país puede tomar la responsabilidad de llevar una parte de la ingeniería de nuevas centrales nucleares. El factor considerado es de 0.8.

Fusión

Como ya se mencionó, el proyecto ITER no demostrará la viabilidad de la generación de energía eléctrica por fusión nuclear, eso será la tarea de DEMO, entonces, en 30 años no se contará aún con energía eléctrica generada por fusión. Sin embargo, aun y cuando esta tecnología no sea comercial, México está viviendo todo este proceso desde muy lejos, sin participación alguna. Esta situación nos llevará en un largo plazo, a una dependencia total del exterior. El factor aplicado es 1.

- Escenario 60 años

Fisión

La tecnología de reactores de III generación, según lo visto a mediano plazo, brindaría una cierta independencia mexicana del exterior; sin embargo, con la tendencia en el atraso del desarrollo científico y tecnológico que adolece el país, la tecnología de reactores de generación IV estaría completamente fuera de nuestras manos, al igual que los reactores de fusión nuclear. La dependencia del exterior, entonces, sería total. El factor que se considera es de 1.

Fusión

La calificación de este indicador está sustentada en el mismo argumento que la calificación correspondiente a las de fusión a 30 años y fisión en el escenario a largo plazo. El factor es 1.

En la Tabla 5.2 se hace un resumen de los valores de cada uno de los indicadores de la dimensión económica.

Tabla 5.2 Resumen de los indicadores de la Dimensión Económica

Indicador	Unidades	30 años		60 años	
		Fisión	Fusión	Fisión	Fusión
Disponibilidad de reservas de combustible	Años	400	4000	1000	8000
Consumo de material no-combustible	Factor	0.3	1	0.4	1
Disponibilidad	%	0.95	0.15	0.97	0.75
Costos de producción	\$/kWh	50	100	50	75
Sensibilidad al incremento del precio del combustible	Factor	0.6	0.3	0.5	0.4
Madurez de la tecnología	Factor	1	0.3	1	0.6
Dependencia del exterior	Factor	0.8	1	1	1

5.3.3.2 Dimensión Ambiental

Las calificaciones dadas a los indicadores de la Dimensión Ambiental se muestran a continuación:

Extensión de tierra perdida

Importancia: 5%

Unidades: m²/GWh

- Escenario 30 años

Fisión

Según datos de Hirschberg, la cantidad de tierra perdida por cada GWh generado, para la fisión es de 7, considerando que las nuevas centrales nucleares de reactores de generación tres, serán más pequeñas, se tomará una extensión de tierra perdida de 6 m²/GWh.

Fusión

La superficie de tierra de las instalaciones de ITER, supera con mucho el de una instalación nuclear de fisión, esto aunado a que ITER no generará energía eléctrica hace que este indicador tienda a infinito. En el presente trabajo se considerará una cantidad de tierra perdida muy grande, 6000 m²/GWh.

- Escenario 60 años

Fisión

La tendencia de reducción de los reactores continuará y para los de IV generación el tamaño será aún menor. Considerando esto y el valor de este indicador para mediano plazo, se tomará de 5 m²/GWh.

Fusión

Es difícil saber a ciencia cierta las características de DEMO; sin embargo, se pretende que este alcance una generación de 1000 MW, con un factor de carga del 75. Las instalaciones de este reactor, seguramente serán al igual que en el caso de ITER, de gran tamaño. Se considera en el presente trabajo una extensión de tierra perdida 10 veces mayor que la correspondiente de fisión. 50 m²/GWh.

Niveles de radiación en la región vecina

Importancia: 10%

Unidades: Factor de 0 (Nula radiación en la región vecina) a 1 (Intensa radiación en la región vecina)

- Escenario 30 años

Fisión

Las nucleoelectricas actuales, tienen rigurosos estándares de seguridad radiológica. Sin embargo, en la región vecina, puede existir cierto nivel de radiación. Comparado con la fusión este nivel será más alto, por lo que sí es un indicador crítico en el análisis de sustentabilidad. Se le asignará un valor de 0.7.

Fusión

Como ya se mencionó, la fusión nuclear no produce radiaciones ionizantes; sin embargo, y en particular, cuando ITER trabaje con combustible deuterio tritio, se producirá un alto flujo de neutrones que pueden activar las paredes del reactor. ITER producirá su primer plasma hasta el 2016, y seguramente éste, no estará compuesto por una mezcla deuterio-tritio, sino por deuterio-deuterio, esto con la finalidad de evitar las grandes cantidades de neutrones. Además ITER también contará con sistemas de blindaje biológico, con ello se asegura que los niveles de radiación en la región vecina sean bajos; se le asignará un valor de 0.2.

- Escenario 60 años

Fisión

Los reactores de IV generación tendrán sistemas de seguridad y barreras cada vez más confiables. Sin embargo, seguirán existiendo radiaciones gamma que escapen de ellas. El valor asignado a este indicador es de 0.6.

Fusión

Se espera que en el largo plazo se encuentre en operación DEMO, reactor que trabajará con una mezcla de deuterio-tritio que generará grandes flujos de neutrones que pueden activar ciertos materiales. Se requiere aún de más investigación en el campo de materiales, para evitar estas activaciones en los materiales que serán parte del reactor y de la instalación en la que se encuentra. Dentro de 60 años, se estima que la investigación habrá alcanzado un nivel maduro en cuanto a la ingeniería de materiales, pero también con DEMO se espera un factor de carga de 75% de operación, pulsos más largos y mayor potencia, con todo ello también mayor producción de neutrones. Se le asignará un valor de 0.2.

Desechos radiactivos de alta y mediana actividad

Importancia: 11.67%

Sería conveniente tener un indicador que mida el costo por kWh por concepto del manejo y disposición de los desechos radiactivos, a falta de éste se maneja un factor cualitativo.

Unidades: Factor 0 (Sin desechos radiactivos) a 1 (Gran cantidad de desechos radiactivos)

- Escenario 30 años

Fisión

El proceso de generación de energía eléctrica utilizando energía nuclear de fisión, genera una gran cantidad de desechos radiactivos de alta y mediana actividad. Se encuentran en estudio diversos mecanismos para reducir la actividad del material gastado. Dentro de treinta años, el panorama no parece será muy diferente, por lo que el factor que se asigna a este indicador es de 1.

Fusión

De acuerdo con lo señalado en el indicador de niveles de radiación en la región vecina, no se espera que existan plasmas compuestos por deuterio-tritio en ITER hasta más allá del 2016. Se está realizando un estudio profundo para la selección de materiales que formarán al ITER, uno de los principales requisitos es que dichos materiales sean de baja activación. Cumpliendo con este aspecto nos queda por analizar al tritio, el cual se producirá en el propio reactor, pero cuya vida media es de 12.36 años y que decae con partículas beta de baja energía. Por ello el factor que se le asigna a este indicador es de 0.2.

- Escenario 60 años

Fisión

Dentro de 60 años se espera que los mecanismos para reducir la actividad del material gastado se encuentren en operación, además del uso más eficiente de los combustibles por parte de los nuevos reactores pueden hacer que disminuya en cierto grado el tema de los desechos radiactivos. El valor que se le da a este indicador es de 0.9.

Fusión

Si bien es cierto de que DEMO tentativamente tendrá tiempos de disparo más largos que ITER, factores de disponibilidad mayores que su predecesor y una mayor potencia, lo cual generará un mayor flujo de neutrones que pueden activar las estructuras, se espera que la ingeniería de materiales logre dar una solución viable a este tema. El factor que se le asigna a este indicador es 0.1.

Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos

Importancia: 6.67%

Unidades: Factor de 0 (Nulo riesgo) a 1 (Alto riesgo)

- Escenario 30 años

Fisión

El tema de la seguridad en las plantas nucleoelectricas actuales ha tenido un avance vertiginoso, de tal modo que es prácticamente imposible que se presente un accidente como el ocurrido en Chernobil. El estudio y desarrollo en esta área continúa su crecimiento, por lo que en treinta años se tendrán mejoras muy significativas. Por otro lado el control que se tiene sobre las dosis de radiación permitidas en el personal que labora en las instalaciones, también contribuye con la reducción de este indicador. El valor asignado es 0.4.

Fusión

La fusión nuclear, a diferencia de la fisión, no tiene riesgo de sufrir algún accidente como el de Chernobil, ya que cualquier posible falla en el sistema ocasionaría que el plasma se enfriara y por ende se apagara el reactor. No obstante, la tecnología para el aspecto de seguridad que se empleará en ITER será de primer nivel y no se descuidará en momento alguno. El principal problema sigue siendo la activación de los materiales del reactor, por lo que el tema de los materiales adquiere de nuevo un significado importante. Las dosis que recibirían los trabajadores en el lugar del reactor, serían controladas y en gran parte se contará con sistemas automatizados, al menos en las tareas en las que se involucre más la salud de los trabajadores. El valor que se le otorga a este indicador para mediano plazo es 0.1.

- Escenario 60 años

Fisión

Es evidente que con las mejoras y el progreso en materia de seguridad para las plantas nucleoelectricas, se reducirá aún más el riesgo de accidentes que pudieran poner en peligro la vida de seres humanos. Se asigna un valor de 0.3.

Fusión

Dentro de 60 años la investigación en materiales, se espera, haya aportado resultados en lo referente a materiales de baja activación, reduciendo el riesgo radiológico de los reactores de fusión. Por otra parte, se espera una casi nula intervención del hombre en la operación de estos reactores, gracias a los sistemas de automatización. El valor del indicador es de 0.1.

En la Tabla 5.3 se hace un resumen de los valores de cada uno de los indicadores de la dimensión ambiental.

Tabla 5.3 Resumen de los indicadores de la Dimensión Ambiental

Indicador	Unidades	30 años		60 años	
		Fisión	Fusión	Fisión	Fusión
Extensión de tierra perdida	m ² /GWh	6	6000	5	50
Niveles de radiación en la región vecina	Factor	0.7	0.2	0.6	0.2
Desechos radiactivos de alta y mediana actividad	Factor	1	0.2	0.9	0.1
Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos	Factor	0.4	0.1	0.3	0.1

5.3.3.3 Dimensión Social

Y finalmente las calificaciones de los indicadores de la Dimensión Social:

Máximo número creíble de muertes por accidente

Importancia: 5.00%

Unidades: Número de muertes

- Escenario 30 años

Fisión

Hoy en día el máximo número de muertes por accidente para la fisión (Hirsberg) es de 50,000. La seguridad nuclear es, como ya se mencionó, una de las áreas con mayor desarrollo de la industria nuclear. Serán necesarias campañas de información a la sociedad, sobre estos avances. Se le dará un valor de 25,000 para el escenario de mediano plazo, considerando que las campañas informativas tendrán efecto sobre la sociedad.

Fusión

Uno de los grandes retos de la fusión nuclear, es el de cambiar de manera radical la imagen que tiene la energía nuclear ante la sociedad. La energía nuclear se promueve como una energía limpia, libre de emisiones de gases de efecto invernadero, libre de emisión de radiaciones peligrosas, libre de productos derivados peligrosos, el único producto derivado de la fusión es el helio, con baja posibilidad de proliferación e inherentemente segura. Estas características hacen que la fusión

nuclear sea en general bien vista por la sociedad. El número máximo de muertes por accidente para la fusión en este trabajo será de 1,000.

- Escenario 60 años

Fisión

De acuerdo con lo mencionado para el mediano plazo, además considerando que los reactores de generación IV serán aún mucho más seguros que los de tercera y sumado al incremento de reactores en el mundo y por tanto de la aportación de la energía nuclear en la generación de energía eléctrica, se esperan campañas que acerque más a la sociedad a conocer del tema y que la opinión pública cambie la imagen que tiene de la energía nuclear. En este sentido la fusión nuclear contribuirá de manera significativa. El valor que se le otorga es de 5,000.

Fusión

Este escenario no cambia mucho respecto al de mediano plazo. En general se puede decir que la humanidad en conjunto espera la llegada de los primeros reactores de fusión nuclear comerciales, con ansiedad, debido a la preocupación que generan los combustibles fósiles, en cuanto a temas como su agotamiento y contaminación. En 60 años es probable que DEMO se encuentre funcionando y probablemente la opinión de la sociedad no haya cambiado mucho respecto a la actual. El número máximo de muertes por accidente para la fusión en este trabajo será de 100.

Tiempo necesario de confinamiento

Importancia: 8.33%

Unidades: Años

- Escenario 30 años

Fisión

Uno de los temas que más recurrentemente afectan a la energía nuclear en la forma en como la concibe la sociedad, es en lo referente a los productos derivados de la fisión. Es también uno de los aspectos que los grupos ambientalistas más han utilizado como argumento en contra de esta fuente de energía. La fisión nuclear tiene mucho que trabajar en este sentido; pues aun cuando el manejo de los productos de fisión es llevado a cabo con riguroso cuidado y que ya se encuentran en estudio sistemas que reduzcan la actividad de los productos derivados, la opinión de la gente sigue siendo desfavorable. El valor asignado a este indicador para el mediano plazo es de 1,000,000 de años.

Fusión

Una situación completamente distinta es la que sucede con la fusión nuclear, pues como ya se vio, como producto de fusión sólo se tendrá helio. Sin embargo, el combustible para la fusión es tritio, que tiene una vida media muy corta y actividad baja. La situación es diferente con los componentes del reactor, pues éstos se pueden activar con los grandes flujos neutrónicos generados en la fusión. Es importante que se avance en esta materia y se seleccionen materiales de baja activación para evitar materiales activados que tengan que ser confinados durante muchos años. Uno de los objetivos de ITER es precisamente éste. El valor para este indicador es de 20,000 años.

- Escenario 60 años

Fisión

Se espera que en 60 años, nuevas técnicas para el confinamiento y reducción de la actividad de los productos de fisión se encuentren disponibles, además de las que actualmente se encuentran en estudio. Considero que se logrará al menos una reducción de la mitad del tiempo que actualmente se emplea; es decir, el tiempo necesario de confinamiento en 60 años para la fusión será de 500,000 años.

Fusión

Los flujos de neutrones que se generarán en DEMO serán mucho mayores que los previstos para ITER, es por ello que el riesgo de activación de los elementos del reactor es mayor. Seguramente los avances en ingeniería de materiales para la construcción de reactores de fusión se encontrarán muy adelantados y habrá forma de evitar esta complicación. El valor que se le da a este indicador es de 10,000 años.

Posibilidad relativa a la proliferación

Importancia: 6.67%

Unidades: Factor de 0 (Sin posibilidad) a 1 (Alta posibilidad)

- Escenario 30 años

Fisión

La llegada de los reactores de generación IV, también traerá consigo la reducción de la posibilidad de proliferación. Sin embargo, en los reactores de cría, se podrán seguir generando elementos utilizables en armamento nuclear. El valor que se le da al indicador es de 0.7.

Fusión

En este sentido la fusión no tiene mayor complicación. Con ITER, la fusión no será propensa a la proliferación, pues el único material que se puede utilizar en armamento nuclear es el tritio, el cual será producido en el reactor y ahí mismo consumido. El valor que se le da es de 0.2. Se pueden considerar como aspectos que pueden ser utilizados en el campo militar; el estudio de las bobinas superconductoras y del láser. Sin embargo, es muy difícil de evaluar en qué medida los avances en estas áreas contribuyen con la industria militar.

- Escenario 60 años

Fisión

En el escenario a largo plazo, los reactores de generación IV, serán los que dominen la mayor parte de la escena mundial. Estos reactores hacen un uso más eficiente del combustible, pues todos son de ciclo cerrado. De esta forma se reduce el riesgo de proliferación, el valor del indicador es de 0.4.

Fusión

Un cuanto tanto diferente es la situación para el largo plazo en cuanto a la fusión nuclear. Si se considera para este indicador a la fusión nuclear, puramente como reactores de fusión, la situación es similar a la de mediano plazo. El tritio es entonces el único material que pueda tener una aplicación militar. Pero si consideramos reactores híbridos, en los que trabaje conjuntamente fusión y fisión, se pueden producir elementos de uso militar en uniforma similar a la de los reactores de cría, pero con flujos de neutrones mucho más grandes. Entonces, la posibilidad de proliferación

aumenta considerablemente. En este trabajo no se tomará este aspecto, y sólo se comenta como una posibilidad. Para dar valor a este indicador, se considerará al reactor como puramente de fusión. El valor del indicador es de 0.2.

Oportunidades de empleo

Importancia: 5.00%

Unidades: Factor de 0 (Nula posibilidad de empleo) a 1 (Alta posibilidad de empleo)

- Escenario 30 años

Fisión

Como ya se indicó en los capítulos anteriores, se espera en un futuro a mediano plazo, un auge de la energía nuclear como fuente de energía. Los reactores de generación III y III plus estarán saliendo de operación para ceder su lugar a nuevos reactores con mayor tecnología y eficiencia. Se espera la creación de nuevas centrales en muchas partes del mundo. Lo anterior aunado a los centros y laboratorios científicos que alrededor del mundo realizarán nuevas investigaciones y desarrollos de ingeniería. Todo esto generará una gran cantidad de oportunidades de empleo alrededor del mundo. Por ello la calificación de este indicador es 1.00.

Fusión

ITER brindará una gran cantidad de empleos, el proyecto es el más ambicioso en la historia de la humanidad y por ello requiere la colaboración de muchas de las áreas del conocimiento humano. Muchos laboratorios alrededor mundo harán sus aportaciones en al proyecto, mientras que otra fuerte cantidad de recursos humanos se encontrará laborando en el sitio. El factor es de 0.7.

- Escenario 60 años

Fisión

Con las carencias de los combustibles fósiles, el auge de la energía estará en cierta forma garantizado, pues la ingeniería nuclear es la única que ha mantenido en desarrollo constante, además de ser la única con la capacidad para ocupar la posición de los combustibles fósiles. Las oportunidades de empleo seguirán garantizadas para un escenario a largo plazo. Valor del factor 1.00.

Fusión

Con el éxito ITER llegaría al menos un nuevo proyecto más ambicioso que éste; DEMO. Con nuevos proyectos en puerta, mucha más investigación y gente laborando en el área de la fusión. Por ello se requerirá de muchos más recursos humanos, que afronten el reto que seguirá representando a largo plazo, la generación de energía eléctrica con la energía nuclear de fusión. El valor del factor es 1.00.

Mortalidad (Reducción de la esperanza de vida)

Importancia: 6.67%

Unidades: Factor de 0 (Sin repercusiones) a 1 (Muchas repercusiones)

- Escenario 30 años

Fisión

Dentro de 30 años se encontrarán en operación en su mayoría reactores de generación III y empezarán a entrar en operación reactores de generación IV. Sin embargo, la fisión seguirá produciendo desechos altamente radiactivos y con vidas medias de muchos años. Es necesario encontrar nuevas técnicas que reduzcan la actividad de esos productos de fisión. El factor que se considera para este escenario es de 0.4.

Fusión

Los niveles radiactivos de los materiales que constituyan ITER, dependerán del avance que se pueda lograr en la ingeniería de los materiales. El riesgo de los trabajadores de ITER de recibir altas dosis será minimizado con el apoyo de los sistemas de automatización. Por otro lado en cuanto al combustible, el tritio tiene un nivel de actividad bajo y su vida media es de aproximadamente 12 años. Las probabilidades de accidente son muy bajas, por lo que el factor de este escenario es de 0.1.

- Escenario 60 años

Fisión

La radiación en las regiones vecinas y el confinamiento del material gastado, son los principales problemas en materia de salud que enfrenta la fisión. Sin embargo, como ya se dijo, se encuentran en estudio nuevas maneras de reducir la actividad del material gastado y con ello se habrá dado un gran paso en cuanto a los inconvenientes de los productos de fisión. Nuevas legislaciones se aprobarán en lo referente al confinamiento manteniéndose el extremo cuidado que se tiene en el manejo de estos materiales. Mucho ayudará la operación de los reactores de cuarta generación. El valor de este factor para este indicador es de 0.2. Por otra parte los sistemas de automatización evitarán que mucha gente tenga que operar en la central, reduciendo así el riesgo sobre los humanos

Fusión

Para los reactores de fusión el inconveniente será que los materiales que constituyen el reactor se puedan activar. Encontrando los materiales adecuados, los niveles de radiación serán bajos. La seguridad en este tipo de reactores estará asegurada y los sistemas de automatización evitarán que mucha gente tenga que operar en la central, reduciendo así el riesgo sobre los humanos. El valor que se le da a este indicador es de 0.0.

Ruido y contaminación visual

Importancia: 1.67%

Unidades: Factor de 0 (Nada) a 1 (Mucho)

- Escenario 30 años

Fisión

En cuanto al ruido no se tiene mayor complicación para el caso de la fisión; sin embargo, una gran parte de la sociedad asocia las torres de enfriamiento, que en ciertos casos son empleadas en las instalaciones de una central nuclear, con el peligro. Esta puede ser una forma de contaminación visual. Se considerará un valor de 0.6.

Fusión

El proyecto ITER ocupará una gran extensión de superficie, lo que de cierta forma se puede considerar como contaminación visual. Por otro lado los grandes campos magnéticos que se generarán por el campo poloidal pudieran causar algún ruido de radiofrecuencia en la zona vecina. Este aspecto y otros sólo podrán ser comprobados hasta que ITER se encuentre en operación. El valor del indicador es de 0.4.

- Escenario 60 años

Fisión

El valor cambia a 0.3. Habría que considerar que la opinión de la sociedad para este momento, puede ser distinta y con ella también la percepción que causa en la cercanía una instalación nuclear.

Fusión

Se espera que con el avance en la investigación de la fusión, la reducción de los tamaños de las instalaciones se reduzca significativamente. Es difícil saber si DEMO seguirá esta idea, pues DEMO será también un prototipo, que requerirá de un gran complejo a su alrededor. Los reactores posteriores a DEMO, seguramente lograrán la reducción del espacio, y con ello la contaminación visual que genera una instalación de enorme tamaño. El valor de este indicador es 0.2.

En la Tabla 5.4 se hace un resumen de los valores de cada uno de los indicadores de la dimensión social.

Tabla 5.4 Resumen de los indicadores de la Dimensión Social

Indicador	Unidades	30 años		60 años	
		Fisión	Fusión	Fisión	Fusión
Máximo número creíble de muertes por accidente	Muertes/accidente	25000	1000	5000	100
Tiempo necesario de confinamiento	Miles de años	1000	20	500	10
Posibilidad relativa a la proliferación	Factor	0.7	0.2	0.4	0.2
Oportunidades de empleo	Factor	1	0.7	1	1
Mortalidad (Reducción de la esperanza de vida)	Factor	0.4	0.1	0.2	0
Ruido y contaminación visual	Factor	0.6	0.4	0.3	0.2

5.3.4 Método de análisis de decisión

Para la evaluación de los indicadores se empleará Lógica Difusa. Para llegar a los resultados empleando esta técnica se utilizará la herramienta "Fuzzy Logic Toolbox" de MATLAB versión 6.5. A continuación se hace una pequeña introducción a la lógica difusa y a la herramienta de MATLAB que se empleará.

La lógica difusa es un lenguaje que permite trasladar sentencias sofisticadas del lenguaje natural a un lenguaje matemático formal, produciendo resultados exactos a partir de datos imprecisos. En general la lógica difusa se aplica tanto a sistemas de control, aplicaciones electrónicas y computacionales, como para modelar cualquier sistema continuo de ingeniería, física, biología o economía. Por lo tanto, la lógica difusa puede ser utilizada en el proceso de toma de decisiones como método de análisis multicriterio.

Desde el punto de vista tecnológico, la lógica difusa (también llamada lógica borrosa o fuzzy logic) es una rama de la inteligencia artificial que se funda en el concepto "todo es cuestión de grado", lo cual permite manejar información vaga o de difícil especificación si quisiéramos hacer cambiar con esta información el funcionamiento o el estado de un sistema específico. Con lógica difusa, las proposiciones pueden ser representadas con grados de veracidad o falsedad. Por ejemplo, la sentencia "hoy es un día soleado", puede ser 100% verdad si no hay nubes, 80% verdad si hay pocas nubes, 50% verdad si existe neblina y 0% verdad si llueve todo el día. La lógica difusa, es esencialmente una lógica multivaluada.

5.3.5 Fundamentos de Lógica Difusa ¹¹⁹

El adjetivo "difuso" aplicado a este tipo de lógica, se debe a que los valores de verdad no deterministas utilizados tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. Un vaso medio lleno, independientemente de que también esté medio vacío, no está lleno completamente ni está vacío completamente. Qué tan lleno puede estar es un elemento de incertidumbre; es decir, de difusidad, entendida esta última como una propiedad de indeterminismo. Ahora bien, los valores de verdad asumidos por enunciados aunque no son deterministas, no necesariamente son desconocidos. Por otra parte, desde un punto de vista optimista, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad a los enunciados que los clásicos "falso" o "verdadero" de la lógica tradicional.

La lógica difusa actualmente está relacionada y fundamentada en la teoría de los conjuntos difusos y en un sistema de inferencia difuso basado en una regla difusa o heurística (que siempre convierte un conjunto difuso en otro) de la forma:

"Si <condición> Entonces <consecuencia>"

donde los valores lingüísticos de la condición y de la consecuencia están definidos por conjuntos difusos.

Según esta teoría, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto va a venir determinado por una función de pertenencia que puede tomar todos los valores reales comprendidos en el intervalo $[0,1]$.

Debido a que la lógica tradicional de las computadoras opera con ecuaciones muy precisas y dos respuestas: sí y no o uno y cero, para las aplicaciones muy mal definidas o sistemas vagos, la lógica difusa puede formular matemáticamente nociones indefinidas (expresiones humanas vagas) como "un poco caliente" o "muy frío", por medio de reglas de "sentido común", logrando de esta manera,

¹¹⁹ L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets". Information and Control (1965). Pag. 8, 338-353.

aplicar la forma de pensar humana a la programación de las computadoras. La lógica difusa provee una disciplina que puede construir mejores modelos de la realidad debido a que algunos conceptos pueden ser mejor definidos en términos de palabras, que por matemáticas.

Se ha considerado de manera general que la lógica difusa, que hoy en día se encuentra en constante evolución, se inició en 1965 en la Universidad de California, en Berkeley por Lofti A. Zadeh, como la lógica de razonamiento aproximado. Zadeh inventó la lógica difusa guiado por el principio de que las matemáticas pueden ser usadas para encadenar el lenguaje con la inteligencia humana, además por medio de la lógica difusa combinó los conceptos de la lógica tradicional y de los conjuntos de Lukasiewicz¹²⁰ mediante la definición de grados de pertenencia.

5.3.5.1 Variables y etiquetas lingüísticas

La teoría de conjuntos difusos puede utilizarse para representar expresiones lingüísticas que se utilizan para describir conjuntos o algoritmos. Los conjuntos difusos son capaces de captar por sí mismos la vaguedad lingüística de palabras y frases comúnmente aceptadas. La habilidad humana de comunicarse mediante definiciones vagas o inciertas es un atributo importante de la inteligencia.

Una variable lingüística es aquella variable cuyos valores son palabras o sentencias que van a enmarcarse en un lenguaje predeterminado (natural o artificial) Para estas variables lingüísticas se utilizará un nombre y un valor lingüístico sobre un universo de discurso, en el cual se distribuirán los conjuntos difusos, ya que es el rango de interés de la aplicación bajo análisis. Además, podrán dar lugar a sentencias generadas por reglas sintácticas, a las que se les podrá dar un significado mediante distintas reglas semánticas. Una variable lingüística siempre representa un espacio difuso. Por ejemplo, "calidad" es una variable lingüística si sus valores son "bueno", "malo", "muy malo", etc. Normalmente los valores de una variable lingüística pueden ser generados a partir de un término primario (por ejemplo bueno) de su antónimo (malo) de un conjunto de modificaciones (no, muy, más o menos, bastante, etc.) y de los elementos de conexión (y, o)

La idea básica sugerida por Zadeh es que una etiqueta lingüística tal como "muy", "más o menos", "ligeramente", etc. puede considerarse como un operador que actúa sobre un conjunto difuso asociado al significado de su operando. Retomando nuestro ejemplo, para el término compuesto "muy malo", el operador "muy" actúa en el conjunto difuso asociado al significado del operando "malo". Una representación aproximada para una etiqueta lingüística se puede lograr en términos de combinaciones o composiciones de las operaciones básicas (que se explicarán más adelante) Zadeh también considera que las etiquetas lingüísticas pueden clasificarse en dos categorías que informalmente se definen como sigue:

Tipo I: las que pueden representarse como operadores que actúan en un conjunto difuso: "muy", "más o menos", "mucho", "ligeramente", "altamente", "bastante", etc. y,

Tipo II: las que requieren una descripción de cómo actúan en los componentes del conjunto difuso (operando): "esencialmente", "técnicamente", "estrictamente", "prácticamente", "virtualmente", etc.

¹²⁰ Cuando el filósofo Jan Lukasiewicz asoció a los conjuntos un posible grado de pertenencia con valores de 0 y 1 y extendió esa idea a un número infinito de valores entre 0 y 1, logró desarrollar la primera lógica de vaguedades en 1920.

5.3.5.2 Conjuntos difusos

La mayoría de los fenómenos que encontramos cada día son imprecisos; es decir, tienen implícito un cierto grado de difusidad en la descripción de su naturaleza. Esta imprecisión puede estar asociada con su forma, posición, momento, color, textura, o incluso en la semántica que describe lo que son. En muchos casos el mismo concepto puede tener diferentes grados de imprecisión en diferentes contextos o tiempo. Un día cálido en invierno no es exactamente lo mismo que un día cálido en verano. Este tipo de imprecisión o difusidad asociado continuamente a los fenómenos es común en todos los campos de estudio: sociología, física, biología, finanzas, ingeniería, oceanografía, psicología, etc.

Los elementos de un conjunto difuso son pares ordenados que indican el valor del elemento y su grado de pertenencia. El grado de pertenencia es complementario, ya que, mientras un elemento pertenece a un conjunto pertenece menos al otro.

Para un conjunto difuso $A = \{(x, m_A(x)) / x \in X\}$, se tiene que el elemento x pertenece al conjunto A con un grado de pertenencia $m_A(x)$ (también llamado función de pertenencia de x en A) que puede variar entre 0 y 1. La función de pertenencia transforma cada elemento de x a un valor de pertenencia (valor difuso) proporcionando el grado de pertenencia que cada valor o dato tiene en el universo de discurso.

Por lo tanto, una variable puede ser caracterizada por diferentes valores lingüísticos, cada uno de los cuales representa un conjunto difuso.

Por ejemplo, la temperatura del agua en una alberca puede ser caracterizada por valores lingüísticos como "Fría" (que representa una temperatura de 0 °C a 20 °C) "Tibia" (para una temperatura de 10 °C a 30 °C) y "Caliente" (para una temperatura de 20 °C a 40 °C) Estos términos se asocian a conjuntos difusos con funciones de pertenencia como las mostradas en la siguiente Figura 5.2.

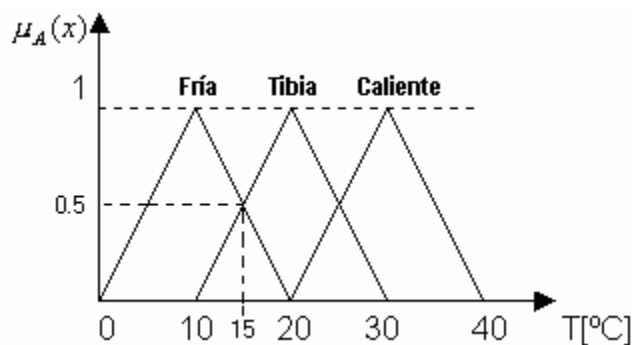


Figura 5.2 Representación de conjuntos difusos de entrada

Por lo tanto, si la temperatura es 15 °C, existen grados de pertenencia 0.5, 0.5 y 0 a los conjuntos difusos "Fría", "Tibia" y "Caliente" respectivamente.

En la Figura 5.2, se observa que cuando nos acercamos a 10, 20 y 30 °C, el grado de pertenencia tiende a ser uno y cuando nos alejamos de estos valores el grado de pertenencia decrece de manera gradual hasta el valor de pertenencia nulo; es decir, cero.

Una de las características de los conjuntos difusos es que no cumplen con dos leyes fundamentales de la teoría clásica de conjuntos: la propiedad de la ley del medio excluido y la ley de la contradicción.

Ley del medio excluido y de la contradicción para conjuntos difusos

Asumiendo que el conjunto difuso A es un subconjunto del universo de discurso X.

- I. $A \cup \bar{A} \neq X$. Ley del medio excluido
- II. $A \cap \bar{A} \neq \emptyset$. Ley de la contradicción

A partir de los dos puntos anteriores nos damos cuenta que los valores de un determinado conjunto difuso A pertenecen en cierto grado a su contrario \bar{A} .

Las partes que conforman un conjunto difuso se muestran en la Figura 5.3.

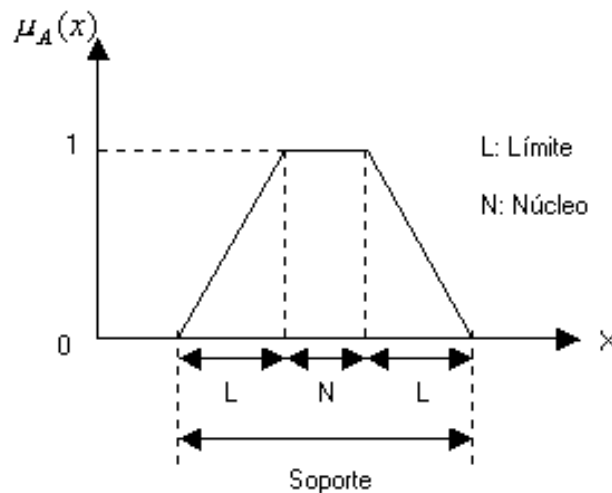


Figura 5.3 Partes que conforman un sistema difuso

- Núcleo: este elemento de la función de pertenencia tiene una región donde el grado de pertenencia es total; es decir:

$$N = \{x / \mu_A(x) = 1\}$$

- Soporte: esta región enmarca todos los elementos que tienen un grado de pertenencia mayor a cero; es decir:

$$S = \{x / 0 < m_A(x) \leq 1\}$$

- Límites: aquí se tienen los elementos con grado de pertenencia menor al total, pero no dejan de tener un cierto grado mayor a cero; es decir:

$$L = \{x / 0 < m_A(x) < 1\}$$

5.3.5.3 Operadores Básicos de Lógica Difusa

El álgebra de los conjuntos difusos es similar a la de los conjuntos crisp¹²¹, ya que comparten muchas de sus respectivas propiedades como son las condiciones de asociatividad, conmutatividad, elementos neutros, absorción, distributividad, complemento y las leyes de Morgan, exceptuando las dos leyes mencionadas anteriormente.

Los operadores lógicos que se utilizan en lógica difusa (AND, OR y NOT) para poder trabajar con conjuntos difusos, se definen utilizando tablas de verdad, mediante un "principio de extensión" por el cual, gran parte del aparato matemático clásico existente puede ser adaptado a la manipulación de los conjuntos difusos y, por tanto, a la de las variables lingüísticas.

Para describir los operadores de unión, intersección y complemento se consideran dos conjuntos difusos A y B en el universo X, con funciones de pertenencia m_A y m_B respectivamente, a partir de los cuales se define lo siguiente:

UNIÓN: el operador unión puede visualizarse mediante una tabla binaria, ya que la unión es semejante al operador "OR" como se muestra en la Tabla 5.5, en donde, el mayor de los valores es uno, por lo tanto, el resultado de la unión de dos conjuntos serán los elementos con mayor valor de pertenencia y su representación es la siguiente:

$$m_{A \cup B} = \max\{m_A(x), m_B(x)\}$$

Tabla 5.5 Tabla de verdad del operador OR

A	B	C = A ∪ B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

INTERSECCIÓN: al igual que para el operador unión, la intersección también puede interpretarse mediante una tabla binaria (tabla de verdad) ya que la intersección es semejante al operador "AND". A partir de la Tabla 5.6, se deduce que el resultado de la intersección de dos conjuntos serán los elementos con menor grado de pertenencia y su representación es la siguiente:

$$m_{A \cap B} = \min\{m_A(x), m_B(x)\}$$

¹²¹ Se refiere a valores aristotélicos; es decir, los valores que se utilizan en la lógica clásica.

Tabla 5.6 Tabla de verdad del operador AND

A	B	$C = A \cap B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

COMPLEMENTO: si se tiene un determinado valor difuso, por ejemplo 0.15, el complemento será lo que falte para un valor de uno; es decir, para este caso el valor del complemento será de 0.85. La operación complemento es semejante al operador "NOT" (ver Tabla 5.7) y su representación es la siguiente:

$$\bar{A} = m_{\bar{A}}(x) = 1 - m_A(x), \quad \text{donde} \quad A = \{x_i / 0 \leq m(x_i) \leq 1\}$$

Tabla 5.7 Tabla de verdad del operador NOT

A	$\bar{A} = 1 - A$
0	1
1	0

A partir de estos operadores (unión, intersección y complemento) y de sus propiedades, pueden realizarse prácticamente todas las operaciones entre conjuntos difusos.

Dado que los conjuntos difusos no se particionan en el mismo sentido que los conjuntos crisp, estas operaciones son aplicadas al nivel de pertenencia, como una consecuencia de los conjuntos difusos. En la Figura 5.4 se puede distinguir cómo actúan los operadores antes mencionados sobre valores crisp (binarios) y difusos.

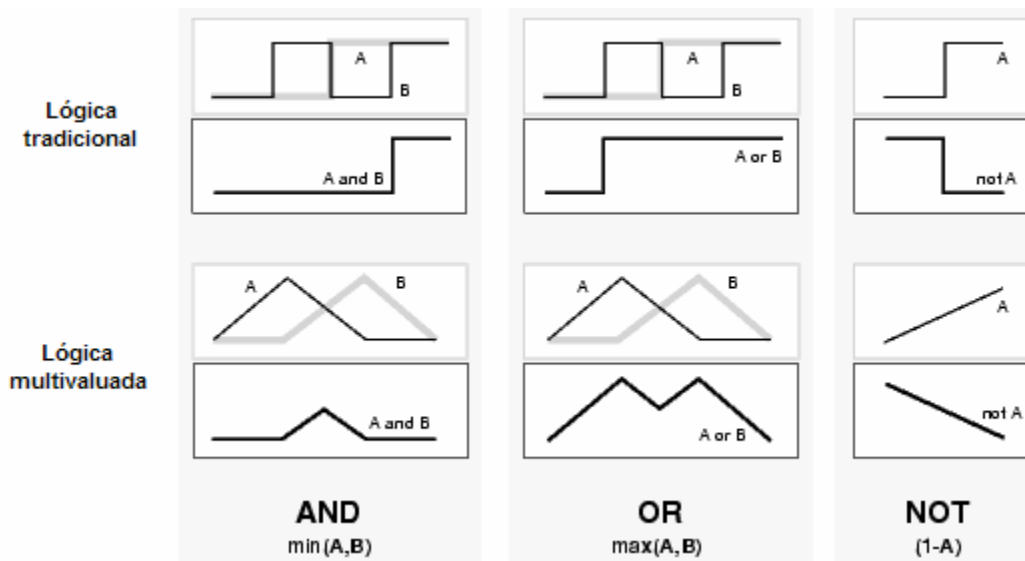


Figura 5.4 Comportamiento de los operadores sobre valores crisp y valores difusos

5.3.5.4 Sistema de Control Difuso

Para aplicar la lógica difusa a la solución de un problema, es necesario construir un sistema de control difuso, el cual se compone de tres etapas: Difusión o Fusificación, Proceso Difuso y Defusificación, las cuales se describen a continuación.

Difusión

Esta etapa transforma los valores crisp de las variables de entrada que describen el comportamiento del sistema en análisis a valores difusos. Para lograr la transformación se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia. Durante el proceso de fusificación se asocia un grado de pertenencia a cada función de pertenencia, comprendido en el rango de [0,1].

Para llevar a cabo el proceso de fusificación se tienen diferentes métodos, cuya función es dar el valor de pertenencia de la variable a los diferentes conjuntos difusos. Estos métodos pueden ser: intuición, inferencia, ordenación por rango, conjuntos difusos, redes neuronales, algoritmos genéticos y razonamiento inductivo.

Proceso Difuso

Esta etapa se divide en:

Base de Conocimiento

Contiene toda la información del sistema a controlar y de las funciones de pertenencia de entrada y salida. También cuenta con la estructura de las reglas difusas mediante las cuales se puede determinar el alcance del control y la estrategia a utilizar para controlar dicho sistema.

Lógica de decisión (Inferencia)

En esta etapa se desarrollan y construyen las reglas lingüísticas de control, conocidas como reglas de Inferencia, las cuales utilizan la lógica de implicación difusa para poder simular el pensamiento humano. Con los valores difusos se evalúan las reglas que son las que determinan el comportamiento del sistema. La lógica de implicación consiste en una formulación de conexión entre causa y efecto; es decir, de condición y consecuencia.

En la lógica difusa existen diversas maneras de definir la implicación; sin embargo, los métodos de implicación difuso que se utilizan comúnmente por su simplicidad y eficiencia computacional son: mínimo de Mamdani y producto de Larsen.

Con el operador de Mamdani, se genera un valor difuso resultado de recortar la conclusión por el máximo de la intersección entre el antecedente y el valor de entrada (ver Figura 5.5):

$$C = m_A(x) \cap m_B(y) = m_{A \cap B} = \min\{m_A(x), m_B(x)\}$$

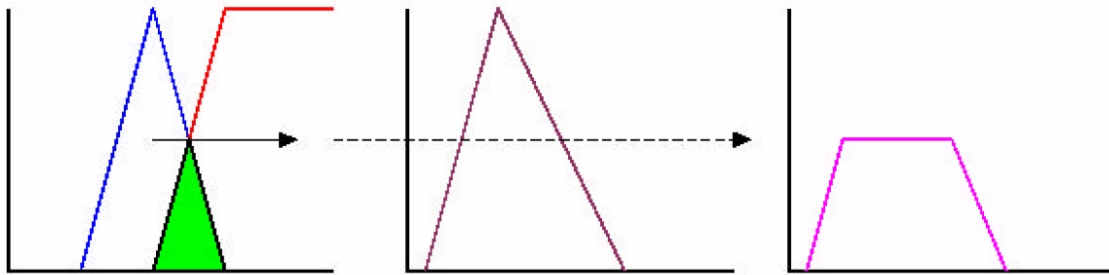


Figura 5.5 Método de Implicación de Mamdani

Con el operador de Larsen, el resultado es parecido, pero la salida no se recorta, sino que se escala al factor del máximo de la intersección (Ver Figura 5.6):

$$C = m_A(x) \bullet m_B(y)$$

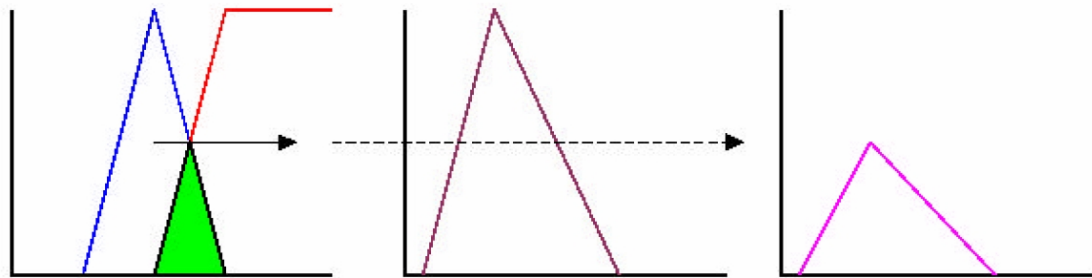


Figura 5.6 Método de Implicación de Larsen

Cuando cada regla ha sido activada por tener su propia función de pertenencia, el resultado obtenido es una serie de funciones de pertenencia (salidas difusas) Posteriormente se utiliza la agregación, la cual se encarga de combinar las salidas difusas de cada regla para obtener una sola salida final.

Cuando utilizamos el método de implicación difuso mínimo de Mamdani, el resultado obtenido de cada regla será la relación que tienen los conjuntos difusos de entrada después de aplicar el operador "mín" y la agregación de conjuntos difusos de salida se obtendrá al aplicar el operador "máx"; es decir la unión de funciones de salida.

Al utilizar el método de implicación difuso producto de Larsen, la relación de los conjuntos difusos de entrada se obtendrá mediante el operador producto y la agregación de conjuntos difusos de salida se obtendrá al aplicar el operador "máx"; es decir la unión de funciones de salida.

La implicación difusa tiene la siguiente estructura:

IF m_1 is A THEN y is B

o, como se menciona anteriormente:

"Si <condición> Entonces <consecuencia>"

Si m_1 es A y m_2 es B entonces y es C

Donde A, B y C son los conjuntos difusos de las variables de entrada " m_1 " y " m_2 ", y de la variable de salida "y" respectivamente y (AND) es uno de los operadores lógicos difusos que pueden ser utilizados.

La primera parte de la regla (Si) se denomina antecedente y contiene una o varias de las condiciones de las entradas del sistema. La segunda parte (entonces) se denomina consecuente y contiene los nombres de los conjuntos difusos a los que deben pertenecer las salidas del sistema, siempre y cuando se cumpla el antecedente correspondiente.

Existen varias formas de derivar las reglas, entre las que destacan las basadas en:

- La experiencia de expertos y el conocimiento de ingeniería de control. La base de las reglas se determina a partir de entrevistas con el operador (experto humano) o a través del conocimiento de la dinámica del proceso; es decir, cuando no existen expertos los sistemas difusos aprenden las reglas observando como se manipulan sistemas reales.
- La modelación del proceso. Los parámetros de la base de conocimiento se obtienen a partir de las entradas y salidas del proceso.

Defusificación

En esta etapa se combinan todas las salidas difusas formadas en la etapa de inferencia para crear una sola salida con valor único que será el valor de salida del control. La defusificación (desdifusión) puede realizarse mediante diversos métodos, el objetivo es derivar el valor crisp más representativo del conjunto difuso inferido, provocando una transformación inversa que trasladará la salida del dominio difuso al crisp; es decir, en este paso los valores fusificados se convierten en valores reales.

Los métodos de defusificación son:

- Principio del Máximo
- Centroide
- Promedio Pesado
- Promedio de Máximos
- Centro de Sumas
- Centro del Área Mayor
- Primero o Último de Máximos
- Singletons

De los métodos de defusificación mencionados, el método más utilizado es el del centroide, y es el que utilizaremos en nuestra aplicación.

Método del Centroide

Se basa en encontrar el peso promedio de la función de pertenencia; es decir, se encuentra el centro de gravedad del área total que comprende dicha función resultado de la inferencia (ver Figura 5.7) El centroide se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$y = \frac{\int_a^b [x \cdot m_x(x)] dx}{\int_a^b m_x(x) dx}$$

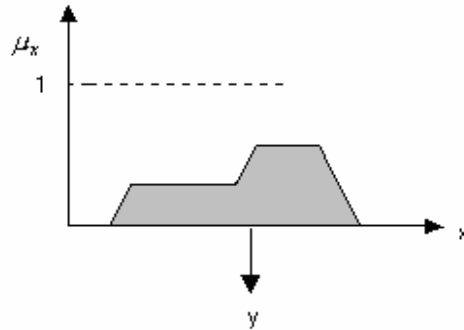


Figura 5.7 Método del centroide

Máquina de Inferencia Difusa

En la máquina de inferencia difusa se esquematizan de manera general la estructura del sistema que se pretende controlar, mostrando cada una de las partes difusas involucradas en el proceso de control (ver Figura 5.8)

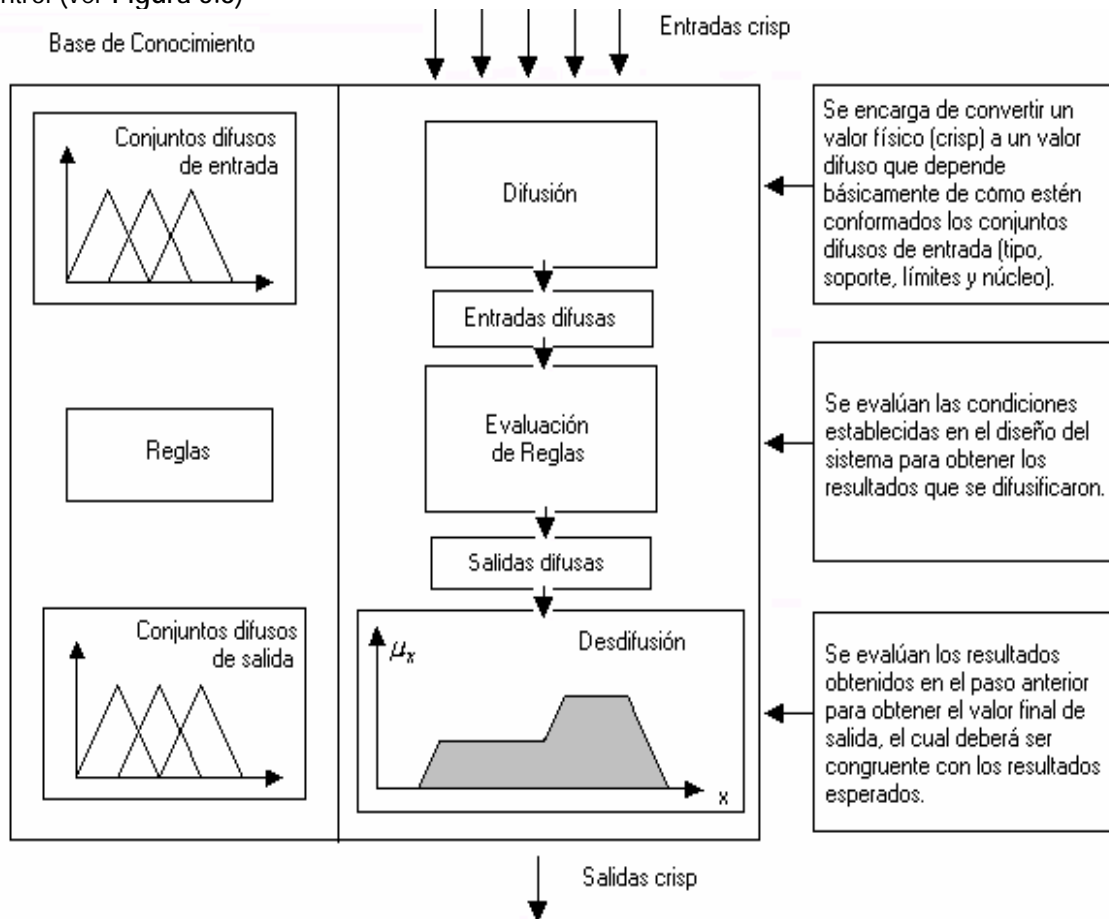


Figura 5.8 Máquina de Inferencia Difusa

5.3.6 Matlab 6.5

Para aplicar el método de lógica difusa, el programa Matlab 6.5, cuenta con un comando Fuzzy.¹²²

El Fuzzy Logic Toolbox 2.1, ofrece una amplia gama de métodos utilizados en lógica difusa a través de un interfaz gráfico, además, integra y extiende el entorno de computación técnica de Matlab y su entorno gráfico de simulación, para permitir utilizar técnicas incorporadas en esta herramienta a través de un entorno de desarrollo y análisis ya conocidos. El Fuzzy Logic Toolbox 2.1 incluye cinco editores gráficos para cada fase del diseño y análisis del sistema.

- El Fuzzy Inference System Editor (FIS Editor): se trata de una herramienta para el dibujo de las formas de las funciones de pertenencia que especifican grados difusos de veracidad para cada una de las variables que conforman el sistema.
- Membership Function Editor (MF Editor): pertenece al FIS Editor. Por medio de este editor es posible construir y variar los valores de las funciones que representan a las variables involucradas.
- Rule Editor: es un editor de reglas utilizado para especificar reglas lógicas en inglés para visualizarlas posteriormente en un formato más conciso.
- Rule Viewer: se trata de una herramienta totalmente interactiva que permite visualizar cómo responde el sistema a combinaciones de entradas o cambios de entradas.
- Output Surface Viewer: muestra la salida del sistema en una superficie 3D que permite visualizar el comportamiento global del sistema mostrando la salida en función de dos variables de entrada cualesquiera.

5.4 Aplicación de la metodología

Empleando la herramienta de MATLAB "Fuzzy Logic Tollbox" se construyó un Sistema de Inferencia Difusa, para cada una de las dimensiones; a continuación se muestran las principales pantallas del Sistema de Inferencia Difusa para la dimensión ambiental, teniendo como variables de entrada, todos los indicadores de dicha dimensión: Extensión de tierra perdida (*ExtensiónTierra*) Niveles de radiación en la región vecina (*RadEnAlrededores*) Desechos radiactivos de alta y mediana actividad (*DesechosRadiac*) Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos (*AccidentesRiesgos*) y como variable de salida la Sustentabilidad de la dimensión ambiental (*DimensiónAmbienta*) (ver Figura 5.9) Esta cuestión se trabaja en el Fuzzy Logic System Editor.

¹²² Fuzzy Logic Toolbox User's Guide for use with MATLAB © Copyright 1995-2004 The MathWorks, Inc. Version 2.1

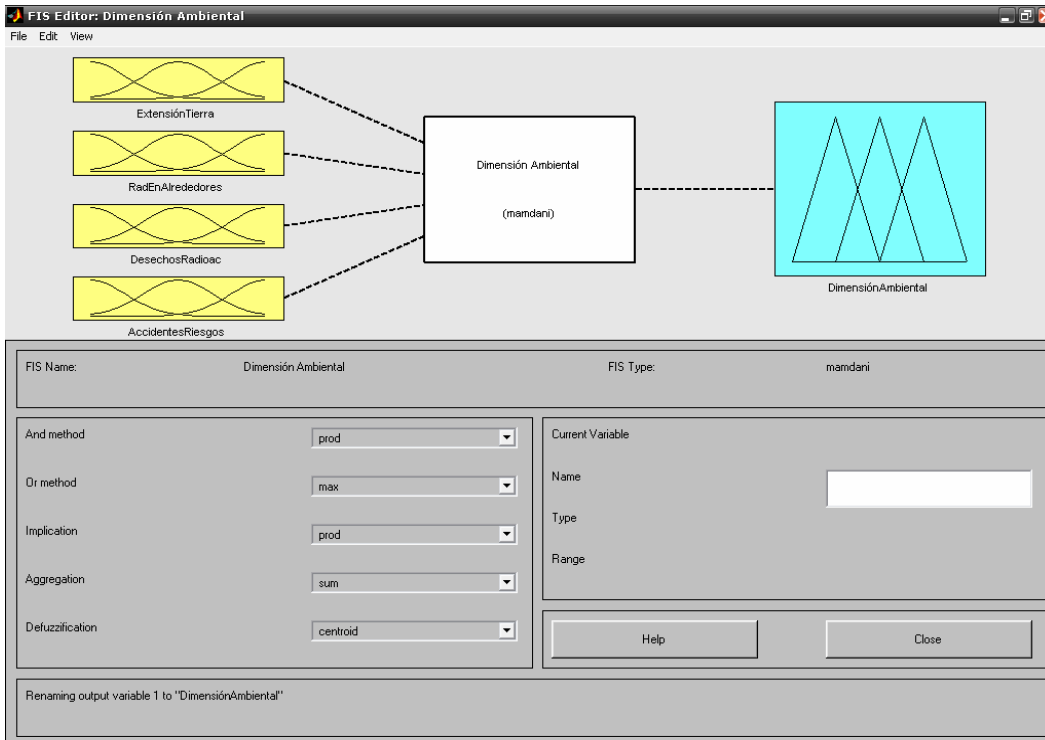


Figura 5.9 Variables de entrada (indicadores) y de salida

En el mismo Fuzzy Logic System Editor, se indicarán algunas de las características del sistema de control difuso, como son, los métodos de los operadores básicos, AND y OR, así como el de los correspondientes al proceso difuso; la implicación y la agregación. Adicionalmente se debe indicar el método de defusificación. Para el operador AND, se utilizó como método el producto y no máximo de los valores difusos (ver Tabla 5.6) porque es una opción alternativa en la que se emplean todos los valores de pertenencia para calcular la salida difusa de las reglas que impliquen al operador AND. Para el operador OR, se empleó el método del máximo valor difuso, tal como se explica en el Tema 5.3.6.3 Tabla 5.5; sin embargo, cabe hacer mención de que el operador OR, no se utilizó en las reglas del proceso difuso. El método seleccionado para la implicación debido a su simplicidad y eficiencia computacional es el método Larsen (ver Tema 5.3.6.4 Figura 5.6); por ello en el Editor, se indica que la agregación se trabajará como producto. Finalmente el método de defusificación es el centroide Tema 5.3.6.4 Figura 5.7. En la Figura 5.10 se muestra la parte del Fuzzy Logic System Editor en el que se asignan los métodos descritos.

And method	prod
Or method	max
Implication	prod
Aggregation	sum
Defuzzification	centroid

Figura 5.10 Métodos del sistema de control difuso

En el Membership Function Editor, se indican los valores de la variable lingüística de cada indicador y de la sustentabilidad de la dimensión ambiental. En este mismo editor se asigna, para cada variable, el rango de valores que puede tomar la función de pertenencia.

Para el indicador "Extensión de tierra perdida" se asignan tres conjuntos difusos, cada uno con su respectivo valor lingüístico, para la variable lingüística Sustentabilidad. El primer conjunto difuso es *Alta*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: -3000, 0 y 3000 respectivamente. El segundo conjunto difuso es *Media*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0, 3000 y 6000 respectivamente. El tercer conjunto difuso es *Baja*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 3000, 6000 y 9000 respectivamente. Finalmente el rango de valores que puede tomar la función de pertenencia es [0 6000]. (ver Figura 5.11)

Para el indicador "Niveles de radiación en la región vecina" se asignan tres conjuntos difusos, cada uno con su respectivo valor lingüístico, para la variable lingüística Sustentabilidad. El primer conjunto difuso es *Alta*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: -0.5, 0 y 0.5 respectivamente. El segundo conjunto difuso es *Media*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0, 0.5 y 1 respectivamente. El tercer conjunto difuso es *Baja*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0.5, 1 y 1.5 respectivamente. Finalmente el rango de valores que puede tomar la función de pertenencia es [0 1]. (ver Figura 5.12)

Para el indicador "Desechos radiactivos de alta y mediana actividad" se asignan tres conjuntos difusos, cada uno con su respectivo valor lingüístico, para la variable lingüística Sustentabilidad. El primer conjunto difuso es *Alta*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: -0.5, 0 y 0.5 respectivamente. El segundo conjunto difuso es *Media*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0, 0.5 y 1 respectivamente. El tercer conjunto difuso es *Baja*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0.5, 1 y 1.5 respectivamente. Finalmente el rango de valores que puede tomar la función de pertenencia es [0 1]. (ver Figura 5.13)

Para el indicador "Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos" se asignan tres conjuntos difusos, cada uno con su respectivo valor lingüístico, para la variable lingüística Sustentabilidad. El primer conjunto difuso es *Alta*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: -0.5, 0 y 0.5

respectivamente. El segundo conjunto difuso es *Media*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0, 0.5 y 1 respectivamente. El tercer conjunto difuso es *Baja*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0.5, 1 y 1.5 respectivamente. Finalmente el rango de valores que puede tomar la función de pertenencia es [0 1]. (ver Figura 5.14)

Finalmente para la variable de salida "Sustentabilidad de la Dimensión Ambiental" se asignaron cinco conjuntos difusos, cada uno con su respectivo valor lingüístico, para la variable lingüística Sustentabilidad. El primer conjunto difuso es *Muy Baja*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: -0.25, 0 y 0.25 respectivamente. El segundo conjunto difuso es *Baja*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0, 0.25 y 0.5 respectivamente. El tercer conjunto difuso es *Media*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0.25, 0.5 y 0.75 respectivamente. El cuarto conjunto difuso es *Alta*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0.5, 0.75 y 1 respectivamente. El quinto y último conjunto difuso es *Muy Alta*, sus parámetros mínimo, máximo y mínimo son: 0.75, 1 y 1.25 respectivamente. Finalmente el rango de valores que puede tomar la función de pertenencia es [0 1]. (ver Figura 5.15)

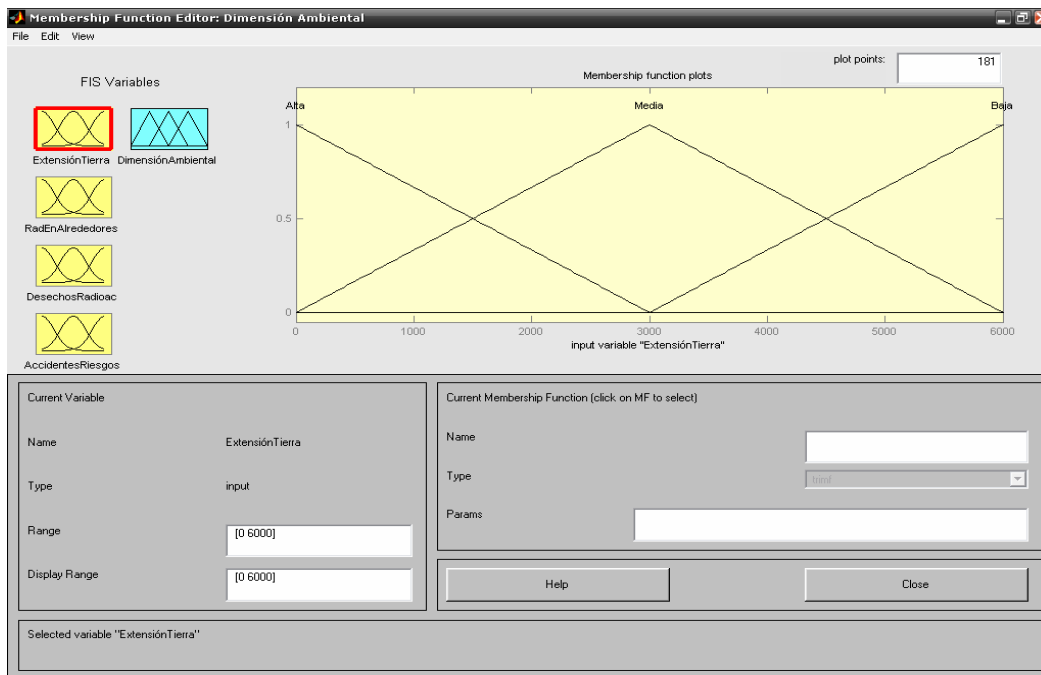


Figura 5.11 Características del indicador Extensión de tierra perdida

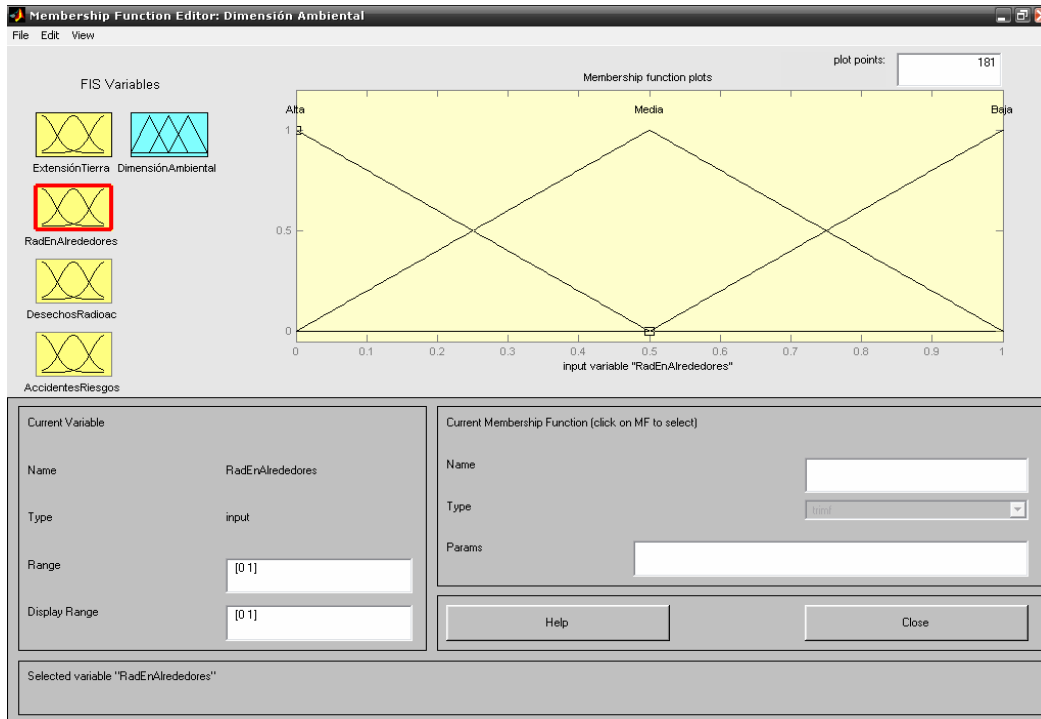


Figura 5.12 Características del indicador Niveles de radiación en la región vecina

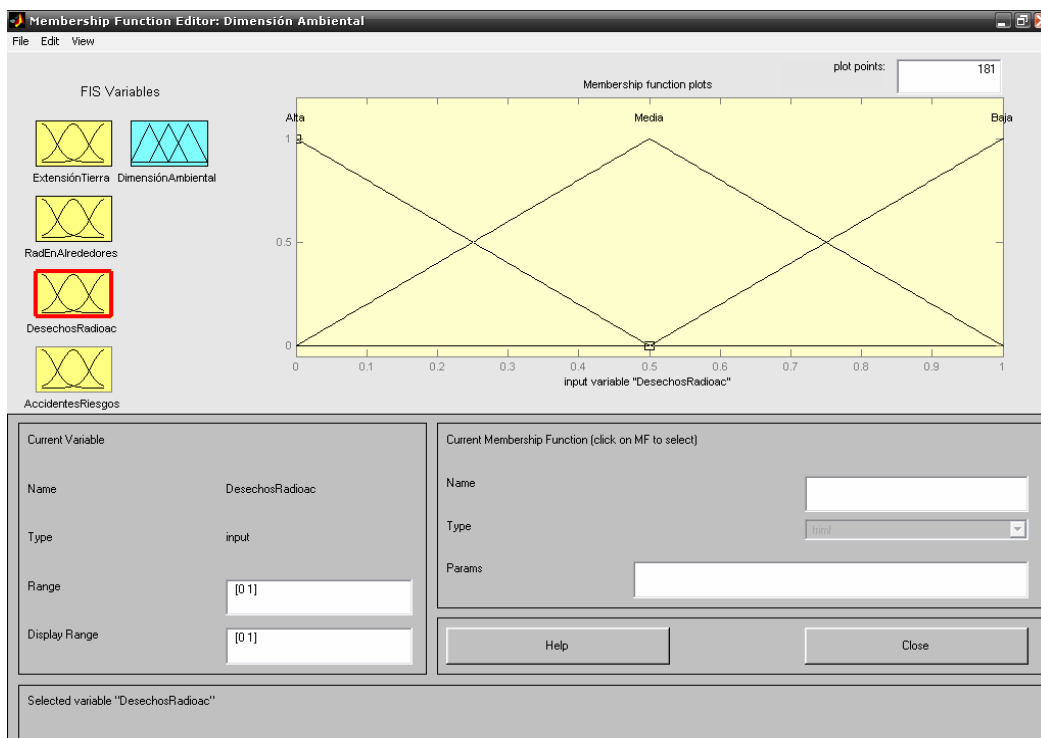


Figura 5.13 Características del indicador Desechos radiactivos de alta y mediana actividad

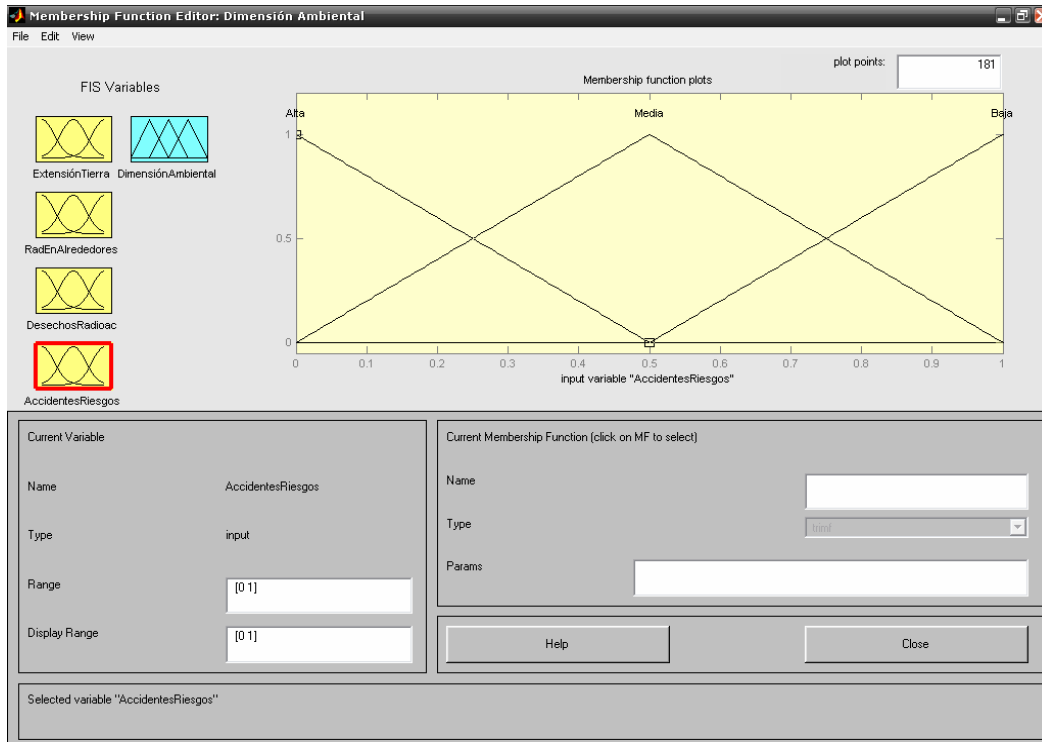


Figura 5.14 Características del indicador Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos

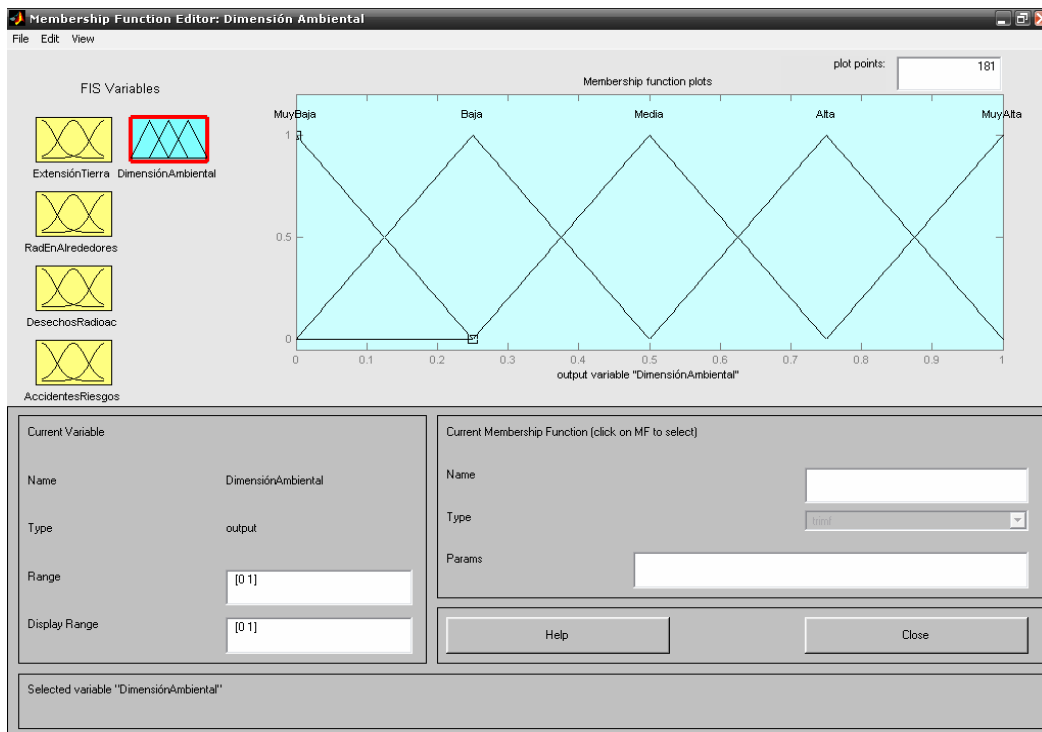


Figura 5.15 Características de la salida Sustentabilidad de la dimensión ambiental

A continuación se asignan las reglas de pertenencia con las que operará el sistema de control, a las reglas se les dará el peso correspondiente al de cada indicador dentro de su dimensión; de acuerdo con la Tabla 5.8 Cabe recordar que los valores lingüísticos de cada uno de los conjuntos difusos, son valores de la variable lingüística Sustentabilidad, esto quiere decir, sólo por poner un ejemplo, que Si <Extensión de tierra perdida es alta>, no se refiere a que la extensión de tierra perdida sea alta en unidades de metros cuadrados, sino a que la sustentabilidad de tierra perdida es alta, por lo que de hecho la extensión de tierra perdida en m² debe ser pequeña. Estas reglas se ingresan al Rule Editor de Fuzzy. Las reglas fueron las siguientes:

1. IF <Extensión de tierra perdida is Alta> AND <Niveles de radiación en la región vecina is Alta> AND <Desechos radiactivos de alta y mediana actividad is Alta> AND <Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos is Alta> THEN <Sustentabilidad de "Dimensión Ambiental is Muy Alta>. (Peso de la regla 1)
2. IF <Extensión de tierra perdida is Media> AND <Niveles de radiación en la región vecina is Media> AND <Desechos radiactivos de alta y mediana actividad is Media> AND <Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos is Media> THEN <Sustentabilidad de "Dimensión Ambiental is Media>. (Peso de la regla 1)
3. IF <Extensión de tierra perdida is Baja> AND <Niveles de radiación en la región vecina is Baja> AND <Desechos radiactivos de alta y mediana actividad is Baja> AND <Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos is Baja> THEN <Sustentabilidad de "Dimensión Ambiental is Muy Baja>. (Peso de la regla 1)
4. IF <Extensión de tierra perdida is Alta> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Alta>. (Peso de la regla 0.150)
5. IF <Extensión de tierra perdida is Media> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Media>. (Peso de la regla 0.150)
6. IF <Extensión de tierra perdida is Baja> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Baja>. (Peso de la regla 0.150)
7. IF <Niveles de radiación en la región vecina is Alta> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Alta>. (Peso de la regla 0.300)
8. IF <Niveles de radiación en la región vecina is Media> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Media>. (Peso de la regla 0.300)
9. IF <Niveles de radiación en la región vecina is Baja> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Baja>. (Peso de la regla 0.300)
10. IF <Desechos radiactivos de alta y mediana actividad is Alta> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Alta>. (Peso de la regla 0.350)
11. IF <Desechos radiactivos de alta y mediana actividad is Media> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Media>. (Peso de la regla 0.350)
12. IF <Desechos radiactivos de alta y mediana actividad is Baja> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Baja>. (Peso de la regla 0.350)
13. IF <Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos is Alta> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Alta>. (Peso de la regla 0.200)
14. IF <Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos is Media> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Media>. (Peso de la regla 0.200)
15. IF <Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos is Baja> THEN <Sustentabilidad de Dimensión Ambiental is Baja>. (Peso de la regla 0.200)

Tabla 5.8 Pesos de los indicadores con respecto de la dimensión a la que pertenecen

	<i>Área de impacto</i> (Importancia en %)	<i>Indicador</i> (Importancia en %)	<i>Peso</i>
Económico	Recursos (20)	Disponibilidad de reservas de combustible (50)	0.100
		Consumo de material no-combustible (30)	0.060
		Disponibilidad (20)	0.040
	Necesidades financieras (50)	Costos de producción (75)	0.375
		Sensibilidad al incremento del precio del combustible (25)	0.125
	Tecnología (30)	Madurez de la tecnología (70)	0.210
Dependencia del exterior (30)		0.090	
Medio Ambiente	Efectos no contaminantes (15)	Extensión de tierra perdida (100)	0.150
	Impacto regional (30)	Niveles de radiación en la región vecina (100)	0.300
	Producción de residuos (35)	Desechos radiactivos de alta y mediana actividad (100)	0.350
	Accidentes severos (20)	Accidentes/Riesgos colectivos en seres humanos (100)	0.200
Social	Aversión al riesgo (15)	Máximo número creíble de muertes por accidente (100)	0.150
	Confinamiento crítico de residuos (25)	Tiempo necesario de confinamiento (100)	0.250
	Proliferación (20)	Posibilidad relativa a la proliferación (100)	0.200
	Empleo (15)	Oportunidades de empleo (100)	0.150
	Repercusiones sobre la salud Humana (Operación normal) (20)	Mortalidad (Reducción de la esperanza de vida) (100)	0.200
	Perturbaciones locales (5)	Ruido y contaminación visual (100)	0.050

Solamente resta ingresar los grados de pertenencia de cada indicador para obtener el valor crisp de sustentabilidad de la Dimensión Económica.

Para la Fisión a 30 años el resultado es: 0.430. (ver Figura 5.16)

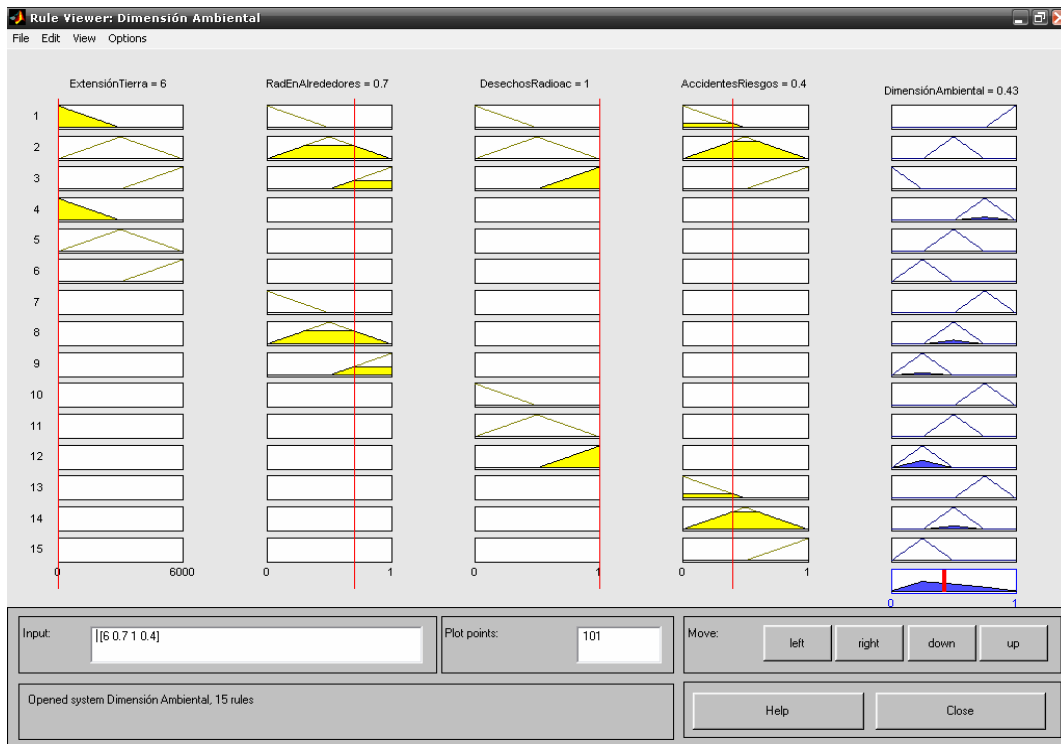


Figura 5.16 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fisión a 30 años

Para la Fusión a 30 años el resultado es: 0.600. (ver Figura 5.17)

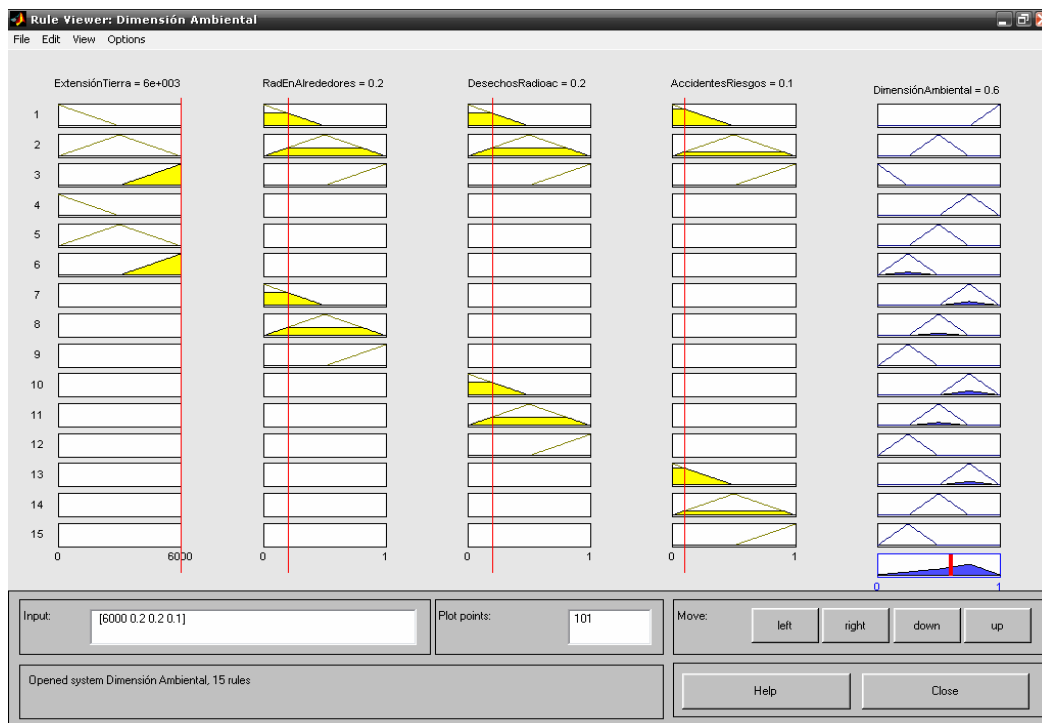


Figura 5.17 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fusión a 30 años

Para la Fisión a 60 años el resultado es: 0.472. (ver Figura 5.18)

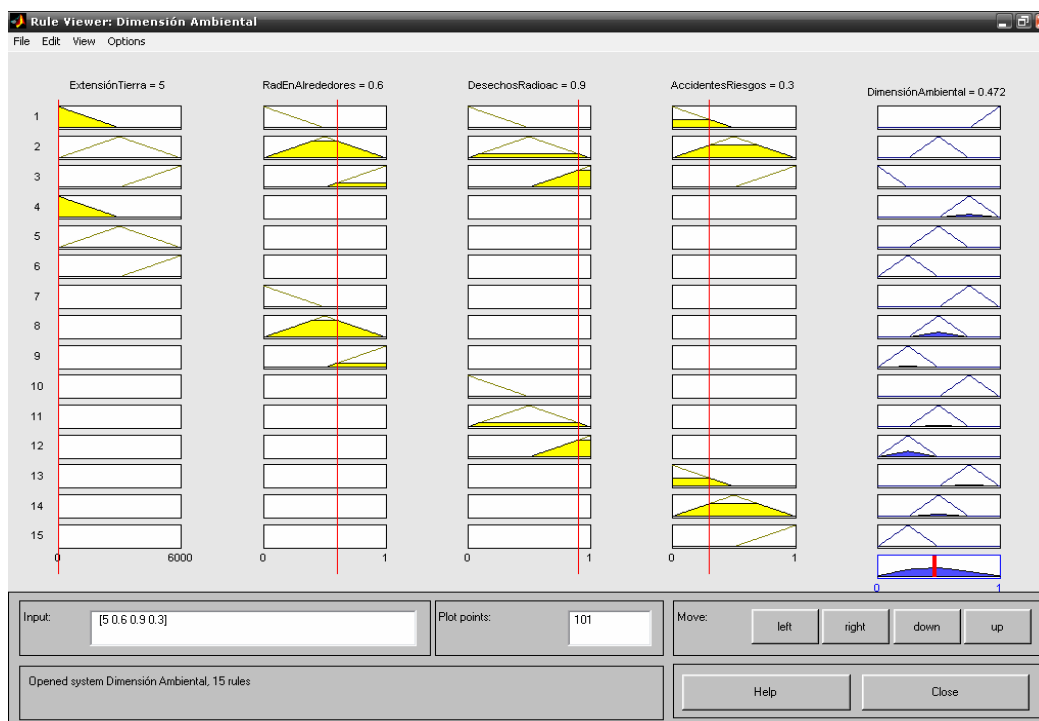


Figura 5.18 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fisión a 60 años

Para la Fusión a 60 años el resultado es: 0.729. (ver Figura 5.19)

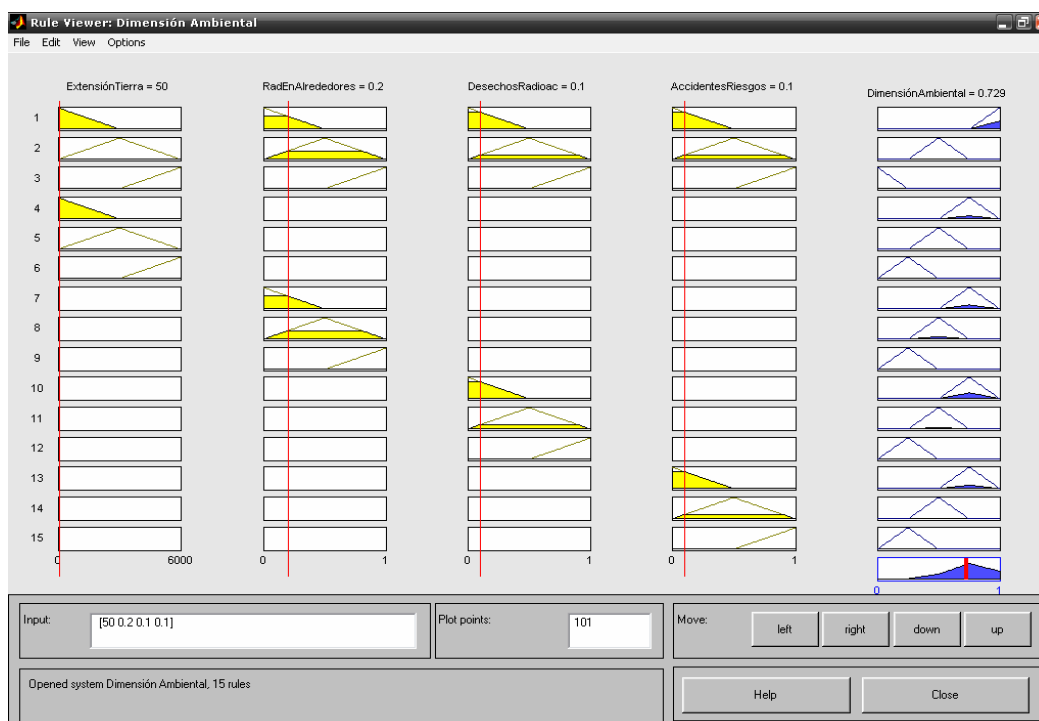


Figura 5.19 Sustentabilidad de la Dimensión Económica para la fusión a 60 años

Con base en la Figura 5.20 se puede concluir. La sustentabilidad de la fisión nuclear para 30 años es 0.430; si observamos en la gráfica de la Figura 5.20 podemos ver que para 0.430 hay dos grados de pertenencia distintos de cero, estos grados son FI-30-1 para el conjunto difuso Media y FI-30-2 para el conjunto difuso baja. Se puede ver claramente que FI-30-1 es mayor que FI-30-2; por lo que se concluye que la fisión a 30 años tiene una sustentabilidad media con respecto a la dimensión ambiental. Para 60 años la fisión tiene un valor de 0.472; FI-60-1 perteneciente al conjunto difuso Media es mayor que FI-60-2, el cual pertenece a Baja; por lo tanto la sustentabilidad de la fisión en 60 años es nuevamente media. Por otro lado, para la fusión nuclear a 30 años el valor es 0.600, se observa que FU-30-1 > FU-30-2 por lo que la sustentabilidad es media y en 60 años (0.729) FU-60-1 es perteneciente al conjunto difuso Alta, es mucho mayor que FU-60-2, por lo tanto es alta.

Podemos observar que a medida que el valor crisp que nos arroja Matlab, es más grande, el grado de pertenencia será más grande para los conjuntos difusos con los mejores valores lingüísticos; es decir, la sustentabilidad tiende a ser más alta.

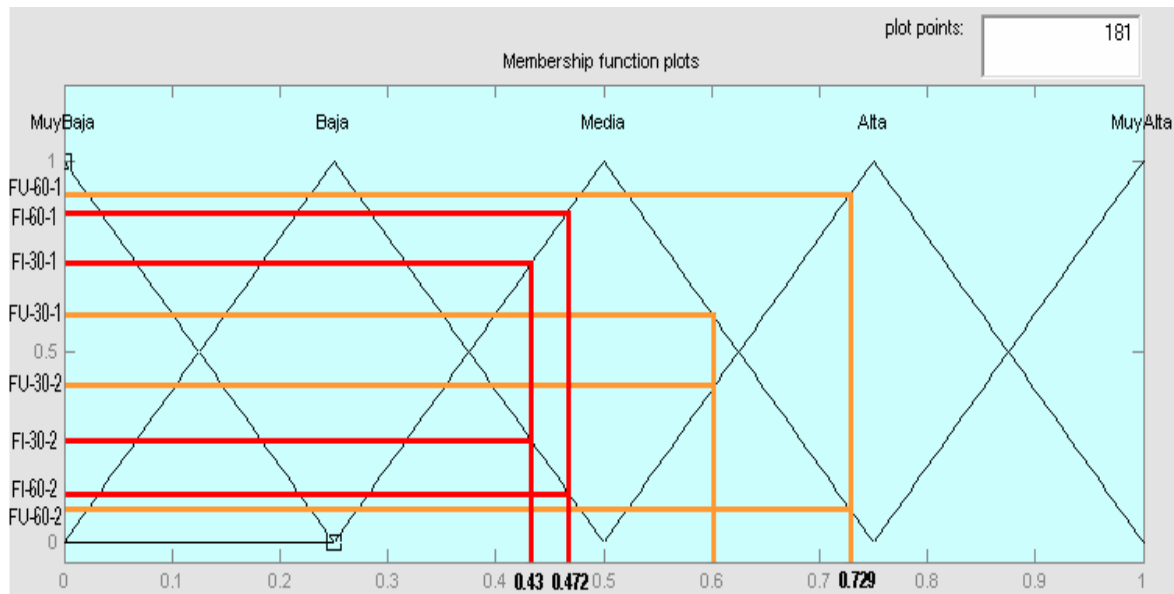


Figura 5.20 Conjuntos difusos de salida, Sustentabilidad

De la misma forma en como se elaboró este sistema de inferencia difusa para la Dimensión Ambiental, se elaboró para las Dimensiones Económica y Social. Una vez obtenidos esos resultados, se elaboraron sistemas de inferencia difusa para los resultados de las dimensiones Económica y Ambiental; para los de las dimensiones Económica, Ambiental y Social y finalmente para los de las dimensiones Económica, Ambiental y Social pero con diferentes pesos para cada una de las dimensiones. Los resultados de todos los sistemas de inferencia difusos se muestran a continuación:

5.4.1 Escenario a 30 años

Los resultados que se muestran a continuación, miden el grado de sustentabilidad de acuerdo con lo propuesto en los valores asignados en la matriz de indicadores. Estos resultados corresponden a un mediano plazo, considerado en este trabajo como a 30 años.

5.4.1.1 Resultados de la dimensión Económica

El resultado de la dimensión Económica tanto para la fisión como para la fusión a 30 años, se muestra en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9 Resultados de la Sustentabilidad Económica, escenario a 30 años

	Dimensión Económica
Fisión 30 años	0.622
Fusión 30 años	0.378

5.4.1.2 Resultados de la dimensión Ambiental

La Tabla 5.10 muestra los resultados de la dimensión Ambiental, en el mediano plazo, tanto para la fisión como para la fusión.

Tabla 5.10 Resultados de la Sustentabilidad Ambiental, escenario a 30 años

	Dimensión Ambiental
Fisión 30 años	0.430
Fusión 30 años	0.600

5.4.1.3 Resultados de la dimensión Social

En la Tabla 5.11 se muestran los resultados de la dimensión social, que obtuvieron las tecnologías de fisión y fusión nuclear, para el escenario de 30 años.

Tabla 5.11 Resultados de la Sustentabilidad Social, escenario a 30 años

	Dimensión Social
Fisión 30 años	0.425
Fusión 30 años	0.688

5.4.1.4 Resultados de las dimensiones Económica y Ambiental

Los resultados de la Tabla 5.12 son los obtenidos de la evaluación de las tecnologías de fisión y fusión, cuando se consideran únicamente las dimensiones Económica y Ambiental, en un escenario a 30 años.

Tabla 5.12 Resultados de la Sustentabilidad Económica y Ambiental, escenario a 30 años

	Dimensión Económica	Dimensión Ambiental	Sustentabilidad Eco & Amb
Fisión 30 años	0.622	0.430	0.517
Fusión 30 años	0.378	0.600	0.493

5.4.1.5 Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social

Finalmente para el escenario a mediano plazo, tenemos el estudio de sustentabilidad de las tres dimensiones. Con base en el principio de equilibrio, se consideró que los pesos de cada una de las dimensiones es el mismo; es decir, de aproximadamente 33.33% para cada dimensión. (Ver Tabla 5.13)

Tabla 5.13 Resultados de la Sustentabilidad global, escenario a 30 años

	Dimensión Económica	Dimensión Ambiental	Dimensión Social	Sustentabilidad Econ&Amb&Soc
Fisión 30 años	0.622	0.430	0.425	0.494
Fusión 30 años	0.378	0.600	0.688	0.543

5.4.1.6 Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social con pesos ponderados

El último estudio que se realizó para el escenario a mediano plazo, es el de las tres dimensiones pero con diferentes pesos (la justificación se detalla en el Tema 5.5); a la dimensión económica se le dio el 50% del peso total, a la Ambiental el 30% y finalmente a la Social el 20%. Los resultados se muestran en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14 Resultados de la Sustentabilidad global con pesos, escenario a 30 años

	Dimensión Económica (50%)	Dimensión Ambiental (30%)	Dimensión Social (20%)	Sustentabilidad
Fisión 30 años	0.622	0.430	0.425	0.515
Fusión 30 años	0.378	0.600	0.688	0.505

5.4.2 Escenario a 60 años

Ahora se muestran los resultados obtenidos para el largo plazo, considerado en este trabajo, como a 60 años. Cabe recalcar que los resultados obtenidos están en función de la matriz de indicadores y del valor y peso que se le asignó a cada indicador.

5.4.2.1 Resultados de la dimensión Económica

En la Tabla 5.15 se muestran los resultados de la dimensión Económica, que obtuvieron las tecnología de fisión y fusión nuclear, para el escenario a 60 años.

Tabla 5.15 Resultados de la Sustentabilidad Económica, escenario a 60 años

	Dimensión Económica
Fisión 60 años	0.624
Fusión 60 años	0.509

5.4.2.2 Resultados de la dimensión Ambiental

El resultado de la dimensión Ambiental tanto para la fisión como para la fusión a 60 años, se muestra en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Resultados de la Sustentabilidad Ambiental, escenario a 60 años

	Dimensión Ambiental
Fisión 60 años	0.472
Fusión 60 años	0.729

5.4.2.3 Resultados de la dimensión Social

La Tabla 5.17 muestra los resultados de la dimensión Social, en el largo plazo, tanto para la fisión como para la fusión.

Tabla 5.17 Resultados de la Sustentabilidad Social, escenario a 60 años

	Dimensión Social
Fisión 60 años	0.606
Fusión 60 años	0.756

5.4.2.4 Resultados de las dimensiones Económica y Ambiental

Considerando solamente las dimensiones Económica y social se llegó a los siguientes resultados (Ver Tabla 5.18)

Tabla 5.18 Resultados de la Sustentabilidad Económica y Ambiental, escenario a 60 años

	Dimensión Económica	Dimensión Ambiental	Sustentabilidad
Fisión 60 años	0.624	0.472	0.531
Fusión 60 años	0.509	0.729	0.588

5.4.2.5 Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social

Los resultados de la Tabla 5.19 son los obtenidos de la evaluación de las tecnologías de fisión y fusión, cuando se consideran las dimensiones Económica, Ambiental y Social, en un escenario a 60 años. Los pesos de las tres dimensiones, son iguales.

Tabla 5.19 Resultados de Sustentabilidad global, escenario a 60 años

	Dimensión Económica	Dimensión Ambiental	Dimensión Social	Sustentabilidad
Fisión 60 años	0.624	0.472	0.606	0.549
Fusión 60 años	0.509	0.729	0.756	0.633

5.4.2.6 Resultados de las tres dimensiones, Económica, Ambiental y Social con pesos ponderados

La Tabla 5.20 muestra los resultados de las tres dimensiones, pero con diferentes pesos cada una de ellas, se le otorgó 50% de peso a la dimensión Económica, 30% de peso a la dimensión Social y 20% de peso a la dimensión Social.

Tabla 5.20 Resultados de la Sustentabilidad con pesos, escenario a 60 años

	Dimensión Económica (50%)	Dimensión Ambiental (30%)	Dimensión Social (20%)	Sustentabilidad
Fisión 60 años	0.624	0.472	0.606	0.545
Fusión 60 años	0.509	0.729	0.756	0.600



CAPÍTULO 6

Conclusiones

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Capítulo 6

6 Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado un estudio de la sustentabilidad de las tecnologías de fisión y de fusión nuclear. Para poder realizar este estudio, fue necesario conocer los conceptos básicos, así como las características correspondientes a cada uno de los dos fenómenos físicos. En el Capítulo 5 se llevó a cabo el estudio y se llegó a los resultados.

Los resultados esperados por mi parte, eran un cuanto tanto diferentes a los obtenidos. A mediano plazo, 30 años, esperaba que la fusión nuclear fuera una realidad, que brindaría para ese momento una solución a la demanda de energía; la sustentabilidad de la fusión sería alta en cada una de las dimensiones y debería ser mayor a la de la fisión. A 60 años la fusión tendría niveles de sustentabilidad altos, considerando cada una de las tres dimensiones del desarrollo sustentable y sería nuevamente más sustentable que la fisión. Por su parte, la fisión lograría avances significativos en las tres dimensiones, principalmente en la social y ambiental llegando a niveles de sustentabilidad altos, sin embargo, en ambos escenarios la sustentabilidad de la fisión sería menor que el de la fusión. Sin embargo, no todo lo esperado fue obtenido como se puede constatar en el análisis de los resultados que se muestra a continuación.

Para hacer el análisis de los resultados es necesario realizar las siguientes observaciones:

1. Los resultados obtenidos para cada uno de los casos analizados, dependen de los valores y pesos otorgados a los indicadores que constituyen la matriz. Dichos valores y pesos fueron asignados de acuerdo con la experiencia que se obtuvo del desarrollo de los cuatro capítulos anteriores y es en ellos en donde se encuentra su fundamento. Sin embargo, el tema tratado es un tema controversial, en el que inclusive, en muchas de las ocasiones, los expertos difieren de manera muy significativa con otros colegas. El presente trabajo no pretende hacer un análisis riguroso de la sustentabilidad de ambas tecnologías, sino ser una introducción al estudio de la energía nuclear, con la finalidad de que pueda servir como una guía o material de apoyo para adentrarse en esta rama de la ciencia y la tecnología, además de mostrar una metodología para poder comparar estas tecnologías en el contexto del desarrollo sustentable, y que sea funcional para el presente, el mediano y largo plazo.
2. La teoría del Desarrollo Sustentable, nos indica que el peso de las dimensiones debe ser igual para todas las dimensiones; es decir, 33.33% para cada una de ellas. Sin embargo, en la realidad esto pocas veces se cumple, el papel de la dimensión económica, es por lo general más importante a la hora de la toma de decisiones. Por esta razón, se incluyeron resultados, en las que las tres dimensiones tienen pesos ponderados distintos; en los dos escenarios analizados, a la dimensión Económica se le asignó un peso del 50% sobre la variable de salida, a la Ambiental un peso de 30% y la dimensión Social un peso de 20%.
3. El que una fuente de energía resulte ser más sustentable que la otra, no quiere decir que la tecnología correspondiente es la que se va entonces a implementar, la presente metodología no busca ese objetivo, sino el de comparar ambas tecnologías en el contexto del desarrollo sustentable. Lo que se vaya a decidir en materia energética en los plazos tratados en este estudio, dependerán de más variables que las tratadas en el presente.

La Figura 5.20 muestra los conjuntos difusos de la variable de salida sustentabilidad. Esta gráfica es la misma para todos los casos analizados en el presente trabajo y con base en ella se realizará el análisis de los resultados.

Escenario a 30 años

Para el escenario a treinta años, podemos ver en la Tabla 5.9 que la sustentabilidad de la tecnología de fisión, para el caso en el que únicamente se considera la dimensión Económica, es de 0.622, lo que nos lleva a concluir de acuerdo con la Figura 5.20, que la sustentabilidad en el aspecto económico es media. Por su parte el de la tecnología de fusión, para el mismo caso, es de 0.378, podemos concluir que la sustentabilidad económica es baja. Esto nos lleva a decir que en 30 años la energía nuclear de fisión, será más sustentable económicamente que la de fusión.

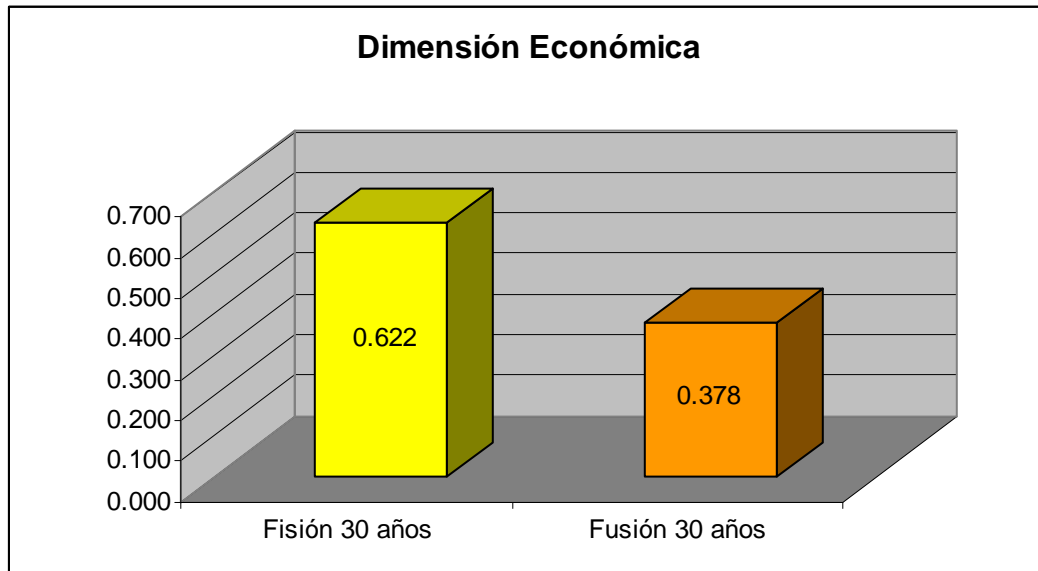


Figura 6.1 Resultados de la Dimensión Económica, escenario a 30 años

Ahora analizando a la dimensión Ambiental, vemos en la Tabla 5.10 que la fisión tiene 0.430 contra 0.600 de la fusión; la fisión se ubica entre sustentabilidad Ambiental media, al igual que la fusión que también es media. Se concluye que en un escenario a 30 años, la fusión nuclear será más sustentable en el aspecto Ambiental que la fisión nuclear.

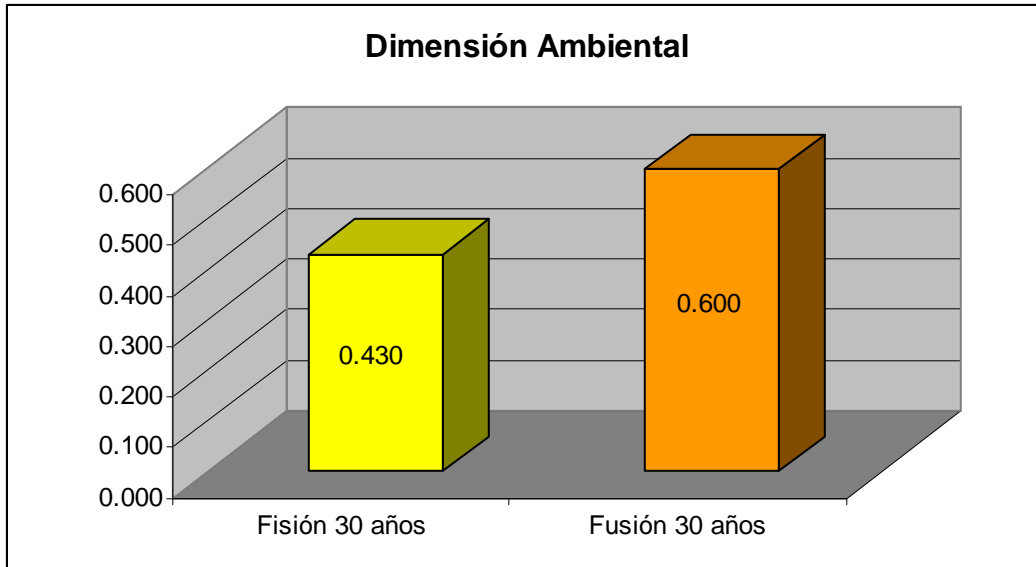


Figura 6.2 Resultados de la Dimensión Ambiental, escenario a 30 años

De acuerdo con la Tabla 5.11 y con la Figura 5.20 se tiene para la sustentabilidad, tomando únicamente en consideración a la dimensión Social, que la fisión es entre medianamente sustentable con un valor de 0.425; mientras que la fusión está con un valor de 0.688, tiene una sustentabilidad alta. Entonces en 30 años la fusión también será más sustentable que la fisión, pero ahora en el renglón social.

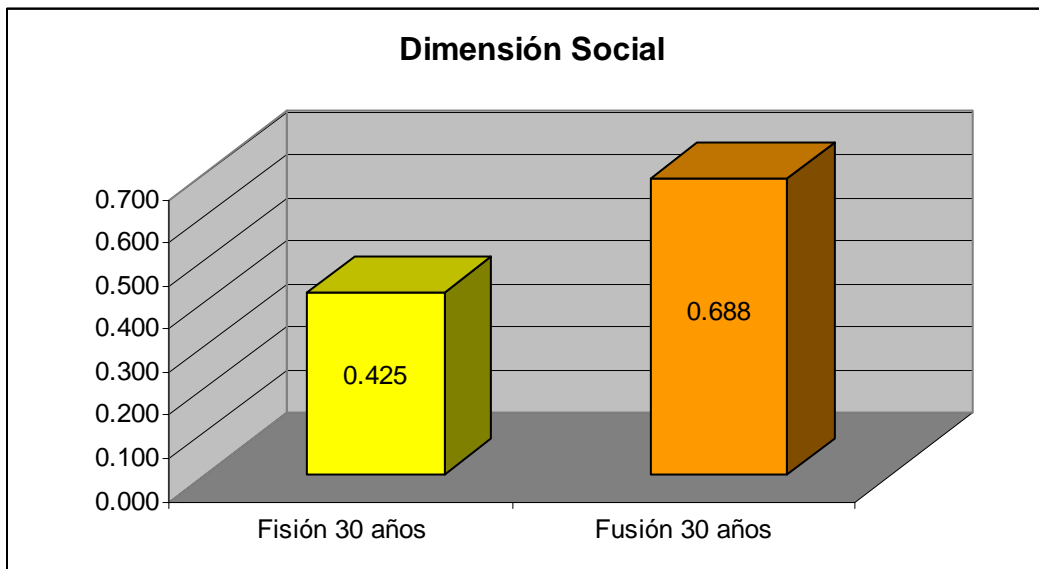


Figura 6.3 Resultados de la Dimensión Social, escenario a 30 años

Si ahora tomamos los indicadores de las dimensiones Económica y Ambiental (ver Tabla 5.12) entonces se obtiene un valor de 0.517 para la fisión y se concluye que es medianamente sustentable con base en la Figura 5.20. La fusión tiene un valor de 0.493, y también es medianamente sustentable. Entonces, considerando las dimensiones Económica y Ambiental a mediano plazo la fisión nuclear es más sustentable que la fusión.

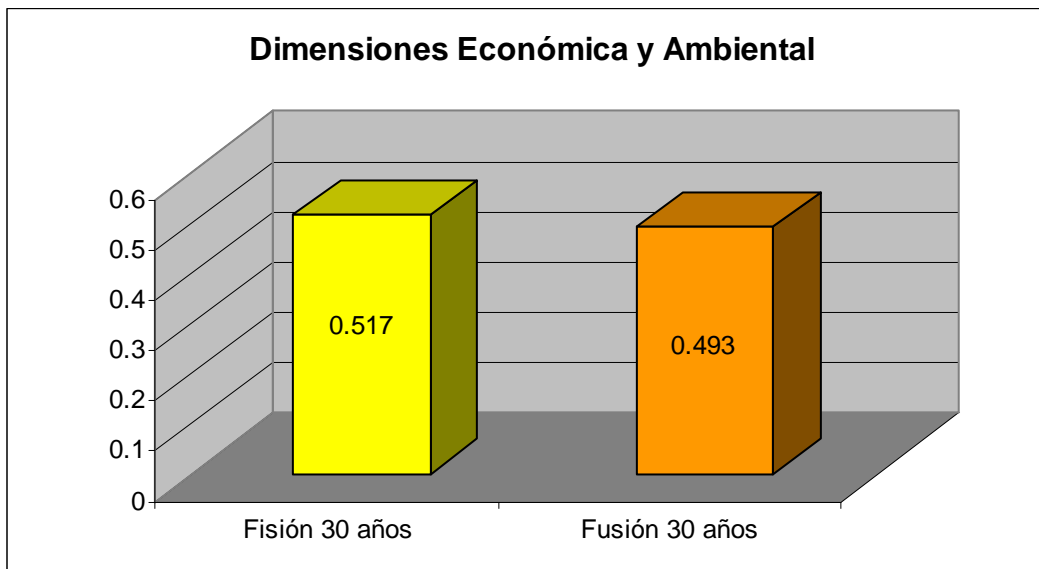


Figura 6.4 Resultados de la Dimensión Económica y Ambiental, escenario a 30 años

Cuando se toman en cuenta las tres dimensiones con el mismo peso, resulta que la fisión tiene un valor de 0.494 (ver Tabla 5.13) concluyendo que es medianamente sustentable. Por su parte la fusión tiene un valor de 0.543 lo que significa que es también medianamente sustentable, de acuerdo con la Figura 5.20; finalmente se concluye que tomando en cuenta los tres indicadores con el mismo peso de acuerdo con la teoría del desarrollo Sustentable, la fusión nuclear es más sustentable que la fisión.

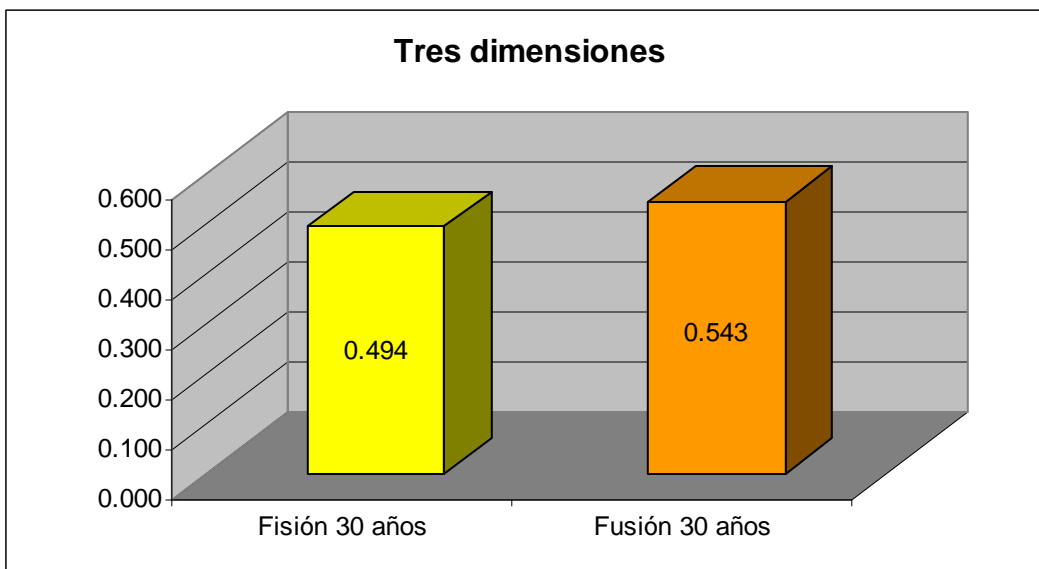


Figura 6.5 Resultados de las tres dimensiones, escenario a 30 años

Por último, para el escenario a 30 años con las tres dimensiones, pero considerando que la económica es la más importante, seguida de la ambiental y la social al final, Tabla 5.14 se tiene que la fisión es medianamente sustentable con un valor de 0.515, valor mayor que 0.505 de la fusión

nuclear que también se considera con una sustentabilidad media. Entonces, si se le da mayor importancia al aspecto económico, algo que como ya se mencionó es muy común en nuestra realidad, resulta que la fisión es más sustentable que la fusión en un escenario a mediano plazo.

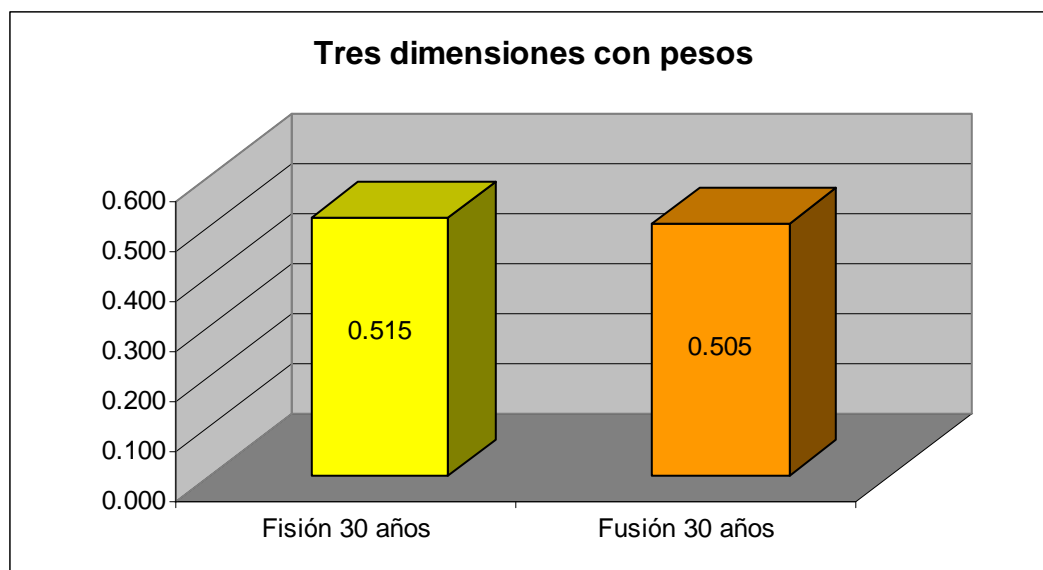


Figura 6.6 Resultados de las tres dimensiones con pesos, escenario a 30 años

Escenario a 60 años

Para el escenario a sesenta años, se tiene que la sustentabilidad de la tecnología de fisión para el caso en el que únicamente se considera la dimensión Económica es de 0.624 (ver Tabla 5.15) lo que nos lleva a concluir con base en la Figura 5.20, que la sustentabilidad en el aspecto económico se ubica entre media y alta. Por su parte el valor de la tecnología de fusión, para el mismo caso, es de 0.509, observamos en la Figura 5.20 que la sustentabilidad económica es media, es importante indicar que este valor representa un incremento aproximado de 34% con respecto al valor del mismo indicador para el escenario a mediano plazo. Por lo anterior concluimos que a 60 años la energía nuclear de fisión, será al igual que en el mediano plazo, más sustentable económicamente que la de fusión, pero reconociendo que las distancias se habrán acortado.

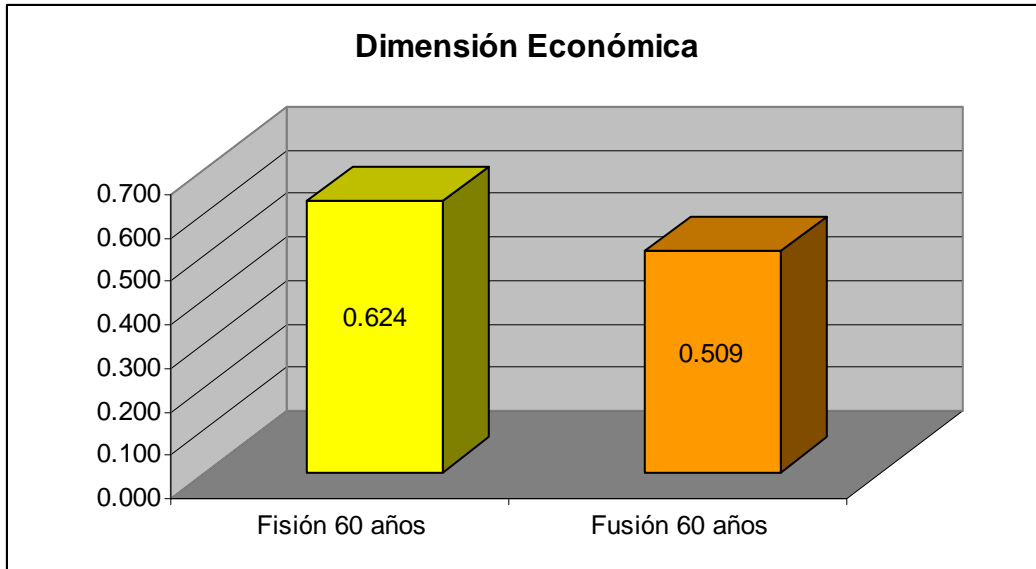


Figura 6.7 Resultados de la Dimensión Económica, escenario a 60 años

Tomando sólo a la dimensión Ambiental, vemos en la Tabla 5.16, que la fisión tiene 0.472 contra 0.729 de la fusión; la fisión tiene una sustentabilidad Ambiental media, mientras que la fusión es alta (ver Figura 5.20) Se concluye que en un escenario a 60 años, la fusión nuclear será más sustentable en el aspecto Ambiental que la fisión nuclear, se mantiene esta situación con respecto al mediano plazo.

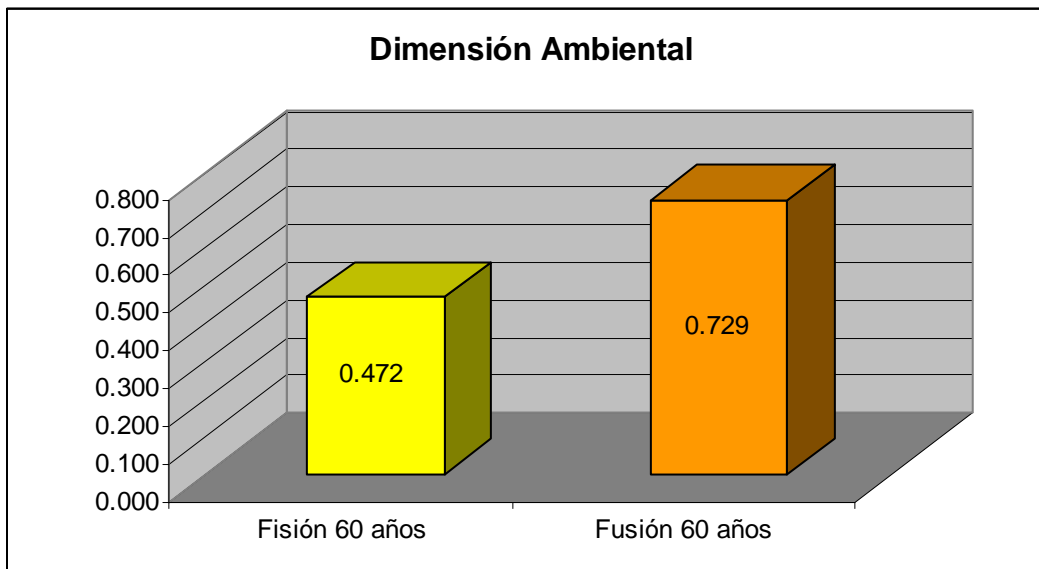


Figura 6.8 Resultados de la Dimensión Ambiental, escenario a 60 años

De acuerdo con la Tabla 5.17 y con la Figura 5.20 se tiene para la sustentabilidad, tomando únicamente en consideración a la dimensión Social, que la fisión es medianamente sustentable con un valor de 0.606 que representa un aumento aproximado de 42% con relación a lo que sucede a mediano plazo; mientras que la fusión tiene un valor de 0.756, que indica que es altamente

sustentable. Entonces en 60 años la fusión también será más sustentable que la fisión, pero es importante resaltar que la fisión habrá logrado un gran avance en el aspecto social.

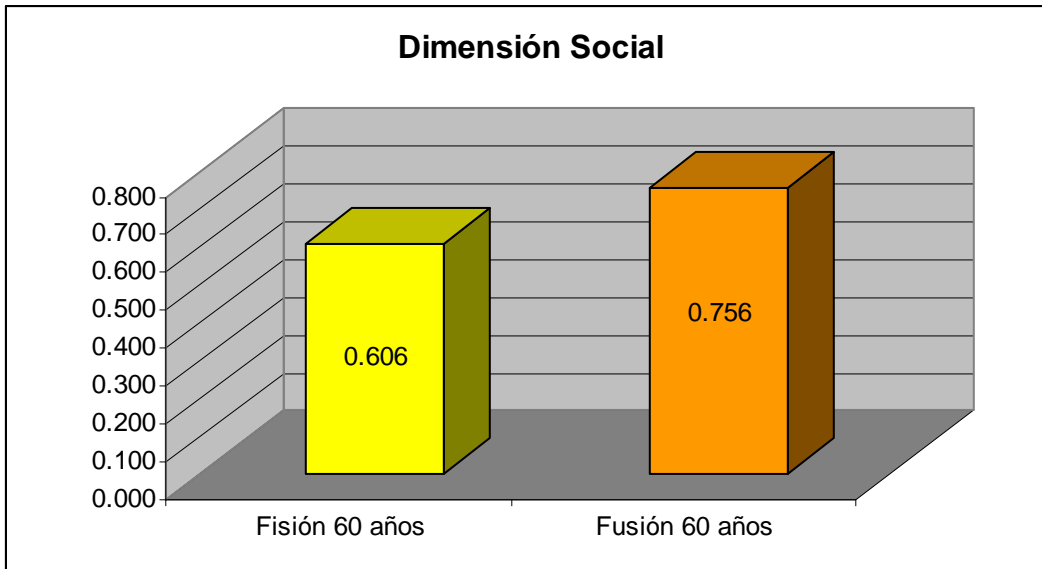


Figura 6.9 Resultados de la Dimensión Social, escenario a 60 años

Si ahora tomamos los indicadores de las dimensiones Económica y Ambiental (ver Tabla 5.18) entonces se obtiene un valor de 0.531 para la fisión y se concluye que es medianamente sustentable con base en la Figura 5.20. La fusión tiene un valor de 0.588, y es también medianamente sustentable. Entonces, considerando las dimensiones Económica y Ambiental a largo plazo la fusión nuclear es ya más sustentable que la fisión, situación contraria que para el mismo caso en el escenario a 30 años.

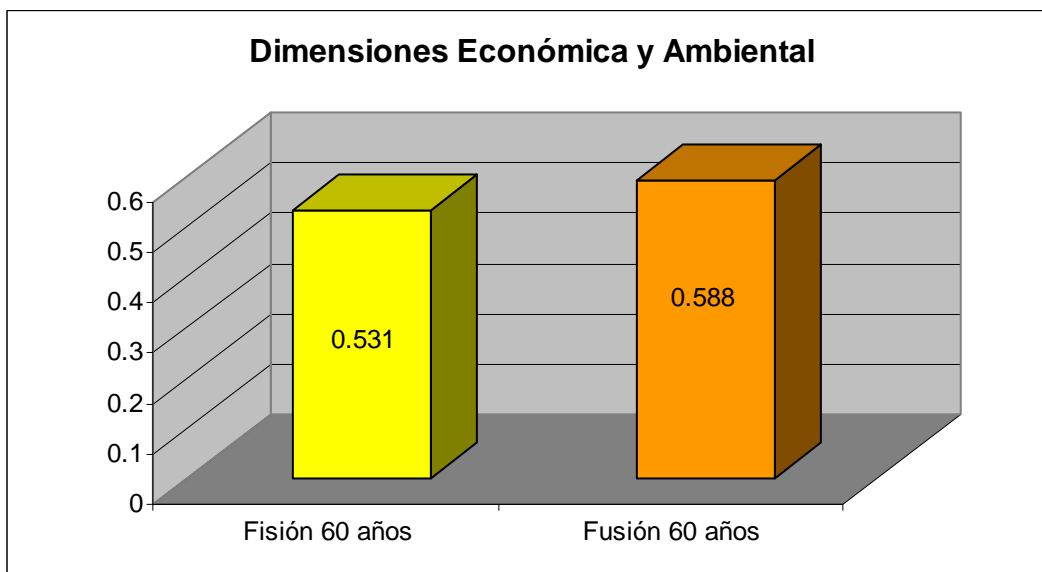


Figura 6.10 Resultados de la Dimensión Económica y Ambiental, escenario a 60 años

Considerando las tres dimensiones con el mismo peso, resulta que la fisión tiene un valor de 0.549 (ver Tabla 5.19) concluyendo que es medianamente sustentable. Por su parte la fusión tiene un valor de 0.633 lo que significa que tiene una sustentabilidad alta, de acuerdo con la Figura 5.20; finalmente se puede concluir que tomando en cuenta los tres indicadores con el mismo peso de acuerdo con la teoría del Desarrollo Sustentable, la fusión nuclear es más sustentable que la fisión, al igual que lo sucedido en el mediano plazo.

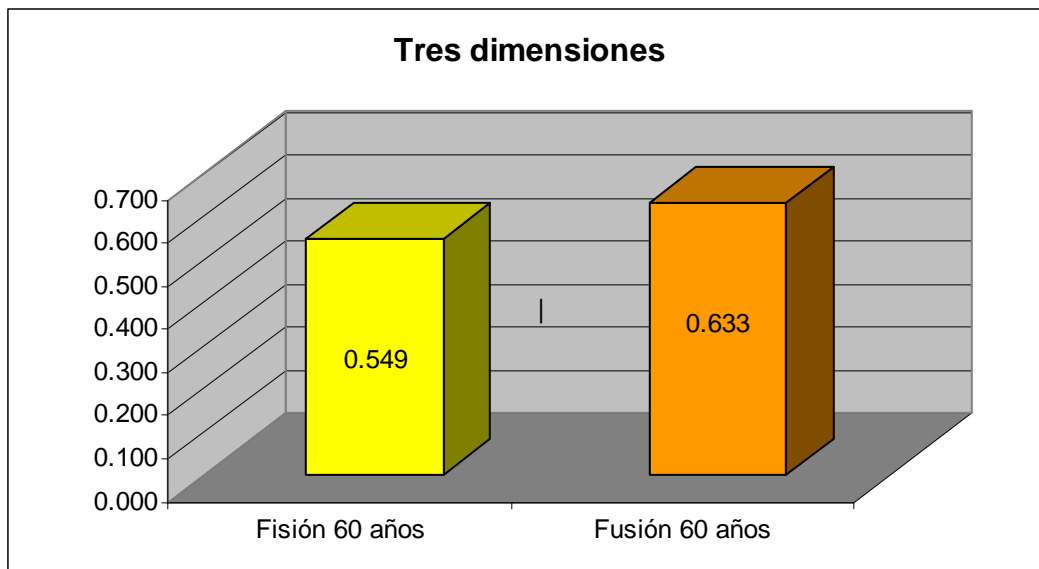


Figura 6.11 Resultados de las tres dimensiones, escenario a 60 años

Por último, para el escenario a 60 años con las tres dimensiones, pero considerando que la económica es la más importante, seguida de la ambiental y la social al final, se tiene que la fisión es medianamente sustentable con un valor de 0.545, por su parte la fusión tiene un valor de 0.600 que se considera con una sustentabilidad media. La fusión nuclear logrará un avance considerable en el aspecto económico, por lo que a diferencia del mediano plazo, la sustentabilidad en 60 años, considerando pesos ponderados en las dimensiones, es mayor para la fusión. (ver Tabla 5.20 y Figura 5.20)

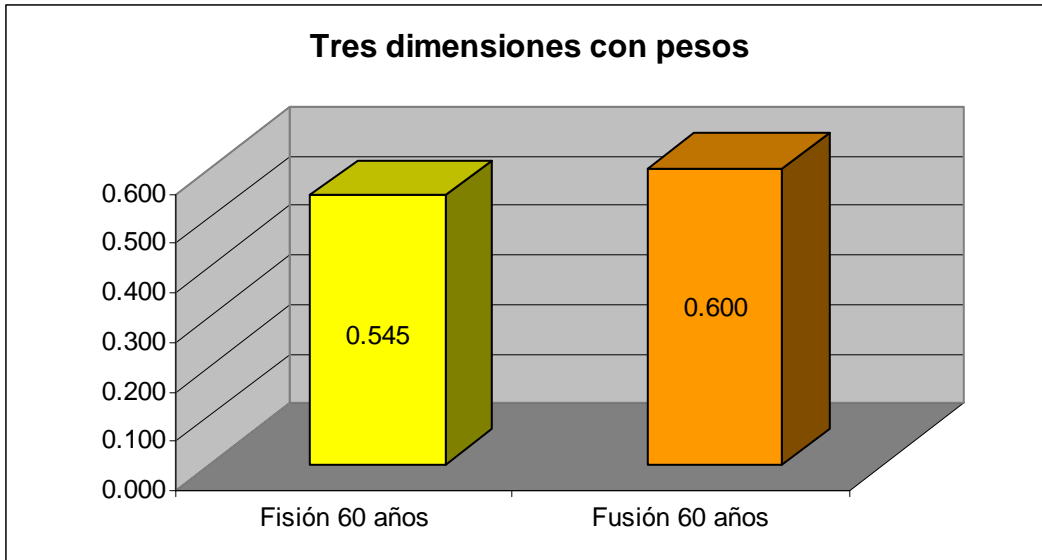


Figura 6.12 Resultados de las tres dimensiones con pesos, escenario a 60 años

Los resultados obtenidos nos llevan a la conclusión general de que en el mediano plazo la tecnología de fisión nuclear será más sustentable que la de la fusión, cuando se considera que la dimensión económica tiene un mayor peso en el análisis, pero en un escenario a 60 años, la situación se habrá invertido. Lo anterior se conseguirá debido al avance de la tecnología de la fusión en el aspecto económico con respecto al escenario a mediano plazo; sin embargo, aún seguirá siendo más sustentable la fisión en este rubro. Además, ambas tecnologías lograrán un avance considerable en cuanto a los aspectos ambiental y social, siendo importante resaltar los avances de la fisión en lo referente a la dimensión social. Ambas tecnologías resultaron ser medianamente sustentables en los dos escenarios, según los resultados del sistema de inferencia difusa.

Los resultados obtenidos difieren en lo siguiente: se esperaba que a mediano plazo la sustentabilidad de la fusión fuera mayor que la de la fisión, esto resultó ser cierto para el caso en el que se consideraron las tres dimensiones del desarrollo sustentable igualmente importantes; sin embargo, para cuando se otorgó mayor peso a la dimensión económica, la fisión resultó ser más sustentable. Para ambas tecnologías en el mediano plazo, se concluyó que serán medianamente sustentables, mientras que se esperaba que fueran altas. En 60 años, se esperaba que ambas tecnologías tuvieran una sustentabilidad alta y que la fusión fuera más sustentable que la fisión; esto último también se obtuvo como resultado, pero a mediano plazo la sustentabilidad de ambas tecnologías fue, como en el caso de 30 años, medianamente sustentable.

Como ya se hizo mención en el punto número 1 de las observaciones de este capítulo, el tema es muy controversial; los mismos expertos llegan a tener opiniones muy distantes. Una posible mejora a la metodología presentada en este trabajo, es llenar la matriz de indicadores de sustentabilidad, con pesos y valores asignados por un conjunto de expertos de acuerdo con su propia percepción del tema, incluso se podrían sugerir otros indicadores que no fueron considerados en el trabajo. Con ellos se podría obtener un valor por estadística o inclusive nuevamente por lógica difusa y serían los que se ingresarían al sistema de inferencia difusa desarrollado en esta tesis. Además también podrían realizarse análisis de sensibilidad para profundizar sobre la implicación del valor asociado a cada indicador sobre la sustentabilidad global de cada opción comparada.

Se cumplió otro de los objetivos de este trabajo, el cual es el de servir como guía o material de apoyo a estudiantes que deseen adentrarse en esta rama de la ciencia y la tecnología. El trabajo dejó claros los conceptos básicos, su origen y sus aplicaciones, principalmente encaminadas a la generación de energía eléctrica; además de dar a conocer la tecnología actual y los grandes retos tecnológicos que aún existen para poder aprovechar al máximo la energía nuclear.

La energía nuclear es sin duda una de las grandes respuestas de la ciencia y la tecnología al problema de la creciente demanda energética, pero es también uno de los campos menos estudiados en nuestro país, aún y cuando el tema es muy relevante y de gran interés en otras partes de nuestro planeta. De su estudio, comprensión y dominio de esta forma de energía, dependerá en gran parte el futuro de la humanidad, entonces si este trabajo logra crear interés o logra motivar a alguna persona, para involucrarse en el estudio de este apasionante campo del conocimiento, se habrá cumplido otro de los objetivos de dicho trabajo; el camino es muy largo y la tarea complicada; y el tiempo apremia.

Bibliografía:

1. La energía nuclear. Obtenido el 7 de enero de 2008 en: <http://www.inin.mx/paraconocer/laenergianuclear.pdf>
2. Energía Nuclear (2007) Obtenido el 25 de enero de 2008 de: http://www.natureduca.com/energ_nuclear_historia1.php
3. Las bombas atómicas de Hiroshima y Nagasaki (2007) Recuperado de: <http://eltamiz.com/2007/07/06/las-bombas-atomicas-de-hiroshima-y-nagasaki/>
4. Nuclear Competitiveness for the Future (2007). Obtenido el 7 de enero de 2007 en: <http://www.world-nuclear.org/why/nucfuture.html>
5. Harald Fritzsch, Michael Helge. El genio del siglo: Albert Einstein. Contacto Nuclear, Diciembre de 2005, no 41, p. 31-34.
6. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine (2005) Obtenido el 16 de enero de 2008. Recuperado de: <http://www.iaea.org/Publications/Booklets/Chernobyl/chernobyl.pdf>
7. Los muertos por Chernóbil superan ya la cifra de 200,000 y se prevén otros 93,000 más por cáncer (2006) Obtenido el 16 de enero de 2008 en: <http://www.greenpeace.org/espana/news/los-muertos-por-chern-bil-supe>
8. Nuclear Power Today (2007) Obtenido el 7 de enero de 2008 en: <http://www.worldnuclear.org/why/nuctoday.html>
9. Nuclear Power in the World Today (Agosto 2007). Obtenido el 7 de enero de 2008 en: <http://www.world-nuclear.org/info/inf01.html>
10. Del Valle Gallegos Edmundo, François Lacouture Juan Luis. Estado actual y futuro en México de la especialidad: Ingeniería Nuclear. III Congreso Anual de la Academia de Ingeniería Palacio de Minería, México, D. F., 2007
11. Ignalina Nuclear Power Plant (2009) Obtenido el 24 de enero de 2009 de: http://www.iae.it/visaginas_en.asp?lang=1&sub=1
12. Nucleoeléctrica Laguna Verde (2007) Recuperado el 6 de febrero de 2008 de: <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoelectlagverde/>
13. Paredes Gutiérrez L. C., Ortiz Magaña J. R. , Delgado Guardado J. L . Aplicaciones nucleares al cuidado de la salud, el ambiente, la industria y la generación de conocimientos. III Congreso Anual de la Academia de Ingeniería Palacio de Minería, México, D. F., 2007

14. ¿Qué es la energía nuclear? (2005) Obtenido el 16 de enero de 2008 de:
<http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/nucleoelectlagverde/queesenergianuclear/>
15. La amenaza nuclear. (2006) Recuperado el 7 de enero de 2008 de:
<http://www.greenpeace.org/mexico/campaigns/energ-a-y-cambio-climatico/la-amenaza-nuclear>
16. Instituto de Tecnología Nuclear Dan Beninson (2004) Panorama de los fenómenos nucleares. Obtenido el 7 de enero de 2008 de:
http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/CAPITULO_1_Difusion/EL_TE_MA_NUCLEAR/Panorama_de_los_fenomenos_nucleares.htm
17. John R. Lamarsh and Anthony J. Baratta
Introduction to Nuclear Engineering
3rd edition
New Jersey
Prentice-Hall, 2001
ISBN 0-201-82498-1
18. Thomas J. Connolly
Fundamentos de ingeniería nuclear
Primera edición
México
Editorial Limusa, 1983
ISBN 968-18-1335-9
19. JANIS 3.0 Software for nuclear data information. Application Java-based nuclear data display program.
20. Raymond Chang Williams
Química
Novena edición
México
Editorial Mc Graw Hill, 2007
ISBN -13 978-0-07-298060-8
21. Sabadell, Miguel Ángel y Vito, Arturo. (2008) "Mundo Radiactivo: La Radiación del Planeta y sus Efectos". *Muy interesante*, Año XXV No. 2. pp. 74-80.
22. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiations Sources (2007) Obtenido el 25 de junio de 2008 de:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/SS-115-Web/Pub996_web-1a.pdf

23. José Raúl Ortiz Magaña. (2006) Reservas de Uranio y los factores económicos para su transformación en electricidad. Obtenido el 15 de abril de 2008 de:
<http://omega2.inin.mx/publicaciones/documentospdf/44%20URANIO.pdf>
24. Isabel Domínguez Trejo, Nora Alejandra Hernández Barroso, Gloria Arango Solano, Jacobo Medina Gutiérrez (2006) Yacimientos de uranio en México. Recuperado el 15 de abril de 2008 de:
http://smm.iim.umich.mx/12_Dominguez_U.pdf
25. John Holdren y Matthew Bunn (2002) Types of Nuclear Bombs, and the Difficulty of Making Them. Recuperado el 30 de octubre de 2008 de:
http://www.nti.org/e_research/cnwm/overview/technical2.asp
26. INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE (2007) Evaluation of nuclear criticality safety data and limits for actinides in transport. Obtenido el 31 de octubre de 2008 de:
http://ec.europa.eu/energy/nuclear/transport/doc/irsn_sect03_146.pdf
27. Comisión Federal de Electricidad (2007) Laguna Verde, nucleoelectrica. Recuperado el 17 de abril de 2008 de:
<http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/generacionelectricidad/visitasvirtuales/lagunaverdenucleoelectrica/>
28. CANDU Owners Group Inc. How and Why is CANDU designed the way it is (2003) Recuperado el 29 de octubre de 2008 de:
<http://canteach.candu.org/library/20000101.pdf>
29. Foro de la Industria Nuclear Española. Centrales Nucleares Avanzadas (2003) Obtenido el 29 de octubre de 2008 de:
http://www.foronuclear.org/detalle_articulo_nucleo.jsp?id=10
30. Comisión Nacional de Energía Atómica. Ciclo de combustible nuclear (2005) Recuperado el 30 de octubre de 2008 de:
http://caebis.cnea.gov.ar/IdEN/CONOC_LA_ENERGIA_NUC/CAPITULO_6_Difusion/CICLO_COMB_NUCL/Ciclo_combustible.htm
31. Tsuji, A. Endoh, Y. Asada, "Completion of ABWR Plant, Kashiwazaky-Karima Nuclear Power Station Unit; Nos. 6 and 7"; Hitachi Review; Vol. 47, No. 5, p. 5 (1998)
http://www.hitachi.com/rev/1998/revoct98/r4_101.pdf.
32. United States Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology and Nuclear Energy Research Advisory Committee, "A Roadmap to Deploy New Nuclear Power Plants in the United States by 2010", Near Term Deployment Roadmap, Volume II, p.107, 212, 233 (2001)

33. Nuclear Energy Agency, "Reduction of Capital Cost of Nuclear Power Plants; Organization for Economic Co-Operation and Development. General Electric, "ESBWR", Technology Fact Sheet, p. 1-3.
34. Framatome ANP Tour AREVA, "The EPR, a strategic choice", AREVA, (2005)
<http://www.framatome-anp.com>
35. R. Mayson, "Reactor developments the AP-1000", Nuclear Congress 2003,
<http://www.bnes.com/Events/Past/2003-06-19-Visions2003/Mayson.pdf>
36. Pebble Bed Reactor Technology; Future Pebble Bed Reactor Technology PBMR Development Eskom Holdings Limited Reg No 2002/015527/06.
37. Uranium Information Centre A.B.N., "Advanced Nuclear Power Reactors, Nuclear Issues Briefing", Paper 16, HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTORS, PBMR,
[http://www.uic.com.au/nip16.htm.\(2005\)](http://www.uic.com.au/nip16.htm.(2005))
38. S. Thomas, "The Economic Impact of the Proposed Demonstration Plant for the Pebble Bed Modular Reactor Design", *Public Service International Research Unit University of Greenwich UK*, (2005)
39. Julio Herrera Velázquez. La Fusión Nuclear como Opción Energética para el siglo XXI. Boletín de la Sociedad Mexicana de Física, 2007, No. 21, Año 2 , Pag. 83-93
40. Jorge Flores Valdés, Arturo Menchaca Rocha (1991) La Gran Ilusión 4. La Fusión Fría. Obtenido el 19 de agosto de 2008 de:
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/110/htm/lagran4.htm>
41. Julio Martinell Benito (2006) Los prometeos modernos o el esfuerzo por controlar la fusión nuclear. Recuperado el 17 de agosto de 2008 de:
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/106/htm/prometeo.htm>
42. "Fusion and Plasma Physics" (2007) Obetnida el 25 de enero de 2009 de:
<http://www.tkk.fi/Units/AES/fusion.htm>
43. The ITER Device, Research and Development (2007) Recuperado el 7 de junio de 2008 de:
http://www.iter.org/a/index_nav_4.htm
44. Magnetic plasma confinement - the Tokamak. Recuperado el 5 de octubre de 2008 en:
<http://www.jet.efda.org/pages/fusion-basics/fusion3.html>
45. La Fusión Nuclear (2007) Obtenido el 24 de agosto de 2008 de:
<http://www.inin.mx/paraconocer/fusionnuclear.cfm>
46. R.J. Goldstone (2008) *An Experiment to Tame the Plasma Material Interface*. Princeton Plasma Physics Laboratory. Princeton NJ.

47. World Commission on Environment and Development (WECD) Our Common Future. New York Oxford. 1987
48. L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets". Information and Control (1965). Pag. 8, 338-353.
49. Fuzzy Logic Toolbox User's Guide for use with MATLAB © Copyright 1995-2004 The MathWorks, Inc. Version 2.1