



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

JUSTIFICACIÓN TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DE LA INCLUSIÓN DE
MÉXICO EN EL DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA ENERGÍA DE FUSIÓN
NUCLEAR Y PROPUESTA DE PROGRAMA NACIONAL DE FUSIÓN NUCLEAR

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JOSÉ LUIS DE LA MATA MORALES

TUTOR PRINCIPAL
DR. JUAN LUIS FRANCOIS LACOUTURE, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. ABRIL 2013

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Julio E. Herrera Velazquez
Secretario: Dr. Juan Luis Francois Lacouture
Vocal: Dra. Cecilia Martín Del Campo Marquez
1 er. Suplente: Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo
2 d o. Suplente: M.C. Alejandro Tellez Bastida

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Juan Luis Francois Lacouture

FIRMA

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme creado con un amor personal,
a mi esposa Alma por ser el regalo más maravilloso de mi vida y por su amor y
apoyo incondicional,
a mis padres Isabel y José Luis a quien les debo todo lo que hoy soy,
a mi hermano Carlos por ser mi compañero en mis primeros años,
a mis jefes en CFE Marco, Alejandro, Jorge y Salvador por darme la oportunidad
de continuar aprendiendo,
a mis maestros en la UNAM, en especial a mi Tutor de Tesis, el Dr. Juan Luis por
su paciencia, orientación y apoyo y al Dr. Julio por sus buenos consejos,
a todos mis maestros en las diferentes etapas de mi formación académica y
profesional,
y a todos mis amigos, sin cuyo apoyo y cariño la vida sería menos emocionante.

Índice general

	Pag.
Índice de figuras	10
Índice de cuadros	14
Acrónimos y abreviaturas	16
Resumen	21
Introducción	22
Capítulo 1. La situación actual de los recursos energéticos en México	26
1. La situación actual de los recursos energéticos en México	27
1.1. Aspectos generales	27
1.2. Contexto energético mundial	28
1.3. Indicadores nacionales de energía	30
1.3.1. Consumo de energía per cápita	30
1.3.2. Oferta y demanda de energía	30
1.4. Matriz y diagramas del Balance Nacional de Energía	35
1.5. Principales retos en México del sector energético en la actualidad	40
1.5.1. Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026 planteada por la SENER.....	40
1.5.1.1. Objetivos de la Estrategia Nacional de Energía 2012 - 2026	41
1.5.1.1.1. Restituir reservas, incrementar la producción de crudo y la de gas natural	41
1.5.1.1.2. Diversificar las fuentes de energía, dando prioridad al incremento en la participación de las tecnologías no fósiles	43
1.5.1.1.3. Incrementar los niveles de eficiencia en el consumo de energía de todos los sectores.....	44
1.5.1.1.4. Reducir el impacto ambiental del sector energético	46
1.5.1.1.5. Operar de forma eficiente, confiable y segura la infraestructura energética.....	48
1.5.1.1.6. Fortalecer y modernizar la infraestructura del sector energético	51
1.5.1.1.7. Impulsar el desarrollo de la industria petroquímica nacional	52
1.6. Conclusiones del Capítulo 1	54

Capítulo 2. Análisis del requerimiento de energía en México en el mediano y largo plazo y factores prioritarios para su planeación.....	55
2.1. Necesidades de energía en el mediano y largo plazo en México	56
2.1.1. Requerimientos de energía en México para el periodo 2011-2026	57
2.1.2. Requerimientos de energía en México para el periodo 2026 - 2100.....	60
2.2. Factores que deben tomarse en cuenta para cubrir las necesidades energéticas en el mediano y largo plazo.....	63
2.2.1. Alta dependencia nacional energética y económica de los hidrocarburos	64
2.2.2. Declinación de la producción de petróleo crudo y declinación de las reservas	65
2.2.3. Declinación de las reservas del gas natural y la Inestabilidad de sus precios	71
2.2.4. Limitantes técnicas y económicas de las energías renovables.....	74
2.2.5. Necesidades ambientales de México y el mundo en la generación de energía	77
2.2.5.1. Situación actual de México en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI)	78
2.2.5.2. Proyección de las emisiones de CO ₂ de la industria eléctrica mexicana a mediano y largo plazo	81
2.3. Conclusiones del Capítulo 2	87
Capítulo 3. La energía nuclear de fusión.....	88
3.1. Introducción a la energía nuclear de fusión	89
3.2. Principios físicos de la energía nuclear de fusión	89
3.2.1. Ciclo de combustible de la tecnología de fusión nuclear	91
3.3. Tecnología de la energía nuclear de fusión.....	93
3.3.1. Parámetros técnicos para obtener reacciones nucleares de fusión.....	93
3.3.2. Desarrollos tecnológicos para lograr reacciones de fusión nuclear	97
3.3.2.1. El confinamiento magnético.....	98
3.3.2.1.1. El Tokamak.....	100
3.3.2.1.2. El Stellarator	102
3.3.2.2. El confinamiento inercial.....	104
3.3.3. La central nuclear de fusión	107

3.3.3.1. Configuración de una planta de fusión nuclear	107
3.3.3.2. Operación de una central nuclear de fusión.....	109
3.4. Antecedentes históricos de la tecnología de fusión nuclear.....	110
3.4.1. Los primeros pasos del confinamiento magnético.....	110
3.4.2. El surgimiento del Stellarator	111
3.4.3. Desarrollo del confinamiento en el mundo	112
3.4.4. El desarrollo del confinamiento toroidal.....	114
3.4.5. Hacia los grandes Tokamaks.....	117
3.4.6. Investigación en grandes Tokamaks: El JET, el TFTR y el JT-60	118
3.4.7. En busca de la operación con Tritio	124
3.5. Proyección actual de la tecnología de fusión nuclear	125
3.5.1. El experimento Tokamak ITER	127
3.5.1.1. Descripción del ITER.....	128
3.5.1.2. Componentes del ITER	130
3.5.1.3. Ciclo de combustible en el ITER.....	136
3.5.1.4. Operación del ITER.....	138
3.5.1.5. Sistemas de seguridad del ITER	139
3.6. Proyección futura de la tecnología de fusión nuclear.....	143
3.7. Principales ventajas y desventajas de la energía nuclear de fusión.....	143
3.7.1. Principales ventajas de la energía nuclear de fusión.....	143
3.7.2. Principales desventajas de la energía nuclear de fusión	146
3.8. Conclusiones del Capítulo 3.....	147
Capítulo 4. La energía nuclear de fusión como una opción viable para México	148
4.1. Características necesarias en las fuentes de energía en el largo plazo.....	150
4.2. Fuentes de energía que cumplen con las características necesarias	150
4.3. La energía nuclear como opción para cubrir las necesidades energéticas nacionales.....	153
4.3.1. Las ventajas de la energía de fisión nuclear en su aplicación futura en México	153

4.3.1.1. El reto de los residuos radiactivos nucleares	155
4.3.2. Las ventajas de la energía de fusión nuclear en su aplicación futura en México	158
4.4. Conclusiones del Capítulo 4	162
Capítulo 5. Acercamiento general a políticas actuales de energía nuclear de fusión en países con características técnicas, económicas y sociales similares a México	163
5.1. Países seleccionados para su análisis	164
5.2. Desarrollo científico y técnico de la energía nuclear de fusión en Brasil	168
5.2.1. Antecedentes de la energía nuclear de fusión en Brasil.....	168
5.2.2. Actualidad de la energía nuclear de fusión en Brasil.....	168
5.2.2.1. El Tokamak TBR-1 de Brasil	169
5.2.2.2. El Tokamak TCA-BR de Brasil.....	170
5.2.2.3. El Tokamak ETE de Brasil.....	172
5.3. Desarrollo científico y técnico de la energía nuclear de fusión en China	173
5.3.1. Antecedentes de la energía nuclear de fusión en China	173
5.3.2. Actualidad de la energía nuclear de fusión en China	174
5.3.2.1. El Tokamak superconductor EAST de China	174
5.3.2.2. Fusión-Fisión en China.....	177
5.3.2.3. China en el ITER	177
5.3.2.4. Reactor HCSB-DEMO de China.....	178
5.4. Desarrollo científico y técnico de la energía nuclear de fusión en India	179
5.4.1. Antecedentes de la energía nuclear de fusión en India.....	179
5.4.2. Actualidad de la energía nuclear de fusión en India.....	180
5.4.2.1. El Tokamak SINP de India.....	180
5.4.2.2. El Tokamak ADITYA de India	180
5.4.2.3. El Tokamak SST-1 de India.....	181
5.4.2.4. India en el ITER.....	185
5.5. Conclusiones del Capítulo 5	186
Capítulo 6. El desarrollo de la energía nuclear de fusión en México	187

6.1. Antecedentes históricos del desarrollo de la energía nuclear de fusión en México	188
6.1.1. El Tokamak Novillo de México	188
6.2. Actualidad del desarrollo de la energía nuclear de fusión en México	194
6.2.1. El Laboratorio de Física de Plasmas del ININ	194
6.2.2. El Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)	198
6.2.3. Symposium: “Hacia un programa mexicano de fusión”, México 2007	200
6.2.4. El Tokamak “T” desarrollado por la UANL	201
6.3. Conclusiones del Capítulo 6	206
Capítulo 7. Propuesta de Plan Nacional de Fusión Nuclear (PLANAFUN)	207
7.1. Objetivos generales del PLANAFUN	208
7.2. Vías Conservadora y Ambiciosa del PLANAFUN	209
7.2.1. Vía Conservadora del PLANAFUN	209
7.2.1.1. Objetivos específicos de la Vía Conservadora del PLANAFUN	209
7.2.1.2. Líneas de acción de la Vía Conservadora del PLANAFUN	209
7.2.1.2.1. Líneas de acción en Investigación de la Vía Conservadora del PLANAFUN	210
7.2.1.2.2. Líneas de acción en Infraestructura de la Vía Conservadora del PLANAFUN	212
7.2.1.2.3. Líneas de acción en Capacitación de la Vía Conservadora del PLANAFUN	212
7.2.1.2.4. Líneas de acción en Financiamiento de la Vía Conservadora del PLANAFUN	213
7.2.2. Vía Ambiciosa del PLANAFUN	216
7.2.2.1. Objetivos específicos de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN	216
7.2.2.2. Líneas de acción de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN	216
7.2.2.2.1. Líneas de acción en Investigación de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN	216
7.2.2.2.2. Líneas de acción en Infraestructura de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN	218

7.2.2.2.3. Líneas de acción en Capacitación de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN	219
7.2.2.2.4. Líneas de acción en Financiamiento de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN	219
7.3. Conclusiones del Capítulo 7	221
Conclusiones generales.....	222
Bibliografía.....	226

Índice de figuras

	Pag.
Capítulo 1. La situación actual de los recursos energéticos en México	
Figura 1.1.	Producción mundial de energía primaria 2009, 12,291.7 Mtep..... 28
Figura 1.2.	Oferta total mundial de energía 2009, 12,149.8 Mtep..... 29
Figura 1.3.	Consumo mundial de energía por energético 2009, 8,352.8 Mtep..... 29
Figura 1.4.	Indicadores Energéticos a nivel mundial 2009..... 30
Figura 1.5.	Consumo de energía per cápita (GJ por habitante)..... 30
Figura 1.6.	Estructura de la producción de energía primaria 2010, 9,250.7 PJ..... 31
Figura 1.7.	Oferta interna bruta por tipo de energético 2010, 8,151.9 PJ..... 33
Figura 1.8.	Estructura del consumo final total por tipo de energético 2010..... 34
Figura 1.9.	Consumo final energético por sector y energético 2010..... 35
Figura 1.10.	Estructura del Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules)..... 36
Figura 1.11.	Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules)..... 37
Figura 1.12.	Reservas probadas, probables y posibles de hidrocarburos en México..... 41
Figura 1.13.	Producción de hidrocarburos en los últimos años en México..... 42
Figura 1.14.	Composición de la matriz energética nacional..... 43
Figura 1.15.	Generación bruta del Sistema Eléctrico Nacional..... 44
Figura 1.16.	Intensidad energética y consumo total de energía per cápita..... 45
Figura 1.17.	Curva de costos de oportunidad de ahorro en consumo final de energía..... 46
Figura 1.18.	Emisiones de CO ₂ en México..... 47
Figura 1.19.	Aprovechamiento, quema y venteo de gas..... 47
Figura 1.20.	Consumo de agua en el sector energético..... 48
Figura 1.21.	Indicadores Operativos del Sector Energético nacional (1)..... 49
Figura 1.22.	Indicadores Operativos del Sector Energético nacional (2)..... 50
Figura 1.23.	Red actual de ductos y centros procesadores de gas..... 51
Figura 1.24.	Producción del SNR VS demanda interna..... 52
Figura 1.25.	Balanza comercial de productos petroquímicos y de origen petroquímico... 53
Capítulo 2. Análisis del requerimiento de energía en México en el mediano y largo plazo y factores prioritarios para su planeación	
Figura 2.1.	Margen de reserva y margen de reserva operativo de capacidad..... 58
Figura 2.2.	Participación de la capacidad de generación del Sistema eléctrico..... 59
Figura 2.3.	Capacidad bruta por tipo de combustible del Sistema eléctrico..... 60
Figura 2.4.	Evolución de la demanda máxima bruta de energía para el periodo 2026-2100 con una tasa media anual de crecimiento de 3.4%..... 61
Figura 2.5.	Participación proyectada de las tecnologías de generación a base de combustibles fósiles en el año 2100, de conservarse la participación del año 2026..... 63
Figura 2.6.	Producción de energía primaria en México 1965-2005..... 65

Figura 2.7.	Producción de hidrocarburos internacionales proyectadas hasta 2050.....	66
Figura 2.8.	Evolución del precio del petróleo en dólares por barril de 2001 a 2006.....	67
Figura 2.9.	Producción de petróleo por región y activos integrales.....	68
Figura 2.10.	Producción de Cantarel 2000 – marzo de 2010 (estimado a partir de marzo de 2007).....	68
Figura 2.11.	Años de vida de las reservas totales de hidrocarburos con base en las tasas actuales de explotación 1980 – 2007.....	69
Figura 2.12.	Reservas probadas, probables y posibles (3P) de hidrocarburos en México, 1955-2007.....	70
Figura 2.13.	Reservas probadas de hidrocarburos en México 2003 – 2007.....	70
Figura 2.14.	Composición de las reservas probadas por tipo de crudo 1998 – 2007.....	71
Figura 2.15.	Participación de la capacidad de generación en los años 2010 y 2026, Sistema eléctrico.....	72
Figura 2.16.	Reservas probadas, probables y posibles (3P) de gas natural en México, periodo 2001 – 2007.....	73
Figura 2.17.	Precio histórico promedio del gas natural en Henry Hub 1994 – 2007.....	73
Figura 2.18.	Costo Unitario de Generación por tecnología en México.....	76
Figura 2.19.	Costo Unitario de Inversión por tecnología en México.....	77
Figura 2.20.	Diagrama del total de emisiones (709,005.3 Gg de CO ₂ equivalente) en 2006 en México.....	80
Figura 2.21.	Emisiones anuales proyectadas de CO ₂ por generación de energía eléctrica para el periodo 2010-2100.....	86

Capítulo 3. La energía nuclear de fusión

Figura 3.1.	Energía de enlace por nucleón en función del número másico.....	90
Figura 3.2.	Reacciones de fusión Deuterio – Tritio.....	90
Figura 3.3.	Plasma en el experimento START.....	94
Figura 3.4.	Tasa de reacción para las principales reacciones de fusión en función de la temperatura maxweliana del gas.....	95
Figura 3.5.	Valores del producto de la densidad del plasma n por el tiempo que permanece confinada su energía t_E , necesarios para el emparejamiento de pérdidas y ganancias y para el encendido, ambos en función de la temperatura del plasma.....	97
Figura 3.6.	Comportamiento de iones en presencia de un campo magnético.....	99
Figura 3.7.	Componentes esenciales y funcionamiento de un Tokamak.....	100
Figura 3.8.	Formación del campo magnético helicoidal en un Tokamak.....	101
Figura 3.9.	Esquema de un Stellarator.....	103
Figura 3.10.	Los tres tipos de Stellarators: a) Torsatron: ATF; b) Modular: W7-AS; c) Heliac: TJ-II.....	103
Figura 3.11.	Cápsula de combustible para fusión inercial.....	104
Figura 3.12.	Proceso de evolución de una esfera de combustible para confinamiento inercial.....	105
Figura 3.13.	Dos tipos de impulsión de los blancos en la fusión inercial: directa e indirecta.....	107
Figura 3.14.	Esquema del funcionamiento de una central de fusión.....	108

Figura 3.15.	Diagrama esquemático de uno de los primeros dispositivos toroidales: el Pinch toroidal.....	111
Figura 3.16.	Esquema básico de un Stellarator	112
Figura 3.17.	Esquema de tres diferentes configuraciones magnéticas lineales consideradas para el confinamiento del plasma caliente.....	113
Figura 3.18.	Experimento Zeta.....	115
Figura 3.19.	El primer dispositivo Tokamak en el mundo: El ruso T1 en el Instituto Kurchatov en Moscú.....	116
Figura 3.20.	Emisión de luz de plasma de la región del divertor en el Tokamak ASDEX-U en Munich, Alemania.....	118
Figura 3.21.	Un corte del modelo de Tokamak JET, mostrando el transformador, las bobinas del campo magnético y el recipiente al vacío en el cual se forma el plasma.....	119
Figura 3.22.	Una vista dentro del JET tomada en 1996	120
Figura 3.23.	Comparación de los tres Tokamaks más grandes construidos en los años 70's del siglo pasado: a) TFTR en Princeton, USA, b) JT-60U en Naka, Japón, c) JET en Culham, Reino Unido.....	121
Figura 3.24.	Esquema de un divertor en un Tokamak en la parte inferior de la maquina..	123
Figura 3.25.	Progreso de la fusión nuclear por confinamiento magnético en el Criterio de Lawson en los últimos años.....	125
Figura 3.26.	Componentes del Tokamak IGNITOR en su fase de diseño.....	126
Figura 3.27.	Vista tridimensional del ITER y sus componentes.....	129
Figura 3.28.	Componentes más importantes del ITER.....	131
Figura 3.29.	Configuración del reactor y edificios del ITER.....	135
Figura 3.30.	Diagrama de bloques del ciclo de combustible del ITER.....	137
Figura 3.31.	Actividad relativa calculada de algunos materiales constituyentes de plantas de fusión, como una función del tiempo, partiendo del fin de su operación.....	145
Figura 3.32.	Comparación de la declinación de la radiotoxicidad relativa proveniente de los residuos de varias fuentes de energía.....	146

Capítulo 4. La energía nuclear de fusión como una opción viable para México

Figura 4.1.	Participación de la capacidad de generación 2010, Sistema eléctrico.....	151
Figura 4.2.	Esquema de una planta piloto de aislamiento de residuos radiactivos en los Estados Unidos de América.....	157
Figura 4.3.	Comparación de la declinación de la radiotoxicidad relativa proveniente de los residuos de varias fuentes de energía.....	161

Capítulo 5. Acercamiento general a políticas actuales de energía nuclear de fusión en países con características técnicas, económicas y sociales similares a México

Figura 5.1.	Comparación internacional de PIB per cápita e IDH, 2006.....	165
Figura 5.2.	PIB per Cápita e Índice de desarrollo humano de países en desarrollo.....	167
Figura 5.3	Vista del Tokamak TBR-1 de Brasil.....	169
Figura 5.4	Vista del Tokamak TCA-BR de Brasil.....	171
Figura 5.5.	Visión artística del Tokamak ETE de Brasil.....	172

Figura 5.6.	Tokamak Superconductor Avanzado Experimental (EAST) de China.....	175
Figura 5.7.	Vista del Tokamak SINP de India.....	180
Figura 5.8.	Vista del Tokamak ADITYA de India.....	181
Figura 5.9.	Vista del SST-1 de India.....	182
Figura 5.10.	Bobina de campo toroidal y cámara de vacío del SST-1, India.....	183

Capítulo 6. El desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

Figura 6.1.	Vista lateral del Tokamak Novillo, ININ, México.....	190
Figura 6.2.	Vista superior del Tokamak Novillo, ININ, México.....	191
Figura 6.3.	Cámara para plasmas de Radio Frecuencia.....	194
Figura 6.4.	Cámara cilíndrica del equipo para la implantación de iones por plasma.....	195
Figura 6.5.	Dispositivo experimental utilizado en la eliminación de SO ₂ y H ₂ S.....	196
Figura 6.6.	Cauterización por plasma.....	197
Figura 6.7.	Dispositivo Plasma Focus llamado Fuego Nuevo II instalado en el Laboratorio de Física de Plasmas del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM.....	199
Figura 6.8.	Vista esquemática en 3D del Tokamak "T", México (en proyecto).....	202
Figura 6.9.	Dos vistas esquemáticas 3D de la cámara de vacío del Tokamak "T", México (en proyecto).....	203
Figura 6.10.	Vista isométrica del inyector neumático de cápsulas de hidrógeno congelado con ángulo seleccionable (SICIAV) (en proyecto).....	205

Índice de cuadros

	Pag.
Capítulo 1. La situación actual de los recursos energéticos en México	
Cuadro 1.1. Insumos de energía primaria en centros de transformación (petajoules).....	31
Cuadro 1.2. Entrada de energía primaria a centros de transformación por fuente (petajoules).....	32
Cuadro 1.3. Matriz del Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules).....	38
Capítulo 2. Análisis del requerimiento de energía en México en el mediano y largo plazo y factores prioritarios para su planeación	
Cuadro 2.1. Comparación de tmca del PIB y de la demanda bruta de energía para los periodos 2011 – 2026 y 2026 – 2100.....	61
Cuadro 2.2. Capacidad de generación eléctrica proyectada con combustibles fósiles por tipo de tecnología 2010 – 2100.....	82
Cuadro 2.3. Capacidad de generación eléctrica proyectada con combustibles fósiles por tipo de combustible 2010 – 2100.....	82
Cuadro 2.4. Composición química típica de gas natural para proyectos termoelectricos de la CFE.....	84
Cuadro 2.5. Eficiencia promedio estimada de la infraestructura de generación por combustibles fósiles.....	85
Cuadro 2.6. Emisiones anuales proyectadas de CO ₂ por generación eléctrica en México por combustibles fósiles 2010 – 2100.....	85
Capítulo 3. La energía nuclear de fusión	
Cuadro 3.1. Principales parámetros técnicos de los tres grandes Tokamaks construidos en los años 70's del siglo pasado.....	121
Cuadro 3.2. Principales parámetros técnicos del Tokamak ITER.....	130
Capítulo 4. La energía nuclear de fusión como una opción viable para México	
Cuadro 4.1. Reservas estimadas de combustibles de fusión nuclear.....	159
Cuadro 4.2. Consumo de combustible para diferentes fuentes de energía.....	160
Capítulo 5. Acercamiento general a políticas actuales de energía nuclear de fusión en países con características técnicas, económicas y sociales similares a México	
Cuadro 5.1. Parámetros técnicos principales del Tokamak TBR-1 en Brasil.....	170
Cuadro 5.2. Parámetros técnicos principales del Tokamak TCA-BR en Brasil.....	171
Cuadro 5.3. Parámetros técnicos principales del Tokamak ETE en Brasil.....	173
Cuadro 5.4. Parámetros técnicos principales del EAST en China.....	176
Cuadro 5.5. Principales parámetros técnicos de los Tokamaks en operación en India....	184

Capítulo 6. El desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

Cuadro 6.1.	Principales parámetros técnicos del Tokamak Novillo.....	192
Cuadro 6.2.	Parámetros técnicos principales del Tokamak “T” (en proyecto).....	204

Acrónimos y abreviaturas

^2D	Deuterio
3P	Reservas probadas, probables y posibles
^3T	Tritio
A	Amperes
a	Radio menor de Tokamak
ABWR	Advanced Boiling Water Reactor
AEREN	Asociación para el estudio de los recursos energéticos
a_p	Radio menor de plasma de Tokamak
ASIPP	Academia China de Ciencias
ATG	Aceite terciario del Golfo
a_v	Radio Menor de cámara de Tokamak
B_o	Campo magnético toroidal de Tokamak
B_p	Campo magnético poloidal de Tokamak
BTU	British Thermal Unit
BUAP	Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
C	Carbono
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
CCFE	Centro Culham para la Fusión Nuclear, UK
CEC	Compañía eléctrica de Chapala
CEN	Centro de Estudios Nucleares, UNAM
CFCs	Clorofluorocarbonos
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CIAE	Instituto Chino de Energía Atómica
CIEMAT	Laboratorio Nacional de Fusión
CIIF	Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión
CN	Capacidad neta
CNSNS	Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Bióxido de carbono
CO ₂ e	CO ₂ equivalente
CONAPO	Consejo Nacional de Población
CPD	Centro de Procesamiento de Datos
CTM	Confederación de Trabajadores de México
CTUN	Consumo térmico unitario neto
D ₂ O	Agua pesada
DENIM	Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid
EAST	Tokamak Superconductor Avanzado Experimental
ECO ₂	Emisiones al año de CO ₂

ECRH	resonancia de electrones de ciclotrón
EGS	Tecnologías de sistemas geotérmicos mejorados
ETE	Experimento Tokamak Esférico
EUA	Estados Unidos de América
EURATOM	Comunidad Europea de la Energía Atómica
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FIME	Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
FP	Factor de planta
g	Gramos
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg	Gigagramos
GJ	Gigajoules
Gton	Gigatoneladas
GW	Gigawatts
H ₂	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
HCSB	Sistema de enfriamiento sólido
He	Helio
HFCs	Hidrofluorocarburos
IAEA	Agencia Internacional de Energía Atómica
ICN	Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
ICPR	Conferencia Internacional en Reconocimiento de Patrones
ICRH	Resonancia de iones de ciclotrón
IDH	Índice de Desarrollo Humano
IEO	International Energy Outlook
IGCC	Integrated gasification combined cycle
IIE	Instituto de Investigaciones Eléctricas
IMF	Instituto de Física Moderna
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ININ	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
I _p	Corriente de plasma de Tokamak
IPN	Instituto Politécnico Nacional
IPR	Instituto de Investigación de Plasma, India
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JAEA	Agencia Japonesa de Energía Atómica
JAERI	Instituto Japonés de Investigación en energía nuclear
JET	Joint European Torus
JIA	Joint ITER Agreement

K	Kelvin
kA	Kiloamperes
keV	Kiloelectron-volts
kJ	Kilojoule
kW	Kilowatts
kWh	Kilowatt-hora
LAP	Laboratório Associado de Plasma
LFC	Compañía de Luz y Fuerza del Centro
LHCD	Conducción de corriente híbrida baja
Li	Litio
LSPEE	Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica
M	Mega
m ³	Metro cúbico
Mbd	Miles de barriles diarios
MeV	Megaelectron-volts
MLP	Compañía Mexicana de Luz y Fuerza
MMb	Millones de barriles
MMMbpce	Miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente
MMMpc	Miles de millones de pies cúbicos
MMpcd	Millones de pies cúbicos diarios
MPa	Megapascales
MR	Margen de reserva
ms	Milisegundos
Mtep	Mega toneladas equivalentes de petróleo
MW	Megawatts
MWh	Megawatts - hora
n	Densidad de partículas
NBI	Inyección de átomos neutros energéticos
n _e	Densidad electrónica de Tokamak
NGL	Nueva Generación Limpia
NIFS	Instituto Nacional de Ciencia de Fusión
O ₂	Oxígeno
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico
OH	Calentamiento Ohmico
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
Pa	Pascales
PCI	Poder calorífico inferior
PEMEX	Petróleos Mexicanos
P _F	Potencia de fusión
PFCs	perfluorocarbonos

PIB	Producto Interno Bruto
PIE	Productor Independiente de Energía
PJ	Petajoules
PLANAFUN	Plan Nacional de Fusión Nuclear (propuesta)
PLT	Princeton Large Torus
POISE	Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico
PPPL	Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton
P_R	Potencia de radiación
PROMEP	Programa para el Mejoramiento del Profesorado
P_α	Potencia de partículas alfa
Q	Energía generada entre energía absorbida
q	Factor de seguridad de Tokamak
RCO_2	Relación de masa de CO_2 emitido por masa de combustible quemado
RM	Repotenciación y modernización
R_o	Radio mayor de Tokamak
s	Segundos
SCJN	Suprema Corte de Justicia de la Nación
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SENER	Secretaría de Energía
SEP	Secretaría de Educación Pública
SFs	Sulfurfluors
SICIAV	Inyector neumático de cápsulas de hidrógeno congelado con ángulo seleccionable
SIN	Sistema Interconectado Nacional
SNG	Sistema Nacional de Gasoductos
SNR	Sistema Nacional de Refinación
SST-1	Tokamak superconductor de operación estable, India
Sv	Sievert
SWINPC	Instituto de Física Nuclear y Química del Suroeste, China
SWIP	Instituto de Física del Suroeste
T	Temperatura en unidades de energía
T	Teslas
t_E	Tiempo de confinamiento de energía
T_e	Temperatura electrónica de Tokamak
TFTR	Tokamak Fusión Test Reactor
$TgCO_2$	Teragramos de CO_2
T_i	Temperatura iónica de Tokamak
TIU	Tiempo de interrupción por usuario sin afectaciones
TLCAN	Tratado de Libre Comercio de América del Norte
tmca	Tasa media de crecimiento anual

Tokamak	Toroidalnaya kamera magnitnaya katushka
torr	Torricelli o milímetros de mercurio
TW	Terawatts
TWh	Terawatt-hora
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UDG	Universidad de Guadalajara
UGTO	Universidad de Guanajuato
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority
uma	Unidades de masa atómica
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USCUSS	Uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura
USD	Dólares estadounidenses
WEO	World Energy Outlook
δ	Triangularidad de Tokamak
ϵ	Eficiencia de la conversión de energía captada a energía útil
κ	Elongación de Tokamak
ηSv	Microsieverts

Resumen

México actualmente cubre la mayor parte de sus requerimientos energéticos mediante combustibles fósiles; sin embargo, datos actuales indican que sus reservas disminuirán aceleradamente en los próximos años a nivel mundial y que sus precios subirán y serán cada vez menos competitivos. Adicionalmente, las tecnologías que cubran los requerimientos energéticos nacionales en el largo plazo deberán limitar sus emisiones de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global y, por lo tanto, de grandes costos futuros, económicos y sociales, a nivel mundial.

En el presente trabajo se analiza detalladamente la energía nuclear de fusión que podría ser una opción para cubrir los requerimientos energéticos a largo plazo. Esta fuente de energía tendría ventajas muy importantes como: grandes reservas de sus combustibles, capacidad de generar electricidad a gran escala, no requerir combustibles fósiles y, por lo mismo, no liberar gases de efecto invernadero, no generar residuos radiactivos de vida media larga y la inexistencia de riesgo de accidentes nucleares. Aunque esto es prometedor, aún no es técnicamente viable generar electricidad mediante esta fuente de energía y no lo será por muchas décadas más.

Por otro lado, analizando las fuentes de energía conocidas actualmente en México, se concluye que la única que cumple con las características necesarias para cubrir la mayor parte de los requerimientos de energía en el largo plazo es la nuclear: la de fisión y la de fusión. Esta última tiene además la ventaja de no producir residuos radiactivos de vida media larga. Por lo anterior, se determina que, de lograrse su viabilidad técnica y económica, ésta sería una opción sustentable y atractiva para cubrir de manera mayoritaria los requerimientos nacionales de energía a largo plazo.

Aunque principalmente son las grandes potencias las que han investigado la energía de fusión, países en vías de desarrollo, con indicadores económicos similares a los de México, actualmente desarrollan programas de investigación en esta fuente de energía. No obstante, su desarrollo en nuestro país ha sido muy limitado.

Por lo anterior, se propone un Plan Nacional de Fusión Nuclear para llevar a nuestro país, en las próximas décadas, a participar activamente en la carrera internacional por hacer técnicamente viable la energía de fusión. Este plan se basa, sobre todo, en lo analizado en el presente trabajo y en los programas de investigación en esta fuente de energía, de países con un desarrollo similar a México. El Plan propone objetivos generales que permitan a nuestro país detener el atraso en el que se encuentra en esta tecnología, e insertarlo de lleno en la investigación y el desarrollo de la misma en beneficio de las siguientes generaciones.

Para lograr estos objetivos, el Plan propone una Vía “Conservadora” y una Vía “Ambiciosa”. Cada una propone objetivos específicos y líneas de acción concretas en los campos de la Investigación, la Infraestructura, la Capacitación y el Financiamiento, que deberán desarrollar los sectores públicos y privados para lograr los objetivos propuestos para potencializar la investigación nacional de la energía nuclear de fusión.

Introducción

Introducción

Actualmente, uno de los principales retos que enfrentan la mayor parte de las naciones del mundo es el abastecimiento suficiente de los recursos energéticos necesarios para cubrir su demanda y para asegurar su crecimiento económico y su sustentabilidad en el corto, mediano y largo plazo.

Desde finales del siglo XIX, las necesidades energéticas de los países desarrollados han sido cubiertas de forma mayoritaria por los combustibles de origen fósil como el petróleo, el carbón y el gas natural. Éstos han sido aprovechados en todo el mundo a gran escala durante más de un siglo debido a su relativa abundancia, su bajo costo de extracción, su alto contenido energético, su fácil transporte y almacenamiento y su disponibilidad.

El caso de México, nuestro país, no es diferente. La creciente demanda de energía experimentada en las últimas décadas, en especial de energía eléctrica, ha sido cubierta en su mayor parte por tecnologías que aprovechan los combustibles fósiles. El descubrimiento de abundantes reservas de petróleo en nuestro país, le ha dado una gran ventaja económica y competitiva; sin embargo, la falta de previsión de los responsables de sus políticas energéticas lo ha hecho muy dependiente económica y energéticamente de los combustibles fósiles.

En las últimas décadas, a estas circunstancias se han agregado otras que no dependen del manejo o gestión de los gobernantes. Los combustibles fósiles, que en otra época se imaginaron fuente inagotable de energía barata, han mostrado en las últimas décadas sus grandes desventajas, como el agotamiento progresivo e inexorable de sus reservas a nivel mundial y la emisión a la atmósfera de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, producidas por su combustión.

Adicionalmente, se proyecta que en las próximas décadas, todas las naciones del mundo, en especial los países en vías de desarrollo, aumenten significativamente su consumo de energía con respecto al actual debido a su crecimiento poblacional y económico.

Como consecuencia de lo anterior, en México y en todo el mundo se han propuesto tecnologías y fuentes de energía alternas para sustituir gradualmente a los combustibles de origen fósil dentro de la cadena de transformación de energía.

Las energías renovables tienen aún un margen de crecimiento muy grande en todo el mundo y, dadas sus características económicas y ambientales, tendrán un papel muy importante en la generación de energía eléctrica en las próximas décadas. Sin embargo, ninguna de ellas cumple con las características necesarias para ser la energía principal y mayoritaria de generación hacia finales de este siglo y durante el transcurso de los siguientes.

Aunque cada una de las fuentes de energía aprovechadas actualmente en nuestro país, tiene una o varias características que la hacen deseable para cubrir una fracción de los requerimientos energéticos nacionales futuros, ninguna tiene el potencial técnico y ambiental suficiente para ser candidata a cubrir estos requerimientos en el mediano y largo plazo de manera ilimitada y técnica y ambientalmente sustentable.

Sin embargo, actualmente se encuentra en desarrollo tecnológico, en distintos ámbitos internacionales y, a modesta escala en nuestro país, una tecnología que teóricamente podría ser la fuente de energía que cubriera mayoritariamente las necesidades de energía en el mundo a largo plazo, con reservas prácticamente inagotables de combustible, sin daños importantes al ambiente y con altos índices de confiabilidad y disponibilidad: la energía nuclear de fusión.

Aunque sus principios físicos fueron demostrados desde la década de los cincuentas, actualmente la tecnología de fusión nuclear se encuentra en la etapa de desarrollo de su viabilidad técnica. Grandes economías del mundo como Estados Unidos, Japón y la Unión Europea han invertido decenas de miles de millones de dólares para hacer de esta tecnología una opción técnica y económicamente viable.

Sin embargo, a pesar de los esfuerzos internacionales que se han realizado, ya se ha comprobado que el aprovechamiento controlado de la energía de fusión en una planta de generación no será tan fácil, tan barato ni tan rápido como en el caso de la fisión. Problemas técnicos concretos como las altas energías y presiones a las que tienen lugar las reacciones de fusión o la carencia de materiales adecuados para soportarlas, aún no han sido solucionados satisfactoriamente y el aprovechamiento útil de este tipo de energía parece aún lejano.

Sin embargo, ante el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y los problemas técnicos del resto de las tecnologías de generación, la energía nuclear de fusión es hoy en día una opción prometedora para mantener y mejorar las actuales condiciones económicas y sociales mundiales, en el largo plazo.

Con todo, México no participa en esta carrera. Aunque la seguridad nacional del abasto energético en las siguientes décadas no está del todo claro, actualmente nuestro país aporta pocos recursos económicos, humanos y técnicos en el desarrollo de la tecnología de fusión nuclear, y no se beneficia del aprendizaje correspondiente.

Aunque en la actualidad, el aprovechamiento de la energía nuclear de fusión se vislumbra como algo lejano en el tiempo y, por lo tanto, no se considera un asunto prioritario dentro de las múltiples necesidades de nuestro país, la irresponsable postergación de las acciones necesarias para ser parte activa en el desarrollo de esta fuente de energía, puede provocar que, en el futuro, a México le sea imposible acceder a ella si no es mediante la compra de tecnología a otras naciones a precios onerosos y poco competitivos.

Por lo dicho hasta aquí, se presenta el presente trabajo de Tesis, que, como su título indica, busca, por un lado, justificar desde los puntos de vista técnico, económico y ambiental la necesidad de que México se inserte en las acciones internacionales para desarrollar tecnológicamente la energía de nuclear de fusión y, por otro, proponer un Programa Nacional de Fusión Nuclear.

Este trabajo pretende, en primer lugar, demostrar mediante el análisis objetivo de datos disponibles, la necesidad y la capacidad que tiene México de comenzar lo antes posible a poner los recursos necesarios y realizar las acciones pertinentes para participar y cooperar activamente en los esfuerzos que se llevan a cabo en el mundo para hacer técnica y económicamente viable la energía nuclear de fusión.

En segundo lugar, también es su objetivo proponer líneas de acción concretas en los ámbitos de Investigación, Infraestructura, Capacitación y Financiamiento para concretar un vigoroso desarrollo en nuestro país de la fuente de energía que muy posiblemente sea la preponderante a nivel mundial en los siguientes siglos.

En el Capítulo 1, se analizará la situación actual de las fuentes de energía en nuestro país, las razones históricas que lo han llevado a esta situación, y se hará énfasis en la alta dependencia que tiene de los combustibles fósiles en general, y del petróleo en particular.

En el Capítulo 2 se expondrán proyecciones de las necesidades energéticas de México hacia el año 2026 y hacia el año 2100, con base en datos y análisis propios y de la Comisión Federal de Electricidad. Así mismo, se expondrán los retos más importantes que tendrá que afrontar nuestro país para cubrir estas necesidades energéticas en el futuro.

En el Capítulo 3 se hará una revisión de la energía nuclear de fusión poniendo énfasis en sus fundamentos físicos y técnicos, en las tecnologías propuestas para controlarla y aprovecharla, en su evolución histórica, en el estado actual de su tecnología, en su prospectiva a largo plazo, en sus ventajas y desventajas, y en las posibilidades que tiene de ser técnica y económicamente viable en las siguientes décadas.

En el Capítulo 4, con base en los tres primeros capítulos, se determinarán las características fundamentales que deberán tener las fuentes de energía que cubran de manera mayoritaria las necesidades energéticas de nuestro país en el largo plazo, y se definirá si la energía nuclear de fusión tiene posibilidades de cubrirlas para ser una de esas fuentes de energía.

En el Capítulo 5 se analizarán los avances que han tenido en la investigación, desarrollo, inversión y capacitación en esta fuente de energía, países en vías de desarrollo con indicadores económicos y sociales comparables a los de México, con el fin de evidenciar la posibilidad que tiene nuestro país para sumarse a los esfuerzos que se hacen a nivel mundial para hacerla técnicamente viable.

En el Capítulo 6 se expondrán los esfuerzos que se han hecho y se hacen en México para investigar y desarrollar la tecnología de esta fuente de energía en los campos teórico y experimental en territorio nacional.

Finalmente, en el Capítulo 7, con base en lo analizado y desarrollado en los primeros 6 capítulos, se propone un programa concreto para integrar a nuestro país en la carreta internacional por hacer técnicamente viable la energía nuclear de fusión, sumando esfuerzos de los sectores estatales, académicos y productivos.

Capítulo 1. La situación actual de los recursos energéticos en México

1. La situación actual de los recursos energéticos en México ¹

1.1. Aspectos generales

El sector energético es fundamental para el desarrollo de cualquier país. El suministro de energéticos con calidad y suficiencia contribuye, en gran medida, a un mayor bienestar de la población, a la realización de las actividades productivas, al crecimiento económico y a la competitividad de cada país en el escenario internacional.

La situación actual del sector energético nacional, con sus ventajas, como la práctica total cobertura del servicio público de energía eléctrica, y sus desventajas, como su excesiva dependencia del petróleo, es consecuencia del desarrollo que éste ha tenido a partir de las características geográficas, climáticas y geopolíticas de nuestro país, los recursos naturales que se han podido encontrar y aprovechar en su territorio, y las políticas energéticas de estado que históricamente se han establecido.

El petróleo y sus derivados no sólo han permitido impulsar la industria Mexicana sino que, con los recursos obtenidos de su explotación, ha sido posible financiar una parte importante del desarrollo económico y social. Sin embargo, en el futuro próximo, México enfrentará el gran reto de extraer el petróleo de yacimientos cuya complejidad superará, por mucho, la que se ha presentado hasta ahora.

Para enfrentarlo con éxito, se requerirán grandes esfuerzos orientados a incrementar la capacidad de ejecución y de inversión, adoptar las mejores prácticas en la administración del riesgo que implican las inversiones y utilizar las tecnologías más adecuadas para la explotación de los nuevos yacimientos.

Por otra parte, es necesario que la industria dedicada a la producción de petrolíferos y petroquímicos incremente su capacidad para dar valor al petróleo mexicano, aumentando la producción en territorio nacional de los energéticos que se requieren para el desarrollo de la economía y detonando, así, importantes inversiones y empleos en México.

En materia de electricidad, es prioritario conducir e impulsar los cambios necesarios en los organismos que prestan el servicio público de energía eléctrica, a fin de mejorar la calidad del mismo. Particularmente en el área central de país, se requiere adoptar medidas que solucionen la grave problemática de las pérdidas de energía. Para enfrentar estos retos, se plantean como objetivos centrales el incremento en la productividad de los procesos y la mejora en la eficiencia de sus sistemas operativos y comerciales. Alcanzarlos amentaría la confiabilidad y la seguridad del suministro de electricidad y la eficiencia financiera de los organismos, propiciando con ello, una mayor competitividad del aparato productivo nacional.

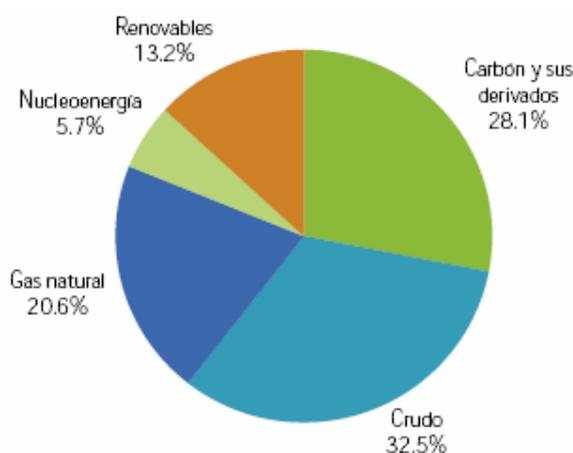
¹ Fuente del subcapítulo: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Dado que en México el suministro de energéticos depende, principalmente, del petróleo y del gas natural, la reposición de sus reservas es un objetivo central. Adicionalmente, con el objetivo de reducir los riesgos inherentes al alto consumo de combustibles fósiles, es conveniente que la matriz energética incluya una mayor participación de fuentes no fósiles.

1.2. Contexto energético mundial

De acuerdo con información de la Agencia Internacional de Energía ², en 2009 la producción mundial de energía primaria totalizó 12,291.7 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), 0.8% menor a lo producido en 2008. La producción mundial de carbón y de sus derivados y renovables aumentó 2.3% y 1.9%, respectivamente. Por su parte la producción mundial de gas natural disminuyó 3.1% respecto de 2008, la de petróleo crudo cayó 2.3% y la nucleoenergía 1.2%.

Como se puede observar en la figura 1.1, el 32.5% de la producción mundial correspondió a crudo, 28.1% a carbón y sus derivados, 20.6% a gas natural, 13.2% a energías renovables y 5.7% a nucleoenergía.



Notas: Renovables incluye energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica, biomasa y desechos

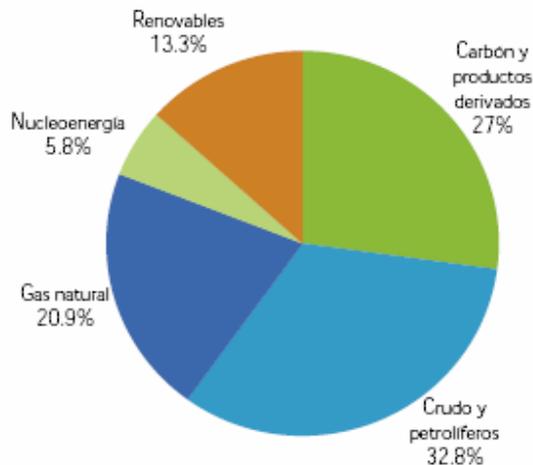
Fuente: Energy Balances of OCDE countries y Energy Balances of Non-OCDE countries, AIE, edición 2011

Figura 1.1. Producción mundial de energía primaria 2009

12,291.7 Mtep

Como se muestra en la figura 1.2, de la oferta total de energía mundial en 2009, de 12,149.8 Mtep, el 32.8% se compuso por crudo y petrolíferos, el 27% de carbón y sus productos derivados, el 20.9% de gas natural, el 13.3% de renovables y el 5.8% de nucleoenergía.

² Energy Balances of OECD Countries y Energy Balance of Non-OECD Countries, edición 2010.



Nota: Renovables incluye energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica, biomasa y residuos. Se incluye el comercio exterior de electricidad

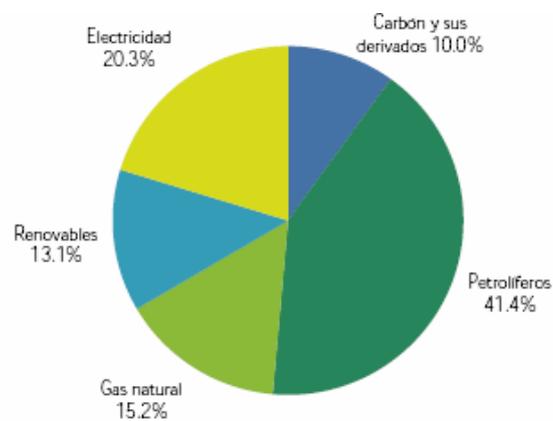
Fuente: Energy Balances of OCDE countries y Energy Balances of Non-OCDE countries, AIE, edición 2011

Figura 1.2. Oferta total mundial de energía 2009

12,149.8 Mtep

El consumo de energía a nivel mundial disminuyó 0.9% durante 2009 con respecto a los niveles de consumo registrados en 2008, totalizando 8,352.8 Mtep.

Como se observa en la figura 1.3, los petrolíferos fueron los que dominaron el consumo en 2009, a causa, en gran medida, de la demanda de los sectores transporte e industrial.



Nota: Renovables incluye energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica, biomasa y residuos

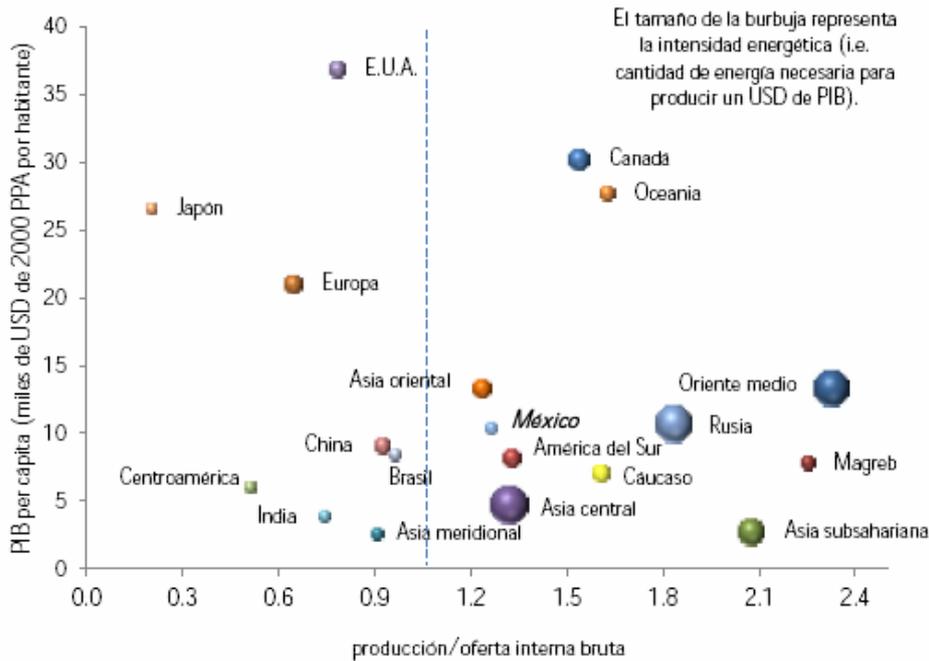
Fuente: Energy Balances of OCDE countries y Energy Balances of Non-OCDE countries, AIE, edición 2011.

Figura 1.3. Consumo mundial de energía por energético 2009

8,352.8 Mtep

Por otro lado, la figura 1.4 muestra tres indicadores para algunos de los países y para las distintas regiones mundiales. En el eje horizontal se presenta la relación de la producción entre la oferta interna bruta, en el eje vertical se indica el Producto Interno Bruto (PIB) per cápita y el tamaño de las burbujas muestra la intensidad energética³. La relación producción entre oferta interna bruta mide el grado en que la oferta interna bruta de un país es cubierta con producción nacional. México fue energéticamente autosuficiente pero su PIB per cápita e intensidad energética estuvieron por debajo de la media.

³ Es la cantidad total de energía consumida por unidad generada de Producto Interno Bruto (PIB).



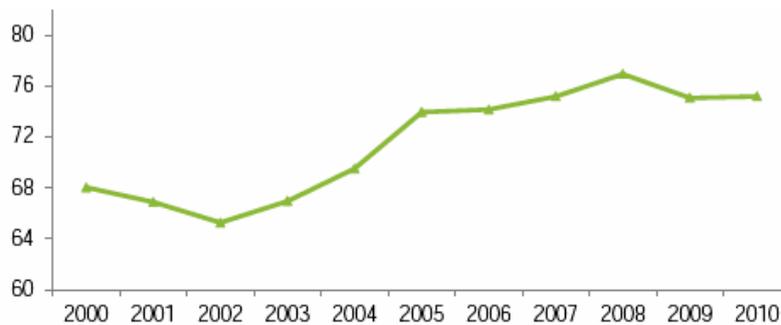
Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Figura 1.4. Indicadores Energéticos a nivel mundial 2009

1.3. Indicadores nacionales de energía

1.3.1. Consumo de energía per cápita

El consumo de energía total per cápita en 2010 fue 75.2 Giga Joules (GJ) por habitante. En la gráfica siguiente se muestra la evolución de éste indicador durante los últimos años.



Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

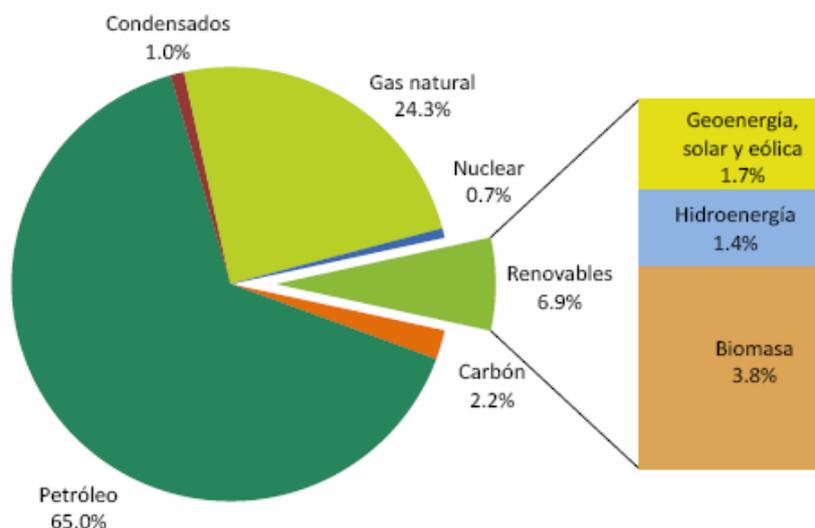
Figura 1.5. Consumo de energía per cápita (GJ por habitante)

1.3.2. Oferta y demanda de energía

a) Producción de energía primaria

En 2010 la producción nacional de energía primaria totalizó 9,250.7 PJ.

Como se puede apreciar en la figura 1.6, la producción de hidrocarburos continuó predominando la canasta de energía primaria en México en 2010, con una participación de 90.24%, al sumar 8,348.16 Peta Joules (PJ).



Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Figura 1.6. Estructura de la producción de energía primaria 2010
9,250.7 PJ

b) Energía primaria a transformación

En 2010 la energía primaria enviada a centros de transformación sumó 5,467.8 PJ, 6.1% PJ menos que 2009.

En los siguientes cuadros puede apreciarse el comportamiento de los insumos de energía primaria por centro de transformación y por fuente en los años 2009 y 2010.

	2009	2010	Variación porcentual (%) 2010/2009	Estructura porcentual	
				2009 %	2010 %
Total	5,822.73	5,467.76	-6.10	100.00	100.00
Coquizadoras	50.56	63.35	25.30	0.87	1.16
Refinerías y despuntadoras	3,176.23	2,783.26	-12.37	54.55	50.90
Plantas de gas y fraccionadoras	1,939.58	1,951.67	0.62	33.31	35.69
Centrales eléctricas	656.36	669.49	2.00	11.27	12.24

Nota: La suma de los parciales puede no coincidir con los totales, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.

Cuadro 1.1. Insumos de energía primaria en centros de transformación (petajoules)

	2009	2010	Variación porcentual (%) 2010/2009	Estructura porcentual	
				2009 %	2010 %
Total	5,822.73	5,467.76	-6.10	100.00	100.00
Carbón	345.38	386.10	11.79	5.93	7.06
Petróleo Crudo	3,171.63	2,777.60	-12.42	54.47	50.80
Condensados	85.43	89.47	4.74	1.47	1.64
Gas natural	1,858.76	1,867.85	0.49	31.92	34.16
Nucleoenergía	112.75	63.94	-43.29	1.94	1.17
Hidroelectricidad	95.20	132.26	38.93	1.64	2.42
Geoenergía	152.69	149.94	-1.81	2.62	2.74
Energía eólica	0.90	0.60	-33.40	0.02	0.01

Nota: La suma de los parciales puede no coincidir con los totales, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Sistema de Información Energética, Sener.

Cuadro 1.2. Entrada de energía primaria a centros de transformación por fuente (petajoules)

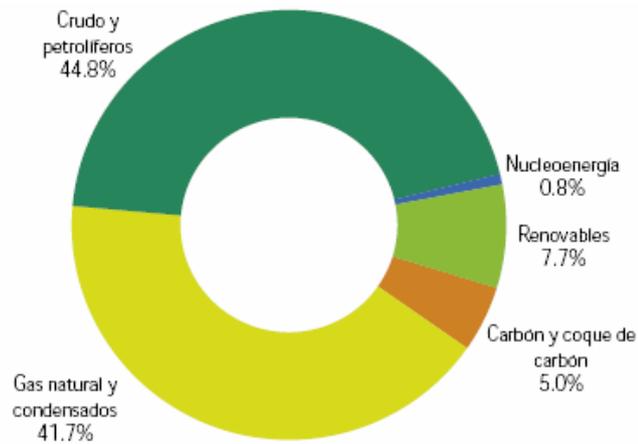
c) Oferta interna bruta de energía

En 2010 la oferta interna de energía total aumentó un 0.9% respecto al año anterior al ser de 8,151.9 PJ.

La relación de la producción entre la oferta interna bruta, que mide el grado en que la producción nacional satisface los requerimientos de energía del país, fue 1.13 en 2010 – superior a uno-, indicando así que la mayor parte de la oferta fue cubierta con la producción nacional. No obstante, la relación observó una contracción de 3% respecto a 2009, al ubicarse ese año en 1.16.

En 2010 fue necesario importar 1,987.3 PJ, es decir el 24.4% de la oferta interna bruta de energía total. Esta relación entre las importaciones y la oferta interna bruta mostró un incremento de 3.8 puntos porcentuales respecto a 2009.

En la siguiente figura se puede apreciar la distribución porcentual de la oferta interna bruta por tipo de energético para el año 2010.



Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Figura 1.7. Oferta interna bruta por tipo de energético 2010

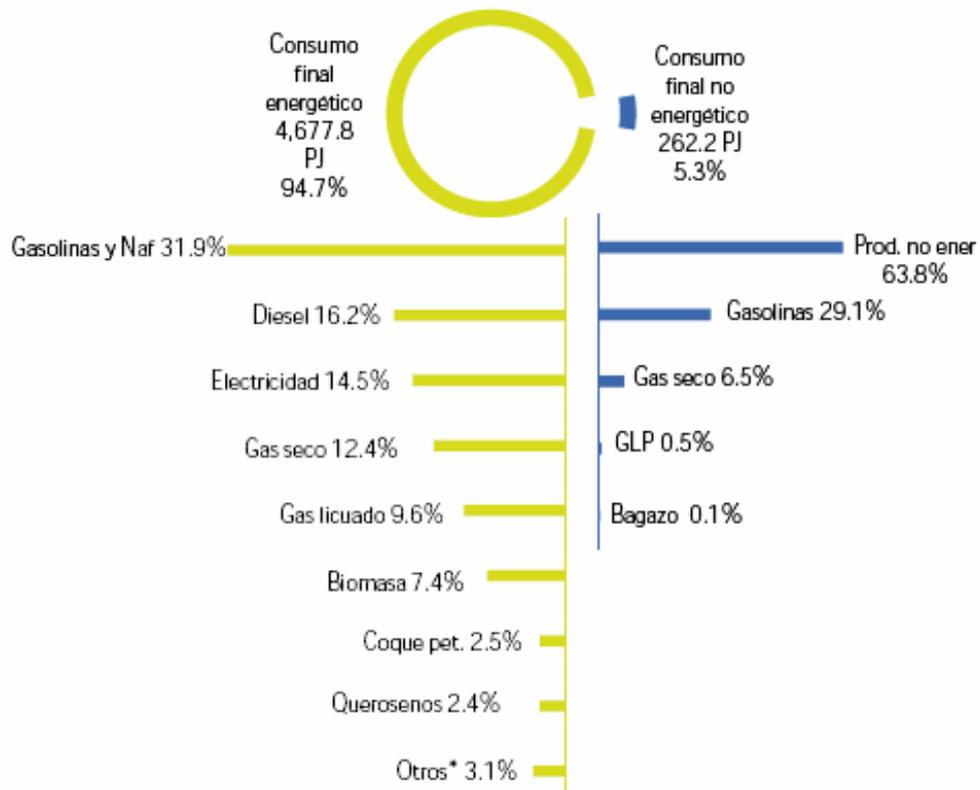
8,151.9 PJ

d) Consumo final de energía

En 2010 el consumo final total de energía, que es la suma del consumo no energético y el consumo energético, mostró un incremento de 2.6% respecto a 2009, al totalizar 4,940 PJ.

El sector que mostró el mayor incremento en su consumo de energía entre 2009 y 2010 fue el industrial, con un aumento de 61.9 PJ, es decir, el 4.7%.

En la siguiente figura se puede apreciar la estructura del consumo final total por tipo de energético para el año 2010.

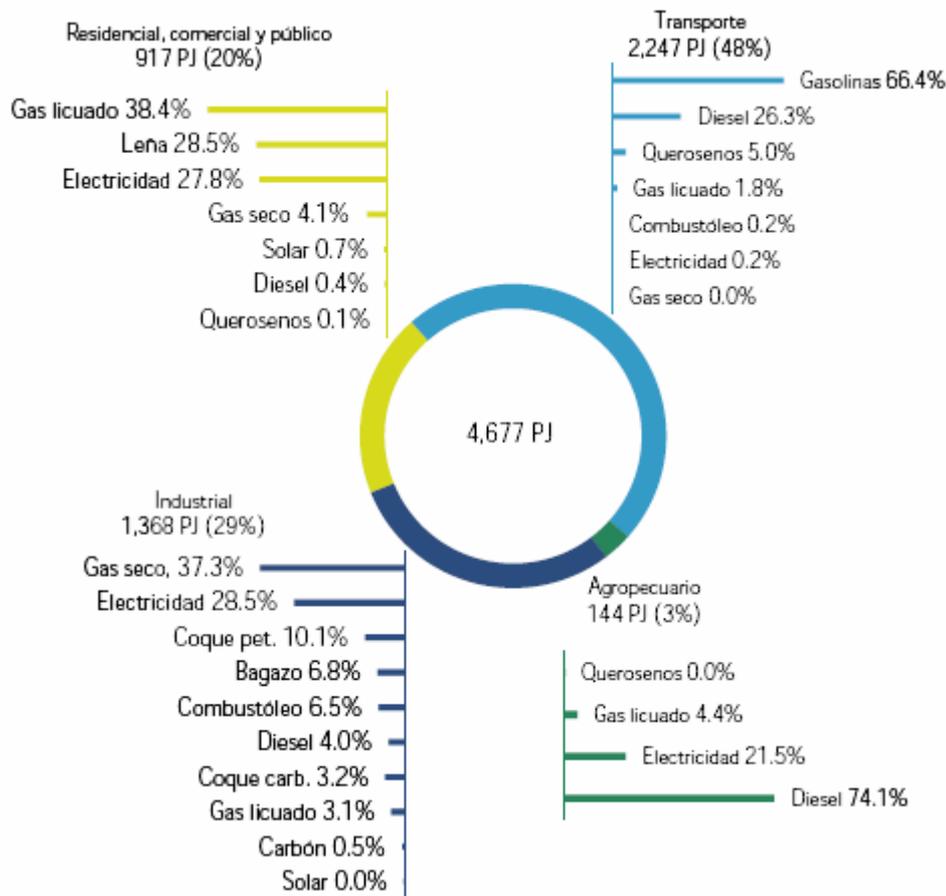


* Incluye carbón, coque de carbón, combustóleo y energía solar

Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Figura 1.8. Estructura del consumo final total por tipo de energético 2010

Como se muestra en la figura 1.9, el sector transporte consumió el 48% de dicha energía, por lo que se mantuvo como el principal consumidor de energía en México. El sector industrial le siguió en importancia, con una participación en el consumo del 29%. Los sectores residencial, comercial y público emplearon el 20% entre los tres, de la energía para consumo final. Por su parte, el sector agropecuario consumió 3% de la energía final.



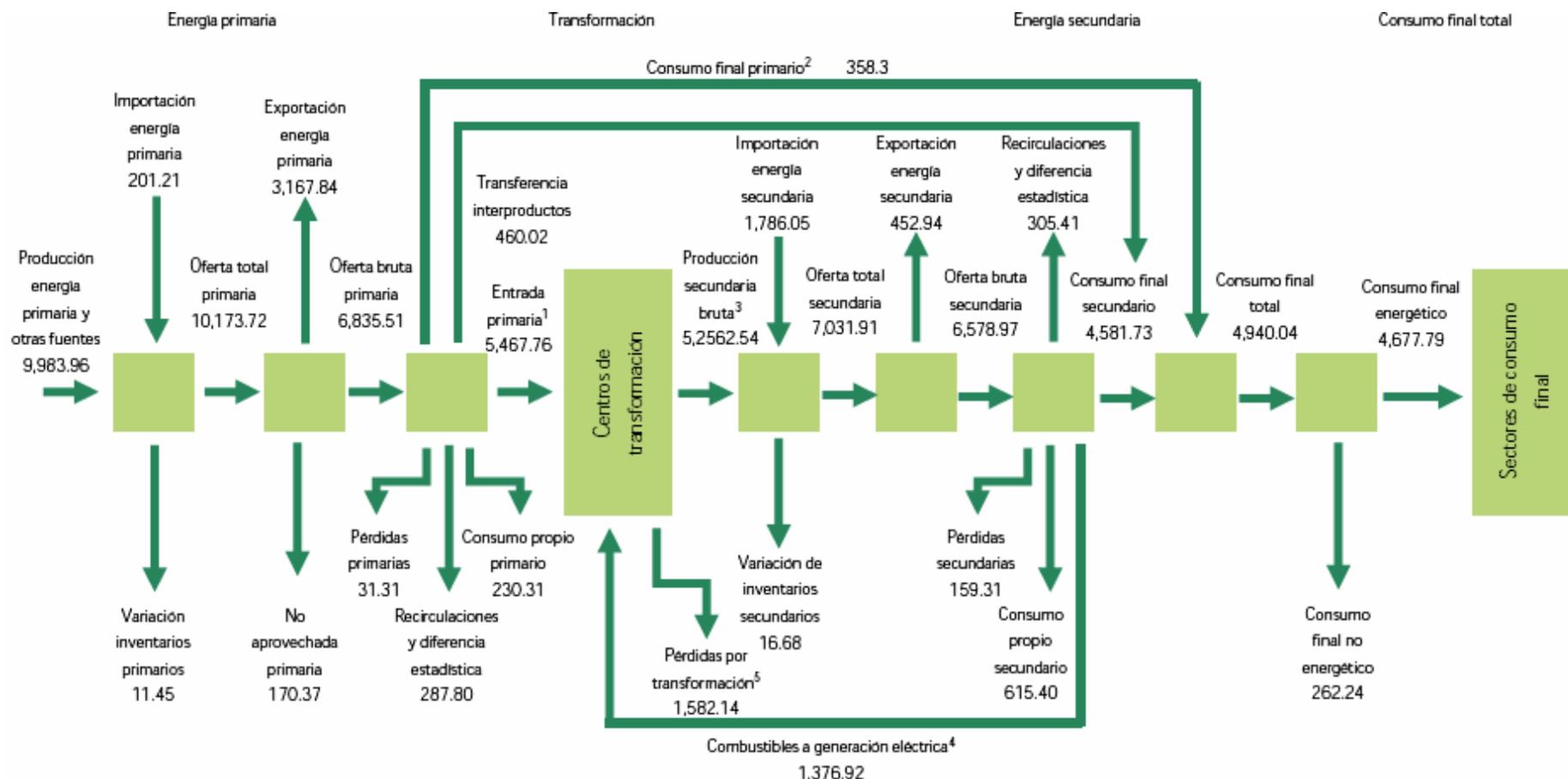
Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Figura 1.9. Consumo final energético por sector y energético 2010

1.4. Matriz y diagramas del Balance Nacional de Energía

Finalmente, a modo de resumen gráfico de la situación de la producción y consumo actual de la energía en México, se presentan los esquemas gráficos del Balance Nacional de Energía 2010, que muestran el flujo de la energía desde sus fuentes primarias, pasando por los procesos de transformación propios de cada tipo hasta su consumo final.

En n primer lugar se muestra la estructura utilizada para generar gráficamente el Balance Nacional de Energía y posteriormente se muestra el Balance Nacional de Energía para el año 2010 con sus respectivos cuadros-matriz.



¹ Carbón: 386.10; Crudo y condensados: 2,867.07; Gas natural: 1,867.85; Nucleoenergía: 63.94; Hidroenergía: 132.26; Geoenergía: 149.94; Energía eólica: 0.60

² Carbón: 6.10; Energía solar: 4.91; Bagazo de caña: 87.99; Leña: 259.31

³ Coque de carbón: 58.60; Petrolíferos: 2,769.71; Productos no energéticos: 175.94; Gas seco: 1,385.16; Electricidad: 873.14

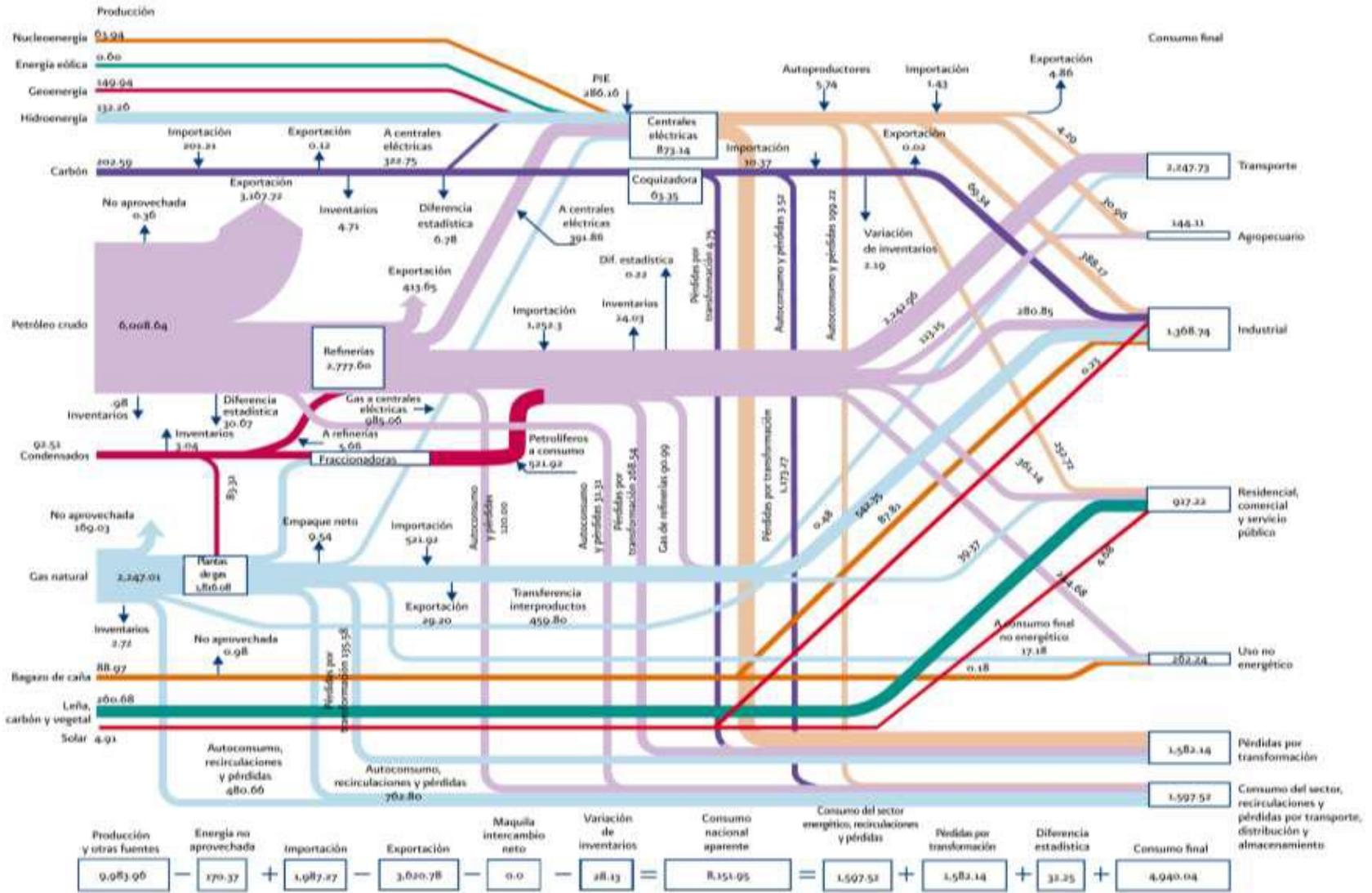
⁴ Diesel: 14.73; Combustóleo: 377.14; Gas seco: 985.06

⁵ Coquizadoras: 4.75; Refinerías y despuntadoras: 268.54; Plantas de gas y fraccionadoras: 135.58; Centrales eléctricas públicas: 862.78; Centrales eléctricas PIE: 310.49

⁶ La suma de los parciales puede no coincidir con los totales, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Sistema de Información Energética (SIE), Sener.

Figura 1.10. Estructura del Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules)



Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Figura 1.11. Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules)

	Carbón	Petróleo crudo	Condensados	Gas natural	Nucleoenergía	Hidroenergía	Geoenergía	Energía solar	Energía eólica	Bagazo de caña	Leña	Total de energía primaria
Producción	202.59	6,008.64	92.51	2,247.01	63.94	132.26	149.94	4.91	0.60	88.97	259.31	9,250.67
De otras fuentes	0.00	0.00	0.00	733.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	733.28
Importación	201.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	201.21
Variación de inventarios	-4.71	-0.98	-3.04	-2.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-11.45
Oferta total	399.09	6,007.66	89.47	2,977.57	63.94	132.26	149.94	4.91	0.60	88.97	259.31	10,173.72
Exportación	-0.12	-3,167.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-3,167.84
Energía no aprovechada	0.00	-0.36	0.00	-169.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-170.37
Maquila-intercambio neto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Oferta interna bruta	398.97	2,839.58	89.47	2,808.54	63.94	132.26	149.94	4.91	0.60	87.99	259.31	6,835.51
Total transformación	-386.10	-2,777.60	-89.47	-1,867.85	-63.94	-132.26	-149.94	0.00	-0.60	0.00	0.00	-5,467.76
Coquizadoras	-63.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-63.35
Refinerías y despuntadoras	0.00	-2,777.60	-5.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-2,783.26
Plantas de gas y fraccionadoras	0.00	0.00	-83.82	-1,867.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-1,951.67
Centrales eléctricas públicas	-322.75	0.00	0.00	0.00	-63.94	-132.26	-149.94	0.00	-0.60	0.00	0.00	-669.49
Centrales eléctricas PIE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Consumo propio del sector	0.00	0.00	0.00	-230.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-230.31
Transferencias interproductos	0.00	0.00	0.00	-460.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-460.02
Recirculaciones	0.00	0.00	0.00	-250.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-250.36
Diferencia estadística	-6.78	-30.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-37.45
Pérdidas (Transp., dist., alma.)	0.00	-31.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-31.31
Consumo final total	6.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.91	0.00	87.99	259.31	358.31
Consumo final no energético	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18
Petroquímica Pemex	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Otras ramas económicas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.18
Consumo final energético	6.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.91	0.00	87.81	259.31	358.12
Residencial, comercial y pub.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.68	0.00	0.00	259.31	263.99
Transporte	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Agropecuario	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Industrial	6.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	87.81	0.00	94.13
Prod. Bruta energía secundaria												

La suma de los parciales puede no coincidir con los totales, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Cuadro 1.3. Matriz del Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules)

	Coque de carbón	Coque de petróleo	Gas licuado	Gasolinas y naftas	Querosenos	Diesel	Combustóleo	Productos no energéticos	Gas seco	Electricidad	Total de energía secundaria	Total
Producción	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9,250.67
De otras fuentes	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	733.28
Importación	10.37	83.18	122.37	761.70	8.05	223.98	53.04	0.00	521.93	1.43	1,786.05	1,987.27
Variación de inventarios	-2.19	-10.06	2.09	4.46	-0.56	-14.35	-5.58	-0.04	9.54	0.00	-16.68	-28.13
Oferta total	8.18	73.12	124.47	766.16	7.49	209.64	47.47	-0.04	531.47	1.43	1,769.37	11,943.09
Exportación	-0.02	-1.40	-0.14	-125.95	-2.66	-0.86	-284.04	-3.82	-29.19	-4.86	-452.94	-3,620.78
Energía no aprovechada	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-170.37
Maquila-intercambio neto	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Oferta interna bruta	8.16	71.72	124.32	640.21	4.83	208.78	-236.57	-3.86	502.27	-3.43	1,316.43	8,151.94
Total transformación	58.60	43.72	330.60	935.45	105.33	585.58	377.16	175.94	400.10	873.14	3,885.62	-1,582.14
Coquizadoras	58.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.60	-4.75
Refinerías y despuntadoras	0.00	43.72	41.54	789.09	105.33	600.31	754.30	89.44	90.99	0.00	2,514.72	-268.54
Plantas de gas y fraccionadoras	0.00	0.00	289.06	146.36	0.00	0.00	0.00	86.50	1,294.16	0.00	1,816.09	-135.58
Centrales eléctricas públicas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-14.73	-377.14	0.00	-388.41	586.98	-193.30	-862.78
Centrales eléctricas PIE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-596.65	286.16	-310.49	-310.49
Consumo propio del sector	-3.52	0.00	-4.90	-5.45	-0.01	-39.65	-69.99	0.00	-451.96	-39.92	-615.40	-845.71
Transferencias interproductos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	460.02	0.00	460.02	0.00
Recirculaciones	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-310.84	0.00	-310.84	-561.19
Diferencia estadística	0.00	0.00	0.00	-1.64	4.42	1.87	0.00	-4.87	-0.22	5.64	5.20	-32.25
Pérdidas (Transp., dist., alma.)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-159.31	-159.31	-190.62
Consumo final total	63.24	115.44	450.03	1,568.56	114.57	756.58	70.60	167.21	599.37	676.13	4,581.73	4,940.04
Consumo final no energético	0.00	0.00	1.39	76.29	0.00	0.00	0.00	167.21	17.18	0.00	262.06	262.24
Petroquímica Pemex	0.00	0.00	0.02	74.35	0.00	0.00	0.00	76.49	17.18	0.00	168.03	168.03
Otras ramas económicas	0.00	0.00	1.37	1.94	0.00	0.00	0.00	90.72	0.00	0.00	94.03	94.22
Consumo final energético	63.24	115.44	448.64	1,492.27	114.57	756.58	7.60	0.00	582.20	676.13	4,319.67	4,677.79
Residencial, comercial y pub.	0.00	0.00	356.27	0.00	1.18	3.69	0.00	0.00	39.37	252.72	653.23	917.22
Transporte	0.00	0.00	40.92	1,492.27	113.36	591.56	4.84	0.00	0.48	4.29	2,247.73	2,247.73
Agropecuario	0.00	0.00	6.29	0.00	0.03	106.83	0.00	0.00	0.00	30.96	144.11	144.11
Industrial	63.24	115.44	45.15	0.00	0.00	54.50	65.76	0.00	542.35	388.17	1,274.61	1,368.74
Prod. Bruta energía secundaria	58.60	43.72	330.60	935.45	105.33	600.31	754.30	175.94	1,385.16	873.14	5,262.54	5,262.54

La suma de los parciales puede no coincidir con los totales, debido al redondeo de las cifras.

Fuente: Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011

Cuadro 1.3. Matriz del Balance Nacional de Energía 2010 (petajoules) (continuación)

1.5. Principales retos en México del sector energético en la actualidad

Derivado de la situación nacional en materia de fuentes de energía y características de consumo, analizada en el subcapítulo anterior; el país enfrenta actualmente numerosos retos relacionados con los recursos, tecnológicos, económicos y ambientales, que debe superar en los próximos años para asegurar el suministro de energía a su población y a su economía, de un modo económicamente competitivo y ambientalmente sustentable.

Dentro del estado mexicano, la Secretaría de Energía se ha dado a la tarea de determinar aquellos factores dentro del sector que definirán su evolución o su retroceso; por ello, en el año 2012 desarrolló una “Estrategia Nacional de Energía 2012 - 2026”.

La “Estrategia Nacional de Energía 2012 - 2026”, delimita y enumera los principales retos que deberá afrontar el sector energético nacional en los próximos años y plantea estrategias concretas para enfrentarlos con el fin de asegurar el abasto energético para cubrir las necesidades nacionales, sin perder eficiencia y competitividad, y cumpliendo con los estándares internacionales de sustentabilidad ambiental.

1.5.1. Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026 planteada por la SENER ⁴

La estrategia está conformada por tres Ejes Rectores, que son: Seguridad Energética, Eficiencia Económica y Productiva y Sustentabilidad Ambiental.

A partir de los Ejes Rectores, se han establecido siete objetivos que pretenden asegurar que el sector evolucione hacia una operación segura, eficiente y sustentable, y que responda a las necesidades energéticas, de crecimiento económico y de desarrollo social del país. Los siete objetivos son los siguientes:

- 1.- Restituir reservas, incrementar la producción de crudo y la de gas natural.
- 2.- Diversificar las fuentes de energía, dando prioridad al incremento de tecnologías no fósiles.
- 3.- Incrementar los niveles de eficiencia en el consumo de energía de todos los sectores.
- 4.- Reducir el impacto ambiental del sector energético.
- 5.- Operar de forma eficiente, confiable y segura la infraestructura energética.
- 6.- Fortalecer y modernizar la infraestructura del sector energético.
- 7.- Impulsar el desarrollo de la industria petroquímica nacional

⁴ Fuentes del subcapítulo:

- Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012
- Estrategia Nacional de Energía, Secretaría de Energía, Febrero de 2010

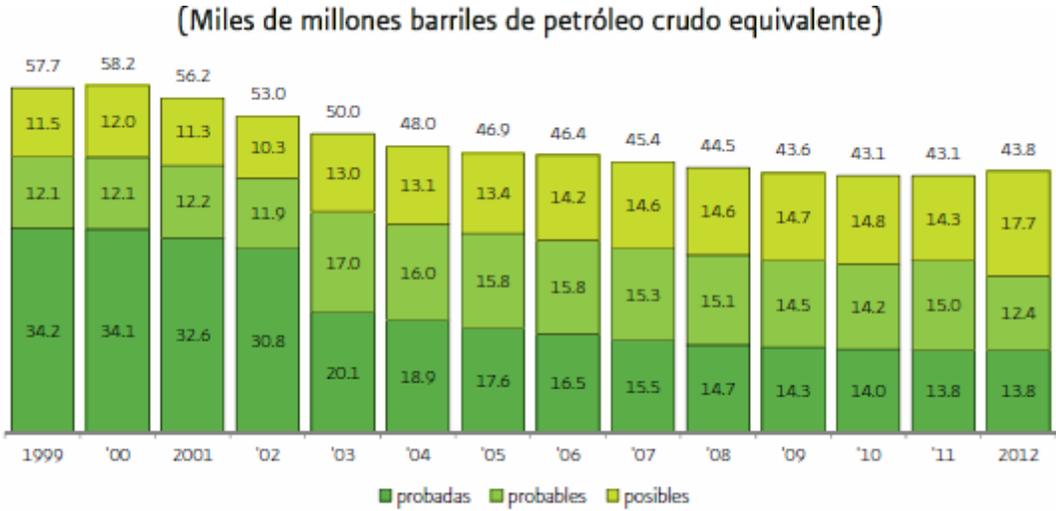
Para cada uno de estos objetivos se han definido líneas de acción específicas. La instrumentación de las líneas de acción tendrá un impacto que se reflejará en diversos indicadores que pueden ser agrupados en los Ejes Rectores que sustentan la Estrategia. Por ello se propone alcanzar diversas metas concretas al año 2026 que se detallarán más adelante.

1.5.1.1. Objetivos de la Estrategia Nacional de Energía 2012 - 2026

1.5.1.1.1. Restituir reservas, incrementar la producción de crudo y la de gas natural

En los últimos años, se han alcanzado niveles históricos en la inversión en exploración y producción, los estudios geológicos realizados a la fecha indican que México cuenta con 54.6 miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente (MMMbpce) de recursos prospectivos al primero de enero de 2012.

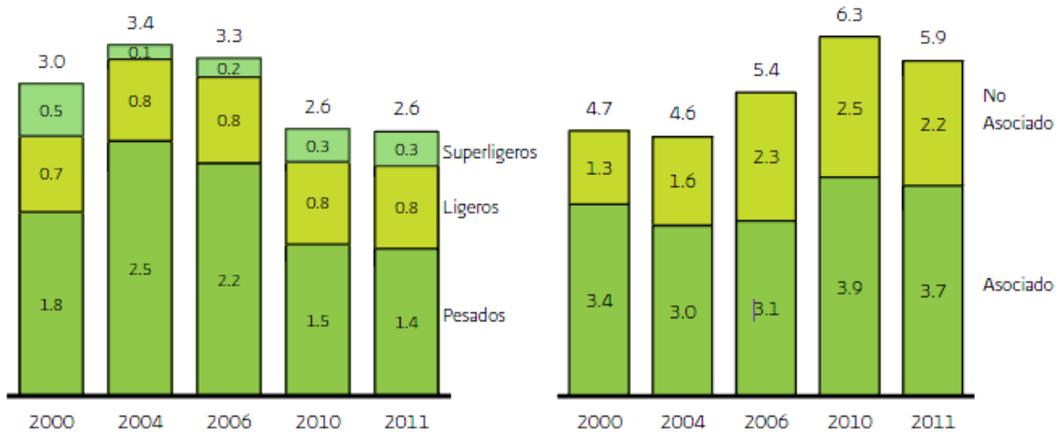
De 2007 a 2011, gracias a nuevos descubrimientos en las Cuencas del Sureste, de Burgos y de Veracruz, las reservas totales de hidrocarburos del país ascendieron a 30,612.5 millones de barriles (MMb) de aceite y 61,640.9 miles de millones de pies cúbicos (MMMpc) de gas natural. Esto se refleja en la figura siguiente:



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.12. Reservas probadas, probables y posibles de hidrocarburos en México

Por otro lado, debido en gran medida a la declinación natural de campos maduros, en particular, Cantarell, la producción de hidrocarburos en nuestro país ha disminuido en los últimos meses, como se puede apreciar en siguiente la figura.



Nota: La producción de gas natural, no incluye nitrógeno.

Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.13. Producción de hidrocarburos en los últimos años en México

Así mismo, el portafolio de proyectos de explotación incluye un gran número de proyectos en etapa de madurez. Es previsible que, en el futuro, la producción de crudo provenga de campos de menor tamaño que los grandes yacimientos de las cuencas terrestres y marinas del Sureste. Esto representa un reto significativo dado que estos campos tendrán mayor complejidad y costos de extracción.

El hecho es que, para desarrollar los recursos prospectivos nacionales, se requiere de la generación de capacidades y del uso de tecnología especializada y no disponible actualmente en nuestro país.

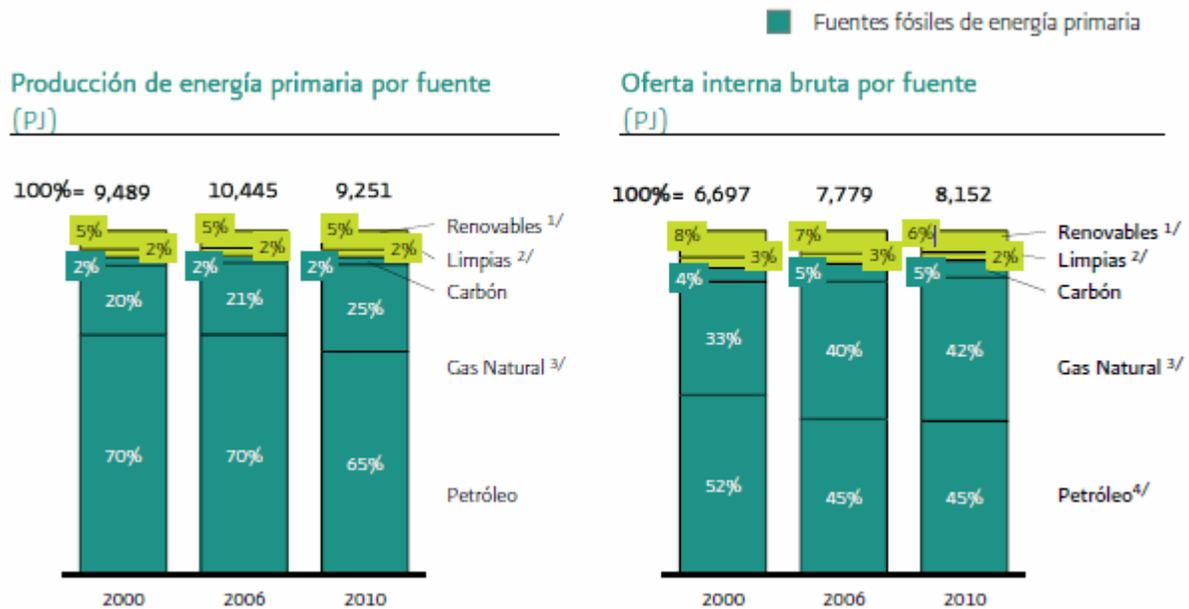
Las metas concretas que la Secretaría de Energía (SENER) ha planteado para el año 2026 para este objetivo son:

- 1.- Incrementar y mantener un nivel de restitución de reservas probadas 1P superior a 100%, considerando el crecimiento de la plataforma de producción.
- 2.- Alcanzar un nivel de producción de petróleo crudo de 3,354 miles de barriles diarios (Mbd).
- 3.- Incrementar la producción neta de gas natural a 11,472 millones de pies cúbicos diarios (MMpcd).

1.5.1.1.2. Diversificar las fuentes de energía, dando prioridad al incremento en la participación de las tecnologías no fósiles

La matriz energética nacional, actualmente está concentrada en fuentes de energía fósiles con una participación significativa del gas natural.

La gráfica siguiente muestra en porcentajes la matriz de producción de energía primaria y oferta interna bruta por fuente para los años 2000, 2006 y 2010.



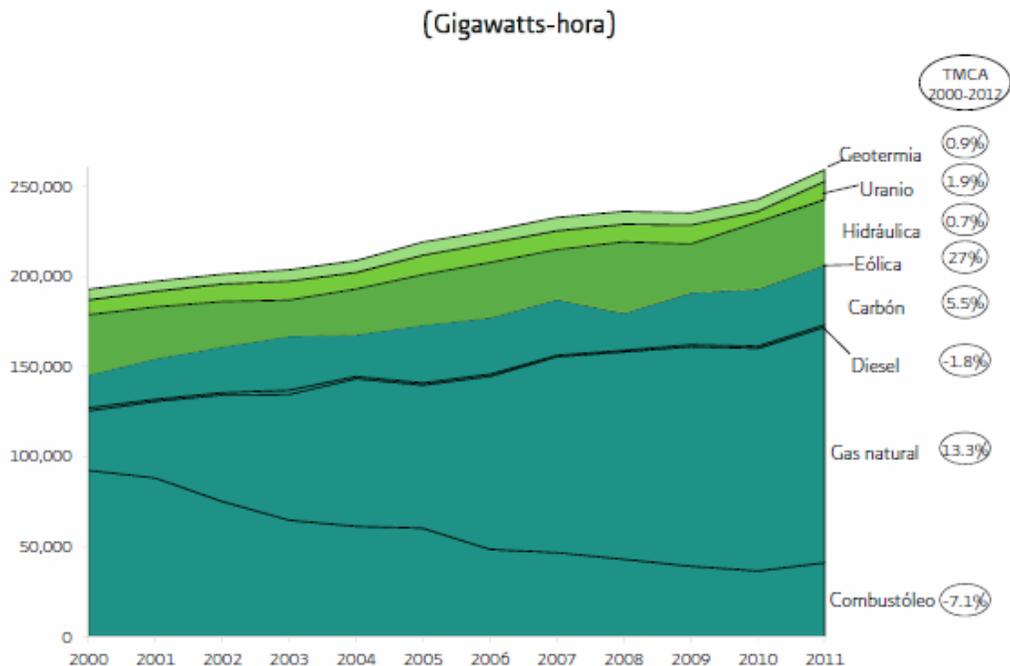
Notas: 1/ Biomasa (bagazo de caña, biogás, leña y carbón vegetal), solar, geotérmica y eólica
 2/ Nuclear e hidráulica
 3/ Incluye condensados
 4/ Incluye productos petrolíferos

Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.14. Composición de la matriz energética nacional

Adicionalmente, dado que la tecnología de generación de ciclo combinado es más eficiente, requiere de menores tiempos de entrada en operación y tiene menor costo, la mayor parte de las adiciones a la infraestructura de generación en la última década han sido centrales de esta tecnología.

La evolución de la generación bruta por tipo de energético desde el año 2000 se muestra en la siguiente figura.



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.15. Generación bruta del Sistema Eléctrico Nacional

Por otro lado, México cuenta con un potencial de generación de electricidad con energías renovables que no ha sido explotado.

Existen barreras importantes que han limitado el desarrollo de las tecnologías renovables en nuestro país, como el hecho de que las inversiones de capital iniciales son elevadas y requieren de largos periodos de tiempo para generar retornos o la intermitencia de algunos recursos renovables que hace necesaria cierta capacidad de generación de respaldo.

Adicionalmente, existen tecnologías de generación tales como las que aprovechan el biogas, las mareas o la energía nuclear, que no han sido aprovechadas al máximo por los sectores que tienen oportunidades de hacerlo.

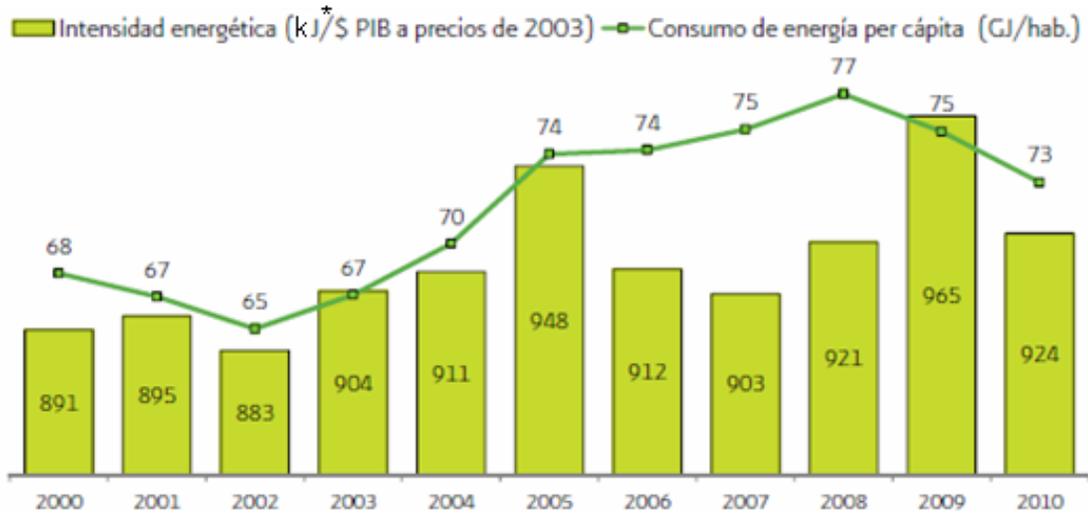
La meta concreta que la SENER ha planteado para el año 2026 para este objetivo es:

- 1.- Incrementar la participación de las fuentes no fósiles en la generación de electricidad a 35%.

1.5.1.1.3. Incrementar los niveles de eficiencia en el consumo de energía de todos los sectores

Para lograr los objetivos de la Estrategia es indispensable incrementar la eficiencia en el consumo de energía sin sacrificar el crecimiento económico de México. Existen importantes áreas de oportunidad de mejora en el uso de la energía en nuestro país, éstas permitirían ahorros económicos y la conservación de recursos naturales.

La intensidad energética del país sólo creció 0.4% promedio anual los últimos diez años debido al mayor desarrollo económico durante los dos últimos años, en comparación con el crecimiento en el consumo de energía.

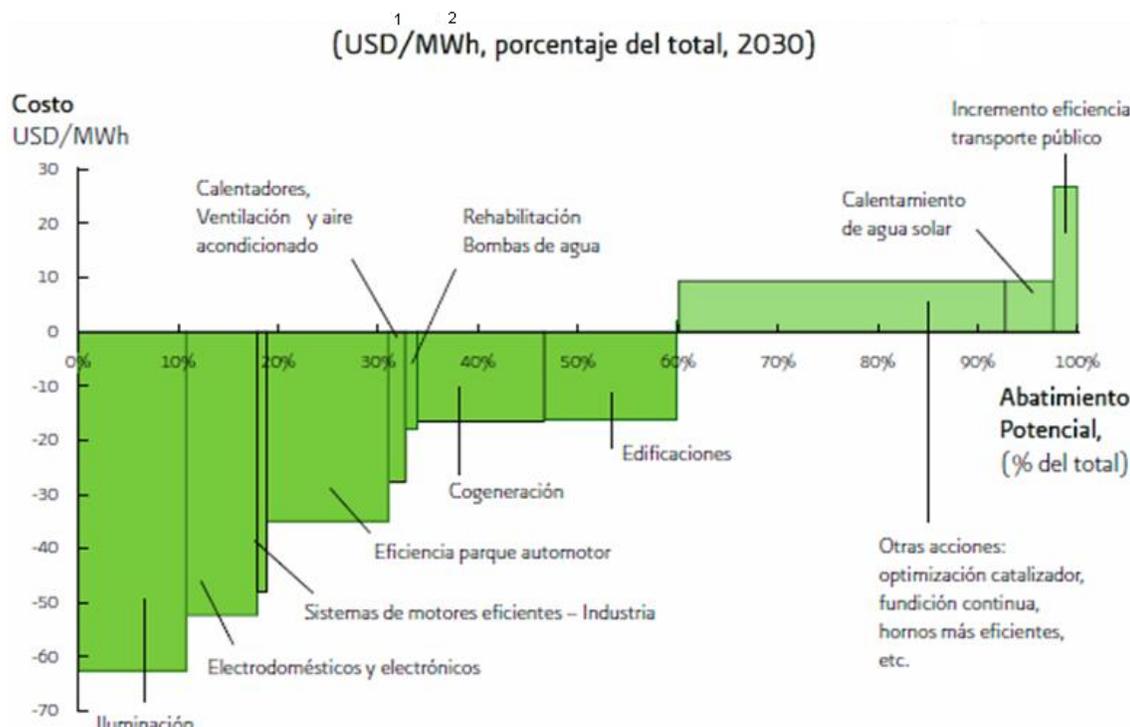


* kJ = Kilojoule

Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.16. Intensidad energética y consumo total de energía per cápita

Existe aún un gran potencial para reducir el consumo final de energía de manera costo-eficiente. La siguiente gráfica muestra las oportunidades de ahorro más importantes en nuestro país en consumo final de energía.



Nota 1: USD = Dólares estadounidenses

Nota 2: MWh = Megawatt - hora

Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.17. Curva de costos de oportunidad de ahorro en consumo final de energía

Por otro lado, los subsidios al consumo de energéticos representan montos significativos y desincentivan el consumo eficiente.

La meta concreta que la SENER ha planteado para el año 2026 para este objetivo es:

1.- Lograr un ahorro de energía de 15% respecto a la proyección de la línea base del consumo nacional de energía.

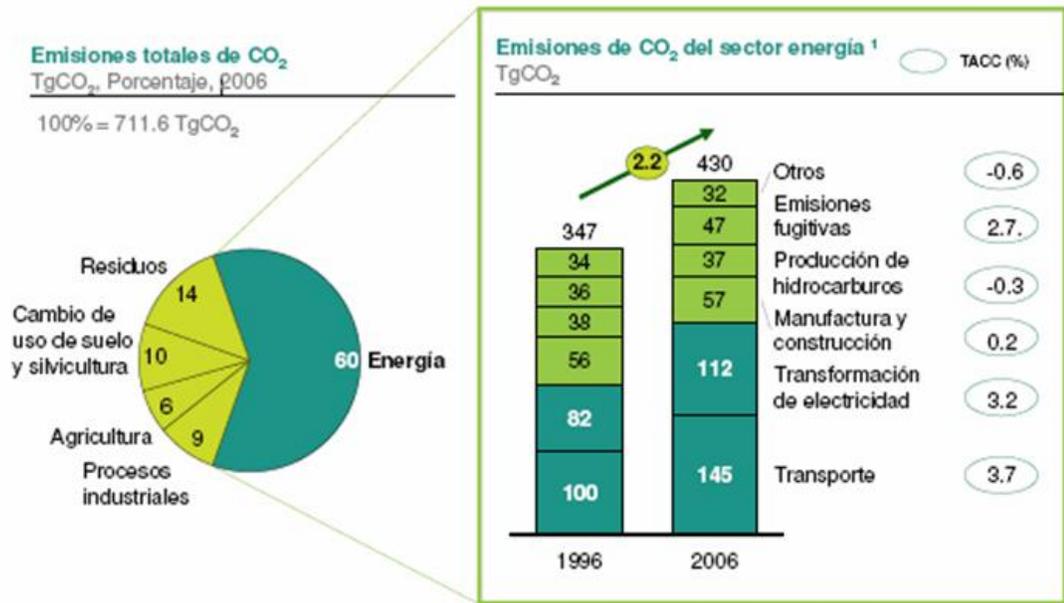
1.5.1.1.4. Reducir el impacto ambiental del sector energético

La producción y el consumo de energía provocan daños al medio ambiente tales como calentamiento global, contaminación atmosférica, lluvia ácida y contaminación por desechos de hidrocarburos o radioactivos, entre otros. La prevención, contención, remediación o compensación adecuada de éstos permiten lograr el desarrollo de un modo sustentable.

Las emisiones de CO₂ del sector energía han sido provocadas principalmente por el sector eléctrico y el de transporte.

La siguiente figura muestra los porcentajes de emisiones de CO₂ por sector en 1996 y 2006.

TgCO₂*



* TgCO₂ = Teragramos de CO₂

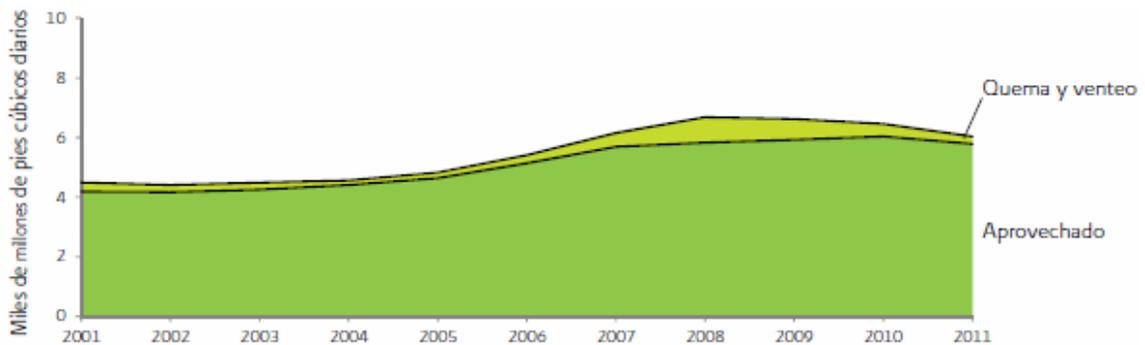
Nota 1: No incluye emisiones de hidrofluorocarburos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y sulfurofluors (SFs)

Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.18. Emisiones de CO₂ en México

De acuerdo con el Programa Especial de Cambio Climático, de continuar con esta tendencia, las emisiones totales del país crecerán 50 % en 2030 y 70 % en 2050.

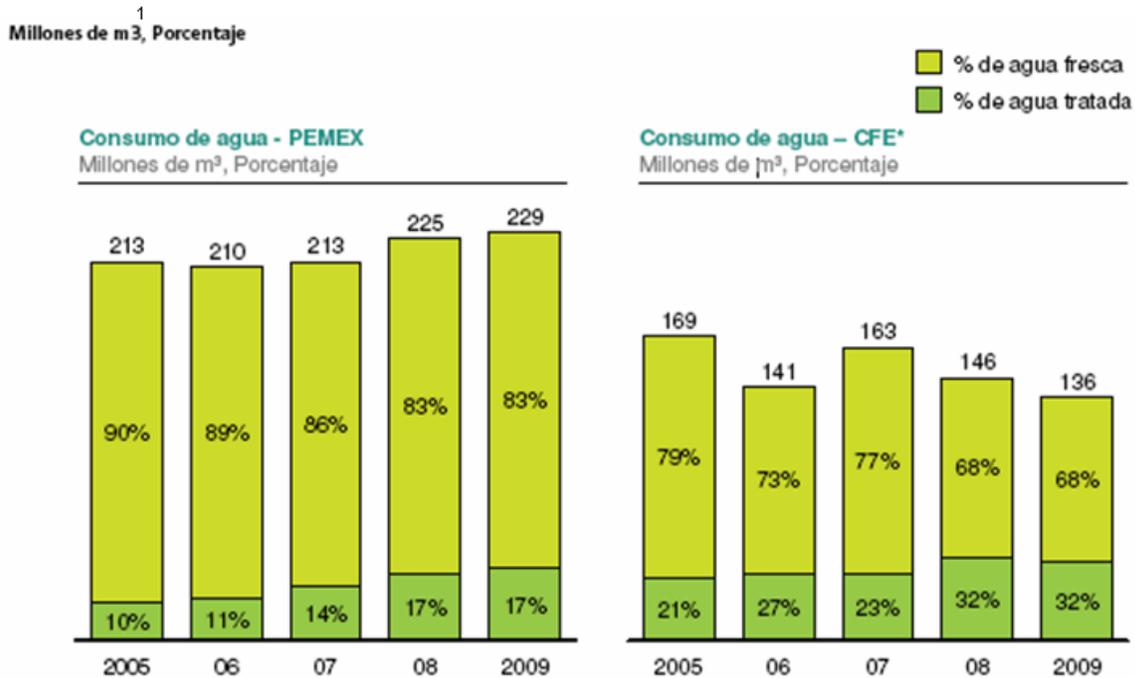
Por otro lado, aunque la quema y venteo de gas ha disminuido, como se puede apreciar en la siguiente figura, aún se deben tomar medidas para aprovechar este combustible y evitar el daño ambiental que provoca su desperdicio y liberación.



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.19. Aprovechamiento, quema y venteo de gas

Adicionalmente, el sector energético en nuestro país consume grandes cantidades de agua fresca. La evolución en el consumo de agua en el sector energético se puede apreciar en la siguiente figura:



Nota 1: m³ = metro cúbico

* No incluye agua de hidroeléctricas

Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.20. Consumo de agua en el sector energético

Las metas concretas que la SENER ha planteado para el año 2026 para este objetivo son:

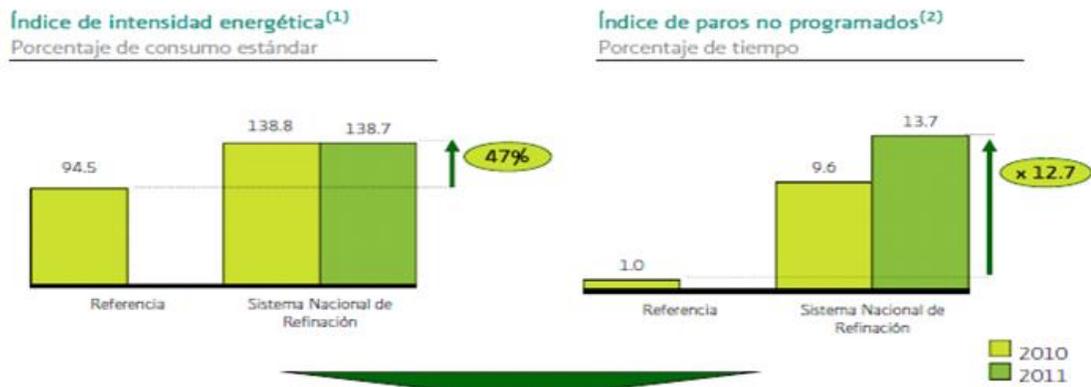
- 1.- Lograr una disminución en las emisiones de CO₂ del sector energético de 51.2 millones de toneladas anuales respecto al escenario Inercial.
- 2.- Incrementar el aprovechamiento de gas natural, en línea con los estándares internacionales.

1.5.1.1.5. Operar de forma eficiente, confiable y segura la infraestructura energética

Los procesos de transformación del sector hidrocarburos presentan brechas en su desempeño operativo respecto a estándares internacionales. De modo similar, los procesos del sector eléctrico presentan también brechas en su desempeño operativo respecto a los mismos estándares.

En las siguientes figuras, se puede apreciar la evolución de los indicadores operativos más importantes del sector energético en los últimos años.

Brechas en desempeño operativo del sector refinación



- Un indicador de desempeño operativo es la comparación de indicadores ajustados por factores estructurales entre el Sistema Nacional de Refinación (SNR) y refinerías internacionales.
- Las refinerías del SNR se encuentran ubicadas en el cuarto cuartil respecto a estándares internacionales en los principales indicadores operativos (costo de operación, disponibilidad operacional, uso eficiente de energía, mantenimiento).

[1] Solomon Associates 2010, RSC III (USGC). Referencia Costa Norteamericana del Golfo de México.

[2] Se refiere al IPNP Total (operación + mantenimiento + retrasos + fallas eléctricas + falta de carga + calidad + altos inventarios + retraso proyectos + clima).

Brechas de desempeño operativo del sector eléctrico^{1/}



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.21. Indicadores Operativos del Sector Energético nacional (1)



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.22. Indicadores Operativos del Sector Energético nacional (2)

Adicionalmente, en el 2011 se tuvo un margen de reserva de capacidad de generación eléctrica del 26%, lo que implica gastos financieros excesivos por el sub-uso de la infraestructura eléctrica.

Las metas concretas que la SENER ha planteado para el año 2026 para este objetivo son:

- 1.- Llevar al Sistema Nacional de Refinación (SNR) del cuarto al segundo cuartil de desempeño operativo respecto a estándares internacionales.
- 2.- Disminuir las pérdidas de electricidad a niveles comparables con estándares internacionales.
- 3.- Disminuir el margen de reserva de capacidad de generación eléctrica a un nivel de 13%.

1.5.1.1.6. Fortalecer y modernizar la infraestructura del sector energético

Desde 1998, la longitud de la red del Sistema Nacional de Gasoductos (SNG) ha permanecido prácticamente sin cambios, totalizando 9 mil kilómetros. La red actual de transporte, que considera tanto ductos de PEMEX como privados, asciende a 11 mil kilómetros.

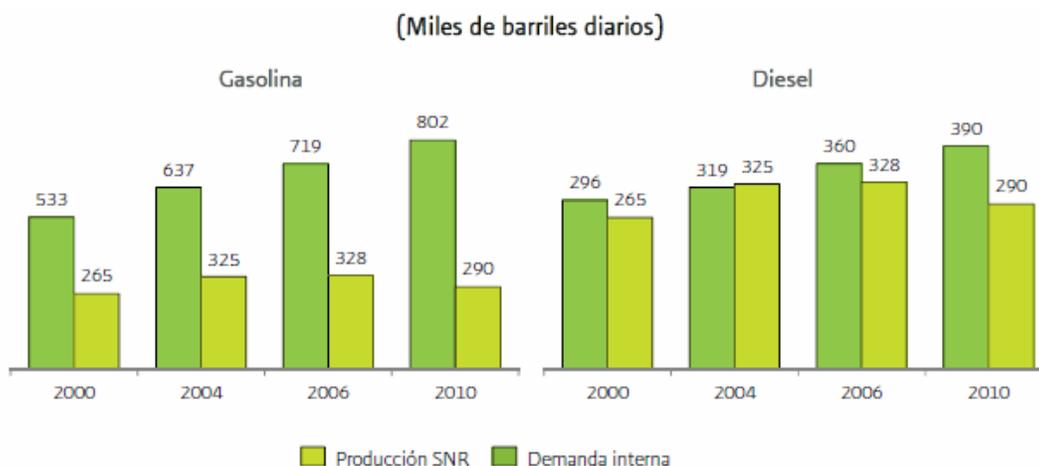


Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.23. Red actual de ductos y centros procesadores de gas

Entre 1995 y 2010, la red de transporte y distribución de gas natural en México aumentó 1.1 % promedio anual, mientras que la demanda lo hizo 5.8% anual. En 2011, el volumen físico de transporte de gas natural fue de 4,616 miles de metros cúbicos.

Por otro lado, la infraestructura del Sistema Nacional de Refinación debe hacer frente a la creciente demanda de combustibles. Actualmente, se complementa la oferta nacional con otras fuentes de suministro. De 2000 a 2011, la producción de gasolinas en nuestro país disminuyó a una tasa de 0.1% promedio anual mientras que la demanda creció 3.8% promedio anual.



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.24. Producción del SNR VS demanda interna

En cuanto a las líneas de transmisión y distribución del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), algunas de ellas presentan periodos de saturación debido a factores como una demanda máxima coincidente en periodos de tiempo similares y la lejanía de los lugares donde se lleva a cabo la generación.

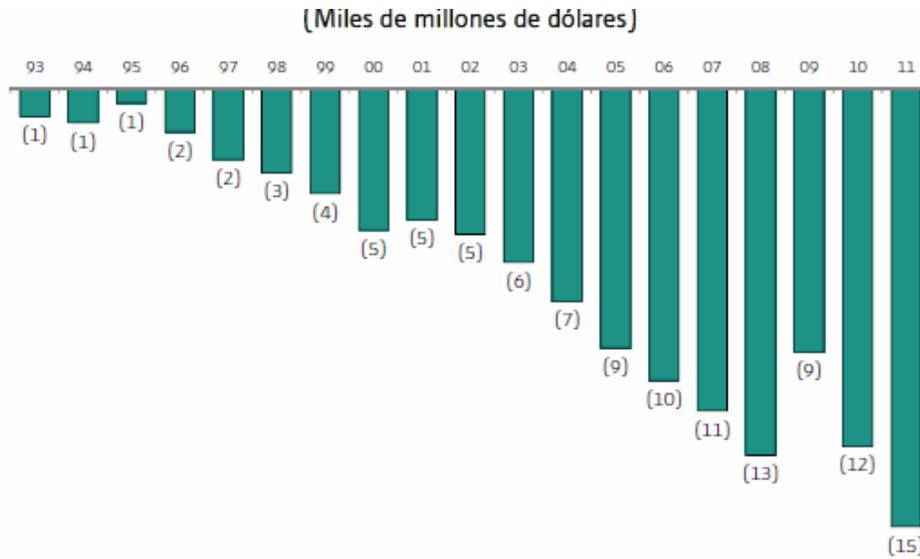
Las metas concretas que la SENER ha planteado para el año 2026 para este objetivo son:

- 1.- Incrementar el volumen físico de transporte de gas natural a 7,833 miles de metros cúbicos.
- 2.- Lograr un incremento de 2.1% en la red de transmisión.

1.5.1.1.7. Impulsar el desarrollo de la industria petroquímica nacional

Desde mediados de los años noventa del siglo pasado hasta principios de la década pasada, en nuestro país, cayó la producción y aumentaron las importaciones de productos petroquímicos. Esto fue el resultado de la separación de la cadena petroquímica, debido al tratamiento legal diferenciado entre la llamada petroquímica básica y la secundaria. Mientras la petroquímica básica está reservada al estado, la secundaria está abierta a la participación de actores privados.

Lo anterior ha provocado que, como se muestra en la figura siguiente, la balanza comercial de productos petroquímicos haya sido cada vez más deficitaria en los últimos años.



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 1.25. Balanza comercial de productos petroquímicos y de origen petroquímico

Como consecuencia, en el año 2011, la capacidad nacional de producción de petroquímicos fue de sólo 8,943 miles de toneladas anuales.

La meta concreta que la SENER ha planteado para el año 2026 para este objetivo es:

- 1.- Incrementar la capacidad nacional de producción de petroquímicos a 22,562 miles de toneladas anuales.

1.6. Conclusiones del Capítulo 1

La situación actual del sector energético de México es producto, por un lado, de las fuentes naturales de energía a las que tiene acceso por su situación geográfica y climática y, por otro, del uso, aprovechamiento, gestión y administración que históricamente sus gobernantes les han dado.

El descubrimiento en el siglo pasado de grandes reservas de petróleo en territorio nacional, su posterior explotación y su gran demanda mundial, han traído enormes ventajas económicas a nuestro país y le han permitido cubrir gran parte de sus necesidades económicas y sociales; sin embargo, la falta de previsión le ha provocado desventajas como la alta dependencia que tienen su economía y su sector eléctrico de los combustibles fósiles.

A causa, en gran medida, de lo anterior, el sector energético de nuestro país, actualmente enfrenta retos que ya han sido analizados por las dependencias del estado correspondientes. Entre los retos más importantes que hoy enfrenta el sector energético nacional están: restituir reservas de hidrocarburos; incrementar la producción de crudo y de gas natural; diversificar las fuentes de energía, dando prioridad al incremento en la participación de las tecnologías no fósiles y reducir el impacto ambiental del sector energético.

Aunque las instituciones gubernamentales correspondientes han propuesto líneas de acción concretas para hacer frente a los retos anteriores en el periodo 2012 -2026; no se cuenta con una estrategia concreta a largo plazo para eventualmente eliminar la dependencia económica y energética que tiene nuestro país de los combustibles fósiles y el impacto ambiental que ésta genera.

Para poder afrontar a largo plazo muchos de los retos del sector energético nacional que hoy son evidentes, nuestro país debe explorar fuentes de energía y tecnologías que hoy no han sido consideradas. A muchas de ellas, en México se les considera inviables por estar aún en fase de investigación. Sin embargo, el día de hoy, algunas de ellas son vistas en muchos ambientes técnicos y científicos a nivel mundial, como opciones que serán en el futuro, técnica y económicamente viables para enfrentar los retos energéticos y ambientales en las siguientes décadas.

Capítulo 2. Análisis del requerimiento de energía en México en el mediano y largo plazo y factores prioritarios para su planeación

2. Análisis del requerimiento de energía en México en el mediano y largo plazo y factores prioritarios para su planeación

Como continuación al capítulo anterior, en éste se buscará determinar desde un punto de vista cuantitativo y cualitativo la magnitud de los requerimientos energéticos que México deberá cubrir en las siguientes décadas. Para lograrlo se partirá de una proyección de estos requerimientos hasta el año 2026, basado en los estudios que año con año desarrolla la CFE para la planeación de la infraestructura eléctrica nacional.

Posteriormente, se hará una proyección sustentada en factores técnicos y económicos realistas de los requerimientos nacionales de energía eléctrica para el año 2100.

A continuación se analizarán los factores técnicos, económicos y ambientales que deberán tomarse en cuenta para determinar las tecnologías que deberán cubrir la demanda de energía eléctrica en los periodos proyectados.

Finalmente, a partir de lo anterior, se planteará en las conclusiones algunas características prioritarias que deberán tener las tecnologías que cubran la mayor parte de los requerimientos energéticos nacionales en el mediano y largo plazo.

2.1. Necesidades de energía en el mediano y largo plazo en México

En el Capítulo 1 se analizó de modo general la situación actual de los recursos energéticos en México. En el presente capítulo se tiene por objetivo hacer una proyección realista de los requerimientos energéticos nacionales para los años 2026 y 2100.

Por fortuna, existe en México una prospectiva detallada de la infraestructura de generación requerida en nuestro país en el mediano plazo. El Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico (POISE), es un documento que publica cada año la Comisión Federal de Electricidad (específicamente, su Subdirección de Programación), en el cual expone los resultados más importantes de la planeación que se ha hecho de la infraestructura eléctrica nacional para los siguientes 15 años, a partir de un análisis detallado basado en el crecimiento económico histórico nacional y sus pronósticos futuros.

Cabe destacar que el siguiente subcapítulo está basado en el POISE 2012-2026 por lo que en él podrán encontrarse sus resultados más importantes. Con base en lo anterior, en el subcapítulo que le sigue se hará una proyección para los requerimientos energéticos del país para el año 2100.

2.1.1. Requerimientos de energía en México para el periodo 2011-2026 ¹

Para exponer el cálculo de la capacidad de generación necesaria para el año 2026 descrito en el POISE 2012 – 2026, se presenta en primer lugar la proyección de la demanda máxima de potencia para ese año. Para determinar esta proyección, fue necesario analizar la información histórica del consumo de electricidad nacional y su relación con la evolución de la economía, los precios de los combustibles y el precio de la electricidad para los distintos usuarios. Analizando la evolución de las variables fundamentales que influyen en el desarrollo del consumo eléctrico –principalmente, el crecimiento de la economía- es posible elaborar estimaciones prospectivas para dicho consumo.

A nivel macroeconómico, generalmente se elaboran tres posibles escenarios para la evolución del Producto Interno Bruto (PIB) (alto, planeación y bajo). Para fines del presente trabajo, para realizar el ejercicio de planeación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) 2012-2026, se consideró el escenario de planeación ya que es el que considera las proyecciones económicas con mayor probabilidad de realización en los próximos años.

En el escenario de planeación, la tasa media de crecimiento anual (tmca) del PIB global para el periodo 2011-2026 se consideró de **3.6%**.

Adicionalmente, para hacer una proyección de las necesidades de electricidad en los siguientes años, la subdirección de planeación de la CFE toma en cuenta los siguientes factores:

- La evolución de las ventas de energía eléctrica en los sectores tarifarios y zonas del país
- Los registros históricos en los sectores tarifarios y zonas del país
- La evolución histórica de las pérdidas de energía en zonas, regiones y áreas
- El desarrollo de la demanda en bancos de transformación
- El comportamiento histórico de los factores de carga de diversidad de las zonas
- Los valores reales y estimaciones futuras de los usos propios de generación
- La caracterización y proyección de las cargas autoabastecidas
- Los escenarios del consumo sectorial de electricidad

El pronóstico de la demanda máxima bruta del Sistema Interconectado Nacional (SIN) muestra una tendencia moderada al alza, de modo similar al PIB. La evolución histórica de la demanda máxima bruta de 2001 a 2010, que en ese año fue de 35,310 megawatts (MW), presentó un crecimiento de 2.6% anual. Para el periodo 2011 – 2026 se pronostica una tasa media anual de crecimiento de 4.0% para este indicador, por lo que, para el año 2026, su valor sería de 66,514 MW.

¹ Fuente del subcapítulo: Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2012-2026 (POISE 2012-2026), Subdirección de Programación, CFE

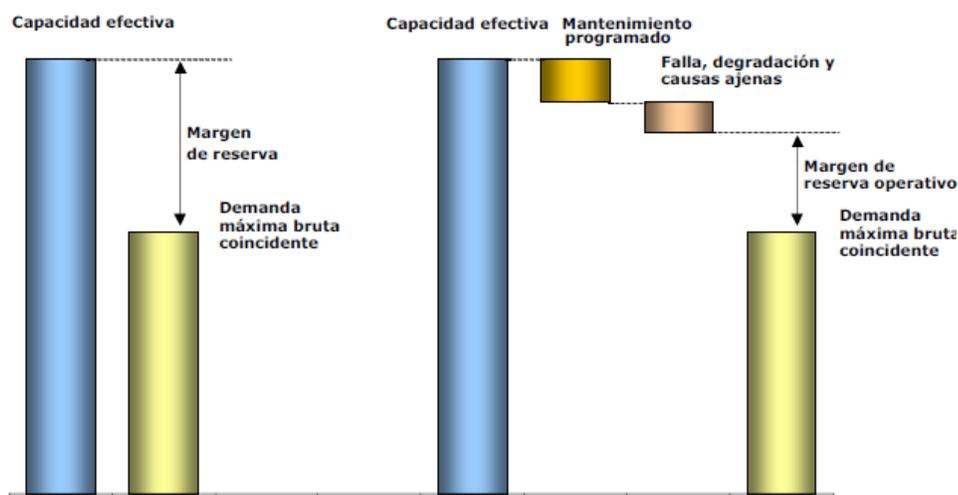
El POISE 2012-2026 muestra también la planificación de las centrales generadoras que cubrirán las necesidades de energía descritas.

“La planificación del sistema eléctrico requiere datos actualizados sobre las alternativas de generación y transmisión factibles de incorporarse al programa de expansión. Esta información se obtiene de estudios que realiza CFE para identificar y evaluar proyectos y tecnologías, así como de otras fuentes especializadas.”²

La CFE elabora un plan óptimo y una selección de tecnologías basado en el análisis técnico-económico de diversas alternativas, utilizando modelos que optimizan el comportamiento de todo el sistema ante diferentes condiciones de operación.

“Estos análisis se realizan para el mediano y largo plazos con base en las premisas de evolución de la demanda y precios de combustibles, así como los costos y la eficiencia de las opciones tecnológicas para la generación de energía eléctrica.”³

Adicionalmente, es necesario contar con un margen de reserva (MR) de capacidad y con un margen de reserva operativo. El margen de reserva es la capacidad de generación adicional a la demanda máxima bruta de potencia, que es necesaria para asegurar la cobertura de esta última. Esto se ilustra con claridad en la siguiente figura:



Fuente: POISE 2011-2025, Subdirección de Programación, CFE

Figura 2.1. Margen de reserva y margen de reserva operativo de capacidad

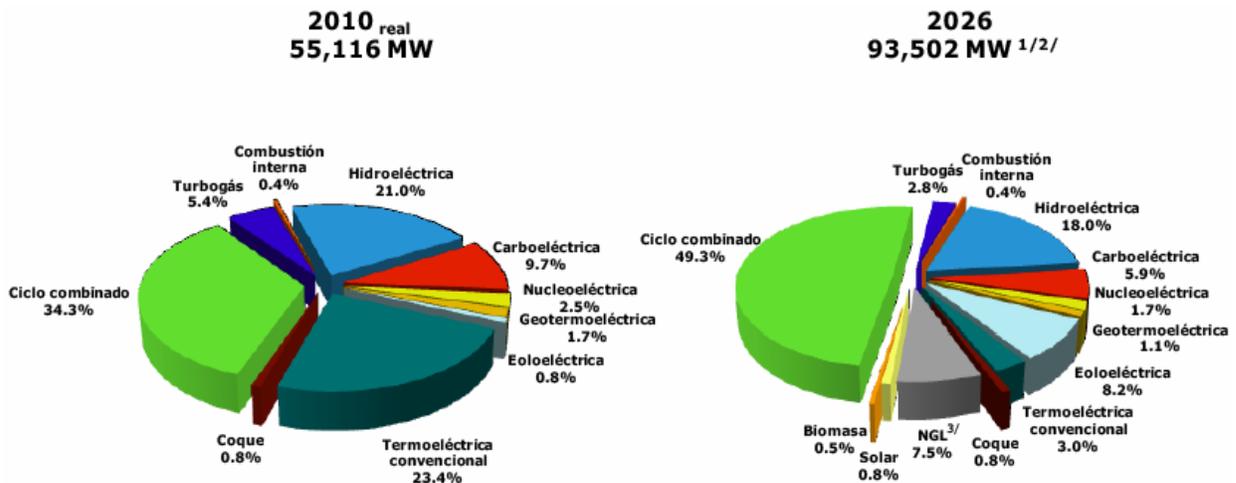
Tomando en cuenta los proyectos adicionales incorporados al sistema eléctrico nacional, las salidas de infraestructura, el autoabastecimiento y la modernización de la infraestructura y considerando un margen de reserva conservador, el POISE 2012 – 2026 expone detalladamente la proyección de la expansión del sistema eléctrico nacional.

² Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2012-2026 (POISE 2012-2026), Subdirección de Programación, CFE, 3-1 p.

³ Ibidem

De acuerdo a las proyecciones y con base en lo analizado, al final del periodo referido, la participación respecto a la capacidad total de generación del Sistema Eléctrico Nacional, de tecnologías a base de gas natural será de 52.1%; las fuentes renovables alcanzarán una participación de 28.6%; las que operarán a base de combustóleo, coque y diesel reducirán su participación a 4.2%; el carbón tendrá una participación a 5.9%, la energía nuclear de fisión participará con 1.7% y la capacidad de Nueva Generación Limpia (NGL, ver la siguiente figura) representará el 7.5%.

En la siguiente figura se muestra la participación de las tecnologías en el total de la capacidad de generación en el año 2010 y la proyectada para el año 2026 para el Sistema Eléctrico Nacional.



Notas: 1 Incluyen incrementos en RM de Laguna Verde, Altamira, Río Escondido; modificación de capacidad en el Sauz U5; y varias centrales hidroeléctricas (538.8 MW).

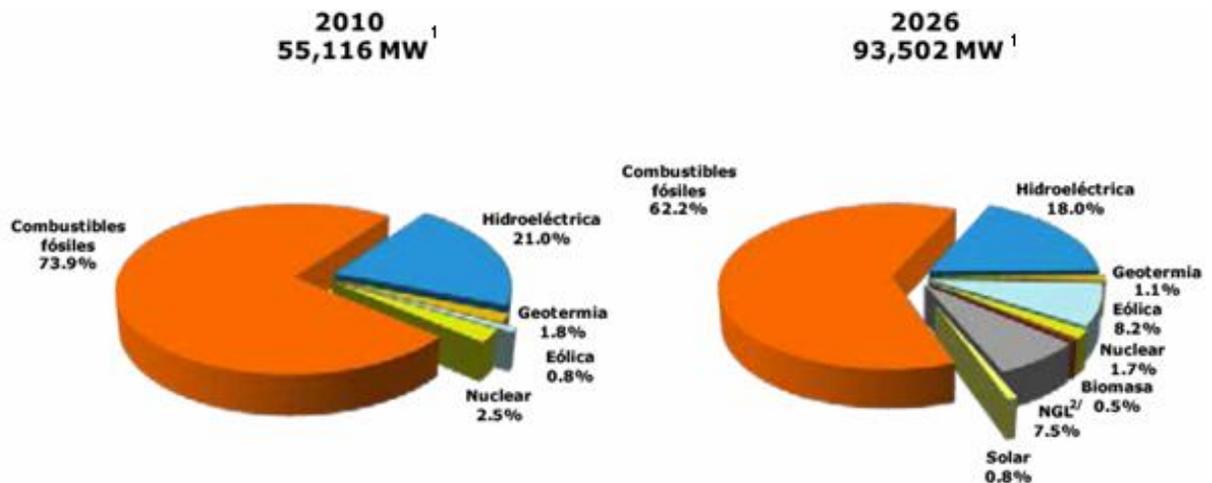
2 Incluye autoabastecimiento remoto.

3 Nueva generación limpia (NGL): Ciclo combinado y carboeléctrica con captura y secuestro de CO₂; nucleoeléctrica, eoloeléctrica, solar o importación de capacidad.

Fuente: POISE 2012-2026, Subdirección de Programación, CFE

Figura 2.2. Participación de la capacidad de generación del sistema eléctrico

Es importante notar que el uso de combustibles fósiles en la capacidad instalada de generación reducirá su participación de 73.9% en 2010 a 62.2% en 2026 (sin tomar en cuenta que una parte de la capacidad de la fracción identificada como NGL, pudieran utilizar combustibles fósiles que incrementarían esta participación).



Notas: 1 Incluye autoabastecimiento remoto.

2 Nueva generación limpia (NGL): Ciclo combinado y carboeléctrica con captura y secuestro de CO₂; nucleoelectrica, eoloelectrica, solar o importación de capacidad.

Fuente: POISE 2012-2026, Subdirección de Programación, CFE

Figura 2.3. Capacidad bruta por tipo de combustible del Sistema eléctrico

En México, como se ha visto en este subcapítulo, la proyección de la infraestructura necesaria para satisfacer los requerimientos de energía se hace con eficiencia, practicidad y profesionalismo. De acuerdo a lo analizado, puede decirse que se encuentra suficientemente planificada y asegurada para los próximos quince años.

2.1.2. Requerimientos de energía en México para el periodo 2026 - 2100

Como pudo comprobarse en el subcapítulo anterior, las necesidades de infraestructura de generación en México son planeadas y proyectadas cada año por la entidad competente, la CFE, para los siguientes quince años. Esto asegura que, año con año, los cambios en los factores importantes son tomados en cuenta para optimizar la siguiente planeación.

En este subcapítulo, se busca extrapolar estas proyecciones en el largo plazo. Una vez establecida la efectividad de la planeación que realiza el POISE, podemos decir que, basada en ella, la proyección para años futuros tiene bases realistas.

Se pretende a continuación hacer una proyección para los requerimientos de capacidad de generación en México para el periodo de 2026 a 2100. El análisis se basará en los factores analizados en el subcapítulo anterior; sobre todo, en los pronósticos de crecimiento del PIB y de la demanda máxima bruta, en el margen de reserva y en la participación de tecnologías en la capacidad de generación.

Como se analizó, se pronostica para el periodo 2011 – 2026 una tasa media de crecimiento anual del PIB global de 3.6% y una tasa media anual de crecimiento del 4.0% para la evolución de la demanda máxima bruta de potencia.

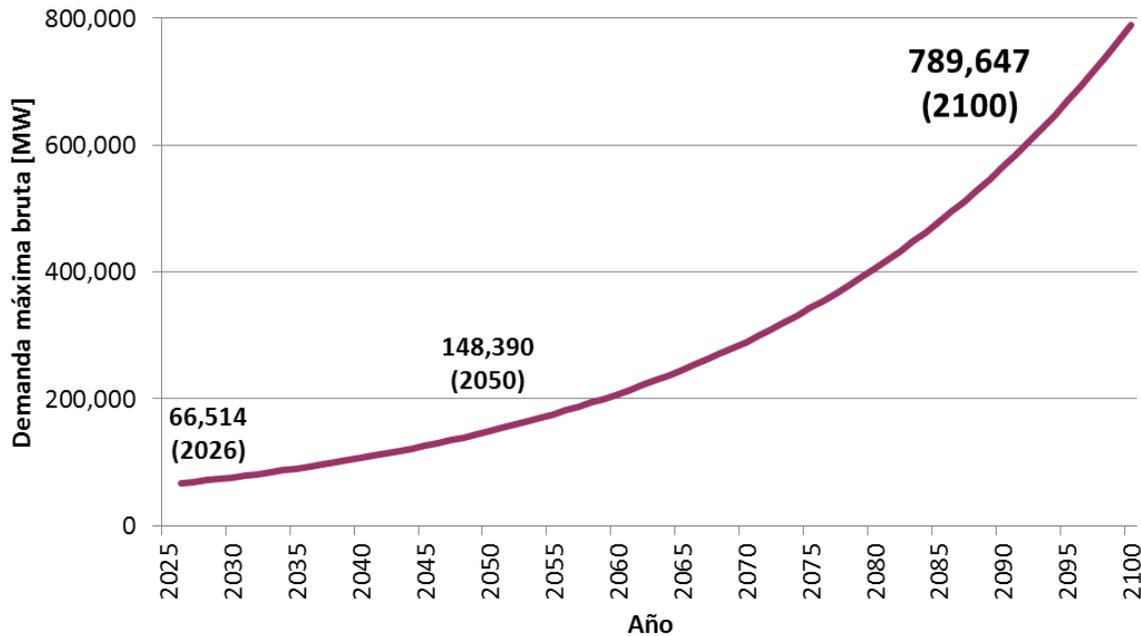
Para el periodo 2026 – 2100, se planteará un escenario más conservador por lo que, en base a lo analizado, se propondrá una tasa media de crecimiento anual del PIB global de 3.1%, y una tasa media anual de crecimiento del 3.4% para la evolución de la demanda máxima bruta. Lo anterior se resume en el siguiente cuadro:

Tasa media anual de crecimiento	Periodo 2011 - 2026	Periodo 2026 - 2100
PIB	3.6%	3.1%
Demanda máxima bruta de potencia	4.0%	3.4%

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del POISE 2012 - 2026

Cuadro 2.1. Comparación de tmca del PIB y de la demanda bruta de potencia para los periodos 2011 – 2026 y 2026 - 2100

Haciendo la proyección de la demanda máxima bruta de potencia para el periodo 2026 – 2100 partiendo de la demanda proyectada para el año 2026 de 66,514 MW y usando una tasa media de crecimiento anual de 3.4%, se llega a que, para el año 2100, la demanda bruta de potencia en el territorio nacional será de 789,647 MW, lo anterior se ilustra en la siguiente figura:



Fuente: Elaboración propia a partir de proyecciones y datos del POISE 2012 - 2026

Figura 2.4. Evolución de la demanda máxima bruta de potencia para el periodo 2026-2100 con una tasa media anual de crecimiento de 3.4%

Para proyectar las necesidades de capacidad de generación instalada para el año 2100, se debe considerar un margen de reserva adicional a la demanda máxima bruta de energía para ese año. Puede tomarse de un modo confiable el margen de reserva proyectado para el año 2026 ya que las consideraciones técnicas para calcular este factor no cambian en el largo plazo.

De este modo, puede verse que el margen de reserva proyectado por la CFE para el año 2026 será:

$$\text{Margen de reserva 2026} = \frac{\text{Capacidad de generación 2026}}{\text{Demanda máxima bruta 2026}} - 1 = \frac{93,502 \text{ MW}}{66,514 \text{ MW}} - 1 = 40.57\%$$

(2.1)

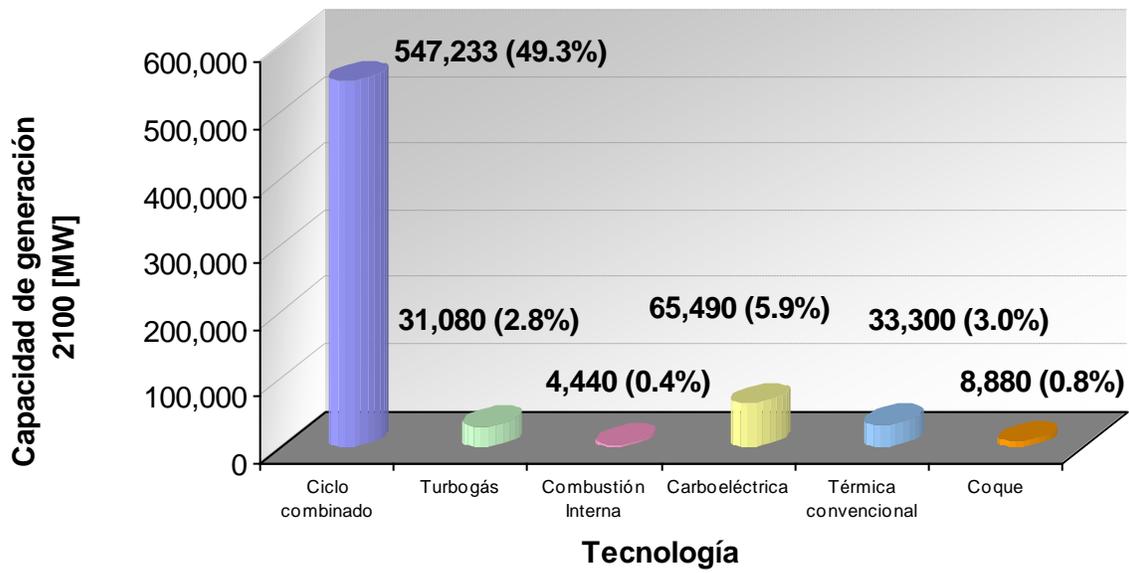
Usando este mismo margen de reserva, puede calcularse la capacidad de generación proyectada para el año 2100:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de generación 2100} &= \text{Demanda máxima bruta 2100} \times (1 + \text{Margen de reserva 2100}) \\ &= 789,647 \text{ MW} \times (1 + 0.4057) = 1,110,007 \text{ MW} \end{aligned}$$

(2.2)

Por lo tanto, en virtud del análisis anterior, puede proyectarse de que para el año 2100 será necesaria en nuestro país una capacidad de generación instalada de **1,110,007 MW**. Es de notar que es 20.14 veces la capacidad de generación instalada en el año 2010 y 11.87 veces la capacidad de generación instalada proyectada para el año 2026.

En este punto cabe destacar que, si se pretendiera conservar el porcentaje de participación de las distintas tecnologías en la capacidad de generación del sistema eléctrico, proyectado para el año 2026, sería necesario instalar, para el año 2100, 734,825 MW (62.2%) de capacidad de generación a base de combustibles fósiles. En la siguiente figura se muestra la capacidad de generación a base de combustibles fósiles que habría en el año 2100, por tipo de tecnología, bajo el supuesto indicado:



Fuente: Elaboración propia a partir de proyecciones y datos del POISE 2012 - 2026

Figura 2.5. Participación proyectada de las tecnologías de generación a base de combustibles fósiles en el año 2100, de conservarse la participación del año 2026

Cabe destacar que en el año 2100, en este caso, y suponiendo que las eficiencias respectivas de las tecnologías de generación se mantengan en valores similares a los actuales, el consumo de gas natural sería aproximadamente 26.43 veces el de 2010, el consumo de combustóleo y diesel sería 2.88 veces el de 2010 y el consumo de carbón sería 12.25 veces el de 2010.

2.2. Factores que deben tomarse en cuenta para cubrir las necesidades energéticas en el mediano y largo plazo

Una vez realizadas las proyecciones de los requerimientos nacionales de electricidad en el mediano y largo plazo desde un punto de vista cuantitativo, se buscará definir las características más importantes que deberá tener la tecnología de generación que pretenda cubrirlas.

Para ello, es necesario analizar los factores que desde hoy se presentan como relevantes cuando se seleccionan las tecnologías de generación en el corto plazo.

Se presentan a continuación cinco factores que en el futuro marcarán de forma definitiva la pauta a seguir en las políticas energéticas en el escenario nacional e internacional: la alta dependencia energética y económica de los hidrocarburos, la declinación a escala nacional y global de la producción y de las reservas de petróleo crudo, la inestabilidad de los precios del gas natural, las limitantes técnicas y económicas de las energías consideradas “limpias” y las necesidades ambientales de México y el mundo en la generación de energía.

2.2.1. Alta dependencia nacional energética y económica de los hidrocarburos

Como se analizó en el Capítulo 1, las características geográficas de México le han traído muchas ventajas económicas, debidas principalmente a las grandes reservas de petróleo localizadas en territorio nacional sobre todo en los años 70 y 80s del siglo pasado. La mega reserva de Cantarel representó en el año 2005 el 60% ⁴ de la producción nacional de petróleo crudo.

Sin embargo, esto ha acarreado una gran variedad de dilemas económicos que en la actualidad se han hecho evidentes. Uno de los principales tiene que ver con la excesiva dependencia económica de nuestro país de las rentas provenientes del petróleo. Uno de los indicadores más significativos para evidenciar lo anterior es la excesiva carga fiscal a PEMEX. En el año 2006 representó el 8% del PIB. ⁵

El hecho es que la economía Mexicana se encuentra petrolizada. La carga fiscal proveniente del petróleo constituye aproximadamente el 40% ⁶ de los ingresos fiscales del gobierno federal y entre el 34% y el 36% ⁷ de sus ingresos totales.

Durante décadas, la carga fiscal de Pemex fue de alrededor del 60% de sus ingresos. ⁸El gravamen a sus ingresos brutos y no a sus ganancias (ventas menos gastos) ha originado un serio deterioro de la paraestatal desde hace décadas al verse limitada para invertir en su propia modernización y, con esto, conservar su competitividad.

Por otro lado, las fuentes de energía en nuestro país se basan en los hidrocarburos, preponderantemente en el petróleo. De acuerdo con el *International Energy Outlook* (IEO) de 2005 y al balance nacional de energía de SENER, la dependencia energética del petróleo de nuestro país es del 89% ⁹. Como comparación, Estados Unidos depende energéticamente del petróleo en un 65 % y Canadá en un 55% ¹⁰.

⁴ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, *La Crisis del Petróleo en México*, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 36 p.

⁵ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, *La Crisis del Petróleo en México*, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 38 p.

⁶Ibidem

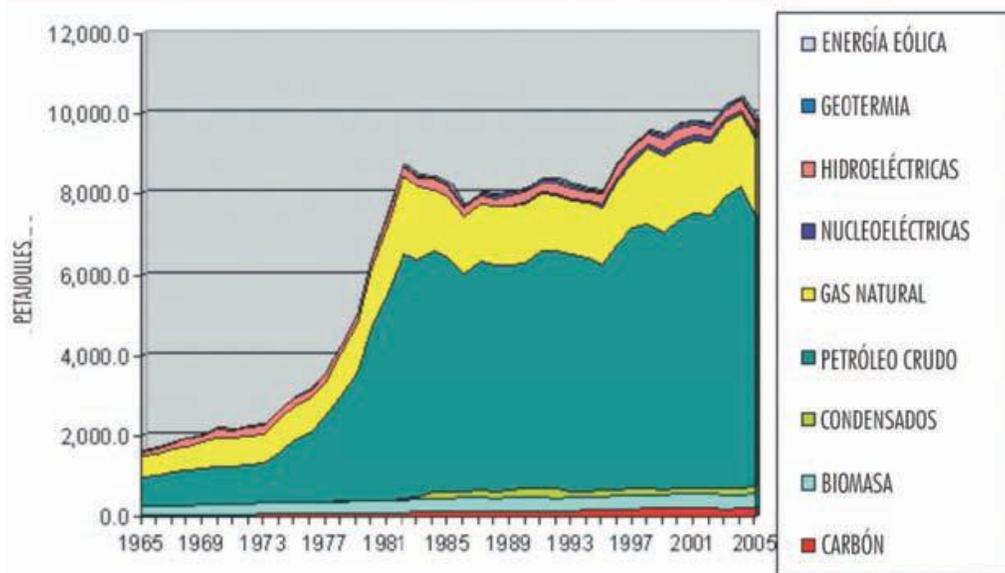
⁷ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, *La Crisis del Petróleo en México*, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 97 p.

⁸ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, *La Crisis del Petróleo en México*, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 56 p.

⁹ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, *La Crisis del Petróleo en México*, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 98 p.

¹⁰ Ibidem

Esta excesiva dependencia del petróleo puede apreciarse en la siguiente figura, donde se muestra la evolución de la producción de la energía primaria en México, en el periodo de 1965 a 2005.



Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.6. Producción de energía primaria en México 1965-2005

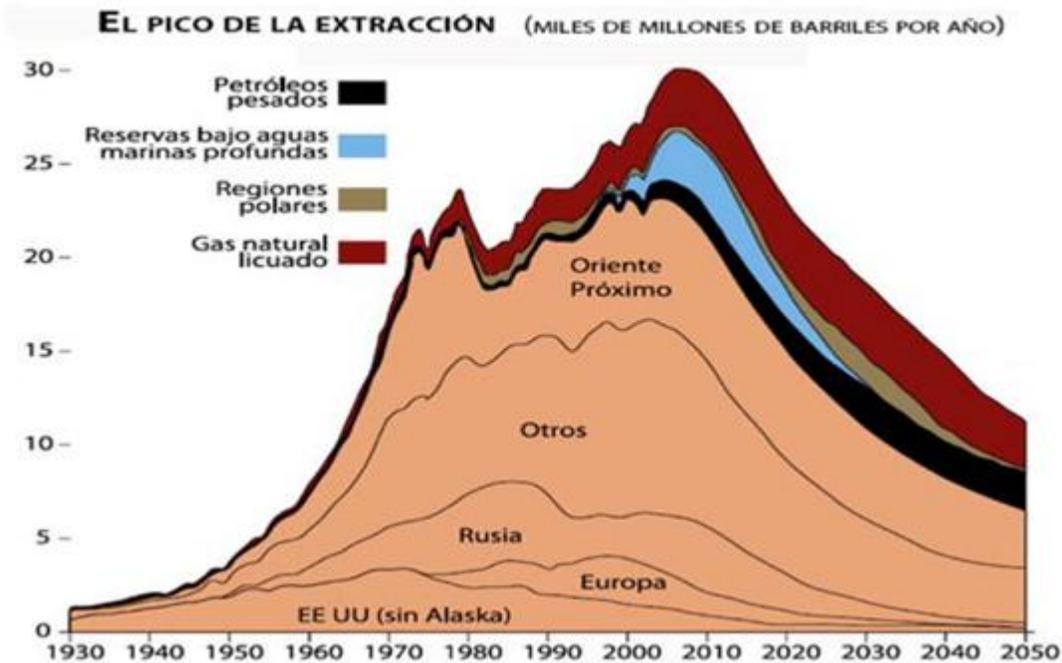
2.2.2. Declinación de la producción de petróleo crudo y declinación de las reservas

Desde la segunda mitad del siglo XIX comenzaron a explotarse los recursos petroleros ubicados en el territorio nacional. A lo largo del siglo XX se descubrieron yacimientos petroleros de grandes dimensiones como Cantarel y Chicontepec que permitieron aumentar la producción de petróleo crudo del país y asegurarla por varios decenios.

Sin embargo, análisis detallados estiman que, tanto las reservas de petróleo nacionales como las mundiales, se encuentran, o se encontrarán en los próximos años, en los máximos niveles de producción de su vida útil. Esto quiere decir que en la actualidad se ha explotado aproximadamente la mitad de la mayor parte de las reservas mundiales y que a partir de este pico, la producción petrolera, tanto la nacional como la mundial, comenzará a declinar.

En la figura 2.15 se muestra una proyección de la producción mundial de petróleo publicada por Hubbert en 1971 en "Scientific American"¹¹. En ella se proyecta la declinación de la producción mundial de petróleo a lo largo de las siguientes décadas. Es evidente que la aceleración de la producción de crudo aceleraría la declinación de la misma:

¹¹ Bullón Miró, Fernando. El Mundo ante el Cenit del Petróleo. Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN), enero, 2006. 14 p.

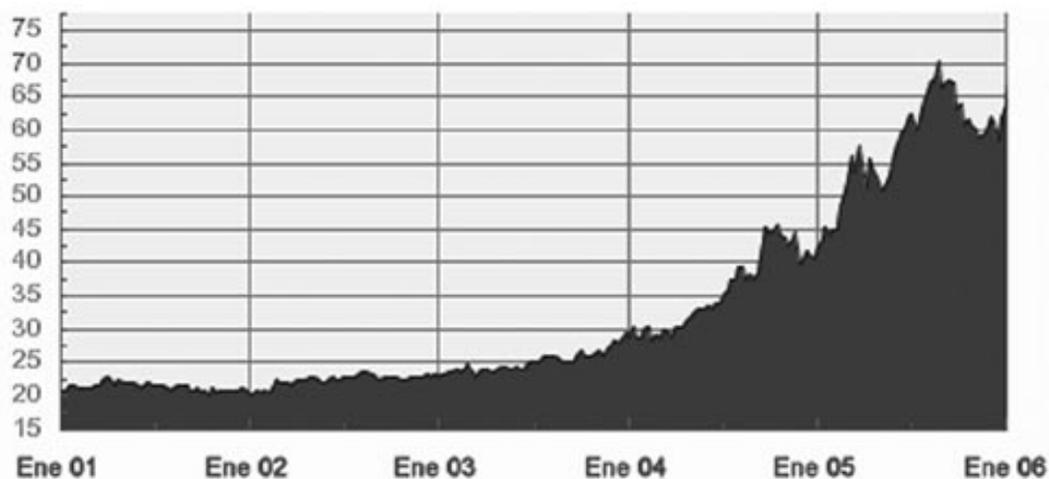


Fuente: Bullón Miró, Fernando. El Mundo ante el Cenit del Petróleo. Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN), enero, 2006

Figura 2.7. Producción de hidrocarburos internacionales proyectadas hasta 2050

El progresivo agotamiento de las reservas mundiales de crudo llevaría en los siguientes años a un descenso en su oferta. Lo anterior, en combinación con una demanda mundial creciente, la alta dependencia a sus productos derivados y la falta de opciones energéticas que puedan reemplazarlo completamente en el corto plazo, conduciría al incremento de su precio en todas las regiones.

La siguiente figura muestra la evolución del precio del petróleo en dólares por barril en la década pasada. Puede apreciarse por un lado una tendencia creciente, y, por otro, una marcada inestabilidad.



Fuente: Bullón Miró, Fernando. El Mundo ante el Cenit del Petróleo. Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN), enero, 2006

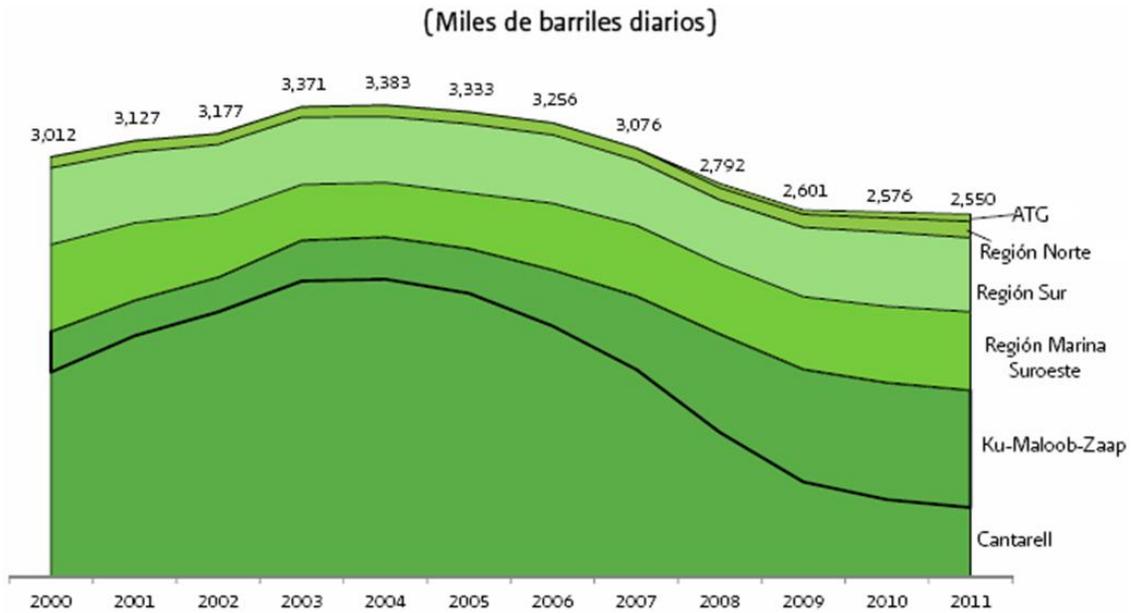
Figura 2.8. Evolución del precio del petróleo en dólares por barril de 2001 a 2006

En México, la declinación de la producción de crudo en los últimos años y el agotamiento de sus reservas es aún más preocupante. De acuerdo a cifras proporcionadas por PEMEX, la producción total de crudo de los yacimientos actuales disminuyó un 14% en promedio anual durante el sexenio 2006-2012 ¹².

La siguiente figura muestra la producción petrolera por yacimiento, en el periodo de 2000 a marzo de 2011 ¹³.

¹² Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 93 p.

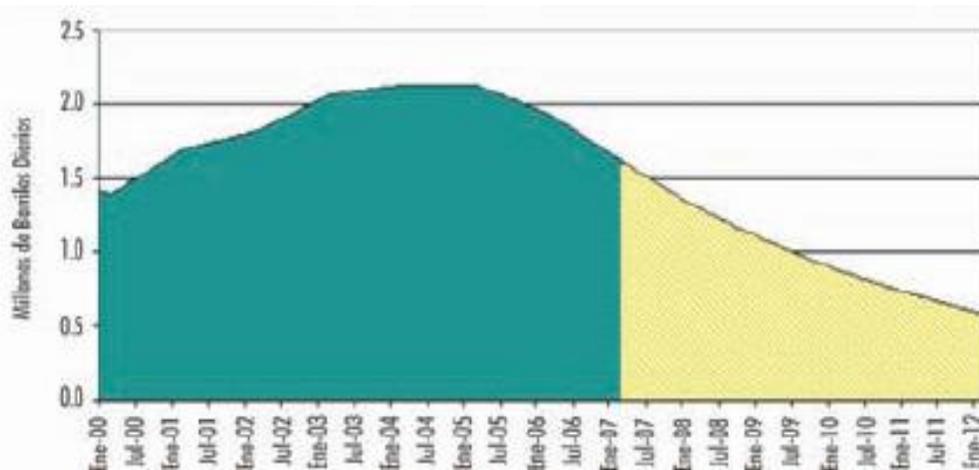
¹³ Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012, 22 p.



Fuente: Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012

Figura 2.9. Producción de petróleo por región y activos integrales

Lo anterior se debe en gran medida al agotamiento de Cantarell, el yacimiento petrolero más grande de México desde hace tres décadas. Cantarell contribuyó en marzo de 2007 con aproximadamente el 50% de la producción total de crudo en nuestro país, sin embargo, de marzo de 2005 a marzo 2007 su rendimiento cayó en más del 26% ¹⁴. PEMEX y la SENER han confirmado desde hace varios años la disminución progresiva de la producción de Cantarell.

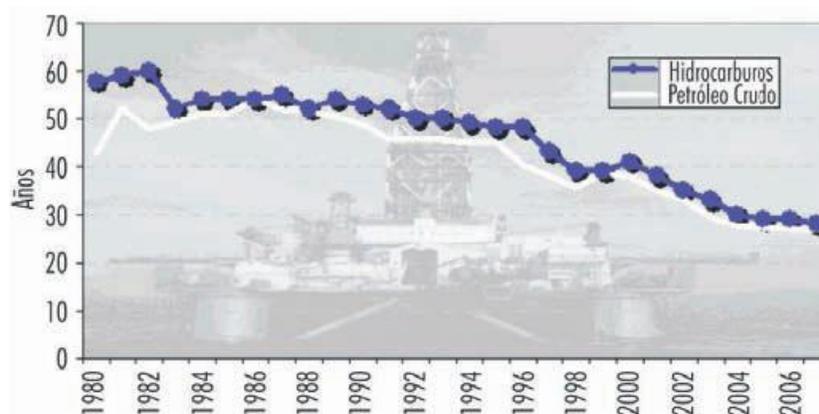


Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.10. Producción de Cantarell 2000 – marzo de 2010 (estimado a partir de marzo de 2007)

¹⁴ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 93 p.

De acuerdo con información proporcionada por la SENER, las reservas totales de hidrocarburos en México (incluidos yacimientos probados, probables y posibles de petróleo crudo, gas natural y condensados) están aseguradas tan sólo para 29 años ¹⁵.



Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.11. Años de vida de las reservas totales de hidrocarburos con base en las tasas actuales de explotación 1980 - 2007

Del mismo modo, de acuerdo con datos de la SENER del 2012, las reservas probadas de petróleo crudo económicamente explotable son de alrededor de 13.8 mil millones de barriles ¹⁶. En el año 2007, cuando eran de 15.5 mil millones de barriles, la misma instancia calculó que, considerando el ritmo de declinación de Cantarel, estas reservas asegurarían la producción de crudo, a la tasa de ese año, tan sólo por una década más ¹⁷.

¹⁵ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 94 p.

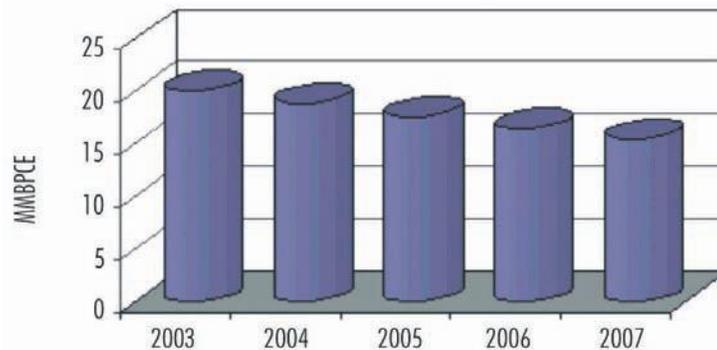
¹⁶ Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012, 20 p.

¹⁷ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 94 p.



Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.12. Reservas probadas, probables y posibles (3P) de hidrocarburos en México 1955-2007



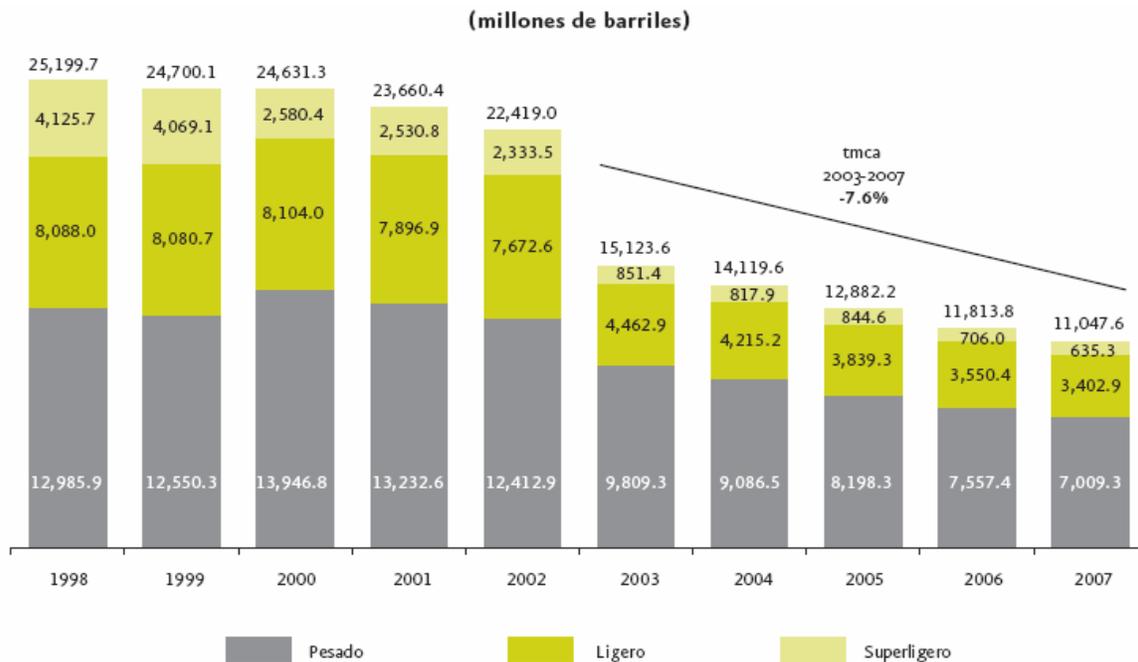
Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.13. Reservas probadas de hidrocarburos en México 2003 – 2007

Para el primer semestre del 2011, las reservas 3P equivalían a 43.161 miles de millones de barriles de petróleo crudo equivalente¹⁸. Se espera en los siguientes años la progresiva declinación de las reservas, tal y como ha ocurrido en la última década.

¹⁸ Indicadores de Operación y Financieros de Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios, Evaluación al primer semestre 2011, PEMEX, 1p.

Adicionalmente, como se muestra en la siguiente figura, la declinación de las reservas probadas de crudo, es aún más evidente si se analiza desde los años anteriores al 2000.



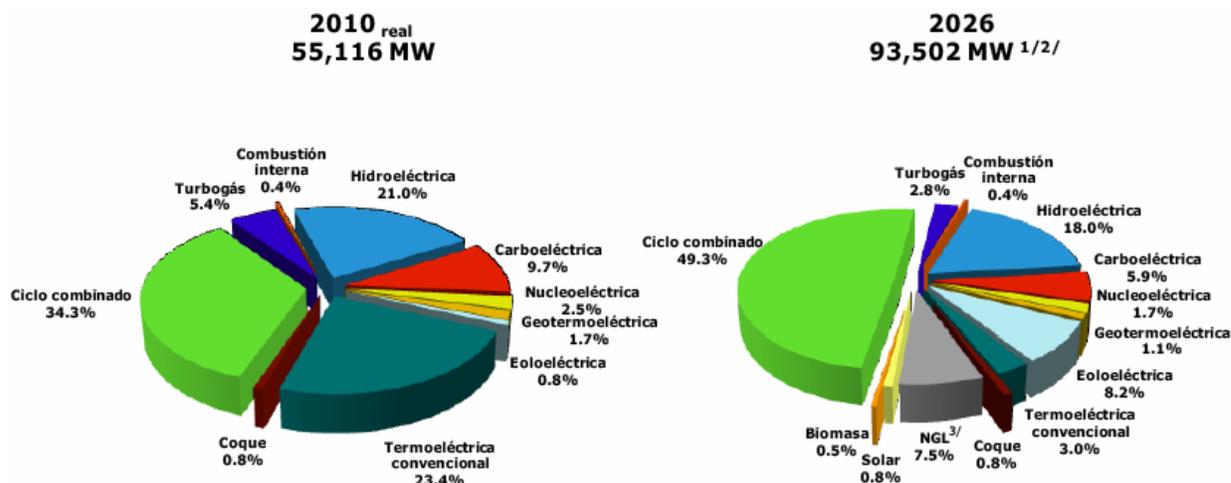
Fuente: Prospectiva del Mercado del Petróleo Crudo 2007-2016, Secretaría de Energía

Figura 2.14. Composición de las reservas probadas por tipo de crudo 1998 - 2007

De este subcapítulo puede desprenderse que, aunque nuestro país ha tenido grandes ventajas en los recursos naturales que se han encontrado en su territorio, tales como las grandes reservas de hidrocarburos; tanto su economía como su sustentabilidad energética no pueden basarse a largo plazo en ellas. De acuerdo con los datos presentados, si las tendencias se mantienen y los pronósticos, aun los más favorables, se cumplen, el petróleo, el gas natural y sus derivados dejarán de ser fuentes de energía económicamente rentables en las siguientes décadas.

2.2.3. Declinación de las reservas del gas natural y la Inestabilidad de sus precios

La política energética de México en los últimos años en materia de generación eléctrica, se ha centrado en la utilización del gas natural como combustible primario para aprovechar su energía química en centrales termoeléctricas con tecnología de Ciclo Combinado. A continuación se muestra, la composición de tecnologías de generación en México en el año 2010 y su proyección para el año 2026.



Notas: 1 Incluyen incrementos en repotenciación y modernización (RM) de Laguna Verde, Altamira, Río Escondido; modificación de capacidad en el Sauz U5; y varias centrales hidroeléctricas (538.8 MW).

2 Incluye autoabastecimiento remoto.

3 Nueva generación limpia (NGL): Ciclo combinado y carboeléctrica con captura y secuestro de CO₂; nucleoeléctrica, eoloeléctrica, solar o importación de capacidad.

Fuente: Fuente: POISE 2012-2026, Subdirección de Programación, CFE

Figura 2.15. Participación de la capacidad de generación en los años 2010 y 2026
Sistema eléctrico

Las razones de esto son muchas pero podrían resumirse en las siguientes:

- 1) La eficiencia de las Centrales de Ciclo Combinado es mayor que la de la mayoría de las tecnologías de generación termoeléctrica por lo que el costo por cada kilowatt-hora (kWh) generado es menor.
- 2) La combustión del gas natural puede considerarse relativamente “limpia” al liberar cantidades mínimas de SO_x.
- 3) La construcción de las centrales de Ciclo Combinado tiene una duración significativamente menor en comparación con la de las centrales convencionales.

Sin embargo, el consumo de gas natural como fuente primaria para la generación de electricidad presenta en el mediano y largo plazo desventajas similares a las analizadas para el petróleo. Por un lado, México cuenta con reservas modestas de gas natural en comparación con países como Rusia o los países del medio oriente.

Aunado a lo anterior, las reservas totales de México (3P), disminuyeron de manera importante en las décadas anteriores y, a pesar de las inversiones, no han logrado incrementarse en los últimos años¹⁹.

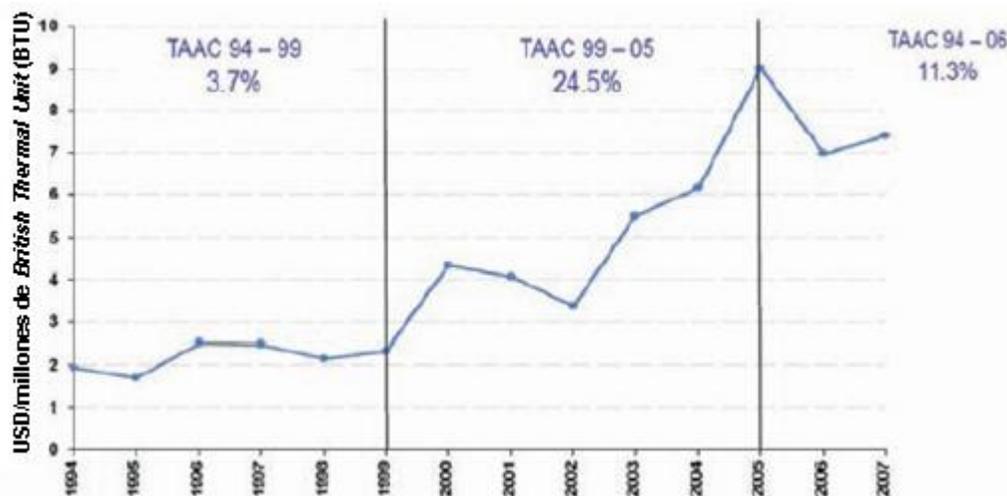
¹⁹ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 157 p.



Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.16. Reservas probadas, probables y posibles (3P) de gas natural en México, periodo 2001 - 2007

Por otro lado, el mercado del gas natural, por sus características, es regional. El mercado de gas de México se encuentra referido al Henry Hub de Estados Unidos, que es de los más elevados del mundo. Debido en parte a que, tanto Estados Unidos como México son importadores netos de petróleo, el precio del gas natural ha tenido una tendencia alcista en la última década y su pronóstico en las siguientes es similar ²⁰.



Fuente: Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008

Figura 2.17. Precio histórico promedio del gas natural en Henry Hub 1994 – 2007

²⁰ Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008, 153 p.

Como se desprende de lo anterior, aunque las ventajas de sustentar mayoritariamente el sistema eléctrico nacional en el gas natural son muchas en la actualidad, esta directriz no es sostenible en el largo plazo. Aunque, a diferencia del petróleo, el gas natural es aprovechado esencialmente para la obtención de energía, el aumento mantenido de su precio lo hará eventualmente poco competitivo para la generación eléctrica a gran escala.

2.2.4. Limitantes técnicas y económicas de las energías renovables

Algunas de las opciones más importantes que actualmente se proponen en diferentes medios para sustituir a los hidrocarburos en la producción energética son las llamadas “energías renovables”; de entre ellas las más mencionadas son la hidroeléctrica, la geotérmica, la eólica y la solar.

Como puede verse en la figura 2.23, en la actualidad se aprovecha en gran medida la energía hidroeléctrica para la generación de electricidad (21.0% de la capacidad de generación en 2010). La energía potencial del agua, retenida por medio de embalses artificiales se aprovecha en nuestro país desde el siglo XIX. En la actualidad, se trata de un recurso aprovechado extensamente y en una etapa madura y, por lo mismo, el potencial de su aprovechamiento futuro está ya determinado. Aunque México aún tiene un margen relativamente grande para explotar la energía hidráulica a gran escala, este margen es finito y será insuficiente para cubrir las necesidades energéticas del país en el largo plazo.

Así mismo, el recurso geotérmico, la energía proveniente de la alta temperatura de las zonas activas de la corteza terrestre, ha sido ampliamente aprovechado en México. Como muestra de ello, nuestro país es el cuarto con mayor capacidad de generación geotermoeléctrica a nivel mundial. Proyecciones recientes indican que el potencial geotermoeléctrico de México con recursos de roca seca caliente, susceptible de ser desarrollado con tecnologías de sistemas geotérmicos mejorados (EGS), es del orden de los 24,700 MW para una profundidad máxima de 3,000 metros.²¹

Aunque las proyecciones mencionadas muestran que existe un gran potencial de energía geotérmica en nuestro país que puede explotarse en el futuro y se tiene previsto la construcción de más plantas geotermoeléctricas en los próximos años, el potencial energético económicamente viable de esta tecnología no será suficiente para cubrir la mayor parte requerimientos energéticos nacionales en las siguientes décadas.

²¹ Hiriart Le Bert, Gerardo, Evaluación de la Energía Geotérmica en México , Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, México, DF, mayo de 2011, 106 p.

²² La energía eólica en México, Coordinación de Proyectos Termoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, 2012, 1p.

Por otro lado, las tecnologías de generación cuya fuente de energía primaria es el viento y el sol, ocupan un lugar cada vez más importante en nuestro país. Como muestra de esto, se tiene planeado incorporar al sistema eléctrico nacional 511 MW de origen eólico en el año 2012 y 12 MW de origen termosolar en el 2013 ²². Sin embargo, si se pretende seriamente cubrir en el futuro con ambas fuentes de energía una parte importante de los requerimientos energéticos nacionales, deben considerarse las limitantes técnicas y económicas que tienen.

Es muy importante tomar en cuenta que, tanto en el caso de la energía eólica, como en el de la solar, su fuente de energía primaria, por un lado no se puede “almacenar” y, por otro, su disponibilidad es altamente intermitente y aleatoria.

La energía química de los hidrocarburos es almacenable en forma de depósitos de combustible y, por lo tanto, es posible prever su disponibilidad en el corto plazo. Por lo anterior, en caso de prever alguna falta de disponibilidad de la fuente de energía, es posible tomar acciones pertinentes.

En el caso de las energías eólica y solar, es imposible predecir en el corto, mediano y largo plazo, con altos márgenes de precisión, la calidad y cantidad de la fuente de energía primaria y, por lo tanto, no puede calcularse su disponibilidad en el futuro. Esta característica impide que estas tecnologías puedan utilizarse como fuente de energía base en un sistema eléctrico nacional.

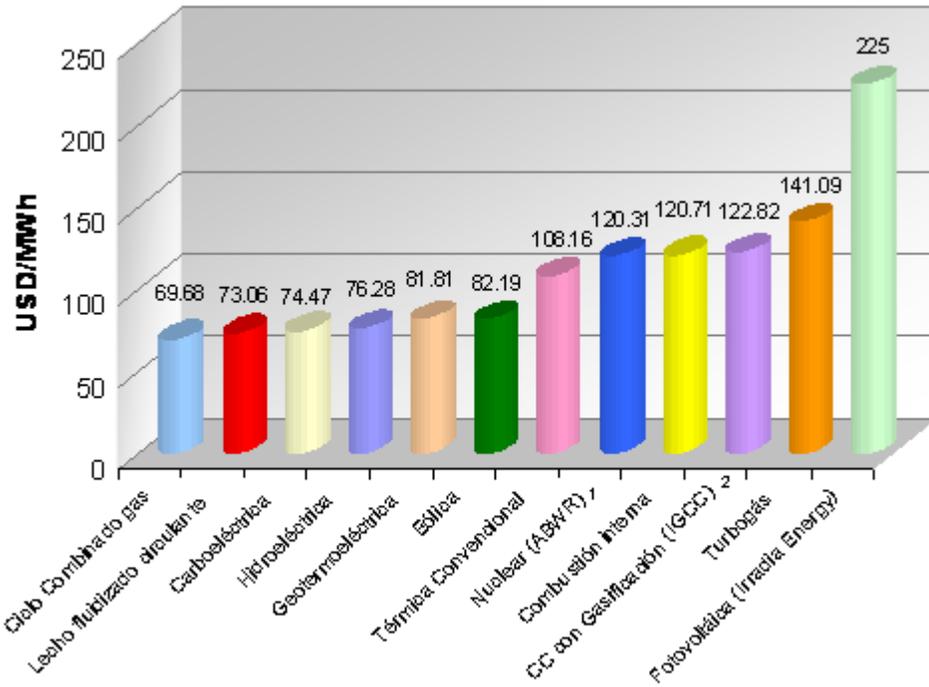
Es importante señalar que lo anterior no impide que estas tecnologías puedan aportar un porcentaje muy importante de la energía eléctrica utilizada en un país o una región.

Por otro lado, para que sean económicamente competitivas, la construcción de centrales eólicas aún requiere en muchos países de incentivos económicos que organismos internacionales ofrecen por sus beneficios ambientales.

Adicionalmente, en el caso de la energía solar fotovoltaica, su costo, tanto de generación como por capacidad instalada, es aún muy alto como para ser competitivo en la generación eléctrica a gran escala.

Como lo muestra la siguiente figura, el Costo Unitario de Generación de la planta solar fotovoltaica piloto que la empresa *Irradia Energy* desarrolla actualmente en nuestro país, sería un 59% más alto que el de la tecnología de generación con mayor Costo Unitario de Generación actualmente usada por CFE: la turbogás ²³.

²³ Tellez Bastida, Alejandro. Nota Informativa: Propuesta de planta piloto solar fotovoltaica de *Irradia Energy*. Coordinación de Proyectos Termoeléctricos de la CFE, Noviembre de 2010, 1p.



Nota 1: ABWR = *Advanced Boiling Water Reactor*

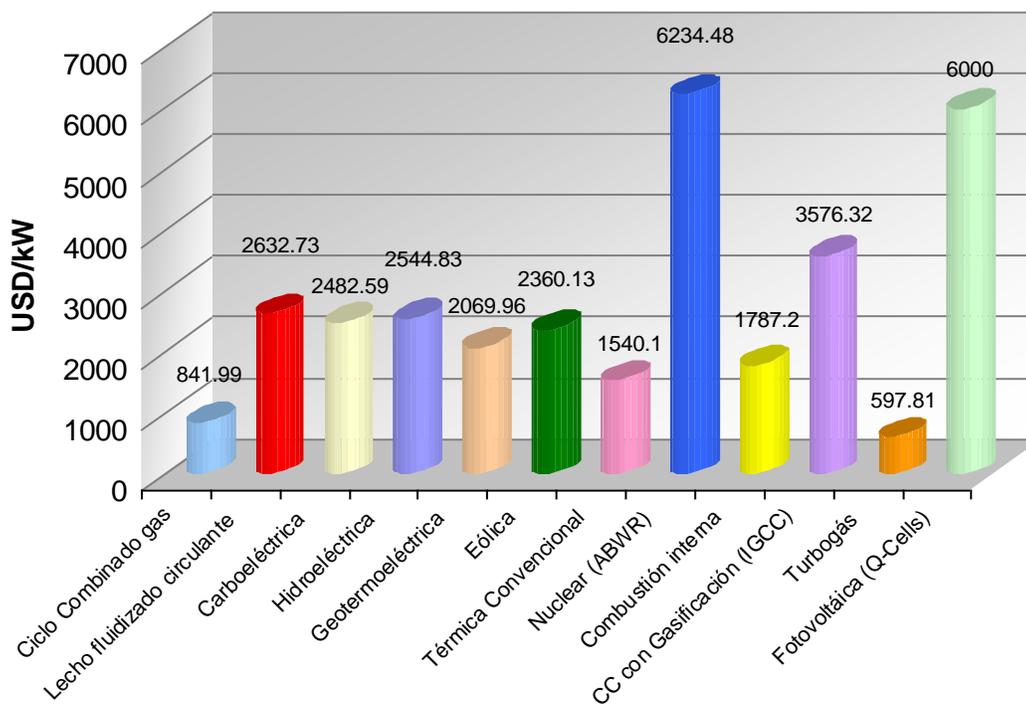
Nota 2: IGCC = *Integrated Gasification Combined Cycle*

Fuente: Tellez Bastida, Alejandro. Nota Informativa: Propuesta de planta piloto solar fotovoltaica de *Irradia Energy*. Coordinación de Proyectos Termoeléctricos de la CFE, Noviembre de 2010

Figura 2.18. Costo Unitario de Generación por tecnología en México

Adicionalmente, aunque la capacidad de generación de la planta de *Irradia Energy*, es de sólo el 0.37% de la capacidad de generación de la Central Nuclear Laguna Verde, el Costo Unitario de Inversión de la primera sería similar al de la planta nuclear ²⁴. Esto se muestra en la siguiente gráfica:

²⁴ Tellez Bastida, Alejandro. Nota Informativa: Propuesta de planta piloto solar fotovoltaica de *Irradia Energy*. Coordinación de Proyectos Termoeléctricos de la CFE, Noviembre de 2010, 2p.



Fuente: Tellez Bastida, Alejandro. Nota Informativa: Propuesta de planta piloto solar fotovoltaica de *Irradia Energy*. Coordinación de Proyectos Termoelectricos de la CFE, Noviembre de 2010

Figura 2.19. Costo Unitario de Inversión por tecnología en México

Las energías renovables tienen aún un potencial de aprovechamiento muy alto en nuestro país y además su utilización es muy atractiva, sobre todo a nivel mediático. Sin embargo, de acuerdo a lo analizado en este subcapítulo, no tienen la capacidad técnica para suplir a los hidrocarburos en la generación de energía tras el eventual agotamiento de sus reservas ni para cubrir las necesidades energéticas de México en el largo plazo.

2.2.5. Necesidades ambientales de México y el mundo en la generación de energía

Como se pudo ver en el Subcapítulo 2.1.1, nuestro país produce en la actualidad la mayor parte de su energía eléctrica (el 73.9%) utilizando combustibles fósiles (combustóleo, diesel, carbón y gas natural) como fuente de energía primaria. Como se analizará, el aprovechamiento a gran escala de los combustibles fósiles tiene graves consecuencias ambientales.

La reacción de combustión de estos combustibles, de la cual se obtiene la energía térmica para su transformación a eléctrica, origina diversos contaminantes, la mayor parte de los cuales contribuyen al calentamiento de nuestro planeta mediante el fenómeno conocido como “efecto invernadero”.

2.2.5.1. Situación actual de México en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) ²⁵

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología, en su documento “Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2010”, contabilizan para ese año los gases que contribuyen al calentamiento global, emitidos en nuestro país.

De acuerdo con este documento, se estima que en el año 2010, en México se emitieron 748,252.2 Gigagramos (Gg) de CO₂e, lo cual es 33.4% mayor que lo emitido en el año 1990. De lo anterior, el 67.3% lo aportaron las emisiones derivadas de la producción de energía, del cual, el 21.8% es directamente debido a la generación de energía eléctrica.

Las emisiones en el año 2010 son: CO₂: 493,450.6 Gg de CO₂e (65.9%); CH₄: 166,716.4 Gg de CO₂e (22.3%); N₂O: 69,140.1 Gg de CO₂e (9.2%); y el restante 2.5% se compone de 18,692.3 Gg de CO₂e de los hidrofluorocarbonos (HFCs), 128.4 Gg de CO₂e de los perfluorocarbonos (PFCs) y 124.4 Gg de CO₂e del SF₆.

En el caso de las emisiones de CO₂, en 2010 (493,450.6 Gg), se tuvo un incremento del 23.6% con respecto a 1990. Las emisiones de CO₂ en el país provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles, USCUS ²⁶ y procesos industriales.

En el año de estudio, las emisiones de CH₄ fueron de 7,938.9 Gg, lo que representa un incremento del 59.8% con respecto a 1990. Sus principales fuentes de emisión son los desechos, la producción energía y agricultura.

Así mismo, en el caso del N₂O, las emisiones en 2010 fueron de 223.0 Gg, lo que representa un incremento del 23.1% con respecto a 1990. Los principales emisores son los suelos agrícolas y el transporte.

En el caso de las emisiones de HFCs, en 2010 fueron, como ya se indicó, de 18,692.3 Gg de CO₂e y se tuvo un incremento del 2,307% con respecto a 1990. Eso se debió a un mayor uso de HFCs en refrigeradores y aires acondicionados de industrias, viviendas y automóviles, en sustitución de los clorofluorocarbonos (CFCs) controlados por el Protocolo de Montreal y cuyo uso está restringido en el mundo.

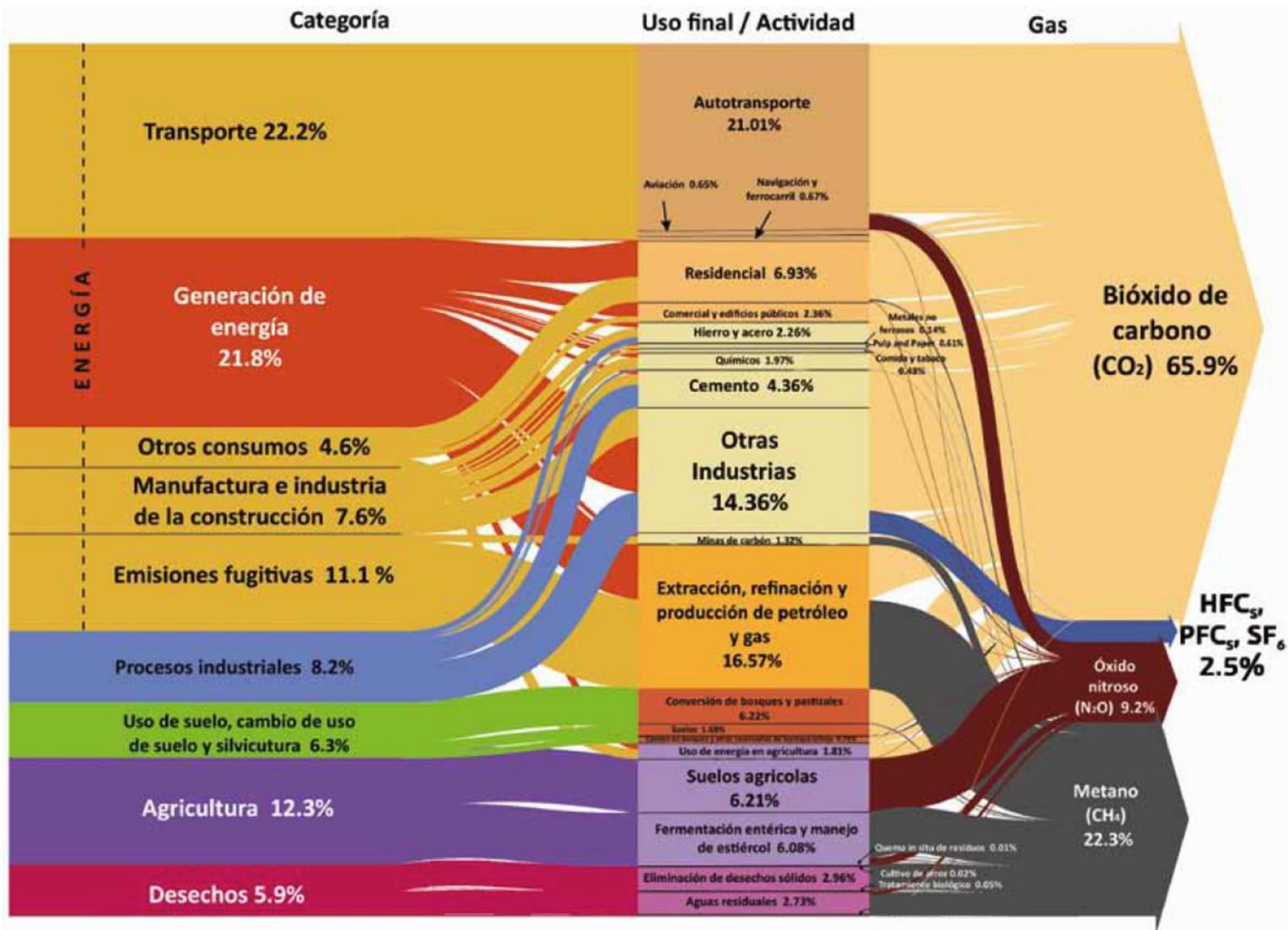
En el caso de las emisiones de PFCs, en 2010 fueron, como también ya se indicó, de 128.4 Gg de CO₂e y se tuvo un decremento del 80.1% con respecto a 1990. Eso se debió a un decremento en la producción de aluminio catalogada dentro de la categoría de “procesos industriales”, que es el proceso en donde se originan estas emisiones.

²⁵ Fuente del subcapítulo: INE Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2006, SEMARNAT

²⁶ Uso de suelo, cambio de uso de suelo y silvicultura

Finalmente, como se indicó, en el caso del SF₆, las emisiones en 2010 fueron de 124.4 Gg, de CO₂e, lo que representa un incremento del 319.7% con respecto a 1990. Los principales emisores son los equipos y circuitos eléctricos que contienen este gas como agente dieléctrico (aislante).

La siguiente figura ilustra con claridad las fuentes del total de emisiones de GEI en México y las divide por tipo de gas, todo se indica en porcentaje:



Fuente: INE Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2010, SEMARNAT

Figura 2.20. Diagrama del total de emisiones (748,252.2 Gg de CO₂ equivalente) en 2010 en México

Como puede verse, la mayoría relativa del total de emisiones en México de GEI en el año 2010 lo constituye el gas CO₂ proveniente de la generación de energía eléctrica.

En el siguiente subcapítulo, se buscará hacer una proyección de las emisiones de CO₂ provenientes de la generación eléctrica para el mediano y el largo plazo.

2.2.5.2. Proyección de las emisiones de CO₂ de la industria eléctrica mexicana a mediano y largo plazo

Como se sabe, toda reacción química de combustión genera energía calorífica exotérmica a partir de la unión de las moléculas de carbono (C) y oxígeno (O₂) para formar bióxido de carbono (CO₂). Por lo tanto, es imposible reducir la cantidad residual de CO₂ de una reacción de combustión para una cantidad constante de calor producido.

Por lo anterior, en la medida en que la generación eléctrica nacional provenga del aprovechamiento de la energía química de los combustibles fósiles, el único modo de reducir las emisiones de CO₂ para una misma cantidad de energía eléctrica generada, será aumentando la eficiencia térmica promedio de la infraestructura de generación nacional.

En este subcapítulo se busca calcular la cantidad de las emisiones de CO₂ derivadas directamente de la generación de energía eléctrica en el mediano y largo plazo, específicamente, en el periodo comprendido desde el presente hasta el año 2100.

Con base en lo analizado en el Subcapítulo 2.1 “Necesidades de energía en el mediano y largo plazo en México”, se proyecta una capacidad de generación nacional total de 1,110,007 MW para el año 2100. El siguiente cuadro muestra la capacidad de generación eléctrica con combustibles fósiles en nuestro país en el año 2010 por tipo de tecnología y su evolución teórica para los años 2026, 2050 y 2100. Las capacidades teóricas por tecnología para los años 2050 y 2100 se calcularon suponiendo la conservación de los porcentajes de participación de las tecnologías proyectados para el año 2026.

Años		2010	2026	2050	2100
Tecnología de generación	Unidades				
Ciclo combinado	MW	18,905	46,096	102,836	547,233
Turbogás	MW	2,976	2,618	5,841	31,080
Combustión Interna	MW	220	374	834	4,440
Carboeléctrica	MW	5,346	5,517	12,307	65,490
Térmica convencional	MW	12,897	2,805	6,258	33,300
Coque	MW	441	748	1,669	8,880
Total	MW	55,116	93,502	208,592	1,110,007

Nota: El total no es la suma pues sólo se muestran las tecnologías de generación por combustibles fósiles

Fuente: Elaboración propia con datos de POISE y proyección 2026 - 2100

Cuadro 2.2. Capacidad de generación eléctrica proyectada con combustibles fósiles por tipo de tecnología 2010 - 2100

Si se agrupan las tecnologías por tipo de combustible, tenemos lo siguiente:

Años		2010	2026	2050	2100
Tipo de combustible	Unidades				
Gas Natural	MW	21,881	48,714	108,677	578,313
Combustóleo y Coque	MW	13,558	3,927	8,761	46,620
Carbón	MW	5,346	5,517	12,307	65,490
Total	MW	55,116	93,502	208,592	1,110,007

Nota: El total no es la suma pues sólo se muestran las tecnologías de generación por combustibles fósiles

Fuente: Elaboración propia con datos de POISE y proyección 2026 - 2100

Cuadro 2.3. Capacidad de generación eléctrica proyectada con combustibles fósiles por tipo de combustible 2010 – 2100

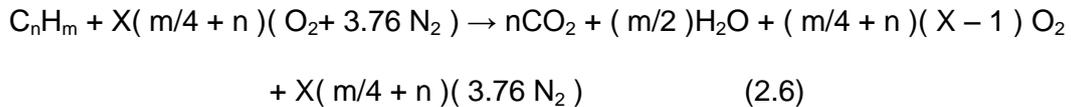
A continuación se calculará la cantidad producida de CO₂ mediante el siguiente análisis:

Se desarrollan las reacciones de combustión de una mol de carbono (C), una mol de monóxido de carbono (CO) y una mol de un hidrocarburo genérico C_nH_m, con la cantidad estequiométricamente necesaria de oxígeno puro (O₂) para una combustión completa:





Así mismo, es posible obtener la reacción de combustión general para el hidrocarburo C_nH_m considerando aire y exceso de oxígeno.



Donde:

X = Cantidad de veces el aire necesario para la combustión

Como se observa, la producción de CO_2 es directamente proporcional a la cantidad de combustible quemado y a su proporción de carbono. Conociendo el porcentaje en masa de un determinado hidrocarburo en un combustible y realizando un análisis estequiométrico a partir de lo analizado hasta aquí, es posible determinar la relación de masa de CO_2 emitido por masa de combustible quemado, la cual, en este documento se nombrará " RCO_2 ".

Adicionalmente, haciendo el análisis térmico correspondiente, tenemos que:

$$ECO_2 = \frac{(CN \times CTUN \times RCO_2 \times FP \times 8760 \text{ h/año})}{(PCI \times 1000 \text{ kgCO}_2 / \text{tonCO}_2)} \quad (2.7)$$

Donde:

ECO_2 = Emisiones al año de CO_2 para el tipo de tecnología analizado [Ton CO_2 /año]

CN = Capacidad neta de la central o de la infraestructura de generación [kW] (kilowatts)

CTUN = Consumo térmico unitario neto promedio ²⁷ [kJ/kWh]

FP = Factor de planta [%]

PCI = Poder calorífico inferior del combustible [kJ/kg]

Para hacer el cálculo de las emisiones anuales de CO_2 para los años 2010, 2026, 2050 y 2100, se toman en cuenta los siguientes supuestos basados en datos proporcionados por CFE, tomados de casos típicos:

²⁷ El CTUN en kJ/kWh es igual a 3600 dividido entre la eficiencia térmica sin unidades.

- Composición del gas natural:

Hidrocarburo		% masa
Metano	CH ₄	89.162
Etano	C ₂ H ₆	7.393
Propano	C ₃ H ₈	1.200
I Butano	C ₄ H ₁₀	0.114
N Butano	C ₄ H ₁₀	0.201
I Pentano	C ₅ H ₁₂	0.043
N Pentano	C ₅ H ₁₂	0.036
Hexano	C ₆ H ₁₄	0.033
Nitrógeno	N ₂	1.005
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.813
Total		100.000

Fuente: Programa de Cálculo de Emisiones de CO₂, Departamento de Ingeniería Mecánica, Coordinación de Proyectos Termoeléctricos, CFE

Cuadro 2.4. Composición química típica de gas natural para proyectos termoeléctricos de la CFE

- Porcentaje masa de Carbono en el combustóleo: 84%
- Porcentaje masa de Carbono en el carbón: 58.8%
- Porcentaje masa de Carbono en el coque: 80.44%
- Poder calorífico inferior del gas natural: 47,752.4 kJ/kg
- Poder calorífico inferior del combustóleo: 39,640.6 kJ/kg
- Poder calorífico inferior del carbón: 23,560.7 kJ/kg
- Poder calorífico inferior del coque: 35,400.7 kJ/kg
- Factor de planta promedio de la infraestructura de generación por combustibles fósiles: 85%

- Eficiencia térmica promedio de la infraestructura nacional de generación por combustibles fósiles, estimada para los años indicados:

Año	Eficiencia Térmica
2010	37%
2026	39%
2050	45%
2100	50%

Fuente: Elaboración propia con valores estimados a partir del COPAR de generación 2011, CFE

Cuadro 2.5. Eficiencia promedio estimada de la infraestructura de generación por combustibles fósiles

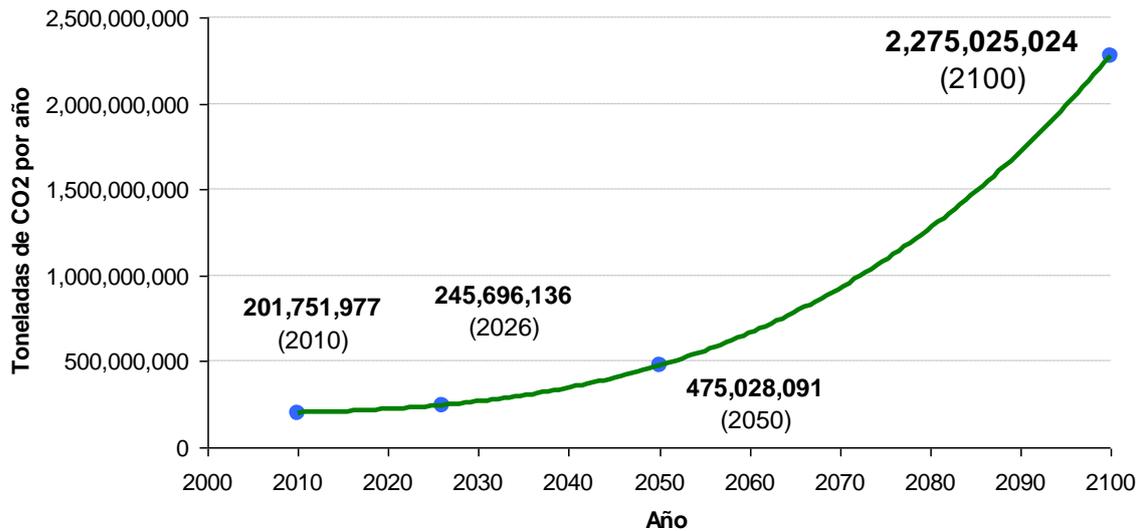
De este modo, y realizando los cálculos necesarios, se tiene que las emisiones de CO₂ para los años considerados son las siguientes:

Tecnología	Emisiones anuales de CO₂ [Ton de CO₂ por año]			
	2010	2026	2050	2100
Gas Natural	89,843,429	189,761,829	366,888,367	1,757,121,388
Combustóleo y Coque	76,466,023	21,233,898	41,054,782	196,618,711
Carbón	35,442,525	34,700,409	67,084,942	321,284,925
Total	201,751,977	245,696,136	475,028,091	2,275,025,024

Fuente: Elaboración propia con valores calculados a partir análisis estequiométricos de emisiones de CO₂

Cuadro 2.6. Emisiones anuales proyectadas de CO₂ por generación eléctrica en México por combustibles fósiles 2010 - 2100

En la siguiente figura puede apreciarse el incremento acelerado de las emisiones anuales de CO₂ derivadas de la generación de energía eléctrica con tecnologías que queman combustibles fósiles, proyectadas para los siguientes años hasta el 2100.



Fuente: Elaboración propia con valores calculados a partir análisis estequiométricos de emisiones de CO₂

Figura 2.21. Emisiones anuales proyectadas de CO₂ por generación de energía eléctrica para el periodo 2010-2100

Como, puede observarse, el aumento de las emisiones de CO₂ derivadas de la generación eléctrica tiende a ser exponencial hasta llegar a 2,275,025,024 toneladas de CO₂ por año (2,275,025 Gg de CO₂) en el año 2100. Esta cifra considera ya el aumento de la eficiencia térmica esperado en las próximas décadas para las tecnologías de generación y no toma en cuenta las emisiones de GEI generadas por el transporte, la agricultura, los desechos, la industria de manufactura, etc.

Suponiendo que en año 2100, la proporción de las emisiones de CO₂ producidas por la generación eléctrica nacional respecto al total de emisiones nacionales de GEI sea igual a esta misma proporción en el año 2010, en el 2100 se emitirían:

Emisiones GEI 2100 =

$$\frac{100\% \text{ GEI } 2010}{\% \text{ CO}_2 \text{ generación eléctrica } 2010} \times \text{Emisiones CO}_2 \text{ generación eléctrica } 2100 =$$

$$\frac{100\%}{21.8\%} \times 2,275,025,024 \text{ ton de CO}_2 = 10,435,894,606 \text{ ton de CO}_2 \text{ equivalent e} =$$

$$10,435,895 \text{ Gg de CO}_2 \text{ equivalent e}$$

(2.8)

Esta cifra es igual a 13.95 veces las emisiones de GEI emitidas en el año 2010 en México. De alcanzarse esta realidad proyectada, aunada al crecimiento igualmente exponencial de las emisiones de GEI en el resto de los países, desarrollados y en desarrollo, los efectos en el clima regional y mundial, derivados de la alta concentración en la atmósfera de estos gases, podrían ser desastrosos.

2.3. Conclusiones del Capítulo 2

Para finalizar el presente capítulo se proponen las conclusiones siguientes, derivadas todas ellas de los análisis hechos en materia de requerimientos de energía, fuentes disponibles de energía y requerimientos ambientales y técnicos en la materia, tanto nacionales como internacionales:

- 1) Si México se propone crecer económicamente durante las próximas décadas a tasas similares o mayores a las actuales, hacia el fin del presente siglo requerirá una capacidad de generación del orden de cientos de miles de MW para cubrir sus requerimientos energéticos.
- 2) Aunque un cierto porcentaje de la capacidad de generación requerida hacia el final del presente siglo se podrá cubrir con energías renovables (solar, biomasa, eólica, etc.), será necesario que por lo menos la mitad de esta capacidad sea de una tecnología que pueda utilizarse como “carga base”, es decir, cuyo combustible pueda asegurarse en el futuro y pueda ser almacenado.
- 3) Es muy probable que, hacia el final del presente siglo, las reservas nacionales y mundiales de combustibles fósiles no sean suficientes para cubrir los porcentajes requeridos de capacidad de generación base.
- 4) La tecnología que cubra el mayor porcentaje de la infraestructura base de generación eléctrica hacia finales del presente siglo en nuestro país (proyectada en varios cientos de miles de MW) no deberá depender de los combustibles fósiles.
- 5) Es de altísima prioridad que la mayor parte de la tecnología utilizada para cubrir los requerimientos energéticos nacionales en las próximas décadas, reduzca al mínimo o elimine las emisiones de gases de efecto invernadero producidas durante su operación.

Capítulo 3. La energía nuclear de fusión

3. La energía nuclear de fusión

3.1. Introducción a la energía nuclear de fusión

A la energía generada por las reacciones nucleares de fusión se le conoce como “energía de fusión”. En esta clase de reacciones de tipo nuclear, dos núcleos atómicos ligeros se fusionan formando un núcleo más pesado y al mismo tiempo, liberan energía.

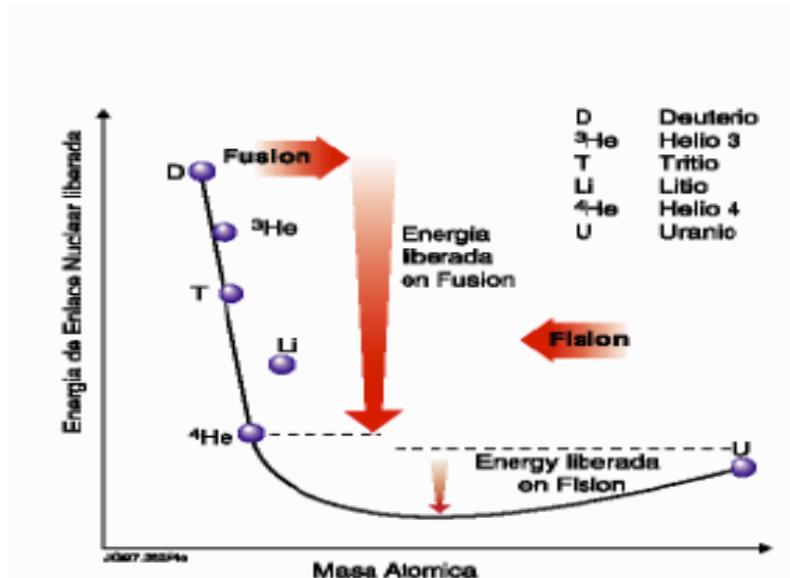
Este fenómeno puede aprovecharse para producir energía útil a partir de material fusionable. En la actualidad, la mayor parte de los diseños considerados para centrales de energía de fusión se basan en la energía liberada en forma de calor. Este calor puede usarse para producir vapor de agua a altas temperaturas y presiones y aprovechar así su energía en una turbina de vapor de un modo similar a las plantas térmicas convencionales.

En la actualidad, existen aún muchos retos de tipo tecnológico que deben superarse para aprovechar la tecnología de fusión de un modo técnico y comercialmente viable.

3.2. Principios físicos de la energía nuclear de fusión ¹

El principio físico de las reacciones de fisión y fusión tiene su fundamento en la energía de enlace por nucleón que depende de la masa atómica del núcleo, esto se muestra en la siguiente figura. Los núcleos con una masa atómica mayor de 50 y menor de 90 son generalmente los de mayor estabilidad. Cuando un núcleo pesado se parte en dos en el caso de la fisión, la masa inicial es mayor a la suma de las masas finales y la masa faltante se convierte en energía según la fórmula $E=mc^2$. Lo mismo ocurre en el caso de la fusión, es decir, cuando núcleos ligeros se unen, la suma de la masa de los núcleos iniciales es mayor a la masa final y la masa faltante se convierte en energía.

¹ Fuente del subcapítulo: Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001

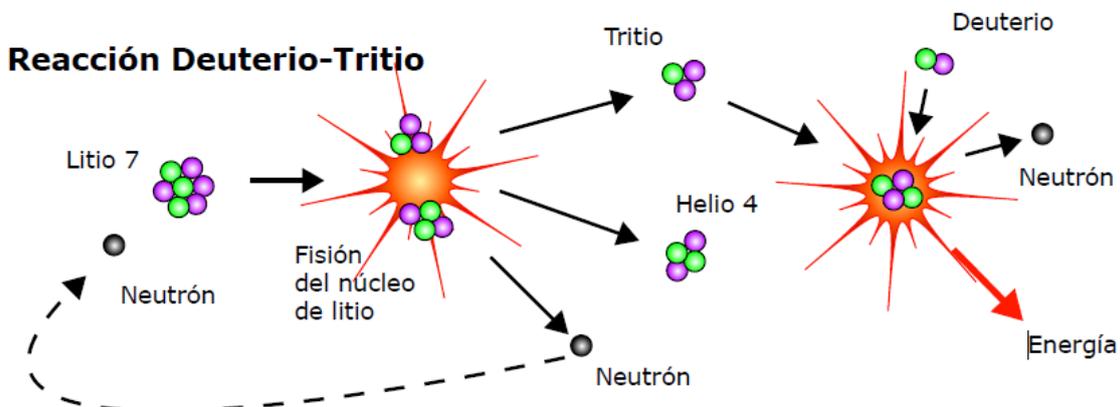


Fuente: <http://www.globalnuclearcontaminationwatch.com/nuclear-radiation-info/nuclear-fusion-a-safer-alternative/>

Figura 3.1. Energía de enlace por nucleón en función del número másico

Es necesario alcanzar temperaturas del orden de los 100 millones de Kelvin (K) a presiones relativamente moderadas para que los núcleos con carga positiva superen la repulsión electrostática que existe entre ellos y se acerquen lo suficiente para producir reacciones de fusión a un ritmo adecuado. A estas temperaturas, los electrones se separan del núcleo y el resultado es un estado de la materia conocido como plasma, en el que los electrones e iones se encuentran separados y moviéndose independientemente a velocidades muy altas.

Debido a su eficiencia, la reacción más atractiva para la operación de una planta de fusión nuclear es la del Deuterio ^2D y Tritio ^3T (D-T):



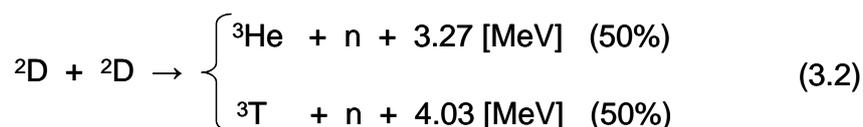
Fuente: http://rcalero.aferventus.biz/energia/energia/ca_040402.html

Figura 3.2. Reacciones de fusión Deuterio - Tritio

Las condiciones para obtener a un ritmo adecuado esta reacción de fusión D-T son las más fáciles de conseguir. Los reactantes deben tener una energía cinética de unos 10 kiloelectron-volts (keV) que corresponde a una temperatura un poco superior a los 100 millones de K a presiones técnicamente accesibles.

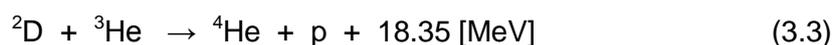
Otras reacciones viables de fusión pero de condiciones necesarias para que se produzcan más exigentes que las de la reacción D-T, son las siguientes:

- Reacción Deuterio – Deuterio (D-D)



Esta reacción tiene la ventaja de no utilizar Tritio y de no producir neutrones de alta energía, sin embargo, la temperatura necesaria es 10 veces mayor que la necesaria para la reacción D-T.

- Reacción Deuterio – helio 3 (D-³He)



Esta reacción es atractiva pues no produce Tritio ni neutrones. Es posible recuperar la gran energía del protón liberado por conversión directa de energía eléctrica, con eficiencias del 80 %. Los inconvenientes más importantes de esta reacción de fusión son la elevada temperatura necesaria y la escasez de ³He en la Tierra.

3.2.1. Ciclo de combustible de la tecnología de fusión nuclear ²

Como se analizó, los combustibles más atractivos para generar reacciones de fusión son el Deuterio y el Tritio que son dos isótopos del hidrógeno.

El Deuterio (²D o ²H₂), con una masa atómica de 2.0141 unidades de masa atómica (uma) y estado gaseoso a temperatura y presión estándares, se encuentra de forma abundante en la naturaleza y puede ser rápidamente extraído del agua ya que hay alrededor de 33 gramos (g) de Deuterio en cada metro cúbico de agua.

² Las fuentes de este subcapítulo son:

- Zambra, Marcelo, Importancia del Litio en el Futuro Proceso Comercial de la Fusión Nuclear: Informe, Gobierno de Chile, Comisión Chilena de Energía Nuclear, Santiago, 12 Agosto 2008

- <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/hidrogeno>

- <http://www.encyclopediadetareas.net/2010/09/deuterio-y-tritio.html>

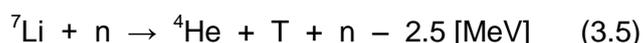
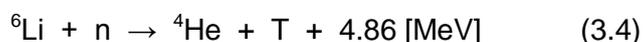
Las características físicas de los compuestos del Deuterio pueden ser diferentes de sus análogos del hidrógeno; por ejemplo, el agua pesada (D₂O) es más viscosa que el agua convencional (H₂O). Como dato curioso puede mencionarse que un cubo de hielo de agua pesada se hundiría en agua líquida convencional debido a que el agua pesada es aproximadamente un 11% más pesada que el agua convencional.

El Deuterio se comporta químicamente de manera semejante al hidrógeno ordinario; sin embargo, hay diferencias en energía y de longitud en enlace para los compuestos de los isótopos pesados del hidrógeno que son más grandes que las diferencias presentadas por los isotopos de cualquier otro elemento. Los enlaces que implican el Deuterio y el Tritio son más fuertes que los enlaces correspondientes en hidrógeno ligero, y estas diferencias son lo bastante importantes para realizar cambios significativos en reacciones biológicas.

El Deuterio puede substituir al hidrógeno común en moléculas de agua para formar agua pesada, que es cerca de 10.6% más densa que el agua normal (el hielo hecho de agua pesada se hunde en agua ordinaria).

Por otro lado, el Tritio (³T o ³H₂), con una masa atómica de 3.0160492 uma y estado gaseoso a temperatura y presión estándares, se encuentra en cantidades despreciables en la naturaleza ya que, siendo radiactivo, tiene una vida media de alrededor de 12.4 años.

Por lo anterior, el ciclo de combustible D-T requiere un generador de Tritio. Por lo tanto, el Tritio debe ser generado a partir neutrones y Litio (Li) mediante las reacciones nucleares siguientes:



El neutrón del miembro de la izquierda en las ecuaciones anteriores se obtiene de la reacción de fusión, ecuación (3.1), que es la que produce energía útil. La reacción con ⁶Li (con abundancia natural de 7.42%) es exotérmica, proveyendo una pequeña ganancia para el reactor. La reacción ⁷Li (con abundancia natural de 92.58%) es endotérmica pero el balance final de energía sigue siendo favorable. Algunas reacciones de ⁷Li requieren reemplazar los neutrones perdidos por medio de reacciones con otros elementos. El diseño de la mayor parte de los reactores de fusión considera una combinación de ambos isótopos.

La fuente de Tritio más prometedora parece ser la que parte de ⁶Li bombardeado por neutrones lentos. Esto es viable si el Litio es usado como refrigerante y medio de transferencia de calor. Por otro lado, usando neutrones rápidos, el Tritio puede ser generado a partir de ⁷Li que es el isótopo más abundante.

Por lo anterior, el ciclo de combustible, en el caso de la fusión D-T, involucra al Litio que es menos abundante que el Deuterio, como generador de Tritio. Por lo tanto éste es el elemento de combustible fundamental para los reactores de fusión D-T a escala comercial.

Por otro lado, el producto generado en mayor cantidad en la reacción de fusión es el helio que no es radioactivo. Sin embargo, el neutrón producido a elevadas energías puede activar los materiales del reactor.

Entre los inconvenientes que pueden atribuirse al ciclo de fusión nuclear Deuterio – Tritio, se pueden mencionar las siguientes:

1. Se presenta radiactividad inducida dentro de la estructura del reactor debido al intenso flujo neutrónico.
2. La contribución energética de las partículas cargadas es pequeña, alrededor de un 20%, frente al 80% debida a los neutrones. Esto limita la utilización de un método de conversión de energía directo.
3. Existe una dependencia de los recursos de Litio que, como ya se mencionó, son menos abundantes que los de Deuterio.
4. Existe un proceso previo para la obtención del radioisótopo Tritio. Éste, al igual que el hidrógeno, es difícil de contener y puede dar lugar a fugas de cierta importancia en el reactor. Algunas estimaciones sugieren que se originaría una emisión de radiactividad al medio ambiente bastante elevada.

3.3. Tecnología de la energía nuclear de fusión

3.3.1. Parámetros técnicos para obtener reacciones nucleares de fusión ³

En la práctica, para conseguir reacciones de fusión nuclear, existen líneas de investigación llamadas “frías” y “calientes”. El uso de estos términos es relativo ya que las líneas “frías” hacen referencia a tecnologías con procesos a temperatura ambiente mientras los procesos de las “calientes” se llevan a cabo a varias decenas de millones de Kelvin.

En ambos casos se busca mantener un gas confinado en una región y aumentar su energía mediante diferentes métodos. El gas debe estar ya compuesto de los elementos reactantes (D-T, D-D o T-T) y se debe buscar iniciar el proceso de fusión, lo que ocurre de forma distinta en las dos alternativas. En el presente trabajo, se analizarán únicamente las líneas de investigación calientes ya que las frías tienen un desarrollo tecnológico incipiente.

El primer desarrollo técnico que aprovechó esta fuente de energía se dio en el campo militar con 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 liberar así energía de manera explosiva se comprime un gas de deuterio encerrado en una cavidad produciendo una implosión.

³ Fuente del subcapítulo: Martinel Benito, Julio, Los Prometeos Modernos o El Esfuerzo para Controlar la Fusión Nuclear, Fondo de cultura económica, 2da edición, México, 1995

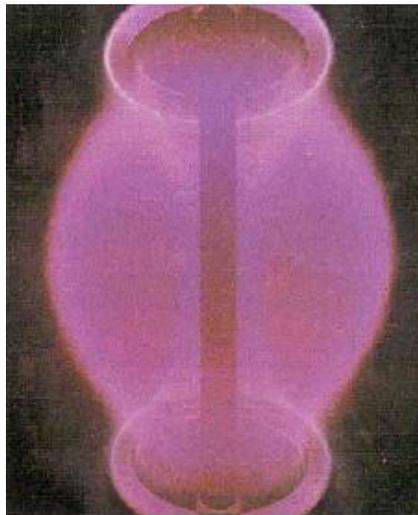
De este modo se transmite gran cantidad de energía a los núcleos de deuterio y se obtienen temperaturas extremadamente altas, de modo que es posible traspasar la barrera de Coulomb y producir reacciones de fusión. En el caso de la bomba H, esto se logra mediante la detonación previa de otra bomba atómica de fisión nuclear. La energía generada por ésta logra que los átomos de deuterio produzcan reacciones de fusión en cantidad suficiente.

Las bombas han demostrado que es posible obtener energía de la fusión nuclear, sin embargo, la energía generada de este modo no puede ser aprovechada con fines pacíficos ya que se produce sin control. La finalidad de la investigación actual sobre la fusión nuclear es lograr un mecanismo que la controle, de manera que pueda ser aprovechada.

La estrategia principal ha sido calentar gas a temperaturas muy altas, pero manteniendo el control del número de reacciones de fusión. A este modo de lograr 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. En la actualidad, el objetivo de la mayoría parte de las investigaciones en este aspecto es lograr la fusión termonuclear controlada.

Cuando se eleva la temperatura de un gas a valores muy altos, las partículas del gas, que normalmente son eléctricamente neutras (formando átomos o moléculas), dejan de serlo, ya que las colisiones entre partículas provocan que los electrones se desliguen de sus núcleos. A este proceso de pérdida de electrones se le llama ionización y al átomo con déficit de electrones se le conoce como ion. El nombre con el que se conoce al gas ionizado es "plasma".

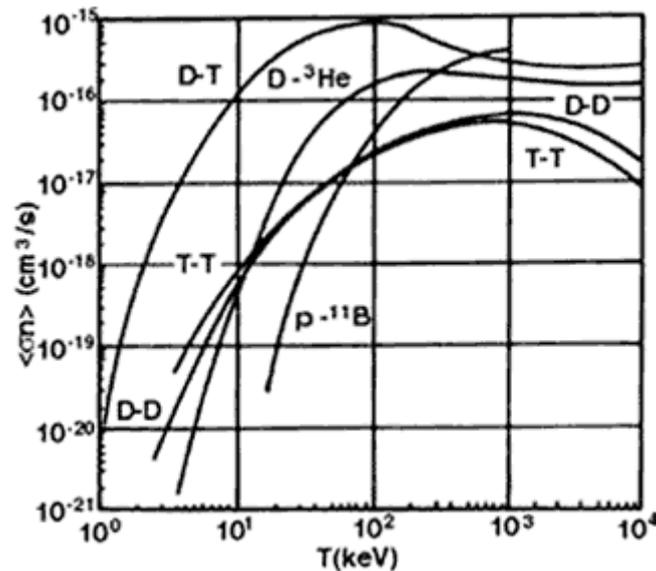
Analizándolo como una unidad, el plasma es generalmente eléctricamente neutro, pero debido a que contiene partículas cargadas, su comportamiento es muy diferente y más complejo que el de un gas sin ionizar. El estudio del plasma es fundamental para la investigación en fusión termonuclear, y, por ello, el desarrollo de estas dos disciplinas han estado ligados desde los años 60's del siglo pasado.



Fuente: Ulrickson, M. Nuclear Fusion: Bringing a Star To Earth, Sandia National Laboratories, October 11, 2011

Figura 3.3. Plasma en el experimento START

Para medir la temperatura en un plasma se emplean unidades de energía en lugar de grados o Kelvin, ya que así se mide con mayor precisión el nivel de agitación que tienen las partículas que lo componen y, adicionalmente, permite compararlo con las energías de las partículas individuales. La siguiente gráfica muestra la posibilidad de que se lleven a cabo reacciones de fusión en función de la temperatura promedio del plasma como función maxweliana ⁴.



Fuente: Martinel Benito, Julio, Los Prometeos Modernos o El Esfuerzo para Controlar la Fusión Nuclear, Fondo de cultura económica, 2da edición, México, 1995

Figura 3.4. Tasa de reacción para las principales reacciones de fusión en función de la temperatura maxweliana del gas

La potencia de fusión generada en un plasma termonuclear es 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. Como se mencionó, la reacción más atractiva es la de D-T, ya que la probabilidad de fusión y la energía generada son mayores que en otras reacciones. Parte de esta potencia será utilizada para mantener las reacciones de fusión en el plasma. La potencia restante puede ser utilizada para generar electricidad.

Es importante señalar que las altas temperaturas requeridas para provocar reacciones de fusión en el plasma provocan que toda esta energía térmica no pueda ser contenida más que por un tiempo finito; a este tiempo se le llama tiempo de confinamiento de energía (t_E).

⁴ La distribución de Boltzmann o distribución de Maxwell-Boltzmann es una distribución de probabilidad de las velocidades de un gas asociada a la estadística de Maxwell-Boltzmann para dicho sistema. El término “distribución de Boltzman” se reserva para la función de probabilidad de la energía de las partículas, mientras que el término “distribución de Maxwell-Boltzmann” se reserva para la distribución de probabilidad de la velocidad de las partículas.

Es posible establecer la condición para que la ganancia de energía sea igual a las pérdidas en términos de t_E . La energía perdida es la energía térmica que se escapa y la 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 equipo es captada y se convierte en energía útil con una eficiencia ε , ésta tendrá que ser mayor o igual que la energía que hay que suministrar al plasma para mantenerlo activo, de modo que la energía de entrada no sea mayor que la de salida. Esta condición puede expresarse como:

$$nt_E \geq \frac{3T}{[P_F(\varepsilon/1 - \varepsilon) - P_R]/n^2} \quad (3.6)$$

Donde:

P_F = Potencia de fusión

P_R = Potencia de radiación

T = Temperatura en unidades de energía

ε = Eficiencia de la conversión de energía captada a energía útil

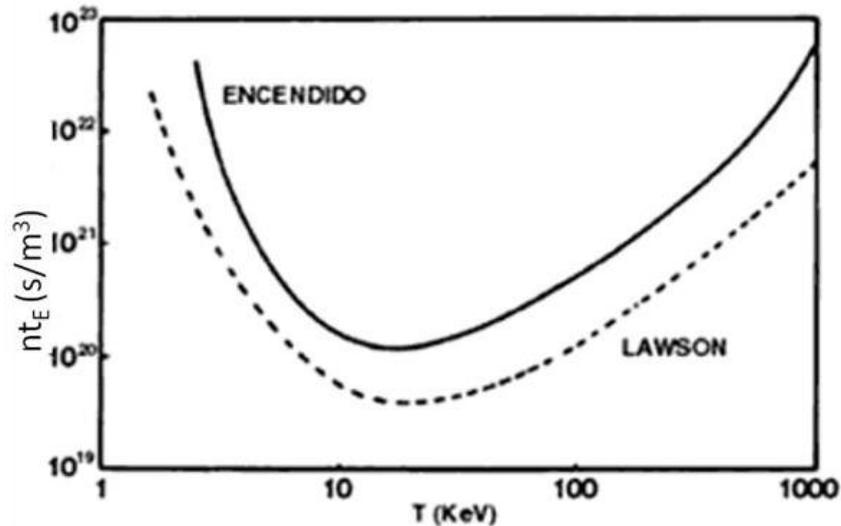
n = Densidad de partículas (número de partículas por unidad de volumen)

El lado derecho de esta relación depende sólo de la temperatura, para una eficiencia dada. A esta condición se le llama criterio de Lawson ya que John Lawson describió las condiciones de equilibrio de pérdidas y ganancias en reacciones de fusión en 1957.

Otro concepto importante utilizado para definir las condiciones para que se den reacciones auto sustentadas es el de ignición o encendido de un plasma. Se le conoce como "estado de encendido" en un plasma termonuclear al estado donde la energía de fusión producida (o parte de ella) puede ser reabsorbida manteniendo la temperatura constante. El plasma habrá llegado entonces a un estado autosostenido, donde ya no es necesario que se suministre energía del exterior. La condición de encendido es más exigente que el criterio de Lawson para la igualdad de pérdidas y ganancias. Suponiendo que las partículas alfa son las únicas que pueden quedar dentro del plasma y proporcionarles su energía, con potencia P_α , el criterio de encendido es:

$$nt_E \geq \frac{3T}{[P_\alpha - P_R]/n^2} \quad (3.7)$$

En la figura 3.5 se muestran los dos criterios en función de la temperatura, para la reacción deuterio-tritio. El régimen de operación de un reactor termonuclear debe quedar arriba de estas curvas; es decir, T debe estar en el rango 10 - 20 keV, y $n \cdot t_E$ del orden de 10^{20} segundos por metro cúbico (s/m^3) o mayor.



Fuente: Martinel Benito, Julio, Los Prometeos Modernos o El Esfuerzo para Controlar la Fusión Nuclear, Fondo de cultura económica, 2da edición, México, 1995

Figura 3.5. Valores del producto de la densidad del plasma n por el tiempo que permanece confinada su energía t_E , necesarios para el emparejamiento de pérdidas y ganancias y para el encendido, ambos en función de la temperatura del plasma

Para satisfacer estos requerimientos, se puede optar entre tiempos de confinamiento de energía pequeños pero densidades grandes o tiempos de confinamiento largos a densidades moderadas. Dentro del primer caso, existe la posibilidad de obtener plasmas muy calientes confinados por su propia masa, por lo que se llama confinamiento inercial. Dentro del segundo caso se incluye la posibilidad de mantener un plasma confinado por tiempos "largos" y, para ello, es posible emplear campos magnéticos que actuarían sobre las partículas cargadas que forman el plasma, por lo que, a este método, se le conoce como confinamiento magnético.

3.3.2. Desarrollos tecnológicos para lograr reacciones de fusión nuclear ⁵

Uno de los retos fundamentales para hacer posible la viabilidad técnica de la tecnología de fusión nuclear es lograr de manera controlada la ignición que, como ya se mencionó, significa mantener las reacciones de fusión en el plasma sólo mediante el aporte de energía de los productos de la fusión. En un reactor de D-T, la temperatura necesaria para que se sigan produciendo reacciones de fusión será mantenida por la energía de los residuos de helio. A continuación se muestra la condición de ignición en unidades del SI:

$$nt_E T > 6 \times 10^{22} \text{ [s MK /m}^3\text{]} \quad (3.8)$$

⁵ Fuentes del subcapítulo:

- Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, , Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001

- McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

donde:

n es la densidad de los iones

T es la temperatura de los iones

t_E es el tiempo de confinamiento de la energía

Evidentemente, existen muchas posibilidades de alcanzar esta condición dependiendo de la variable (n , T o t_E) que se busque maximizar.

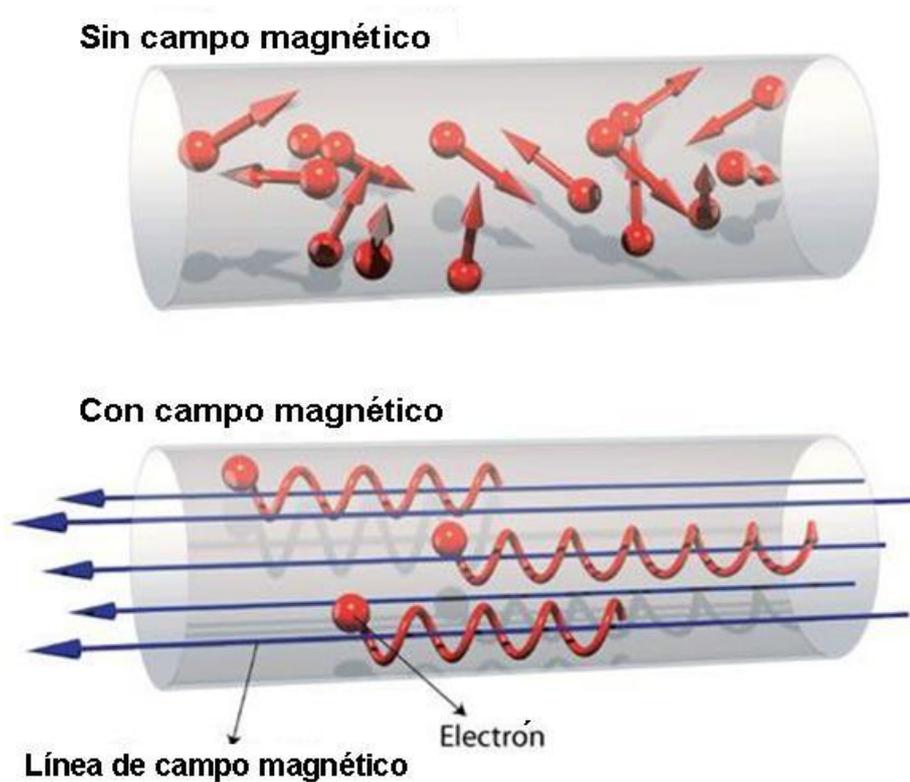
Actualmente, para alcanzar la condición de ignición, se contemplan dos métodos:

- a) **Confinamiento inercial:** mediante láser o haces de iones pesados se comprime una cápsula de combustible muy pequeña a densidades extremas (más de mil veces la densidad de un líquido) hasta que se inicia la fusión en su centro. Mediante este método el tiempo de confinamiento, del orden de milisegundos, es extremadamente corto.
- b) **Confinamiento magnético:** Este método es el más desarrollado en la actualidad. Un plasma caliente se mantiene aislado de las paredes del reactor mediante campos magnéticos logrando densidades del orden de 10^{20} iones por m^3 ; por lo tanto, el tiempo de confinamiento requerido es del orden de segundos.

En los siguientes subcapítulos se buscará ahondar en la descripción de estos dos métodos.

3.3.2.1. El confinamiento magnético

El confinamiento magnético tiene su fundamento en el movimiento helicoidal que siguen las partículas cargadas en presencia de un campo magnético a lo largo de las líneas de campo, evitando que éstas sigan trayectorias aleatorias. Esto se ilustra en la siguiente figura:



Fuente: Garcia, Odd Erik, Nuclear fusion energy, Department of Physics and Technology, University of Troms, 2010

Figura 3.6. Comportamiento de iones en presencia de un campo magnético

Para lograr lo anterior existen dos clases de equipos: los abiertos y los cerrados. En los equipos abiertos, las líneas de campo no se cierran sobre sí mismas y el plasma está confinado en un espacio finito por espejos magnéticos.

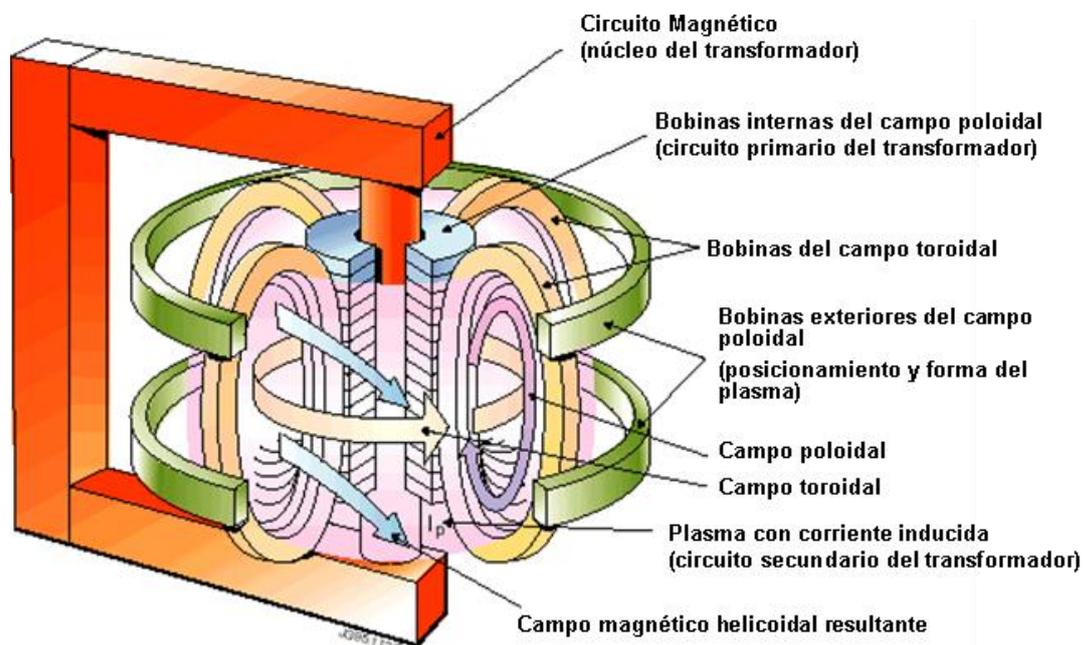
Los equipos cerrados son de geometría toroidal de forma que el plasma está confinado en un volumen finito pero sin que las líneas de campo magnético tengan un límite. Un campo magnético a lo largo del toro en la dirección toroidal se genera mediante bobinas exteriores.

En la actualidad, los dispositivos abiertos de confinamiento magnético han demostrado ser poco adecuados para ser la base de la generación comercial de energía por tecnología de fusión nuclear, debido al escape de plasma y energía en sus extremos. Por lo anterior, el desarrollo de los dispositivos cerrados ha tenido grandes avances en sus dos configuraciones: los Tokamaks y los Stellarators.

3.3.2.1.1. El Tokamak ⁶

El término “Tokamak” es un acrónimo de *toroidalnaya kamera* y *magnitnaya katushka* que en ruso significa cámara toroidal y bobina magnética. El primer Tokamak se desarrolló en la URSS a principios de los años 50's del siglo pasado a partir del concepto original de Andrei Sakharoz e Igor Tamm.

Como se puede ver en la figura 3.7, en un Tokamak, el campo magnético toroidal se crea mediante unas bobinas situadas a lo largo del toro (bobinas de campo toroidal) mientras que el campo magnético poloidal se crea mediante una corriente I_p inducida en el plasma en dirección toroidal. Esta corriente se induce mediante las bobinas internas de campo poloidal que actúan como el circuito primario de un transformador mientras que el propio plasma es el circuito secundario.

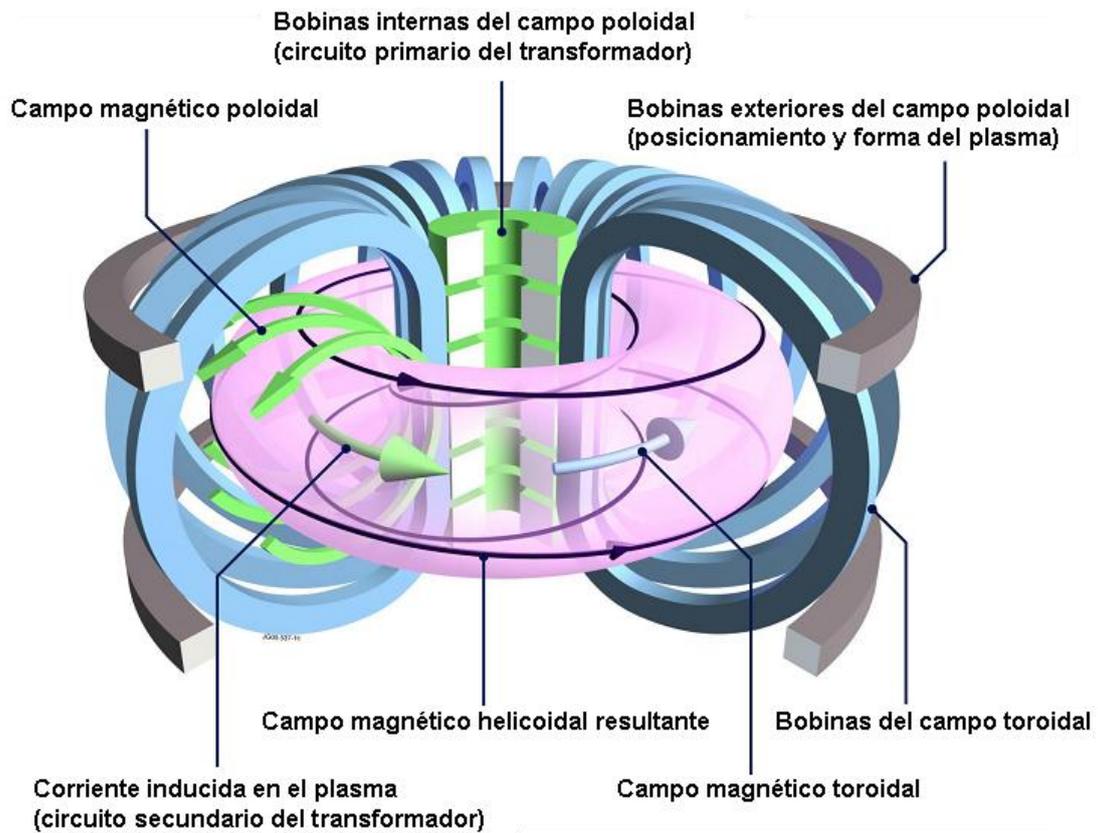


Fuente: Herrera Velázquez, Julio, Estado actual de la fusión nuclear controlada y sus perspectivas, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Departamento De Física de Plasmas e Interacción de la Radiación con la Materia, La transición energética y las energías alternas, 4 de mayo de 2011

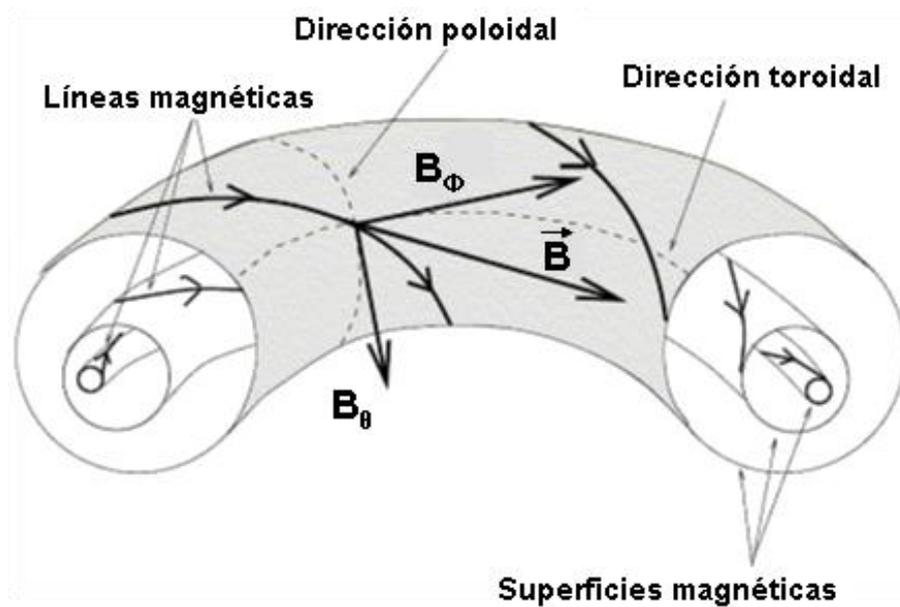
Figura 3.7. Componentes esenciales y funcionamiento de un Tokamak

Las líneas de campo magnético resultantes son la combinación de los campos poloidal y toroidal descritos y tienen una forma helicoidal a lo largo del toro, de forma que las partículas pasan alternativamente por zonas exteriores e interiores del toro. Las siguientes figuras ilustran claramente lo anterior:

⁶ Fuente del subcapítulo: Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001



Fuente: Garcia, Odd Erik, Nuclear fusion energy, Department of Physics and Technology, University of Troms, 2010



Fuente: Barrera López de Turiso, Eduardo, Arquitectura PXI Multiprocesadora para Adquisición y Procesado de Datos en Tiempo Real. Aplicación a Diagnósticos en Entornos de Fusión por Confinamiento Magnético, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2008

Figura 3.8. Formación del campo magnético helicoidal en un Tokamak

Usualmente, el progreso de la investigación en fusión se mide mediante el factor de ganancia “Q”, que se define como el cociente entre la energía producida por las reacciones de fusión y la energía de calentamiento suministrada al sistema.⁷

Hasta el momento, los dispositivos Tokamaks han alcanzado los factores de ganancia “Q” más grandes. El máximo valor de Q se ha alcanzado en el Tokamak europeo JET y ha sido del orden de 0.65.⁸

Actualmente, el confinamiento magnético por medio de dispositivos Tokamak es el más desarrollado en el mundo, y es la tecnología para generar reacciones de fusión nuclear que más posibilidades tiene de ser la base de una generación de energía, técnica y económicamente viable en las siguientes décadas.

3.3.2.1.2. El Stellarator⁹

Los Stellarators, al igual que los Tokamaks, son también dispositivos de confinamiento magnético toroidales que crean un campo magnético toroidal por medio de bobinas con dirección poloidal. Sin embargo, a diferencia de los Tokamaks, en los Stellarators, el campo magnético poloidal no se genera a partir de la corriente del plasma sino a partir también de bobinas exteriores, mediante un devanado con forma helicoidal. Lo anterior se muestra en la siguiente figura:

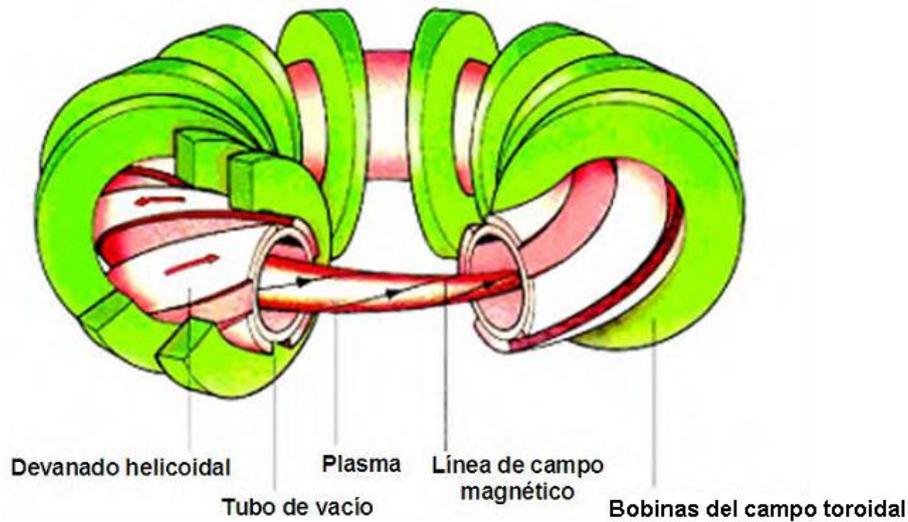
⁷ Meade, Dale, 50 years of fusion research, IOP Publishing and International Atomic Energy Agency, Nuclear Fusion, Nucl. Fusion 50 (2010) 014004 (14pp), 2010, 8 p.

⁸ European Fusion Development Agreement, Fusión, la energía de las estrellas, Assoc. Euroatom – Consorzio RFX, 2003, 40 p.

⁹ Fuentes del subcapítulo:

- Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Universitat Politècnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001

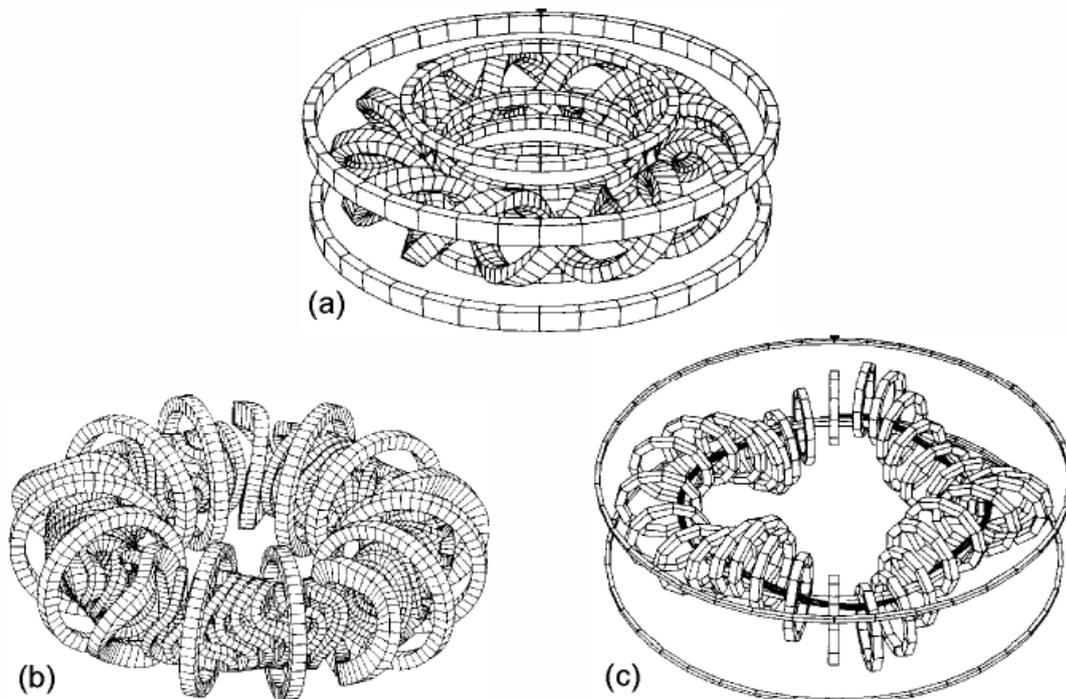
- Barrera López de Turiso, Eduardo, Arquitectura PXI Multiprocesadora para Adquisición y Procesado de Datos en Tiempo Real. Aplicación a Diagnósticos en Entornos de Fusión por Confinamiento Magnético, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2008



Fuente: Barrera López de Turiso, Eduardo, Arquitectura PXI Multiprocesadora para Adquisición y Procesado de Datos en Tiempo Real. Aplicación a Diagnósticos en Entornos de Fusión por Confinamiento Magnético, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2008

Figura 3.9. Esquema de un Stellarator

Existen tres tipos de Stellaratos: Torsatrons, que poseen bobinas helicoidales continuas; Stellarators modulares, con una disposición de bobinas toroidales no planas y HeliaCs, formados por un conjunto de bobinas planas circulares, distribuidas a lo largo de una hélice enrollada alrededor de una bobina central circular.



Fuente: Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001

Figura 3.10. Los tres tipos de Stellarators: a) Torsatron: ATF; b) Modular: W7-AS; c) Heliac: TJ-II

Las principales ventajas de estos dispositivos con respecto a los Tokamaks son su funcionamiento continuo por no haber ninguna corriente inductiva y que al carecer de corriente interna en el plasma, no hay riesgo de disrupciones.

3.3.2.2. El confinamiento inercial ¹⁰

En el confinamiento inercial se usa un mecanismo similar al que opera en una bomba de hidrógeno pero a escalas muy pequeñas. Se busca formar pequeñas cápsulas de combustible fusionable (D o D-T) e irradiarlas uniformemente con alguna fuente de energía desde el exterior para calentarlas.



Fuente: Maire, Pierre-Henri, Numerical schemes for the simulation of Inertial Confinement Fusion in the direct drive context, UMR CELIA, CNRS, University Bordeaux, CEA, France

Figura 3.11. Cápsula de combustible para fusión inercial

Al comprimirse el material de la cápsula, alcanza temperaturas muy altas en su centro por un lapso de tiempo muy corto y toma un estado gaseoso. El lapso de tiempo está determinado por la limitación del confinamiento que provoca la tendencia de un gas a expandirse libremente. Lo único que se opone a la expansión es la masa de las partículas del gas ya que si ésta no existiera, se expandiría instantáneamente; de aquí surge el nombre de “inercial”.

Los tiempos de confinamiento típicos de esta tecnología son del orden de picosegundos (billonésimos de segundo) y las densidades que alcanza el material fusionable son del orden de entre 10^{25} y 10^{26} partículas por centímetro cúbico. Los diámetros de las cápsulas que se usan son de centenas de micras. El objetivo es concentrar una gran cantidad de energía sobre blancos muy pequeños y se logra disparando hacia las cápsulas haces energéticos, uniformemente distribuidos alrededor de las mismas.

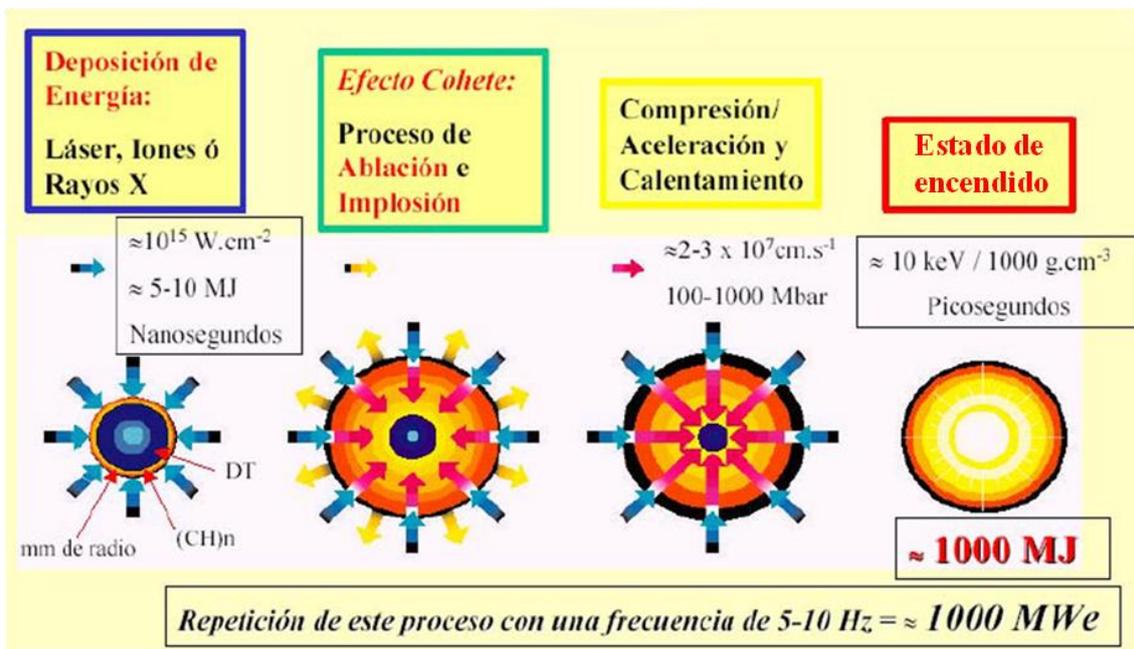
¹⁰ Fuente del subcapítulo: Martinel Benito, Julio, Los Prometeos Modernos o El Esfuerzo para Controlar la Fusión Nuclear, Fondo de cultura económica, 2da edición, México, 1995

Se han investigado cuatro tipos de haces energéticos: láseres de alta potencia, electrones relativistas, iones pesados e iones ligeros. Los experimentos con más éxito hasta la fecha son los realizados con láseres ya que son fáciles de propagar y enfocar sobre el blanco; sin embargo, su eficiencia eléctrica es baja. En contraste, los haces de iones y electrones tienen eficiencias aceptables, pero es difícil enfocarlos sobre el blanco.

Los haces deben ser capaces de concentrar la energía en regiones muy pequeñas, ya que los diámetros de las esferas son de pocos milímetros.

El calentamiento por los haces se concentra en la superficie del blanco, de modo tal que, el material en esta zona, se separa formando una corona de plasma en donde se generan electrones energéticos y radiación. Los haces deben poder atravesar la corona para seguir calentando el interior; sin embargo, generalmente sólo pueden penetrar hasta cierta distancia debido a los efectos de la absorción.

Superando esta distancia, el calentamiento puede continuar mediante la energía transportada por los electrones y por la radiación, generados en la corona. A medida que se calienta, el material se evapora por un proceso de ablación. En respuesta a la evaporación, cuya dirección es hacia el exterior, hay una reacción en el material interno que lo obliga a moverse hacia el interior. Como las energías que intervienen son muy grandes, el movimiento hacia dentro es muy violento por lo que se produce una implosión que comprime y calienta el combustible del interior hasta los valores necesarios para alcanzar el encendido del plasma. En esta etapa comienza el confinamiento inercial.



Fuente: Perlado Martín, José Manuel, Proyección de la Fusión Nuclear: una Energía de Futuro, Instituto Fusión Nuclear (DENIM), E.T.S.I.I., Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Encuentro: Energía Nuclear para el siglo XXI, UIMP Santander 18-19 Julio 2007

Figura 3.12. Proceso de evolución de una esfera de combustible para confinamiento inercial

El estudio de las condiciones físicas que imperan en el momento de máxima compresión es complejo ya que a esas densidades ya no es aplicable la física clásica y los efectos cuánticos dominan el fenómeno.

Otra dificultad que se presenta durante la compresión es el desarrollo de inestabilidades. Cuando un material de alta densidad es acelerado por un material de baja densidad se puede presentar la inestabilidad de Rayleigh-Taylor. Esta inestabilidad se origina porque la irradiación del blanco por los haces no es realmente uniforme y porque la cápsula no es del todo simétrica. Estos factores dan lugar a que en ciertos puntos, la presión producida por los haces sea mayor que en otros, creándose así una situación propicia para que la inestabilidad de Rayleigh-Taylor se desarrolle.

A causa de lo anterior, las zonas que se han desplazado más hacia el centro avanzan cada vez más rápido mientras que las más alejadas del centro casi no se mueven. Esto produce una compresión totalmente asimétrica que es muy ineficiente. Esta inestabilidad puede aparecer en la fase de aceleración y en la fase de frenado o desaceleración.

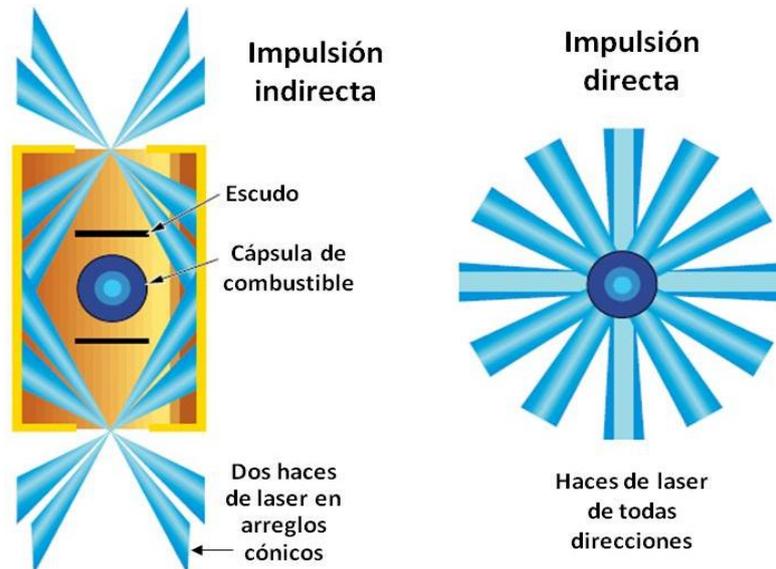
Por otro lado, la ganancia de energía (Q) de un blanco dado depende, fundamentalmente, del tipo de impulsor que se utilice, por lo que es conveniente identificar las diferentes alternativas para evaluar su desempeño. Un impulsor debe tener la propiedad de poder proporcionar energías muy altas (arriba de los 10 kJ) al blanco en lapsos de tiempo del orden de nanosegundos y de poder enfocarse en superficies muy pequeñas. Como se ha analizado, una alternativa clara es el uso de haces de partículas o de radiación electromagnética de alta potencia y bien dirigida como la que constituye el láser.

Como se mencionó, dentro del campo de la fusión por confinamiento inercial, la tecnología de láser es la que más se ha estudiado y la más avanzada, aunque tiene aún muchos retos técnicos por resolver. Uno de sus mayores inconvenientes es que las cantidades de energía que requiere son demasiado altas para los láseres convencionales por lo que ha sido necesario desarrollar nuevos tipos de láser especialmente para el programa de fusión. Gran parte de la investigación que se ha hecho al respecto es secreta ya que los láseres de alta potencia pueden tener uso militar; por ello, el conocimiento del grado de desarrollo a nivel mundial de esta tecnología es limitado.

Otro factor importante en la tecnología de confinamiento inercial es el diseño de las cápsulas de combustible a irradiar, ya que, con un buen diseño, se puede mejorar la tasa de compresión. La forma del blanco depende del tipo de irradiador o impulsor que se emplee.

Existen dos tipos de blancos: los de impulsión directa, que absorben la energía del haz directamente sobre la cápsula de combustible; y los de impulsión indirecta, que primero convierten en rayos X la energía del haz en una cámara externa para que luego éstos sean absorbidos por la cápsula de combustible.

Con el método de impulsión directa, se tiene una transmisión de energía a la cápsula muy eficiente, pero se necesita lograr una gran uniformidad en los haces. Por el contrario, con el método de impulsión indirecta, se pueden tolerar mayores deficiencias en la uniformidad de la irradiación, pero el acoplamiento con la cápsula es ineficiente. Los dos tipos de blancos mencionados se ilustran en la siguiente figura:



Fuente: U.S. DOE by LLNL, Inertial Fusion Energy: Opportunity for Fusion Innovation, UCRL-MI-125743, January 1997

Figura 3.13. Dos tipos de impulsión de los blancos en la fusión inercial: directa e indirecta

Mediante impulsión directa se han alcanzado altas temperaturas y altas densidades, aunque no de manera simultánea. Para obtener altas densidades se requiere una gran uniformidad y esto se logra aumentando el número de haces, es decir, dividiendo los principales en una gran cantidad haces pequeños por medio de un dispositivo especial. Mediante impulsión indirecta se han obtenido mayores presiones pero también menores temperaturas. Con diseños basados en ella (específicamente en el experimento NOVA) se han obtenido valores del parámetro de Lawson del orden de 2 a 4×10^{14} s/cm³ con láseres de longitud de onda pequeña (0.35 mm).

3.3.3. La central nuclear de fusión ¹¹

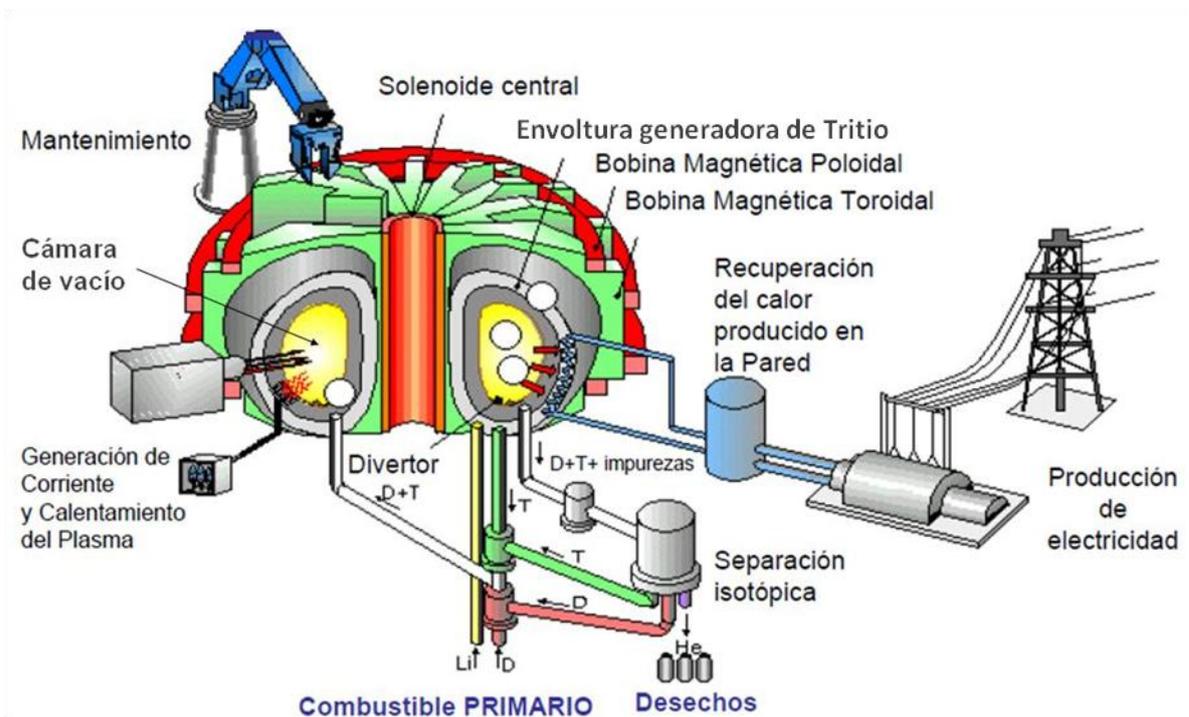
3.3.3.1. Configuración de una planta de fusión nuclear

Han sido propuestos diversos diseños de centrales para extraer la energía generada por las reacciones nucleares de fusión. A pesar de las diferencias entre ellos, existen varios sistemas que son comunes a la mayoría. Una central de fusión, igual que una central nuclear de fisión, suele dividirse en la denominada isla nuclear, y la parte convencional que convierte la energía térmica de alta temperatura en electricidad por medio de un ciclo de turbina de vapor.

¹¹ Fuente del subcapítulo: Perlado Martín, José Manuel, La fusión nuclear como fuente masiva de energía, Revista Ingeniería y territorio No. 90, 2010

En una central de fusión basada en el confinamiento magnético de plasma, la tecnología de fusión más viable en la actualidad, la isla nuclear contaría con una cámara de plasma con un sistema de vacío asociado y estaría rodeada por los componentes expuestos al plasma (barrera primaria y divertor). Estos protegerían el recinto de vacío y absorberían la radiación térmica proveniente del plasma.

A su vez, estos componentes estarían envueltos por un manto fértil (también llamado envoltura generadora de Tritio) que contendría Litio. En esta capa, los neutrones serían absorbidos para producir Tritio y para calentar un fluido de trabajo que transferiría esta energía térmica a la parte convencional de la central. Esto se muestra en la siguiente figura.



Fuente: Perlado Martín, José Manuel, Proyección de la Fusión Nuclear: una Energía de Futuro, Instituto Fusión Nuclear (DENIM), E.T.S.I.I., Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Encuentro: Energía Nuclear para el siglo XXI, UIMP Santander 18-19 Julio 2007

Figura 3.14. Esquema del funcionamiento de una central de fusión

En este tipo de configuración, sería necesario un sistema de bobinas magnéticas, generalmente electroimanes superconductores criogénicos. Adicionalmente se necesitarían sistemas para el calentamiento del plasma, para la recarga del combustible y para la captura de los desechos.

En caso de tratarse de un reactor de confinamiento inercial, se requeriría un accionador (haz láser o acelerador de partículas), un sistema de enfoque y un dispositivo para formar y posicionar las cápsulas de combustible.

El área principal del reactor tendría la forma de una cámara grande que estaría al vacío donde se inyectaría una cápsula de combustible. Al pasar por el centro de la cámara, se le bombardearía con los haces de láser o de partículas energéticas, produciéndose una implosión seguida de una miniexplosión termonuclear. Las bombas de vacío retirarían los gases y los desechos de la explosión, antes de que una nueva cápsula fuera inyectada. Esto se repetiría aproximadamente entre una y diez veces por segundo, de manera que la energía liberada pudiera ser colectada de forma continua.

La configuración más viable para la generación eléctrica en las centrales nucleares de fusión sería la convencional de un ciclo Rankine de turbina de vapor que utilizara el calor generado por los neutrones. Sin embargo, también existen alternativas para la conversión directa en electricidad de la energía de las partículas cargadas.

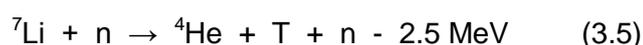
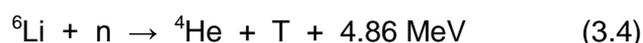
Esta opción no es viable para el ciclo de combustible Deuterio-Tritio, en el que el 80% de la energía es transportada por los neutrones, pero sería de gran interés en el caso de la fusión aneutrónica ¹².

Con frecuencia, la conversión directa ha sido propuesta para configuraciones de confinamiento magnético abierto, como las configuraciones de espejo, en las que las partículas cargadas se pierden a lo largo de las líneas de campo magnético, para luego expandirse convirtiendo gran parte de la energía turbulenta de los productos de fusión, en energía cinética unidireccional. Estas partículas serían captadas por electrodos cargados a un elevado potencial eléctrico. El rendimiento de esta conversión está calculada en alrededor del 80%, aunque también se ha calculado que el coste y tamaño del convertidor pueden ser similares a los del propio reactor.

3.3.3.2. Operación de una central nuclear de fusión

Como se analizó en el Subcapítulo 3.2, actualmente, la reacción más viable para ser aprovechada en una central de fusión es la basada en la reacción de D-T. Durante esta reacción, se producen neutrones con 14 MeV de energía los cuales arrastran un 80% de la energía producida.

En una central de energía basada en el confinamiento magnético de plasma, el manto fértil que rodearía la cámara de vacío absorbería los neutrones producidos por la reacción. Como se mencionó, esta capa contendría Litio (92.5% de ⁷Li y un 7.5% de ⁶Li) que, al reaccionar con los neutrones que escaparían del plasma, se transformaría en Tritio y Helio mediante las reacciones siguientes:



El espesor del manto fértil deberá ser de alrededor de un metro para frenar los neutrones con 14 MeV de energía que producen las reacciones de fusión. Al hacerlo, el manto fértil aumentaría su temperatura.

¹² La fusión aneutrónica es cualquier tipo de reacción de fusión en la que los neutrones transportan menos de un 1% de la energía producida.

Por el interior del manto fértil, circularía agua u otro refrigerante que extraería el calor para producir vapor de agua de alta entalpía, el cual se aprovechará en una turbina de vapor para generar electricidad. El Tritio producido en el manto fértil se separaría del helio y se recuperaría para inyectarlo como combustible en el plasma.

3.4. Antecedentes históricos de la tecnología de fusión nuclear ¹³

Dado que la tecnología de fusión nuclear con mayor desarrollo en la actualidad, con mayor inversión en el mundo y con perspectivas de éxito más claras es la de confinamiento magnético, el presente subcapítulo versará, sobre todo, sobre esta última.

3.4.1. Los primeros pasos del confinamiento magnético

Desde que en 1928, Atkinson y Hourtermarns hicieron pública su hipótesis de que la energía de las estrellas podría tener su origen en las reacciones de fusión ¹⁴, la investigación de estos fenómenos se ha desarrollado hasta nuestros días.

En los años 40's del siglo pasado, la fusión nuclear fue propuesta por un pequeño grupo de científicos como una fuente de energía técnicamente viable.

Los primeros pasos para desarrollar esta fuente de energía fueron hechos en el Reino Unido. En 1946, George Thomson y Moses Blackman del *Imperial College* de Londres registraron una patente para una planta de potencia termonuclear. Su patente fue rápidamente clasificada como secreta, así que, en su tiempo, los detalles no fueron hechos públicos.

En esencia, la patente resumía un plan para confinar un plasma caliente mediante un campo magnético en un recipiente en forma de dona que superficialmente en su forma exterior, se parecía bastante a los experimentos de fusión de hoy en día. Con el beneficio de los conocimientos actuales sobre la materia, es claro que esta temprana idea no hubiera operado pero fue una idea sobresaliente para su época. Esta propuesta provocó mucha discusión y condujo al inicio de la investigación en fusión experimental en el *Imperial College*.

Una iniciativa paralela había dado comienzo en 1946 en el *Clarendon Laboratory* en la Universidad de Oxford. Peter Thonemann había llegado a Oxford proveniente de la Universidad de Sydney en Australia, en donde, a inicios del siglo XX había sido descubierto el llamado efecto Pinch.

Entre 1952 y 1953 fue lanzado en Estados Unidos un ambicioso programa el cual consistía en tener varios grupos de investigación experimental que siguieran diferentes arreglos de campos magnéticos para el confinamiento de plasma. La rivalidad interna avivó el programa. Alrededor de 1954, la investigación en fusión se complicó debido a que fueron iniciados nuevos experimentos aun antes de que los anteriores estuvieran operando.

¹³ Fuente del subcapítulo: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

¹⁴ European Fusion Development Agreement, Fusión, la energía de las estrellas, Assoc. Euroatom – Consorzio RFX, 2003, 10 p.

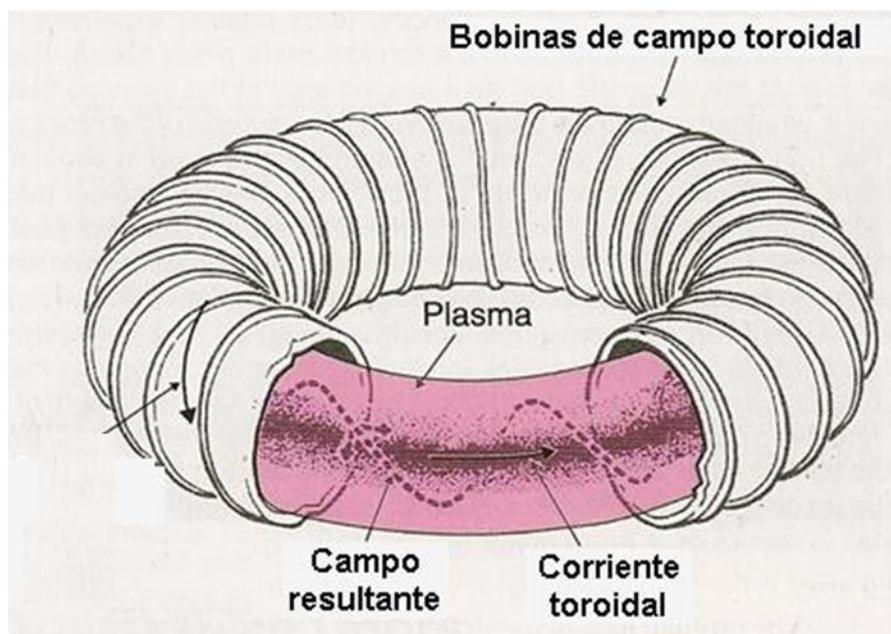
A mediados de los años 50's del siglo pasado, John Lawson estableció las condiciones fundamentales necesarias para obtener una potencia neta positiva de salida de las reacciones de fusión. Su elegante análisis de balance de energía mostró que el producto de la densidad del combustible (n) y del tiempo de reemplazo de la energía del plasma (t_E) es función únicamente de la temperatura del plasma (T), de las impurezas contenidas y de potencia de fusión (Q).

Durante la década de los 50's del siglo pasado, la investigación en fusión por confinamiento magnético incluyó varias configuraciones para crear y confinar el plasma. Los esfuerzos más importantes se concentraron en Tokamaks, Pinch toroidales, Pinch lineales, Stellarators y Espejos Magnéticos.

3.4.2. El surgimiento del Stellarator

En la Universidad de Princeton en Nueva Jersey, el astrofísico Lyman Spitzer desarrolló un dispositivo para el confinamiento del plasma al que llamó Stellarator. A diferencia de los dispositivos Pinch, donde el campo magnético era generado principalmente a partir de corrientes fluyendo en el mismo plasma, el campo magnético en el Stellarator era producido enteramente mediante bobinas exteriores.

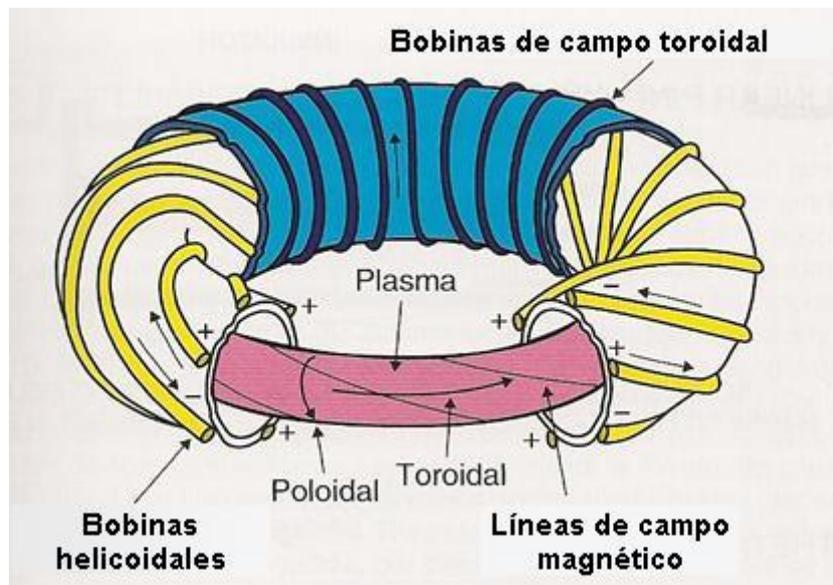
En un experimento Pinch, la corriente de plasma fluye alrededor del interior del toroide (con dirección toroidal) y genera un campo magnético que envuelve al plasma. Adicionalmente, un campo magnético con dirección toroidal se crea mediante unas bobinas situadas a lo largo del toro. Ambos campos se suman y forman un campo magnético helicoidal. Esto se puede apreciar en la figura 3.15:



Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.15. Diagrama esquemático de uno de los primeros dispositivos toroidales: el Pinch toroidal

La idea original del Stellarator había sido confinar el plasma mediante un campo magnético toroidal. Rápidamente, fue evidente que un campo magnético toroidal sólo, no podría confinar el plasma y que sería necesario adicionar una vuelta al campo. En los primeros experimentos esto fue hecho simplemente girando físicamente la totalidad del toroide hasta formar una figura en 8. Posteriormente, el mismo efecto fue producido usando un segundo conjunto de bobinas que se dispusieron “giradas” de manera helicoidal como se muestra en la figura 3.16.



Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

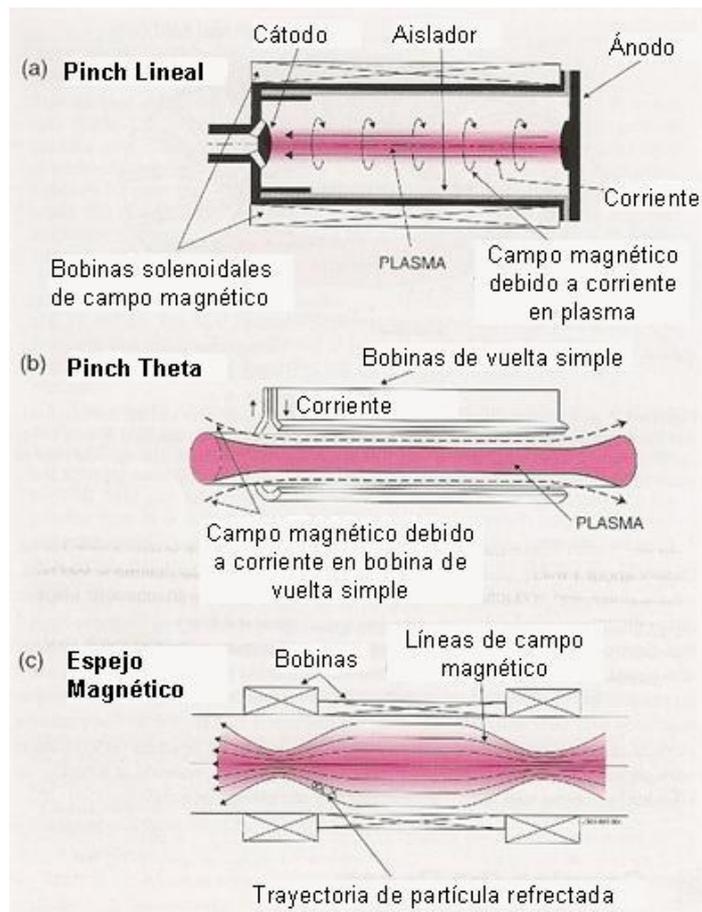
Figura 3.16. Esquema básico de un Stellarator

El Stellarator tiene la ventaja de ser capaz de operar continuamente por lo que aun se considera que tiene el potencial para ser el sistema de confinamiento usado en el futuro en las plantas de potencia de fusión. Por lo anterior, la investigación en Stellarators continua activa en algunos laboratorios de fusión.

3.4.3. Desarrollo del confinamiento en el mundo

El programa de investigación en fusión, en Los Alamos en Nuevo México, estudio el efecto pinch toroidal y el efecto pinch theta, por el que un campo magnético fuerte se construye muy rápidamente para comprimir un plasma. Se pensó que si esto pudiera realizarse lo suficientemente rápido, podrían alcanzarse las temperaturas de fusión antes de que el plasma tuviera tiempo de escapar por los extremos abiertos de los equipos.

En el *Lawrence Livermore National Laboratory*, en California, también se construyeron algunos Pinch, pero se puso énfasis en el confinamiento del plasma en campos magnéticos rectos resistentes en los extremos: la llamada Máquina Espejo Una aproximación similar, usando Máquinas Espejo, fue seguida en el *Oak Ridge* en Tennessee. Algunas de estas configuraciones magnéticas lineales se muestran en la figura 3.17.



Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.17. Esquema de tres diferentes configuraciones magnéticas lineales consideradas para el confinamiento del plasma caliente

Aunque teóricamente, los sistemas lineales tendrían grandes ventajas comparados con los toroidales debido a la facilidad de construcción y mantenimiento de los primeros, éstos tienen problemas importantes por las pérdidas en los extremos.

En la Unión Soviética, la primera propuesta para un dispositivo de fusión provino en 1950 de Oleg Lavrentier, un soldado quien servía en la armada del país. Su propuesta para confinar plasma mediante campos eléctricos en lugar de campos magnéticos fue enviada a los investigadores en Moscú. Ellos concluyeron que no sería posible la operación del confinamiento electrostático mediante la configuración propuesta; sin embargo, esto los estimuló para continuar las investigaciones del confinamiento magnético.

Todas estas investigaciones fueron llevadas a cabo en gran secreto. Investigadores del Reino Unido y de los Estados Unidos sabían algo del trabajo de unos y otros, pero no los detalles. Muy poco se sabía acerca del trabajo en la Unión Soviética. En esa época, se planteaba la cuestión de si la investigación en fusión debería mantenerse en secreto o debería ser abierta a la cooperación. La presión para desclasificar la información de las investigaciones fue incrementándose en una forma rápida.

En 1956, los líderes soviéticos Nikita Khrushchev y Nikolai Bulgarin, fueron al Reino Unido en una visita de estado altamente publicitada. Con ellos fue el físico Igor Kurchatov, quien visitó el *Atomic Energy Research Establishment* en Harwell y dio la conferencia: “*On the possibility of Producing Thermonuclear Reactions in a Gas Discharge*”.

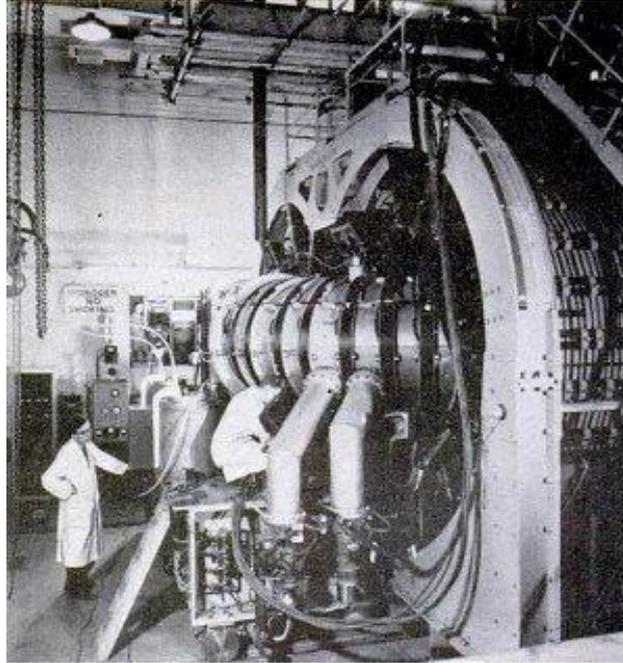
Esto resultó ser de gran interés para los investigadores británicos quienes estaban trabajando en un programa de fusión “secreto”. Fue difícil para ellos formular preguntas sin revelar lo que sabían, y, para lo cual, requerían una aprobación previa. Descubrieron que los investigadores de la Unión Soviética habían estado siguiendo líneas de investigación en confinamiento magnético, muy similares a las seguidas en el Reino Unido y en los Estados Unidos, que estaban concentradas en experimentos de Pinch toroidal y Pinch recto.

3.4.4. El desarrollo del confinamiento toroidal

La investigación en fusión en Harwell se había expandido rápidamente a inicios de los años 50's del siglo pasado. Fueron construidos experimentos Pinch cada vez más grandes y poderosos que culminaron en la maquina ZETA, la cual inició operaciones en 1957. Zeta fue una empresa audaz y una hazaña de ingeniería para sus días. Este toroide de aluminio de 3 metros de diámetro originalmente pretendía contener una corriente de plasma de 100,000 amperes (A), pero esta especificación fue pronto llevada a 900,000 A.

Ya en las primeras semanas de operación con plasmas de Deuterio, las corrientes estuvieron cercanas a los 200,000 A y fueron registrados una gran cantidad de neutrones: hasta un millón por pulso. Esto causó gran excitación pero se cuestionó si estos neutrones eran termonucleares.

El asunto pronto fue resuelto mediante una serie de mediciones en los neutrones que mostraron que no eran termonucleares. ZETA hizo muchas contribuciones importantes para el entendimiento de los plasmas de fusión pero los planes para construir una versión más grande de la máquina fueron abandonados.



Fuente: Gilster, Paul, Z-Pinch: Powering Up Fusion in Huntsville, Centauri Dreams: The News Forum of the Tau Zero Foundation, June 26, 2012

Figura 3.18. Experimento Zeta

Unas pocas semanas después de la publicación de los resultados de ZETA, el velo final de secrecía respecto a la investigación en fusión fue levantado en la “Conferencia Átomos para la Paz” llevada a cabo por las Naciones Unidas en Ginebra en 1958. Algunos de los experimentos en fusión de aquella época fueron llevados a Ginebra y mostrados en una exhibición junto con la Conferencia.

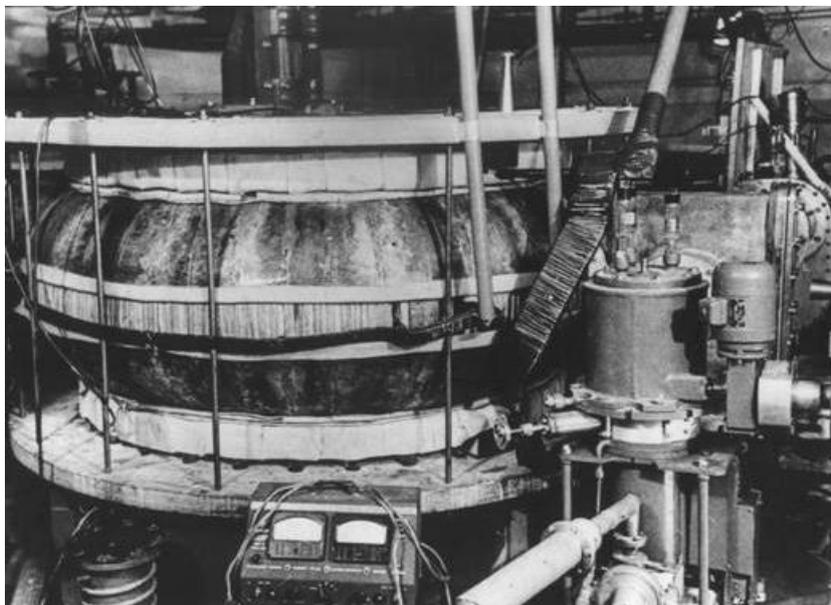
Esta fue la primera oportunidad para que los investigadores en fusión de países capitalistas y comunistas se vieran y escucharan los detalles de los trabajos de otros, para compararlos y hacer preguntas. En muchos casos encontraron que habían estado trabajando en líneas de investigación similares y realizando esencialmente los mismos descubrimientos independientemente. Los contactos personales establecidos ahí conducirían a una fuerte tradición de colaboración internacional en la investigación en fusión.

Las muchas y diferentes configuraciones magnéticas que habían sido probadas podrían ser agrupadas en dos principales categorías de acuerdo a si el campo magnético era abierto en los extremos, como los Pinch Zeta y Theta y las Maquinas Espejo, o cerrado dentro de un toroide, como los Pinch toroidales o Stellarators. Cada una de estas categorías podría ser dividida en sistemas que fueran rápidamente impulsados y sistemas con el potencial para operar en estado permanente.

Algunos de los sistemas de extremos abiertos pulsados rápidamente, en particular los Pinch theta, estuvieron a la vanguardia en este campo de investigación a finales de los años 50's del siglo pasado debido a las altas temperaturas de plasma y a las altas producciones de neutrones alcanzadas. Estos tuvieron resultados impresionantes debido a que el plasma era calentado mediante la compresión inicial rápida de los campos magnéticos antes de darle tiempo de escapar o de volverse inestable. Sin embargo, el potencial de estas configuraciones para convertirse en una central de generación fue limitado, debido a la pérdida de plasma a través de sus extremos abiertos y a las inestabilidades que se desarrollaban relativamente rápido.

Las Máquinas Espejo de extremos abiertos también tuvieron problemas por las pérdidas en sus extremos. Los Pinch toroidales y los Stellarators evitaban pérdidas en los extremos pero se encontró que el plasma escapaba a través del campo magnético mucho más rápido de lo que se esperaba. Si estas pérdidas prevalecían y se proyectaban a una planta de potencia, sería muy difícil, posiblemente imposible, aprovechar la energía de fusión para la generación comercial.

Se obtuvieron pequeños éxitos en los intentos para reducir las pérdidas en los extremos de los sistemas abiertos pero, una a una, estas líneas de investigación se fueron abandonando. Los sistemas toroidales, los Stellarators y los Pinch, tuvieron un progreso permanente y lentamente comenzaron a mostrar signos de mejora en el confinamiento; sin embargo, fueron sorprendidos por un nuevo contendiente: el Tokamak, una configuración que había sido inventada en Moscú, en el Instituto Kurchatov. Como ya se ha visto, el nombre es un acrónimo de las palabras rusas *toroidalnaya kamera*, para cámara toroidal y *magnitnaya katushka*, para bobina magnética.



Fuente: <http://www.iter.org/sci/beyonditer>

Figura 3.19. El primer dispositivo Tokamak en el mundo: El ruso T1 en el Instituto Kurchatov en Moscú

En un Pinch toroidal, el campo magnético poloidal es mucho más fuerte que el campo magnético toroidal, de modo que el campo magnético helicoidal esté curvado de forma muy apretada. Por el contrario, en un Tokamak, el campo toroidal producido por las bobinas exteriores es típicamente alrededor de 10 veces más fuerte que el campo poloidal producido por la corriente de plasma.

3.4.5. Hacia los grandes Tokamaks

En 1968, justamente 10 años después de la conferencia de Ginebra, se llevó a cabo otra conferencia sobre investigaciones en fusión, esta vez en el pueblo siberiano de Novosibirisk. Los resultados más recientes presentados respecto a los Tokamaks rusos fueron tan impresionantes que la mayoría de los países pronto decidieron reorientar sus esfuerzos sobre esta línea.

La única causa de duda respecto a los resultados de los Tokamaks fue que, hasta entonces, la temperatura del plasma confinado en ellos había sido medida un tanto indirectamente. Para poner la cuestión fuera de toda duda, un conjunto de científicos británicos fue invitado para ir a Moscú el siguiente año para medir la temperatura con una nueva técnica basada en láser.

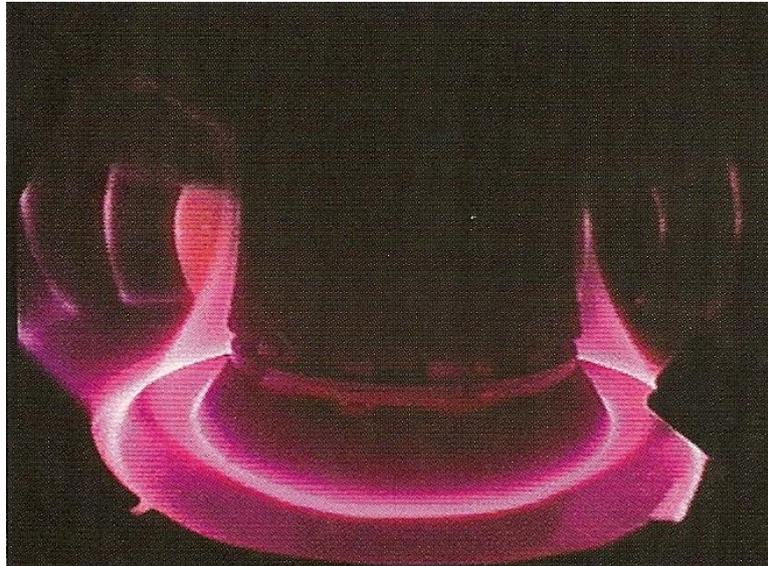
Cuando los resultados de estas pruebas fueron publicados, aun los más escépticos investigadores en fusión quedaron convencidos. El principal laboratorio de fusión de Estados Unidos, en Princeton, se movilizó rápidamente convirtiendo su más grande Stellarator en un Tokamak. Esto fue seguido por la construcción de muchos nuevos dispositivos Tokamaks experimentales en los laboratorios de fusión de los Estados Unidos, Europa, Japón y, desde luego, la Unión Soviética. A partir de entonces, los Tokamaks marcaron el ritmo de la investigación en fusión por confinamiento magnético.

Se diseñaron y construyeron Tokamaks de tamaño pequeño en varios países como el ORMAK, el Alcator y el ATC en EUA; el CLEO, el TFR y el FT en Europa y el JFT-2 y el JFT2a (DIVA) en Japón.

El éxito de los recién construidos Tokamaks en los inicios de los años 70's del siglo pasado animó a los investigadores en fusión a desarrollar planes ambiciosos. Al despertar el mundo de la crisis del petróleo en 1973, las fuentes de energía alternativas disfrutaron de un apoyo político y popular renovado y la prospectiva para la investigación en fusión mejoró.

Sin embargo, la extrapolación de las condiciones del plasma de los Tokamaks relativamente pequeños que entonces estaban en operación a una planta de potencia de fusión era una prospectiva muy incierta. El Tokamak francés TFR y el ruso T4 fueron los más potentes en operación a inicios de los años 70's del siglo pasado, con corrientes máximas de plasma de alrededor de 400,000 A. Estados Unidos construyó un Tokamak conocido como PLT (*Princeton Large Torus*) que inició operaciones en 1975.

Con el gran aumento del presupuesto para investigación en fusión en Estados Unidos y en otros países hacia finales de los años 70's y principios de los 80's del siglo pasado, se propusieron, diseñaron y construyeron más Tokamaks de diseño mediano, el DIII, el DIVA, el PDX, el Alcator C, el ASDEX y el JFT-M, para investigar aspectos específicos del plasma: la forma de la sección transversal, los divertores y los regímenes de campo alto y densidad alta.

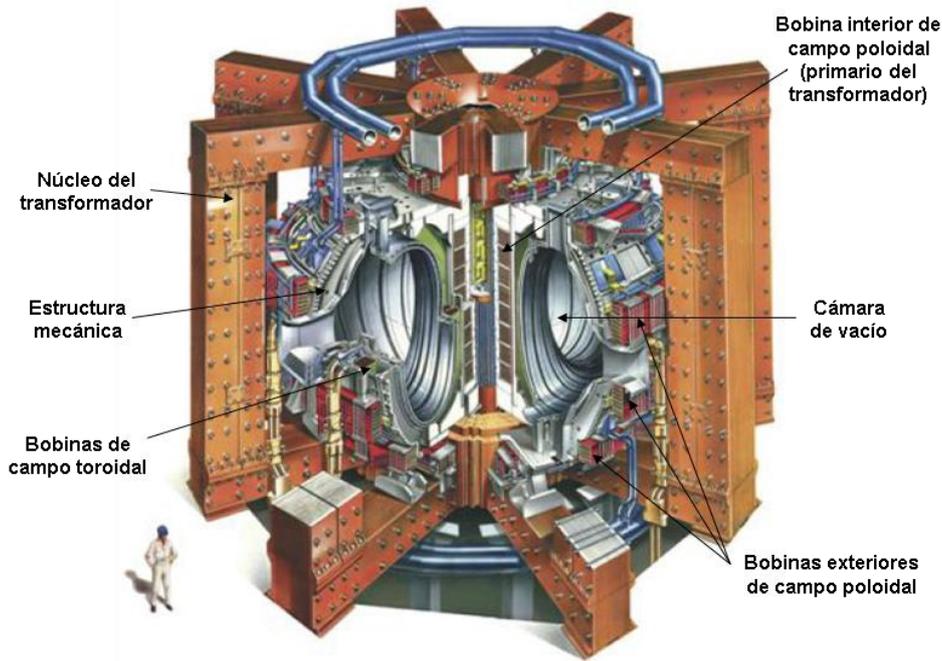


Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.20. Emisión de luz de plasma de la región del divertor en el Tokamak ASDEX-U en Munich, Alemania

3.4.6. Investigación en grandes Tokamaks: El JET, el TFTR y el JT-60

En 1973 los europeos decidieron dar un paso audaz y comenzaron a diseñar un Tokamak de gran potencia y grandes dimensiones, el *Joint European Torus* (JET), muy grande y caro para un simple laboratorio en fusión, que sería financiado en su mayoría con fondos provenientes de la comunidad europea. El diseño progresó rápidamente pero las decisiones políticas lo hicieron lentamente ya que Alemania e Inglaterra querían hospedar el JET. La decisión final fue construir el JET al sur de Oxford en el Reino Unido.

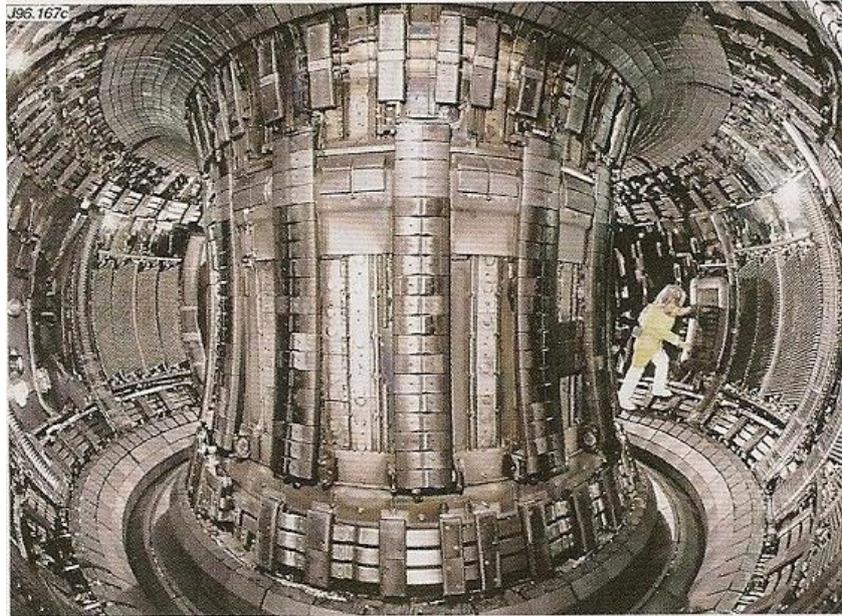


Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.21. Un corte del modelo de Tokamak JET, mostrando el transformador, las bobinas del campo magnético y el recipiente al vacío en el cual se forma el plasma

El diseño inicial del Tokamak JET contemplaba una corriente de plasma de 3 MA pero durante la fase de diseño se cambió para que fuera de 4.8 MA. De hecho el JET fue tan bien diseñado que fue capaz de alcanzar los 7 MA. El contraste con los primeros experimentos de fusión, muchos de los cuales habían fallado en alcanzar sus metas iniciales, fue sorprendente.

Las bobinas de cobre enfriadas con agua suministraban al JET el campo magnético. Estas tenían una forma en "D" para minimizar los efectos de las fuerzas electromecánicas. La forma alargada, contraste con la circular, permitió al plasma contar con un volumen y una corriente mayores y, posteriormente, permitió la instalación de un divertor.



Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.22. Una vista dentro del JET tomada en 1996

La decisión europea de diseñar un gran Tokamak provocó una rápida respuesta de los Estados Unidos. Comenzaron el diseño de su Tokamak TFTR (*Tokamak Fusión Test Reactor*) y fueron rápidos concretar el proyecto y en seleccionar un sitio en la Universidad de Princeton. Fue diseñado con un plasma circular y dimensiones ligeramente más pequeñas que el JET pero con un campo magnético más grande. El diseño del TFTR contempló una corriente de plasma de 2.5 MA.

La Unión Soviética anunció planes tentativos para construir un gran Tokamak, que se designó como T-20, pero debido a que sus prioridades dentro de otras áreas de la ciencia compitieron con la investigación en fusión, finalmente optó por otro mucho más pequeño: el T-15. Japón decidió construir un gran Tokamak diseñado para operar a 2.7 MA: el JT-60. Éste inició su operación en abril de 1985 y fue el último de los grandes Tokamaks en hacerlo.

Se muestran a continuación los parámetros técnicos principales de los tres grandes Tokamaks descritos:

Parámetro	TFTR	JT-60U	JET
Radio Mayor R_o	2.5 m	3.1 m	2.96 m
Radio Menor a	0.85 m	1.34 m (vertical) 0.70 m (horizontal)	2.10 m (vertical) 1.25 m (horizontal)
Campo Toroidal B_o	5.2 T	4.0 T	3.45 T
Corriente de plasma I_p	3 MA	3 MA – 5 MA	3.2 MA (plasma circular) 4.8 MA (plasma forma D)
Duración del pulso t_E	2 s	15 s	20 s – 60 s

Fuentes: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

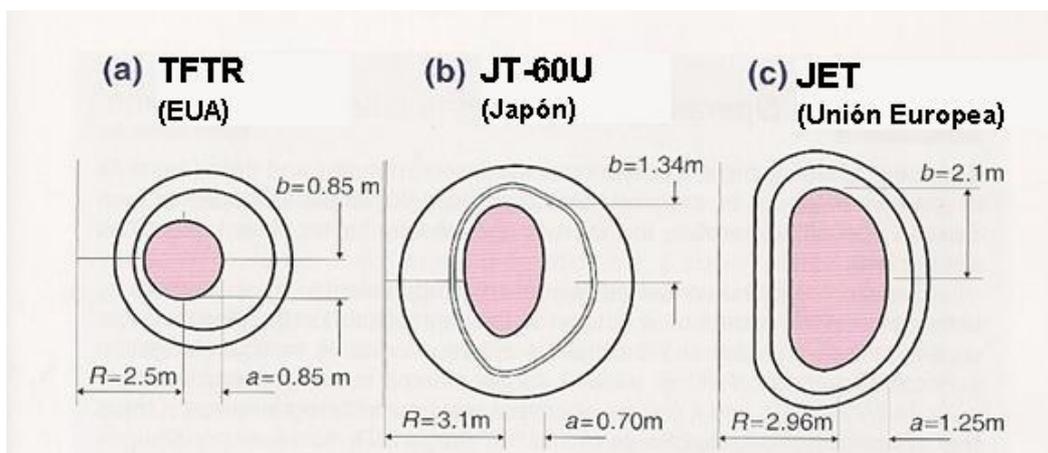
Mlynar, Jan, Focus On: JET: The European Centre of Fusion Research, EDFA JET, China, 2006

Kikuchi, M., JT-60 Modification Plan for Long Pulse: Advanced Tokamak Research, Japan Atomic Energy Research Inst., Naka Fusion Research Establishment, Colloquium of Max Planck Institute fur Plasma Physics, March 8, 2001

Meade, Dale M., TFTR experience with D-T operation, Princeton University, Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton USA

Cuadro 3.1. Principales parámetros técnicos de los tres grandes Tokamaks construidos en los años 70's y 80's del siglo pasado

Pocos años más tarde, después de hacersele modificaciones importantes, el JT-60 (renombrado JT-60U) pudo rivalizar en comportamiento con el JET. Las dimensiones de los tres grandes Tokamaks JET, TFTR y JT-60U se comparan en la figura 3.23. La entusiasta competencia entre los tres grupos de investigación fue un potente estímulo, pero siempre hubo una colaboración cercana y un intercambio de ideas y de información.



Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.23. Comparación de los tres Tokamaks más grandes construidos en los años 70's del siglo pasado: a) TFTR en Princeton, USA, b) JT-60U en Naka, Japón, c) JET en Culham, Reino Unido

El importante objetivo de construir el TFTR se cumplió en la navidad de 1982, cuando, por primera vez, se inyectó hidrógeno dentro del toroide y las bobinas magnéticas se energizaron. El JET y el TFTR rápidamente demostraron que podían operar confiablemente con corrientes de varios millones de amperes, mucho más grandes que los Tokamaks anteriores.

Así mismo, las longitudes de pulso en las nuevas máquinas fueron mucho mayores que las que se habían obtenido anteriormente; por ejemplo, en el JET, los pulsos que se obtuvieron inicialmente estuvieron entre los diez y los veinte milisegundos, aunque, posteriormente, fueron incrementándose hasta ser de más de un minuto.

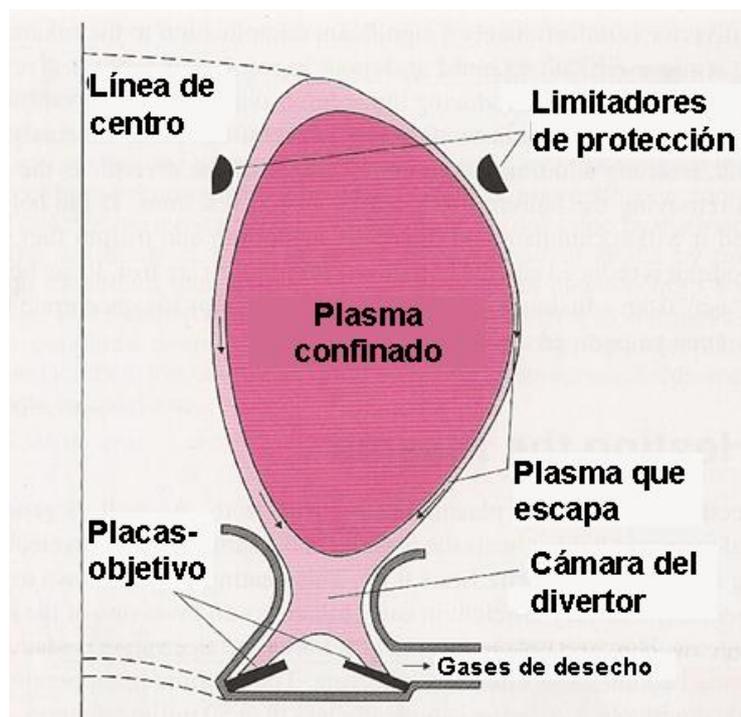
El tiempo de confinamiento de energía se incrementó bastante en comparación con los experimentos anteriores pues llegó a ser del orden de segundos en lugar de milisegundos. Finalmente, el tiempo de confinamiento de energía llegó a entrar en el rango necesario para la ignición; éste fue uno de los hitos más importantes en la investigación en fusión.

En los primeros años de su operación el JET y el TFTR usaron solamente el efecto del calentamiento óhmico de la corriente de plasma. Esto produjo temperaturas un poco más altas que las predichas a partir de los experimentos anteriores más pequeños, dentro del rango de los 50 millones de grados centígrados, pero fueron aun demasiado bajas para que la potencia de fusión fuera significativa.

Los sistemas de calentamiento, los cuales habían sido revisados varias veces partiendo de resultados de Tokamaks pequeños, fueron adicionados en etapas y escalados progresivamente por un periodo de varios años. Al final de ese periodo, cada uno de los grandes Tokamaks tuvo capacidades de calentamiento superiores a los 50 MW. Las temperaturas en el TFTR y en el JT-60 alcanzaron la meta de los 60 millones de grados centígrados. Sin embargo, como en los pequeños Tokamaks, el tiempo de confinamiento empeoraba a medida que el calentamiento se incrementaba.

No obstante, se encontraron algunos datos esperanzadores que indicaban que los tiempos de confinamiento podían ser mejorados. En el Tokamak ASDEX, en Alemania, se encontraron condiciones conocidas como "modo H", en las que el tiempo de confinamiento mejora de manera importante cuando a la configuración del equipo se le agrega un divertor.

El divertor es un sistema que desvía las líneas de confinamiento magnético hacia una cámara adyacente a la principal. Las impurezas del plasma son desviadas hacia esta cámara, donde pueden interactuar con las paredes y ser retiradas sin causar el enfriamiento del plasma principal. En la siguiente figura se muestra el esquema de un divertor:



Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.24. Esquema de un divertor en un Tokamak en la parte inferior de la máquina

El primer divertor fue improvisado en 1986 usando las bobinas magnéticas existentes del Tokamak en el que se añadió. Los resultados fueron impresionantes y produjeron un valor record para el producto $nt_{\text{E}}T$ (densidad por tiempo de confinamiento de energía por temperatura).

El JET había sido diseñado sin un divertor pero, afortunadamente, su cámara de vacío en forma de D permitió instalar uno. La forma circular del TFTR hizo difícil seguir la misma ruta pero los investigadores de Princeton encontraron que podían obtener resultados impresionantes si acondicionaban cuidadosamente el toroide y usaban calentamiento intensivo. Los siguientes años fueron extremadamente exitosos con ambas máquinas dando resultados técnicos alentadores.

El JT-60 fue el único de los grandes Tokamaks que había sido diseñado con un divertor, pero la primera versión del sistema ocupó mucho espacio y restringió seriamente la máxima corriente de plasma. El JT-60 fue cerrado en 1989 para instalar un nuevo divertor. Esto cambió la apariencia del Tokamak y permitió incrementar la corriente del plasma hasta alcanzar los 6 MA. La nueva versión (renombrada JT-60U) entró en operación en marzo de 1991 y comenzó a jugar un rol más importante en la investigación con Tokamaks avanzados.

Para inicios de los años 90's del siglo pasado, tanto la temperatura de los plasmas como el parámetro nt_{E} de Lawson, se habían multiplicado por 3,000 en los experimentos en Tokamaks de todo el mundo, desde la convención de Ginebra de 1958.

3.4.7. En busca de la operación con Tritio

Los experimentos de fusión habían sido operados casi exclusivamente con plasmas de Deuterio y habían evitado el uso del Tritio. Esto minimizó el incremento de radioactividad en las estructuras de los Tokamaks debida al bombardeo y ello hizo más fácil el mantenimiento y las actualizaciones de los equipos.

Sin embargo, era importante ganar experiencia en la operación real con plasmas de Deuterio - Tritio y el TFTR y el JET habían sido diseñados para esto. Ambos Tokamaks fueron alojados en paredes de concreto de gran espesor para proteger al personal de la radiación y fueron diseñados con provisiones para llevar a cabo futuros trabajos de mantenimiento, usando herramientas que podían ser operadas remotamente. Los resultados alentadores obtenidos en plasmas de Deuterio aceleraron estos planes.

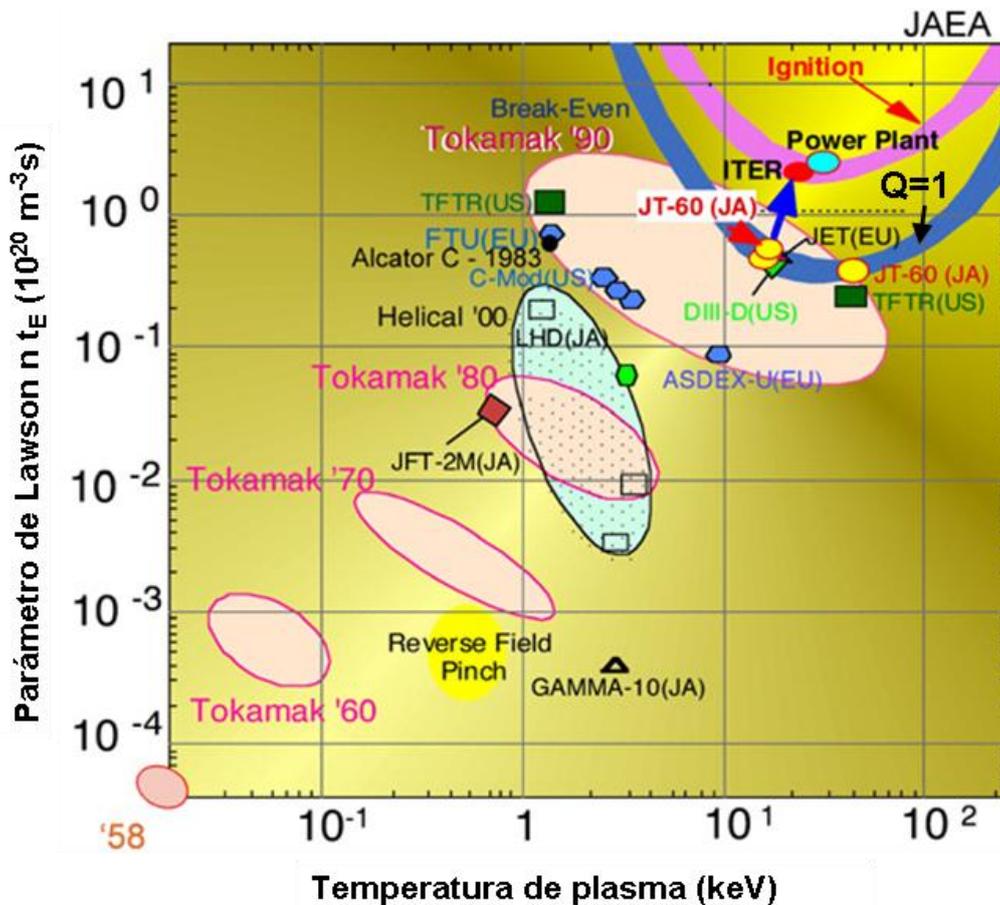
En noviembre de 1991, el JET hizo el primer experimento con una mezcla de Deuterio – Tritio. Los resultados estuvieron cerca de los predichos a partir de los experimentos con Deuterio y se calculó que alrededor de 5 MW podrían producirse con la concentración optima de 50% de Tritio y 50% de Deuterio. Sin embargo, se decidió posponer este paso unos cuantos años para hacer más fácil la instalación del nuevo divertor.

El TFTR no se quedó atrás: en noviembre de 1993 se introdujo Tritio en su cámara de vacío y rápidamente se alcanzó la concentración óptima del 50%. En una campaña intensiva entre 1993 y 1997, el TFTR elevó su salida de fusión a más de 10 MW.

Cuando se volvieron a realizar experimentos con Tritio en el JET en 1997, el nuevo divertor permitió que la salida de fusión alcanzara un valor record de 16 MW durante unos pocos segundos. Sin embargo, no se obtuvieron aún reacciones de fusión autosostenibles pues fueron necesarios alrededor de 25 MW de potencia externa.

Experimentos hechos en los últimos años en Tokamaks de segunda generación como el JT-60U, el DIII-D, el AUG y el C-Mod, han explorado algunos aspectos del estado estacionario que se alcanzaría en Tokamaks más avanzados. Para continuar con estas investigaciones, nuevos Tokamaks superconductores de mediana y larga escala, como el EAST en China, el KSTAR en Korea y el JT-60SA en Japón, han entrado en operación o se están construyendo actualmente, en varios países del mundo.

La siguiente figura muestra la evolución de la tecnología de confinamiento magnético en el siglo pasado:



Fuente: Meade, Dale, 50 years of fusion research, IOP PUBLISHING and INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, NUCLEAR FUSION, 30 december 2009

Figura 3.25. Progreso de la fusión nuclear por confinamiento magnético en el Criterio de Lawson en los últimos años

3.5. Proyección actual de la tecnología de fusión nuclear ¹⁵

Como se ha analizado en este trabajo, el confinamiento magnético de plasma basado en dispositivos de tipo Tokamak es actualmente la tecnología más avanzada y con mayores posibilidades de éxito para lograr la viabilidad técnica y económica de la energía nuclear de fusión.

Con base en los conocimientos sobre esta tecnología y sobre el comportamiento del plasma, obtenidos a partir de la investigación realizada en las últimas décadas, se han determinado los pasos que deben necesariamente darse en la investigación y en el desarrollo de esta fuente de energía para lograr construir una planta comercial de potencia de fusión.

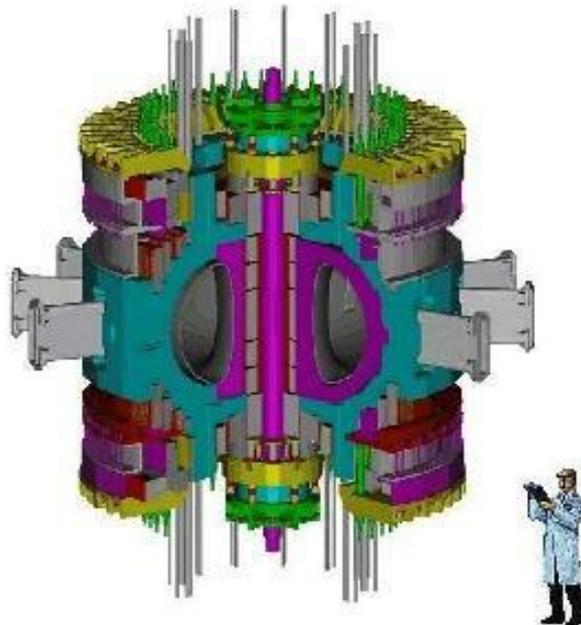
¹⁵ Fuente del subcapítulo: Herrera Velázquez, J. Julio E., La Fusión Nuclear como Opción Energética para el Siglo XXI, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007

En primer lugar, desde el punto de vista de los principios físicos, la próxima generación de equipos experimentales de fusión deberá determinar las características del comportamiento de los plasmas en combustión ($Q > 1$), fenómeno que hasta ahora no se ha observado en dispositivos de experimentación.

Aunque en algunos experimentos se ha alcanzado el valor del producto $n \times t_E \times T$ (densidad de partículas \times tiempo de confinamiento de energía \times temperatura) que sería necesario en plasmas de deuterio – tritio para obtener $Q = 1$, esto sólo ha sucedido en plasmas de deuterio puro, mismos que no son equivalentes a los primeros ya que a los de deuterio puro les falta el calentamiento necesario de las partículas alfa.

Se espera que mediante el experimento ITER se logre este primer objetivo, alcanzando en él valores de $Q = 5$ y posiblemente de $Q = 10$ con plasmas de deuterio – tritio.

Posteriormente, es necesario alcanzar en un plasma de deuterio – tritio el estado de ignición (estado auto sostenido de reacciones de fusión en el plasma, donde, como se ha mencionado, ya no es necesario que se suministre energía del exterior) con el fin del determinar las características de este fenómeno. Actualmente, el único experimento diseñado para alcanzar la ignición ($Q = \infty$) es el IGNITOR, un Tokamak que se encuentra en desarrollo en Rusia; sin embargo, debido a la falta de financiamiento, no se ha comenzado aún su construcción y su futuro es incierto.



Fuente: http://blogs.nature.com/news/2010/04/italy_and_russia_fund_fusion_r.html , 2010

Figura 3.26. Componentes del Tokamak IGNITOR en su fase de diseño

Tanto el ITER como el IGNITOR explorarían fenómenos físicos que no se han observado antes en los experimentos de fusión desarrollados hasta el presente. El ITER será lo suficientemente flexible para probar los equipos necesarios en un reactor de fusión de pulsos prolongados, en él se espera observar los efectos de las partículas alfa sobre la estabilidad cuando el valor de Q sea mayor a 5 y se espera que ocurra un acoplamiento no lineal entre las partículas alfa cuando Q sea mayor a 10. Por otro lado, el IGNITOR debería proporcionar información sobre el plasma en combustión y en camino hacia la ignición en pulsos cortos y en él se debería ensayar el control de la alimentación del combustible al propagarse la combustión y al aparecer transitorios de ignición cuando Q sea mayor a 20.

En ambos experimentos se presentarían fenómenos no explorados anteriormente, como plasmas en combustión y en ignición, y es difícil predecir el tipo de obstáculos que surgirán de los primeros y el modo de resolverlos.

3.5.1. El experimento Tokamak ITER

En 1985, Mikhail Gorbachov (Secretario General del Partido Comunista de la Unión Soviética) propuso a Ronald Reagan (presidente de los EUA) que el Tokamak que daría el siguiente paso en la investigación en fusión, debería ser desarrollado mediante la colaboración internacional. Los EUA consultaron sobre su interés en el proyecto con Japón y con la Comunidad Europea, que respondieron positivamente, y acordaron comenzar la fase de diseño del proyecto ITER ¹⁶.

El nombre "ITER" tiene un significado dual: es un acrónimo de "*International Thermonuclear Experimental Reactor*" y también significa "el camino" en latín. El proyecto actualmente se encuentra en construcción en Cadarache, Francia y participan en él como socios: la Unión Europea, Japón, EUA, Rusia, China, Corea del Sur e India ¹⁷.

El principal objetivo del ITER es demostrar la viabilidad física y tecnológica de la energía nuclear de fusión. Para lograr esto, el ITER deberá demostrar que es posible mantener el control de un plasma de Deuterio – Tritio en condiciones de combustión ($Q > 1$ y hasta $Q = 10$) y, posteriormente, en estado estacionario. Adicionalmente, deberá demostrar que las tecnologías necesarias en un reactor de fusión, son capaces de funcionar correctamente en un sistema integrado ¹⁸.

¹⁶ Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001, 19 p.

¹⁷ Perlado Martín, José Manuel, Proyección de la Fusión Nuclear: una Energía de Futuro, Instituto Fusión Nuclear (DENIM), E.T.S.I.I., Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Encuentro: Energía Nuclear para el siglo XXI, UIMP Santander 18-19 Julio 2007, 24 p.

¹⁸ Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001, 19 p.

Se tiene proyectado que en el año 2018 se finalice su construcción y que en el año 2020 se logre su primer plasma ¹⁹.

3.5.1.1. Descripción del ITER ²⁰

El ITER será un reactor de fusión que integre todos los aspectos físicos y tecnológicos necesarios para la producción de energía, con excepción de los sistemas de producción de electricidad. Su diseño estará basado en el dispositivo Tokamak.

Las bobinas superconductoras situadas alrededor de la cámara toroidal de vacío, confinarán y controlarán el plasma e inducirán una corriente eléctrica a través de él. El volumen del plasma será lo suficientemente grande para alcanzar las condiciones de generación y obtención de energía.

La energía generada en las reacciones nucleares de fusión será absorbida por los componentes situados en la superficie interna de la cámara de vacío. Estos, además, mantendrán la pureza del plasma, lo calentarán y lo diagnosticarán.

Una capa protectora rodeará las bobinas y la cámara de vacío. Esta estructura mantendrá la cantidad de radiación recibida en niveles que eviten la activación del equipo de alrededor y que permitan el acceso humano al equipo, poco después de que éste haya dejado de operar.

Esta capa protectora será parte integral del edificio del Tokamak. Éste, entre otros edificios, albergará sistemas de soporte tales como los de producción de energía y los de refrigeración.

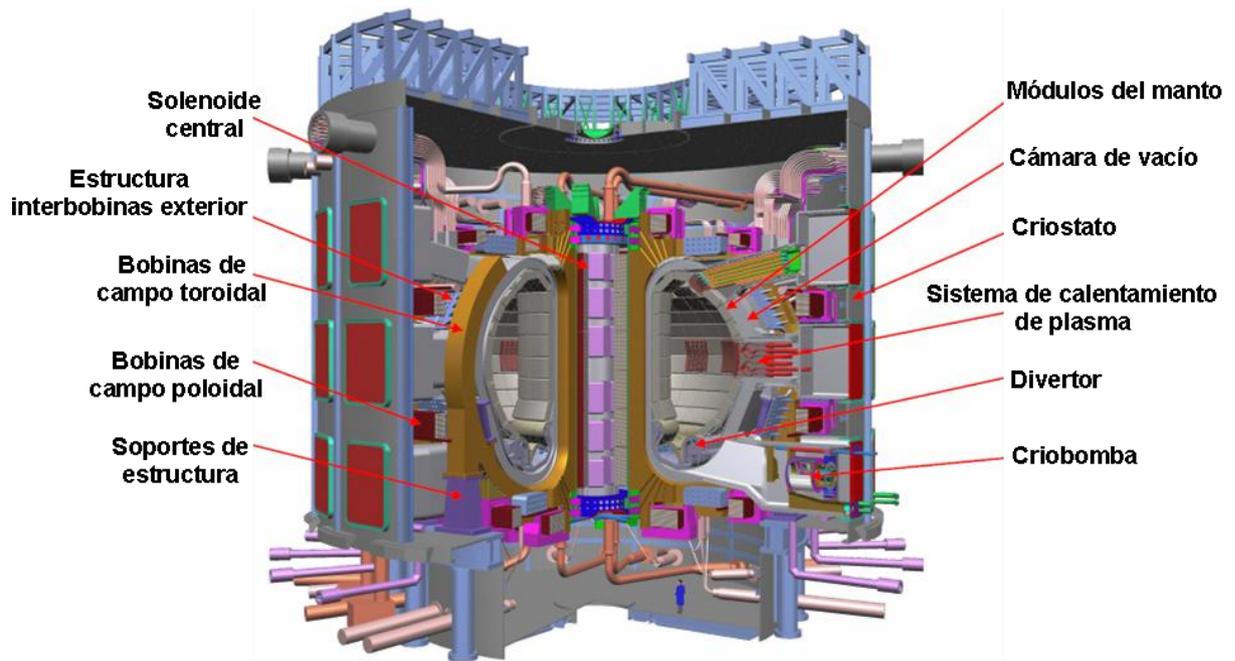
Las bobinas, incluso el solenoide central, serán de material superconductor, la cobertura modular y el divertor están diseñados para permitir su mantenimiento de manera remota. La cámara toroidal de vacío estará contenida dentro de un criostato.

¹⁹ Herrera Velázquez, Julio, Estado actual de la fusión nuclear controlada y sus perspectivas, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Departamento De Física de Plasmas e Interacción de la Radiación con la Materia, La transición energética y las energías alternas, 4 de mayo de 2011, 24 p.

²⁰ Fuentes del subcapítulo:

ˆ Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001.

- http://www-fusion.ciemat.es/New_fusion/es/Fusion/Prensa/abc_02_08_2002.html



Fuente: Garcia, Odd Erik, Nuclear fusion energy, Department of Physycs and Technology, University of Troms, 2010

Figura 3.27. Vista tridimensional del ITER y sus componentes

Los aspectos técnicos más importantes que se evaluarán en el ITER se resumen en:

- El mantenimiento del confinamiento magnético en modo H a alta densidad, alcanzando valores adecuados del campo toroidal para producir la potencia de fusión requerida.
- La previsión de la extracción de partículas e impurezas a través del divertor para asegurar niveles aceptables de helio y de impurezas en el plasma.
- La evolución del escalado del confinamiento magnético con el tamaño.
- La transferencia eficiente de la energía de las partículas alfa al plasma, limitando las pérdidas de energía.
- El mantenimiento de la estabilidad magnetohidrodinámica y del control del plasma para asegurar que las cargas térmicas y electromagnéticas producidas por disrupciones estén dentro de los límites aceptables.
- Desarrollo de cobertores para la generación de tritio y la conversión de energía de los neutrones en energía térmica.
- Prueba de materiales de primera pared que no absorban tritio y que soporten la radiación.
- Estudio de plasmas en combustión.

Los parámetros más importantes del ITER son los siguientes:

Parámetro	ITER
Radio Mayor R_0	6.2 m
Radio Menor a	2.0 m
Campo Toroidal B_0	5.3 T
Corriente de plasma I_p	15 MA
Duración del pulso	> 400 s
Potencia de fusión t_E	500 MW
Volumen del plasma	840 m ³
Calentamiento por fusión	10 W/cm ³
Amplificación de potencia	> 10
Altura	24 m
Longitud	30 m

Fuentes: - Sánchez , Joaquín, Fusión Nuclear, Laboratorio Nacional de Fusión por Confinamiento Magnético Gobierno de España, Ministerio de educación y ciencia, CIEMAT

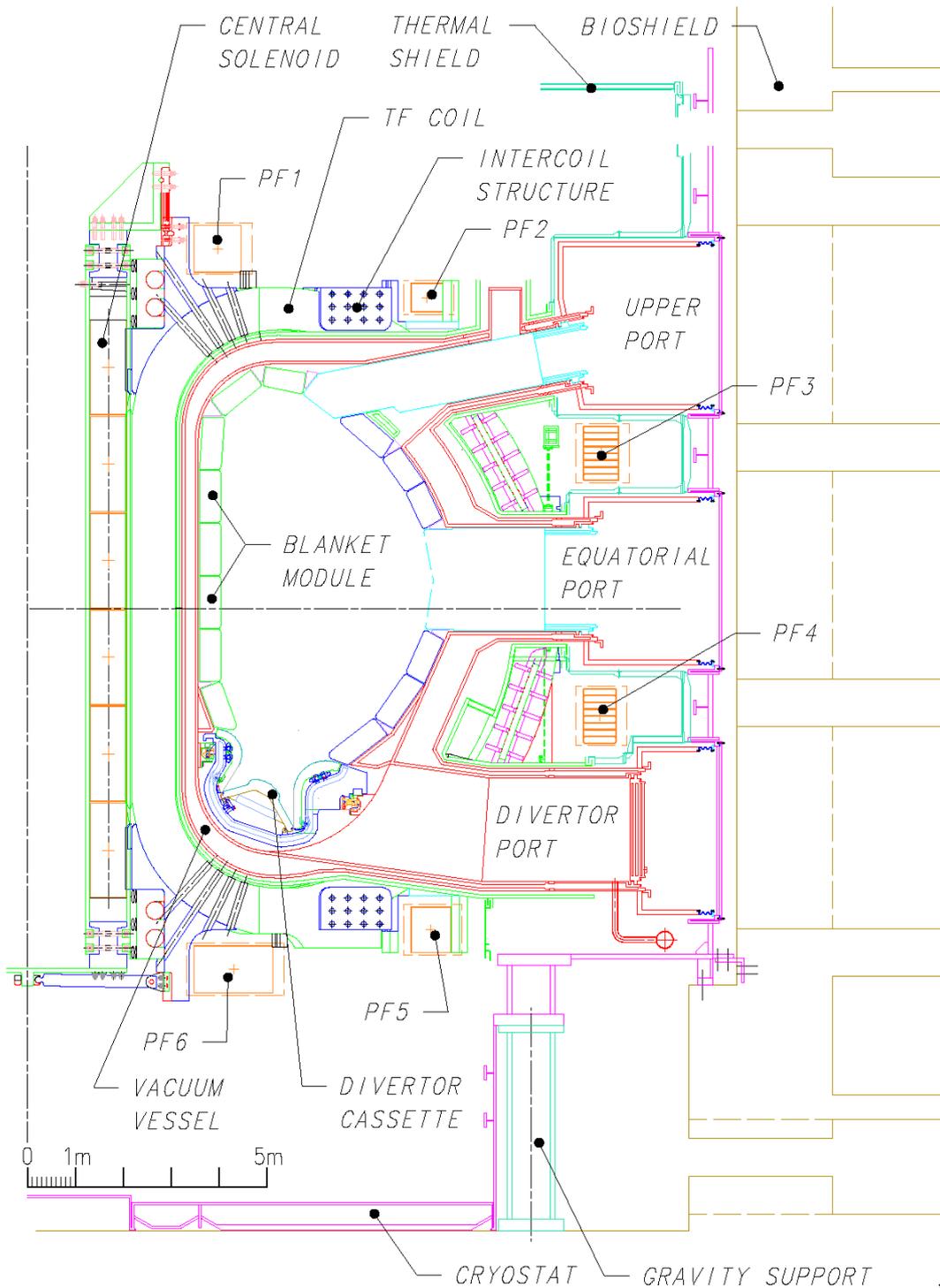
- Barrera López de Turiso, Eduardo, Arquitectura PXI Multiprocesadora para Adquisición y Procesado de Datos en Tiempo Real. Aplicación a Diagnósticos en Entornos de Fusión por Confinamiento Magnético, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2008

Cuadro 3.2. Principales parámetros técnicos del Tokamak ITER

3.5.1.2. Componentes del ITER ²¹

Se muestra a continuación un esquema con los componentes más importantes del ITER desde el punto de vista de la ingeniería y, posteriormente, se describen cada uno de ellos:

²¹ Fuente del subcapítulo: Summary of the ITER, Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director, G A0 FDR 4 01-07-21 R 0.4



6010122-0101-JOK

Fuente: Summary of the ITER, Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director, G AO
FDR 4 01-07-21 R 0.4

Figura 3.28. Componentes más importantes del ITER (los nombres de los componentes se dejan intencionalmente en su idioma original para no alterar su significado)

a) Bobinas superconductoras de campo toroidal

Las bobinas superconductoras de campo toroidal formarán y estabilizarán el campo magnético toroidal. Serán 18 bobinas de campo toroidal, cada una pesará aproximadamente 290 toneladas y medirá 14 metros de alto y 9 metros de ancho. El material superconductor compuesto de las bobinas lo formarán láminas radiales de Nb_3Sn envueltas en acero inoxidable. Su campo magnético máximo será de 11.8 teslas (T).

b) Solenoide superconductor central

El solenoide superconductor central inducirá la corriente eléctrica en el plasma del ITER. La bobina del solenoide pesará aproximadamente 840 toneladas y medirá 12 metros de alto y 4 metros de diámetro. La bobina estará hecha del material superconductor Nb_3Sn . La estructura estará segmentada en seis módulos independientes. El campo magnético máximo en el solenoide será de 13.5 T.

c) Bobinas superconductoras de campo poloidal

Las bobinas superconductoras de campo poloidal posicionarán y conformarán el plasma del ITER. Serán 6 bobinas de campo poloidal. Las bobinas estarán hechas de material superconductor NbTi metido en conductos cuadrados de acero inoxidable. El campo magnético máximo en las bobinas será de 6.0 T.

d) Cámara de vacío

La cámara de vacío proporcionará un límite de alto vacío para el plasma y será la primera línea de detención de las pérdidas radiactivas dentro del recipiente. Se encontrará dividida en 9 sectores.

Su estructura estará hecha de los aceros inoxidables SS 316 LN, SS 304 y SS 430, y tendrá un 2% de armazón de boro. Será una estructura soldada con una capa protectora de pared doble. La anchura media de la estructura estará entre los 0.3 y los 0.8 metros. Su temperatura normal de operación estará entre los 120 °C y los 200 °C.

e) Manto fértil

Las funciones del manto fértil serán principalmente tres: absorber la energía de los neutrones y de las partículas generadas por el plasma, proporcionar protección a la estructura de la cámara de vacío y a las bobinas superconductoras y contribuir a la estabilización pasiva del plasma. El manto fértil estará constituido por 421 módulos reemplazables.

Estos módulos se encontrarán unidos a la cámara de vacío. El manto fértil estará hecho de una combinación de una aleación de cobre (para difundir el calor al refrigerante), acero inoxidable (para la estructura) y berilio (como barrera para el plasma). El refrigerante utilizado será agua que operará a una temperatura entre los 100 °C y los 240 °C y a una presión entre los 3.0 megapascuales (MPa) y los 5.7 MPa.

f) Divertor

El divertor extraerá impurezas producidas por la interacción de las partículas del plasma con las paredes de la cámara de vacío, y partículas alfa que han donado ya su energía, producidas en las reacciones de fusión. El divertor se compondrá de 54 módulos reemplazables y estará situado en la parte inferior de la cámara de vacío.

El divertor estará compuesto por aleaciones de wolframio y de carbono (para las partes que estarán en contacto con el plasma), aleaciones de cobre (para difundir el calor al refrigerante) y acero inoxidable SS 316 LN (para la estructura). El refrigerante utilizado será agua que operará a una temperatura entre los 100 °C y los 240 °C y a una presión entre los 4.3 MPa y los 4.5 MPa.

g) Criostato

La función del criostato será mantener a los imanes aislados térmicamente y servir de segunda barrera de confinamiento después de la cámara de vacío. La estructura constará de una sección cilíndrica unida a los cabezales superiores e inferiores. Las dimensiones máximas del criostato serán: 28 metros de diámetro y 24 metros de longitud. La anchura de sus paredes será de 50 milímetros. Estará formado de acero inoxidable SS 304L.

h) Sistema de agua de refrigeración del Tokamak

El sistema de agua de refrigeración del Tokamak eliminará el calor depositado por los neutrones y por la radiación en los materiales que rodearán al plasma. El calor desprendido en el Tokamak durante la operación nominal de pulsado será de 750 MW a una presión de vapor entre los 3 MPa y los 4.2 MPa y a 120 °C.

i) Planta criogénica

La planta criogénica mantendrá las bobinas a temperaturas propicias para la superconductividad (alrededor de 4 K) y mantendrá las condiciones de criogenia en los escudos térmicos de la cámara de vacío y en el criostato.

La capacidad nominal de refrigeración de los escudos térmicos a 80 K será de 660 kW.

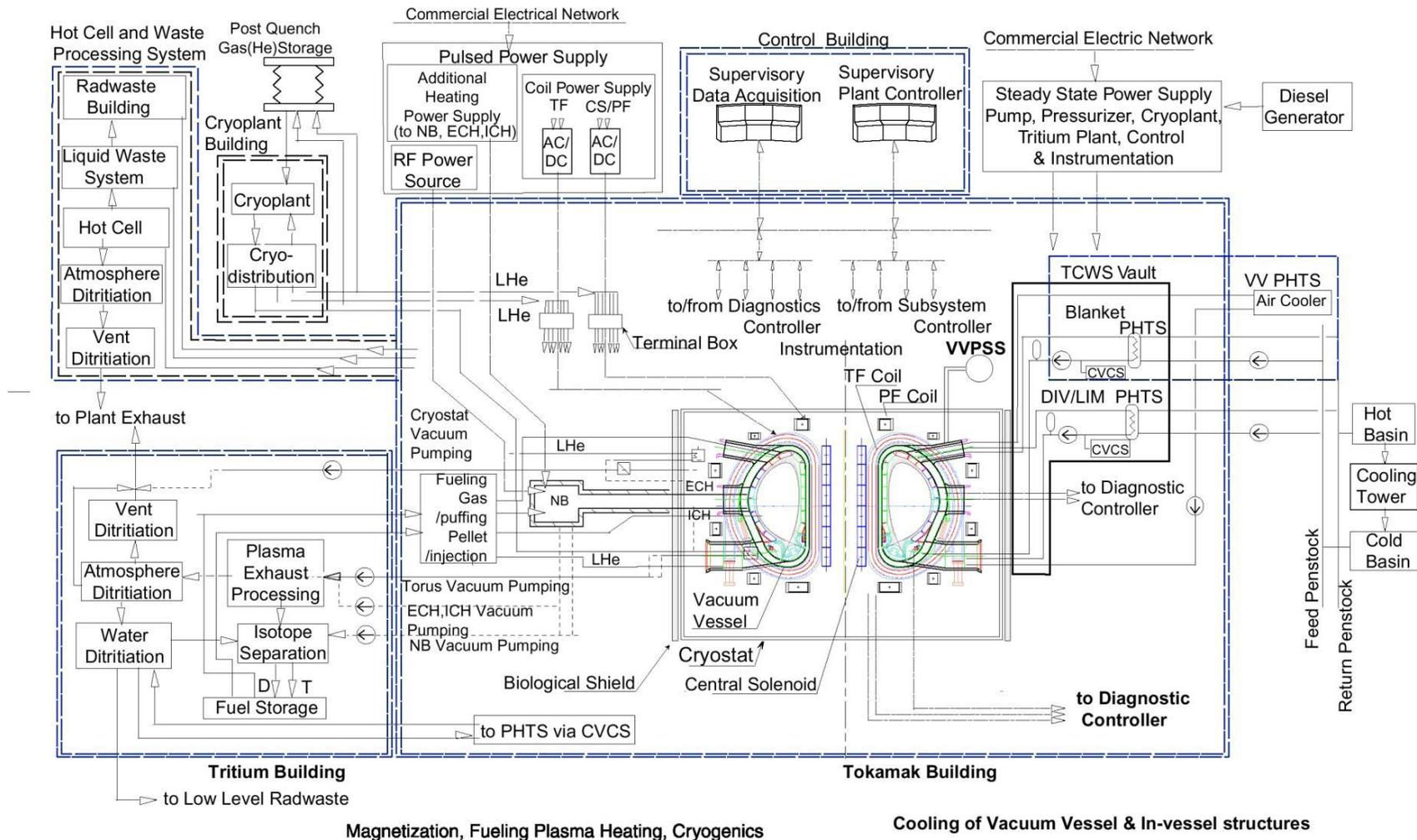
j) Sistemas de calentamiento adicional y de controlador de corriente

La función principal de los sistemas calentamiento adicional y de controlador de corriente será incrementar la temperatura del plasma mientras aumente la densidad para alcanzar la potencia de fusión requerida. Otra de sus funciones importantes será la de suprimir inestabilidades. La potencia total suministrada será inicialmente de 73 MW y podrá alcanzar los 110 MW como máximo. Los sistemas que podrán ser utilizados son, por ejemplo, un ciclotrón de electrones o un ciclotrón de iones que produzcan ondas de radiofrecuencia en sus bandas.

k) Suministro de energía eléctrica

La potencia total activa/reactiva pulsada por la red será de 500 MW. La potencia total activa/reactiva del estado estacionario será de 110 MW.

Se muestra a continuación un esquema del corte transversal de los edificios del reactor que fueron diseñados:



Fuente: Summary of the ITER, Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director, G A0 FDR 4 01-07-21 R 0.4

Figura 3.29. Configuración del reactor y edificios del ITER (los nombres de los componentes se dejan intencionalmente en su idioma original para no alterar su significado)

3.5.1.3. Ciclo de combustible en el ITER ²²

El Tritio utilizado en el ITER será suministrado por fuentes externas. Durante la operación con plasma a altas energías, cada 100 segundos se quemará alrededor de 0.1 g de Tritio con el fin de generar una potencia total de 500 MW. Se requerirá calcular continuamente el combustible a utilizar necesario, en función de las condiciones operativas del divertor.

Durante la operación, será necesario procesar los gases aspirados, eliminar las impurezas, separar el Tritio y almacenarlo para su reciclaje. Existirá un primer filtro de las impurezas separadas en la aspiración de escape.

Posteriormente, el flujo de impurezas se procesará antes de su escape y deberá tener un contenido de Tritio tan bajo como sea posible.

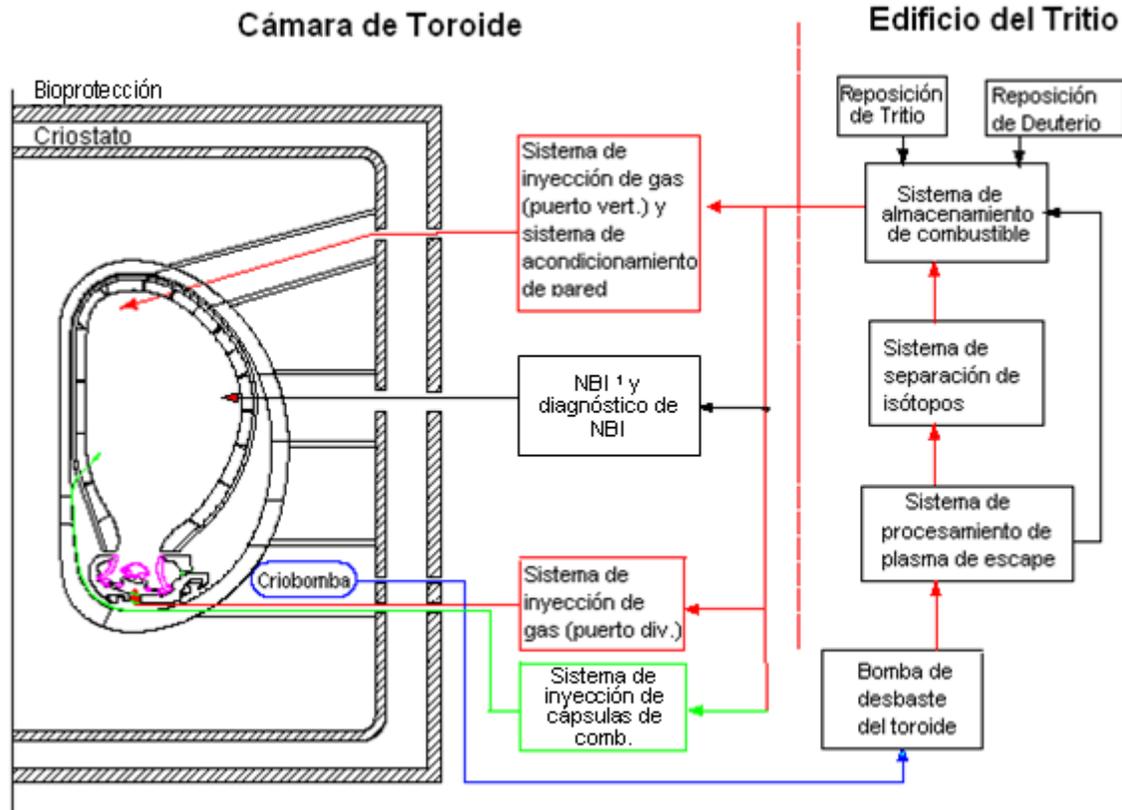
El flujo de hidrógeno se procesará para separar los diferentes isótopos por medio de un proceso de separación por destilación criogénica.

Esta parte del diseño del ITER ha sido optimizada para minimizar el contenido de Tritio en la medida de lo posible, para lograr la relación necesaria de separación de isótopos y para mejorar el rendimiento global.

Para pulsos nominales (< 450 s), el ciclo de combustible no operará en estado estacionario. En este caso, la corriente de salida de los isótopos de hidrógeno a partir de un permeador alimentará un contenedor intermedio, antes de ser procesada por el sistema de separación de isótopos. Para pulsos más largos, el ciclo de combustible podrá operar en estado estacionario usando una alimentación directa del flujo de salida del permeador.

Se muestra a continuación un esquema del ciclo de combustible del ITER:

²² Fuente del subcapítulo: Summary of the ITER, Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director, G A0 FDR 4 01-07-21 R 0.4



Nota 1: NBI: Neutral Beam Injection = Inyección de haces neutros

Fuente: Summary of the ITER, Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director, G A0 FDR 4 01-07-21 R 0.4

Figura 3.30. Diagrama de bloques del ciclo de combustible del ITER

Por razones de seguridad, el sistema de Tritio se diseñó en una estructura separada del Tokamak, con estructuras limitadoras entre ambos módulos y con barreras robustas de confinamiento.

El Deuterio y el Tritio se almacenarán en contenedores y la adsorción se hará en camas de ZrCo, las cuales podrán suministrar con la rapidez necesaria el caudal de combustible requerido por el reactor. El contenido de Tritio en éste, se medirá por calorimetría con alrededor del 1% de precisión.

La medición de la cantidad de Tritio en todo el ciclo de combustible será un aspecto importante, sobre todo porque una parte del que será inyectado en el plasma podrá permanecer en el recipiente atrapado junto con los residuos. Será importante saber la cantidad de Tritio a la que le sucede lo anterior ya que esto puede limitar el desempeño del Tokamak.

Adicionalmente, una pequeña cantidad de Tritio adsorbido en la superficie de la cámara de vacío, será progresivamente desadsorbido y recuperado parcialmente en forma de óxido por los sistemas detritadores instalados. El objetivo de esto será limitar el contenido de este combustible en la atmósfera dentro de la cámara de vacío durante el mantenimiento del Tokamak o en el aire dentro de los componentes del equipo durante su reparación. El agua tritiada resultante será procesada para reinyectar el Tritio obtenido de esto en el ciclo de combustible.

3.5.1.4. Operación del ITER

El periodo de operación previsto del ITER es de alrededor de 20 años, este periodo se dividirá en cuatro fases:

- **Fase de hidrógeno:** Esta fase permitirá la puesta en servicio del Tokamak en sistema no nuclear, misma que no depende de la operación remota pero que permite comprobar las principales propiedades del plasma como su configuración magnética, su equilibrio y sus condiciones de operación.
- **Fase de Deuterio con poco Tritio:** En esta fase se producirá Tritio a partir de reacciones D-D y este Tritio se usará en reacciones D-T por lo que se producirán neutrones. Aunque el nivel de potencia de fusión será bajo, la activación de la cámara de vacío no permitirá el acceso humano a su interior. Durante esta fase se probará el control de partículas, se probará la operación en estado estacionario con plena potencia de calentamiento y se confirmará el umbral de transición de modo L a modo H dado por las leyes de escala.
- **Fase de D-T de bajas prestaciones:** En esta fase, la potencia de fusión y la duración del pulso se incrementarán gradualmente hasta alcanzar la operación inductiva. Así mismo, se probará la operación no inductiva en estado estacionario. Cuando el flujo de neutrones sea significativo, se podrán probar los módulos del manto fértil.
- **Fase de D-T de altas prestaciones:** El objetivo de esta fase será mejorar el funcionamiento global del ITER, prestando mayor atención a los componentes y materiales sujetos a altos flujos de neutrones y a la mejora de los modos de operación de plasma. El desarrollo de esta fase dependerá en gran medida de los resultados obtenidos en las fases anteriores.²³

²³ Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001, 22 y 23 p.p.

3.5.1.5. Sistemas de seguridad del ITER ²⁴

La seguridad es una cuestión prioritaria en el ITER. Ésta considerará el proyecto, el staff, los trabajadores, la población local y el medio ambiente. Se han aplicado las regulaciones nucleares de Francia durante la fase de diseño del proyecto y se continuarán aplicando durante las etapas posteriores.

Las medidas de seguridad más importantes del ITER son las siguientes:

a) Proceso intrínsecamente seguro

En un dispositivo Tokamak, la cantidad de combustible que contiene en cualquier momento alcanza para ser quemado durante sólo unos pocos segundos. Es difícil alcanzar y mantener las condiciones precisas y necesarias para la fusión. Cualquier interrupción en estas condiciones causará que el plasma se enfríe en segundos y que la reacción se detenga; de modo similar a cuando se cierra la válvula de suministro de gas a un quemador y éste se apaga. El proceso de fusión es inherentemente seguro; no hay peligro de que la reacción se salga de control o de que se produzca una explosión.

b) Redundancia de capas protectoras

Los productos de las reacciones de fusión son helio, el cual es un gas inerte y no radiactivo, y neutrones. Cuando los neutrones de alta energía interactúen con las paredes de los componentes internos y con la cámara de vacío, sus materiales se activarán. Los materiales del interior de la cámara de vacío también serán contaminados con pequeñas cantidades de polvo radioactivo, principalmente de berilio, tungsteno y Tritio.

En el ITER, el aislamiento de estos materiales se basará en el principio de la muñeca rusa: los materiales con el contenido radiactivo más alto se localizarán en el centro y estarán rodeados por múltiples capas protectoras. El mantenimiento y la reparación de los elementos radiactivos de los componentes del Tokamak, se efectuará usando máquinas y herramientas controladas de manera remota para evitar la exposición de seres humanos a la radiactividad. Paredes de concreto de 2 metros de espesor rodearán completamente al Tokamak. A esta capa de protección se le conocerá como bioprotección.

c) Sistemas de remoción de calor

La remoción del calor durante la operación con plasma será hecha mediante los sistemas de enfriamiento de la primera pared. La mayor parte de la energía de los neutrones y de las otras radiaciones provenientes del plasma será extraída por estos componentes.

²⁴ Fuente del subcapítulo: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Tan pronto como el proceso de fusión se detenga, el calor a remover será sólo la energía residual en las estructuras y la proveniente de la activación de materiales que causan los neutrones de alta energía. No habrá calor inherente al combustible que necesitará ser removido.

El diseño de los dos sistemas de enfriamiento de la cámara de vacío es tal, que cualquiera de ellos removerá el calor mencionado y mantendrá bajas las temperaturas de los componentes situados en el interior de este recipiente.

d) Estructura resistente a sismos

El Tokamak ITER está diseñado para resistir sismos de alta energía. Por ello, muchos de sus componentes estructurales estarán hechos de concreto especialmente reforzado y descansarán sobre plataformas con rodamientos o pilares. Esta tecnología ha sido ya usada para proteger centrales eléctricas, y otros proyectos delicados, de sismos importantes, y para asegurar que su comportamiento en tales ocasiones, satisfaga los requerimientos de seguridad.

El lugar en donde se construye el ITER, Cadarache, Francia, se encuentra en un área clasificada como zona de actividad sísmica moderada; por ello, se contará con sensores sísmicos alrededor de este sitio para registrar la actividad sísmica, la cual, de acuerdo a la clasificación del área, deberá ser mínima.

e) Manejo de Tritio radiactivo

Se han incorporado en el diseño del ITER las más modernas y eficientes medidas de seguridad para el manejo del Tritio radiactivo, basadas en la experiencia obtenida en el Tokamak europeo JET y en otros laboratorios de investigación en fusión. Las técnicas para el manejo y para el almacenamiento del Tritio están muy desarrolladas. El ITER ha sido diseñado para proteger a los trabajadores de la liberación de Tritio radiactivo y de la exposición a la radiactividad.

f) Sistemas contra fuga de Tritio radiactivo

El confinamiento de Tritio dentro del ciclo de combustible es uno de los objetivos de seguridad más importantes en el ITER. Se ha diseñado un sistema de barreras para proteger a los seres humanos contra la propagación o la liberación del Tritio. La primera barrera de seguridad del confinamiento será por sí misma la cámara de vacío. Dentro de este contenedor doble de acero tendrán lugar las reacciones de fusión. Se les realizarán pruebas rigurosas contra fugas a todas las bombas, válvulas, tubos, e instrumentos relacionados con la cámara de vacío.

Rodeando el primer sistema de confinamiento estará la segunda barrera de seguridad. Ésta comprenderá todos los recipientes y sistemas que rodearán la cámara de vacío, incluyendo los edificios y sistemas de recuperación de gases y líquidos y los sistemas detritadores para la recuperación de Tritio. Estos últimos trabajarán eficientemente para mantener el reciclaje de los combustibles de fusión dentro de un sistema cerrado y para mantener cualquier liberación de combustible dentro de los límites aceptables.

g) Manejo de residuos radiactivos de vida media corta

Como se mencionó, durante el tiempo de vida operacional del ITER, se utilizarán máquinas y herramientas controladas de manera remota para la reparación y el mantenimiento de las partes radiactivas de la cámara de vacío. Todos los materiales de desecho serán tratados, empacados y almacenados en sitio.

La vida media de la mayoría de los radioisótopos que estarán contenidos en estos materiales de desecho será menor a 10 años. Las reacciones de fusión no producirán desechos de vida larga; dentro de 100 años, la radiactividad en los materiales mencionados disminuirá a un valor insignificante, de tal forma, que éstos podrán ser reciclados para su uso futuro en plantas de fusión. Este tiempo de 100 años, podría ser reducido en futuros dispositivos mediante el continuo desarrollo de materiales de baja activación, lo cual es, actualmente, un área importante de la investigación y del desarrollo en fusión.

h) Capacidad total de reciclado de Tritio y detritación

Las fuentes de riesgo específicas del ITER más importantes son el Tritio y el polvo producido por la interacción del plasma con la pared de la cámara de vacío.

El Tritio se encontrará principalmente en el sistema de combustible, incluyendo los equipos de abastecimiento, bombeo y procesamiento del mismo. Como resultado de la selección de carbono y berilio para los componentes de la cara interior de la cámara de vacío, se espera que se acumule una cantidad importante de Tritio en estos componentes.

También se espera que la cantidad de polvo se incremente durante la operación y será un objetivo experimental del ITER estudiar este proceso de acumulación. Como medida de seguridad, en el diseño se tomó en cuenta que unos pocos cientos de kilogramos de carbono, berilio y polvo de tungsteno podrán estar presentes en la cámara de vacío. Los sistemas de medición de la cantidad de polvo y los sistemas de remoción de polvo estarán disponibles antes de la fase de operación con Tritio.

La acumulación de Tritio en la primera pared y el incremento de polvo son retos en el desarrollo del ITER y deben resolverse antes de la construcción de futuras centrales de fusión.

Para prevenir cualquier liberación importante de Tritio, el ITER será el primer dispositivo con capacidad total de reciclado de Tritio y detritiación. Se espera que existan, en operación normal, liberaciones muy pequeñas de radiactividad, menores a 10 microsievverts (μSv)²⁵, que no dañen a los habitantes cercanos.

i) Sistema integral de administración de seguridad

En el ITER se tendrá un sistema de administración de seguridad integrado para gestionar todos los riesgos potenciales y cuidar que se cumpla con las regulaciones de seguridad industrial. Los riesgos potenciales estarán separados por departamentos y se tomarán las medidas de seguridad apropiadas.

Los riesgos no radiológicos considerados en el ITER incluyen fuego, exposición a campos magnéticos y electromagnéticos, exposición a fluidos criogénicos y químicos y altos voltajes. Para proteger a los trabajadores, el acceso al edificio del Tokamak estará estrictamente prohibido durante la operación.

j) Aplicación total de la regulación francesa en seguridad

El ITER será operado en Francia. Como se acordó en la JIA (*Joint ITER Agreement*), la organización ITER, como operador de una instalación nuclear en Francia, cumplirá con las regulaciones francesas. Las regulaciones aplican a la seguridad de componentes principales, equipos a presión, edificios, dispositivos para manejo de plasma y combustible y redes eléctricas. Gran parte de la documentación usada en el diseño y la operación del ITER proviene de las normas internacionales de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y de la Conferencia Internacional en Reconocimiento de Patrones (ICPR).

Estas regulaciones, junto con los requerimientos operativos, incluyendo los de seguridad, son la base del diseño del ITER. Generalmente, desde el punto de vista de la seguridad y de las licencias en Francia, cualquier código y norma internacional es aceptada para el diseño, fabricación y operación de sus componentes mecánicos.

Se deberán hacer evaluaciones del cumplimiento de las instalaciones con las previsiones de seguridad y con la regulación y, en caso de que las instalaciones cumplan con lo requerido, esto se deberá demostrar al regulador.

²⁵ Sv = Sievert, unidad derivada del SI que mide la dosis de radiación absorbida por la materia viva, corregida por los posibles efectos biológicos producidos. 1 Sv = 1 J/kg.

3.6. Proyección futura de la tecnología de fusión nuclear

El objetivo a largo plazo del programa europeo de fusión es la construcción de prototipos de reactores de fusión que desemboquen en la construcción de centrales comerciales que respondan a la demanda energética mundial. Por esto, posterior al ITER, este programa prevé el diseño y la construcción del reactor de demostración DEMO, el cual será un prototipo de reactor de fusión con el que se generará energía eléctrica y que deberá demostrar la viabilidad técnica y económica de una central de fusión nuclear ²⁶.

En la actualidad, se proyecta que el DEMO tenga una ganancia de energía Q de aproximadamente 25, que la energía de fusión generada sea de 2.5 GW y que la energía eléctrica generada sea de 1 gigawatt (GW) ²⁷.

Sin embargo, como ha podido verse, es necesario que la investigación en fusión transite antes por campos todavía inexplorados como la experimentación con plasmas en combustión y en ignición. Dado que este tipo de fenómenos no han sido aún alcanzados en la práctica y que la teoría rara vez ha sido capaz de predecir los fenómenos físicos relacionados con la fusión, será difícil predecir qué dificultades podrán surgir en la futura investigación de este tipo de energía hasta no realizar los experimentos concretos necesarios.

3.7. Principales ventajas y desventajas de la energía nuclear de fusión ²⁸

Se presentan a continuación las principales ventajas y desventajas de la energía nuclear de fusión, basadas todas ellas en lo analizado en este capítulo.

3.7.1. Principales ventajas de la energía nuclear de fusión

Las ventajas principales de la fuente de energía en cuestión son:

a) Abundancia de reservas de combustibles

El combustible principal de la fuente de energía analizada en este capítulo, el Deuterio, puede ser fácilmente extraído del agua ordinaria, la cual está disponible en todos los países del mundo. Las aguas superficiales de la Tierra contienen millones de toneladas de Deuterio. Tomando en cuenta el uso que se le pretende dar, las reservas del combustible resultan prácticamente inagotables.

²⁶ Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001, 23 p.

²⁷ Herrera Velázquez, Julio, Estado actual de la fusión nuclear controlada y sus perspectivas, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Departamento De Física de Plasmas e Interacción de la Radiación con la Materia, La transición energética y las energías alternas, 4 de mayo de 2011, 45 p.

²⁸ Fuente del subcapítulo: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

El Tritio requerido se produciría a partir del litio, el cual está disponible en depósitos en tierra y en el agua de mar, la cual contiene suficiente para muchas décadas de suministro. La disponibilidad a nivel mundial de estos combustibles eliminaría las tensiones internacionales causadas por el desbalance de la posesión de los combustibles requeridos por las tecnologías convencionales para la generación de energía.

b) Inexistencia de emisiones de CO₂ u otros gases de efecto invernadero

Debido a que la tecnología de fusión nuclear no utiliza combustibles fósiles, no se producirían productos de la combustión. No se emitirían las sustancias que provocan el efecto invernadero o la lluvia ácida.

c) Inexistencia de desechos nucleares radiactivos de vida media larga

No existiría formación de productos de fisión que ocasionen problemas de disposición y manejo. La radiactividad se produciría por los materiales activados por los neutrones de alta energía y por el Tritio sobrante, ya que este isótopo y los residuos contaminados con él, son radiactivos.

Sin embargo, se proyecta un diseño cuidadoso de los materiales para minimizar su activación y facilitar su manejo y disposición última.

d) Independencia de los costos con respecto al lugar de construcción y generación

Un aspecto importante de la energía de fusión en contraste con muchas otras fuentes de energía es que su costo de producción sería inelástico. El costo de la energía eólica, por ejemplo, varía dependiendo de la ubicación de los aerogeneradores. El costo de producción de la energía generada por un reactor de fusión, no variaría mucho en función del lugar donde se localice.

e) Minimización de residuos

El helio producido por las reacciones de fusión forma parte de un producto gaseoso que también contiene combustible sin quemar e impurezas. Este producto será extraído continuamente de la cámara de vacío para mantener el plasma de fusión "limpio" y a una cierta temperatura. En el ITER, un sistema sofisticado de procesamiento de este producto gaseoso separará sus diferentes componentes y recuperará los combustibles de fusión para reinyectarlos nuevamente al ciclo de combustible. Este "circuito cerrado" del ciclo de combustible minimizará los residuos.

f) Inexistencia de riesgo de accidente nuclear

La tecnología de fusión nuclear es un sistema intrínsecamente seguro ya que el reactor contiene en todo momento cantidades muy pequeñas de Deuterio y Tritio en la zona de reacciones de fusión, de tal forma que, la liberación sin control de una gran cantidad de energía, sería imposible. En caso de un mal funcionamiento, el plasma golpearía las paredes de la cámara de vacío y se enfriaría.

g) Máxima generación de energía por cantidad de combustible

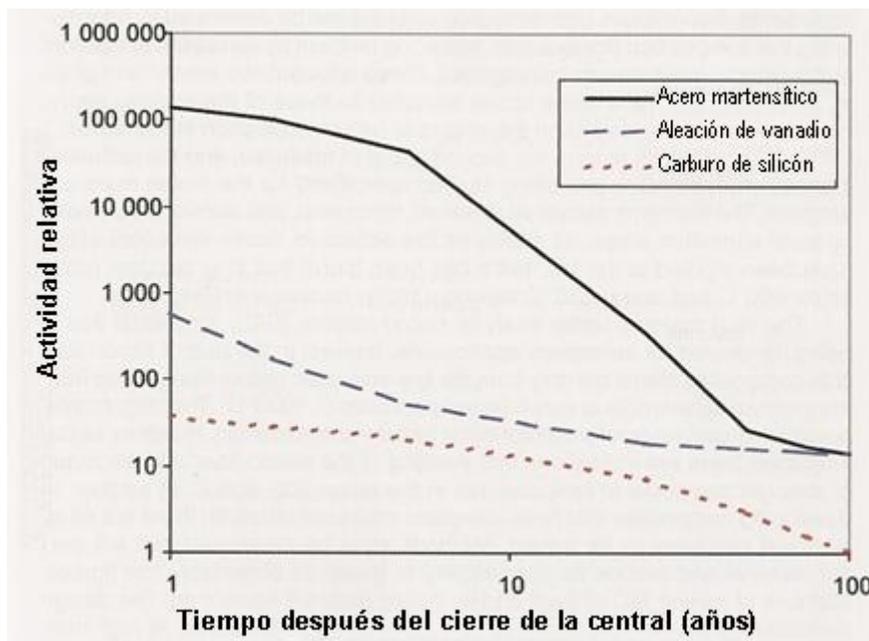
Las reacciones de fusión nuclear suministrarán mucha más energía, para un peso dado de combustible, que cualquier otra tecnología de las actualmente utilizadas. Esto sucederá así debido a que las reacciones de fusión nuclear son mucho más energéticas que la combustión química y, también, que las reacciones de fisión nuclear.

h) No radiactividad de las fuentes de los combustibles

Las materias primas necesarias para obtener los combustibles de la tecnología de fusión nuclear, es decir, el litio y el agua, no son radiactivas.

i) Rápida declinación radiactiva de residuos

Al final de su vida de útil, una planta de generación de fusión tendrá que ser enclaustrada solo por 100 años antes de poder ser completamente demolida. Adicionalmente, su radiactividad podrá ser reducida mediante una selección cuidadosa de los materiales que la constituyan. Esto se muestra en la figura 3.31.



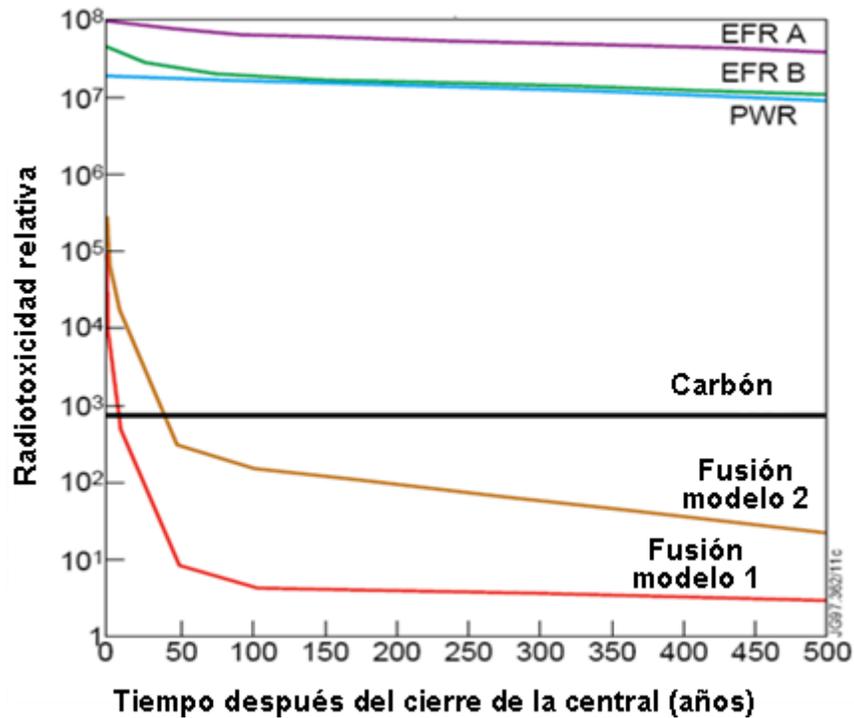
Fuente: McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004

Figura 3.31. Actividad relativa calculada de algunos materiales constituyentes de plantas de fusión, como una función del tiempo, partiendo del fin de su operación

j) Rápida declinación radiotóxica de los residuos

La declinación de la radiotoxicidad relativa (toxicidad potencial de un material radiactivo) de los desechos radiactivos de las centrales de fusión nuclear, será mucho más rápida en comparación con la de las centrales de fisión nuclear y de carbón.

Una comparación de la declinación de la radiotoxicidad relativa de una central de fusión que está al final de su vida, con datos comparables de centrales de fisión y de carbón, se muestra en la figura 3.32.



Fuente: Loarte, Alberto, Energía de Fusión La Energía del Siglo XXI o Cómo crear una Estrella en la Tierra, DG Research, Comisión Europea, EFDA – Close Support Unit – Garching, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Charla Fusión Nuclear – Abril 2000

Figura 3.32. Comparación de la declinación de la radiotoxicidad proveniente de los residuos de varias fuentes de energía

Desde luego, quemar carbón no produce nueva radiactividad; sin embargo, el carbón contiene trazas de uranio, las cuales son liberadas al ambiente cuando el primero es quemado.

3.7.2. Principales desventajas de la energía nuclear de fusión

a) Tecnología no disponible a corto y mediano plazo

Hoy por hoy, no es viable generar electricidad mediante la energía nuclear de fusión. Los reactores de fusión se encuentran actualmente en su fase de experimentación. No habrá posibilidades de construir centrales nucleares de fusión hasta, por lo menos, mediados del presente siglo.

b) El costo de la energía eléctrica generada por las centrales de fusión será inicialmente demasiado alto

Actualmente se proyecta que, durante las etapas iniciales, el costo de la energía eléctrica generada mediante esta tecnología sea demasiado alto en comparación con la generada mediante las tecnologías de generación disponibles en el presente.

3.8. Conclusiones del Capítulo 3

Ante los retos que enfrentarán nuestro país y el mundo en las próximas décadas para cubrir sus necesidades energéticas, entre ellos la declinación de las reservas de los combustibles fósiles, el progresivo aumento de sus precios y el calentamiento global originado por la emisión de GEI, la energía originada por las reacciones de fusión nuclear se presenta como una opción atractiva si se concretan los esfuerzos por dominarla y aprovecharla.

Desde hace casi setenta años, muchos países en el mundo han dedicado una gran cantidad de recursos económicos, técnicos y humanos para investigar a fondo, en una gran cantidad de experimentos, sus fundamentos físicos y los principios técnicos propuestos para controlarla. Sin embargo, en la actualidad, aún falta un largo camino de investigación técnica en muchos campos, por ejemplo en el de los plasmas en combustión y en ignición, para hacerla viable técnica y económicamente.

No obstante, en muchos círculos académicos y técnicos, se piensa que en algún momento del siglo XXI, realmente se podrá contar con plantas de generación de fusión nuclear alrededor del mundo.

Como se analizó en este capítulo, el desarrollo de esta fuente de energía continúa en el presente de manera vigorosa en muchos países del mundo. La mayor parte de ellos son las grandes potencias que han marcado a nivel mundial el desarrollo técnico, político, económico y social en los últimos cien años.

Sin embargo, como se analizó en el Capítulo 1, el crecimiento de las necesidades energéticas será mucho más importante en los países en vías de desarrollo que en las naciones desarrolladas. Siendo México parte de los primeros, sus gobernantes tienen la obligación de explorar cuanto antes las fuentes de energía que sustituirán a los combustibles fósiles una vez que sus reservas se hayan agotado o que sus precios hayan dejado de ser competitivos. Las reacciones nucleares de fusión, evidentemente, tienen importantes posibilidades de ser una de estas fuentes de energía.

Capítulo 4. La energía nuclear de fusión como una opción viable para México

4. La energía nuclear de fusión como una opción viable para México

Como se analizó en el Capítulo 2, las necesidades energéticas de México se encuentran relativamente solventadas para un número importante de décadas en el futuro, al proyectarse, por un lado, el aprovechamiento de las fuentes de energía convencionales, principalmente de combustibles fósiles, y, por otro, la incorporación al sistema eléctrico nacional de gran cantidad de infraestructura de generación de las llamadas fuentes renovables de energía.

Puede afirmarse que durante gran parte del presente siglo, la falta de energía no será un problema grave en nuestro país, siendo la principal dificultad en este aspecto, la distribución y selección de estas tecnologías para tiempos y lugares específicos.

Sin embargo, como también se analizó en el Capítulo 2, existen factores externos e internos que hacen imposible cubrir mediante fuentes de energía convencionales y renovables, la demanda proyectada de energía en nuestro país en el largo plazo, es decir, hacia finales del presente siglo y durante los siguientes.

En el Capítulo 2 pudo apreciarse que los factores concretos que hacen inviable cubrir la demanda de energía en México, más allá de algunas décadas, por medio de combustibles fósiles o energías renovables, son los siguientes:

1. La enorme cantidad de capacidad de generación eléctrica que, de acuerdo a lo proyectado, se requerirá en el año 2100, igual a más de 20 veces la capacidad de generación eléctrica instalada en el año 2010.
2. El agotamiento, lento pero inevitable, de las reservas de combustibles fósiles en México y en el mundo; combustibles que fueron aprovechados por el 73.9% de la infraestructura nacional de generación en el año 2010.
3. El aumento, también inevitable, del precio de los combustibles fósiles, derivado de su agotamiento.
4. La imposibilidad de las fuentes de energía renovables para cubrir el grueso de la carga base requerida en cualquier país o región para asegurar su suministro de energía, debido a su intermitencia y a su incapacidad de almacenaje.
5. La necesidad mundial de disminuir y no aumentar la emisión de gases de efecto invernadero, principalmente de CO₂, producto de los procesos de combustión, para prevenir los daños producidos por el calentamiento global.

Por todo lo anterior, es evidente que, si las autoridades de nuestro país proyectan que éste crezca económicamente, por lo menos al ritmo de los países en vías de desarrollo más importantes, es realista esperar a finales de siglo una demanda de energía por lo menos de un orden de magnitud más grande que la actual.

Es también claro que las fuentes de energía que cubrirán esta demanda, no podrán distribuirse como hasta ahora lo han hecho sino que, un porcentaje muy importante de ellas, deberá cumplir, por lo menos, con algunas características específicas innegociables.

4.1. Características necesarias en las fuentes de energía en el largo plazo

Por lo analizado en el Capítulo 2 y en éste, puede decirse que es muy probable que una parte del total de las fuentes de energía que cubran las necesidades energéticas nacionales hacia finales de este siglo y principios del siguiente, sean los combustibles fósiles y las energías renovables. Sin embargo, otra parte muy importante del total de capacidad de generación requerida deberá, necesariamente, cumplir con las siguientes cinco características:

- 1) Capacidad de generación a gran escala, con unidades generadoras por arriba de los 500 MW para cubrir las necesidades energéticas regionales a costos competitivos.
- 2) Capacidad de asegurar y planear la generación futura, mediante el uso de combustibles almacenables, garantizando factores de planta por arriba del 90% para la carga base en los sistemas eléctricos.
- 3) Fuente de energía diferente de los combustibles de origen fósil (combustóleo, coque, gas natural, carbón, etc.).
- 4) Cero emisiones de gases de efecto invernadero en su fuente de energía principal.
- 5) Las reservas de su fuente de energía o de su combustible deben estar aseguradas por lo menos para los siguientes 200 años.

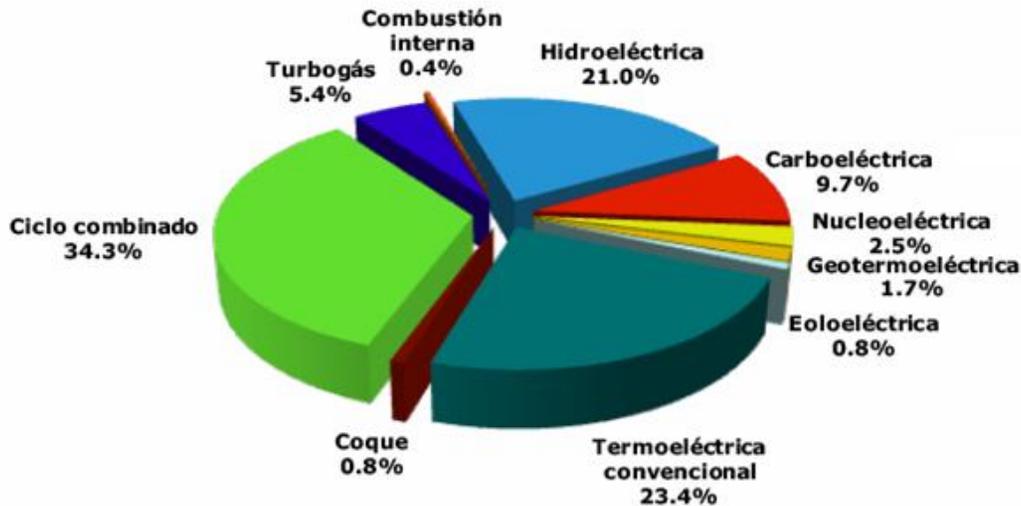
Por lo anterior, en el siguiente subcapítulo se buscará determinar cuáles fuentes de energía conocidas cumplen con las características indicadas.

4.2. Fuentes de energía que cumplen con las características necesarias

Como referencia, se analizará la gama de fuentes de energía que, como se analizó en el Capítulo 2, cubren las necesidades energéticas nacionales en la actualidad.

La gráfica siguiente, muestra la distribución por tecnología, de la capacidad de generación instalada en nuestro país en el año 2010:

2010_{real}
55,116 MW



Fuente: POISE 2012-2026, Subdirección de Programación, CFE

Figura 4.1. Participación de la capacidad de generación 2010, Sistema eléctrico

Analizando cada tecnología se puede decir que:

- La térmica convencional, que representa el 23.4% de la capacidad de generación, cuenta con alta capacidad de generación y alta disponibilidad; sin embargo, tiene como fuente de energía el combustóleo o el gas natural, por lo que no cumple con las características 3), 4) y 5).
- La energía generada a partir del coque de petróleo, que representa en la actualidad el 0.8% de la capacidad de generación, cuenta también con alta capacidad de generación y alta disponibilidad; sin embargo, este combustible se extrae del petróleo, por lo que no cumple con las características 3), 4) y 5).
- La tecnología de ciclo combinado, que representa el 34.3% de la capacidad de generación, tiene alta eficiencia y disponibilidad; sin embargo, usa gas natural como combustible, por lo que no cumple con las características 3), 4) y 5).
- La turbo gas, que representa el 5.4% de la capacidad de generación, cuenta con alta capacidad de generación y alta disponibilidad; sin embargo, usa gas natural como combustible, por lo que no cumple con las características 3), 4) y 5).

- La tecnología de combustión interna, que representa el 0.4% de la capacidad de generación, tiene alta eficiencia y disponibilidad; sin embargo, usa combustóleo y diesel como combustible, por lo que no cumple con las características 3), 4) y 5).
- La hidráulica, que representa el 21.0% de la capacidad de generación, no usa combustibles fósiles y no genera gases de efecto invernadero; sin embargo, como se analizó en el Capítulo 2, el aprovechamiento de su fuente de energía, actualmente en una etapa muy madura, sólo puede crecer de manera muy marginal en las siguientes décadas y, por lo tanto, no puede cubrir los requerimientos energéticos proyectados a largo plazo de forma mayoritaria. Por ello, no tiene la característica no. 5).
- La carboeléctrica, que representa el 9.7% de la capacidad de generación, usa carbón combustible y sus reservas están relativamente aseguradas a escala internacional para un plazo mayor de 200 años; sin embargo, al ser un combustible fósil, su combustión emite una gran cantidad de CO₂ por lo que no cumple con la característica no. 4).
- La tecnología nucleoelectrica, que representa el 2.5% de la capacidad de generación nacional en la actualidad, no usa combustibles fósiles como fuente de energía y por lo tanto, su proceso primario no emite gases de efecto invernadero. Así mismo, es posible diseñar unidades generadoras con capacidades por arriba de los 1,000 MW, y su disponibilidad y factor de planta puede ser calculado y asegurado, ya que, tanto en la energía nuclear de fisión como en la de fusión, su combustible puede almacenarse.

Adicionalmente, las reservas de combustible de la energía nuclear de fisión y de la de fusión están aseguradas en el largo plazo, esto se analizará con más detenimiento en el siguiente subcapítulo. Por lo anterior, puede verse que la tecnología nucleoelectrica cumple con las características requeridas para cubrir las necesidades energéticas nacionales en el largo plazo.

- La geotermoeléctrica, que representa el 1.7% de la capacidad de generación, no usa combustibles fósiles y no genera gases de efecto invernadero; sin embargo, como se analizó en el Capítulo 2, el aprovechamiento de su fuente de energía, actualmente en una etapa muy madura, sólo puede crecer de manera muy marginal en las siguientes décadas y no puede cubrir los requerimientos energéticos proyectados a largo plazo de forma mayoritaria. Por ello, no tiene la característica no. 5).

- La tecnología de generación eoloelectrica, que representa el 0.8% de la capacidad de generación, no usa combustibles fósiles y no genera gases de efecto invernadero, adicionalmente, su fuente de energía, el viento, está asegurado en el largo plazo. Sin embargo, al tener como fuente de energía un recurso intermitente, no es posible planificar su despacho de manera segura y sus factores de planta son bajos. Por estas causas, los sistemas eléctricos que usan extensivamente esta tecnología, deben estar ampliamente respaldados con fuentes de generación base como las que usan combustibles fósiles.

Adicionalmente, la baja densidad de capacidad de generación, por área de terreno de los campos eólicos, en la actualidad hace ambientalmente inviable la construcción de centrales eoloelectricas de mayor capacidad que unos cuantos cientos de megawatts. Por lo anterior, esta tecnología no cumple con las características 1) y 2).

Como se desprende de este análisis, las únicas tecnologías de generación que cumplen con todas las características que deberán tener las que deberán cubrir de manera mayoritaria las necesidades energéticas nacionales en el largo plazo, indicadas en el Subcapítulo 4.1, son las que usan como fuente de energía la fisión y la fusión nuclear.

En el siguiente subcapítulo se hará un análisis comparativo de ambas fuentes de energía.

4.3. La energía nuclear como opción para cubrir las necesidades energéticas nacionales

4.3.1. Las ventajas de la energía de fisión nuclear en su aplicación futura en México

Desde que en 1932 Albert Einstein afirmara que sería imposible obtener energía de origen nuclear y fuera desmentido diez años después por Enrico Fermi y Leo Szilard que construyeron el primer reactor experimental ¹, la energía nuclear de fisión se desarrolló ampliamente en sus aspectos técnicos y científicos en todo el mundo, y se ha convertido en una fuente de energía muy importante, y en una industria que genera millones de dólares en todo el mundo.

En la actualidad hay 429 reactores nucleares en operación en el mundo. Entre las naciones con más reactores nucleares están: Estados Unidos con 104 y Francia con 59. “En la Unión Europea el 38% de la energía eléctrica producida es nuclear (el 79% en Francia, el 55% en Bélgica, el 47% en Suecia, 31% en Alemania, el 19% en España, etc.)”. ²

¹ Velarde, Guillermo, LA ENERGÍA NUCLEAR, SEGURA, LIMPIA Y BARATA PARA CUMPLIR CON KYOTO, papeles FAES, fundación para el análisis y los estudios sociales, No 40, 05/03/2007, 1p.

² Velarde, Guillermo, LA ENERGÍA NUCLEAR, SEGURA, LIMPIA Y BARATA PARA CUMPLIR CON KYOTO, papeles FAES, fundación para el análisis y los estudios sociales, No 40, 05/03/2007, 2p.

La energía nuclear proveniente de la fisión del átomo ha demostrado tener múltiples ventajas en el tiempo que ha sido una de las principales fuentes de generación de energía en una gran cantidad de países desarrollados.

Con respecto al tema del presente trabajo, ha demostrado ampliamente cumplir con la característica no. 1) del Subcapítulo 4.1, al ser una fuente de energía explotable a gran escala. Como ejemplo, el promedio de capacidad de las 44 unidades generadoras en construcción en el año 2008 fue de 864 MW. ³

Así mismo, este tipo de energía, cuenta con la gran ventaja de "...garantizar el suministro de energía eléctrica. Otras fuentes energéticas como la eólica o la solar carecen de seguridad de suministro al estar expuestas a las condiciones meteorológicas..." ⁴, cumpliendo, por lo tanto con la característica no. 2) del Subcapítulo 4.1.

Adicionalmente, la energía nuclear, al tener como fuente de energía, la liberada en las reacciones que ocurren en el núcleo del átomo, y no las reacciones químicas de la combustión, no utiliza combustibles de origen fósil, que, como se vio en el Capítulo 2, se agotan de manera acelerada, y, por lo tanto, no emite CO₂ que es el gas de efecto invernadero más emitido a la atmósfera en el mundo. Por todo ello cumple con las características no. 3) y 4) del Subcapítulo 4.1.

Finalmente, el artículo "Energía para los futuros siglos, ¿puede la fusión ser una fuente de energía inagotable, segura y limpia?" publicado por el investigador Belga J. Ongena de la asociación Comunidad Europea de la Energía Atómica (EURATOM), señala que las reservas de Uranio, el combustible más usado en las centrales de fisión nuclear, están aseguradas para de 2,400 a 3,000 años, siempre y cuando se emplee la tecnología de reactores de cría de combustible, ⁵ cumpliendo así con la característica no. 5) del Subcapítulo 4.1.

Considerando lo expuesto, puede concluirse de manera realista que la energía de fisión nuclear sería capaz de cubrir una parte importante de la requerida en el mediano y largo plazo.

³ Universidad Politécnica de Madrid, Futuro de la energía nuclear, Industriales ETSII, UPM, 2008, 5p.

⁴ Velarde, Guillermo, LA ENERGÍA NUCLEAR, SEGURA, LIMPIA Y BARATA PARA CUMPLIR CON KYOTO, papeles FAES, fundación para el análisis y los estudios sociales, No 40, 05/03/2007, 3p.

⁵ Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association "EURATOM - Belgian State", 2p.

El inconveniente más importante que tiene la energía de fisión nuclear es la producción, ligada a su proceso, de residuos nucleares de vida media larga. Por ello, se han desarrollado, y actualmente se investigan, estrategias para gestionarlos, manejarlos y confinarlos eficientemente para que esta fuente de energía pueda contarse entre aquellas que cubrirán el grueso de los requerimientos energéticos, nacionales y mundiales, en el largo plazo.

4.3.1.1. El reto de los residuos radiactivos nucleares

Tal y como indica el documento español: “Origen y gestión de residuos radiactivos” del Ilustre Colegio Oficial de Físicos: “Se considera residuo radiactivo a cualquier material o producto de desecho, para el cual no está previsto ningún uso, que contiene o está contaminado con radionucleidos en concentraciones o niveles de actividad superiores a los establecidos por el Ministerio de Industria y Energía, previo informe favorable del Consejo de Seguridad Nuclear.”⁶

Por la naturaleza de su fuente energía, la tecnología de fisión nuclear genera cantidades importantes de residuos radiactivos en todas las etapas por las que pasa el combustible nuclear: su extracción, su transformación, su uso en los reactores nucleares para la producción de energía y la gestión del que está gastado.⁷

Los residuos radiactivos originados en la generación de energía eléctrica por tecnología de fisión nuclear incluyen:

- a) Los residuos de la primera fase del ciclo de combustible, que comprenden los residuos generados en las etapas de minería del uranio, fabricación de concentrados, conversión a hexafluoruro de uranio, enriquecimiento del uranio y fabricación de los elementos combustibles.
- b) Los residuos generados en el funcionamiento de las centrales nucleares, que tienen su origen en el proceso de fisión del combustible que tiene lugar en el reactor. En este proceso se originan productos de fisión que contienen isótopos radiactivos de diferentes elementos y neutrones libres.
- c) El combustible nuclear gastado que, una vez que ha cubierto su etapa de producción de energía en el reactor, es almacenado en piscinas de la misma central nuclear, para evacuar el calor residual que produce.⁸

⁶ Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3º Ed., julio 2000, 89p.

⁷ Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3º Ed., julio 2000, 91 - 92 p.p.

⁸ Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3º Ed., julio 2000, 92 - 94p.p.

La clasificación de los residuos radiactivos más aceptada internacionalmente es la propuesta por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) que divide a los residuos en distintas categorías:

- a) Residuos de baja y media actividad, que tienen una actividad específica por elemento radiactivo baja, no generan calor y contienen radionucleidos emisores beta-gamma con períodos de semi-desintegración inferiores a 30 años, lo que quiere decir que reducen su actividad a menos de la milésima parte en un período máximo de 300 años.
- b) Residuos de alta actividad, que pueden desprender calor y tienen un período de semi-desintegración superior a 30 años, llegando algunos a alcanzar decenas de miles de años.⁹

Normalmente, una central nucleoelectrónica grande de 1,000 MW de capacidad produce anualmente alrededor de 27 toneladas de residuos radiactivos de alta actividad, 310 toneladas de residuos de media actividad y 460 toneladas de residuos de baja actividad.¹⁰ En el año 2007 había en el mundo aproximadamente 300,000 toneladas de residuos radiactivos de alta actividad almacenados.¹¹

La dificultad para eliminar por medios convencionales de transformación química, los residuos radiactivos originados por la generación de energía de origen nuclear, y la gran cantidad de radiación que generan, provocan que una de las pocas soluciones aceptadas consista en aislar estos residuos para que, durante su periodo de actividad, que puede ser de varios miles de años, no puedan llegar al ser humano mediante las cadenas tróficas de alimentación.

Los métodos más relevantes que se han considerado para solucionar el problema de los residuos radiactivos de alta actividad son los siguientes:

- a) Lanzamiento al espacio exterior mediante cohetes espaciales que los alejarían de la atmósfera terrestre.
- b) Evacuación en el subsuelo marino, donde se realizarían sondeos profundos para enterrar los contenedores de residuos.
- c) Evacuación en los hielos polares, anclándolos mediante cables o hundiéndolos en la corteza terrestre mediante fusión con el hielo.

⁹ Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3° Ed., julio 2000, 91p.

¹⁰ Rao, K.R., Radioactive waste: The problem and its management, General Article, India, 6p.

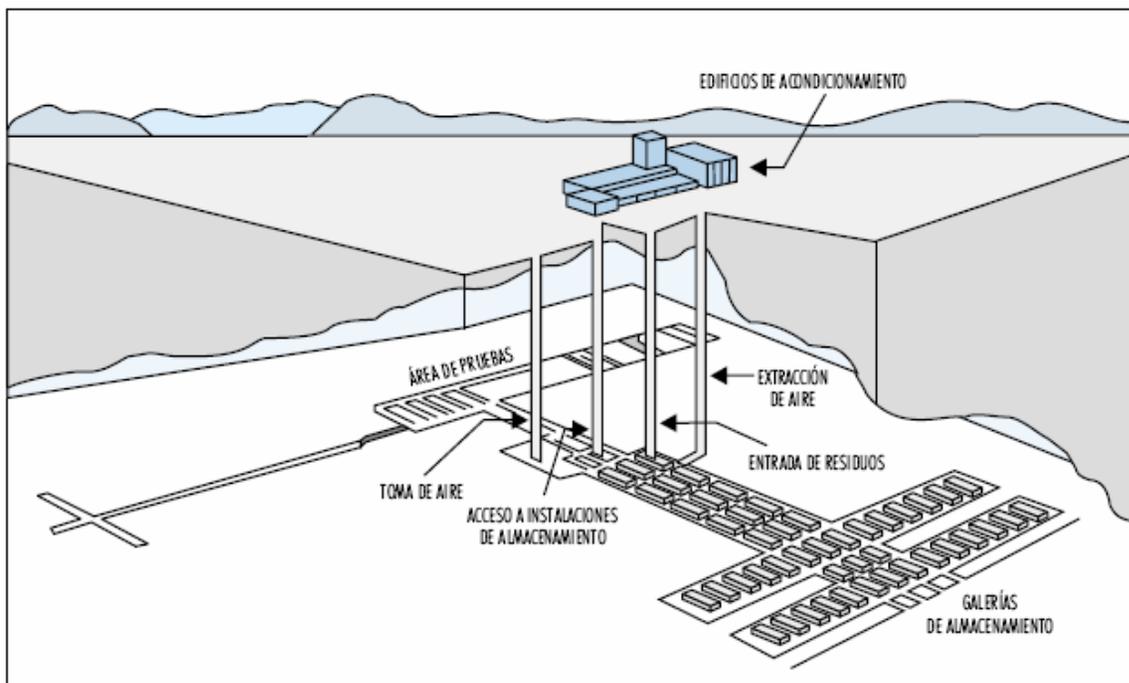
¹¹ Velarde, Guillermo, LA ENERGÍA NUCLEAR, SEGURA, LIMPIA Y BARATA PARA CUMPLIR CON KYOTO, papeles FAES, fundación para el análisis y los estudios sociales, No 40, 05/03/2007, 6p.

- d) Almacenamiento en formaciones geológicas de gran estabilidad a profundidades de varios centenares de metros.
- e) Transformación por transmutación, alterando el balance de partículas subatómicas, de modo que se lograra la conversión de los radionucleidos en elementos estables.

Las primeras cuatro alternativas tienen dificultades importantes de índole científica, técnica, económica, jurídica, ética y de seguridad; por ejemplo, el uso riesgoso de patrimonios comunes como los océanos o los casquetes polares.

En la actualidad existe un amplio consenso en que las opciones de almacenamiento subterráneo en formaciones geológicas, son las alternativas más razonables y válidas y, por lo tanto, hacia ellas apuntan los países avanzados.¹²

En la figura siguiente se muestra el esquema de una planta piloto de almacenamiento de residuos radiactivos de Estados Unidos:



Fuente: Dr. Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3° Ed., julio 2000

Figura 4.2. Esquema de una planta piloto de aislamiento de residuos radiactivos en los Estados Unidos de América

¹² Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3° Ed., julio 2000, 106-107p.p.

El almacenamiento subterráneo en formaciones geológicas de residuos radiactivos es visto en el presente como una solución de mediano y largo plazo, ambientalmente sustentable, para el reto de la producción de estos residuos de la energía nuclear de fisión.

Sin embargo, las consecuencias a muy largo plazo de esta solución no han sido del todo determinadas por lo que las estrategias para gestionar, manejar y confinar estos residuos deben seguir desarrollándose e investigándose a nivel mundial en los siguientes años.

4.3.2. Las ventajas de la energía de fusión nuclear en su aplicación futura en México

Como se analizó en el Capítulo 3, la energía nuclear de fusión tiene muchas características que la han posicionado como una opción muy atractiva para solventar las necesidades mundiales de energía en el largo plazo. Tan es así que actualmente muchas grandes economías invierten cientos de millones de dólares para hacerla técnica, ambiental y económicamente viable.

Estas mismas características pueden hacer de la tecnología de fusión nuclear una opción atractiva y viable también para nuestro país. Si esta tecnología es capaz de cumplir con los requerimientos necesarios que se han definido para las tecnologías de generación de las próximas décadas, México deberá darle desde hoy una gran importancia en sus planes futuros de planeación, investigación e inversión.

Por ello, a continuación se analizará si la tecnología de fusión nuclear es capaz de cumplir con cada una de las cinco características necesarias, definidas en el Subcapítulo 4.1:

En primer lugar, se puede advertir que esta fuente de energía cumple con la característica no. 1), ya que se ha proyectado que las plantas de energía nuclear de fusión generen energía eléctrica mediante un ciclo Rankine de vapor convencional, por lo que serían capaces de generar electricidad a gran escala. Como ejemplo, Chris Llewellyn Smith, Director del *United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) Culham*, de la *EURATOM/ UKAEA Fusion Association Chairman Consultative Committee for Euratom on Fusion*, indica en su ponencia “La vía rápida hacia la energía de fusión”, que las unidades de generación de fusión nuclear serían de alrededor de 1,500 MW de capacidad ¹³.

Por el motivo anterior, y por ser un combustible almacenable, su fuente de energía, las plantas de fusión nuclear podrán operar de manera continua, manteniendo factores grandes de disponibilidad, y pudiendo planear su generación durante su vida útil, siendo claro, por tanto, que cumplen con la característica no. 2).

¹³ Smith, Chris Llewellyn, *The Fast Track to Fusion Power*, EURATOM/UKAEA Fusion Association Chairman Consultative Committee for Euratom on Fusion, UKAEA, Vilamoura 1 November 2004, 15p.

Así mismo, es evidente que, como se analizó en el Capítulo 3, al ser su fuente de energía, la liberada en reacciones nucleares de fusión de núcleos atómicos ligeros, esta tecnología de generación no consumiría combustibles fósiles y, por lo tanto, no generaría gases de efecto invernadero en su proceso primario, cumpliendo con ello con las características 3) y 4).

Finalmente, como lo señala J. Ongena en su artículo, las reservas de litio (Li), del que se obtiene el Tritio (T), y de Deuterio (D), combustibles estos últimos que hasta la fecha han demostrado ser los más convenientes para operar las centrales de energía de fusión, se han calculado suficientes para generar energía durante varios miles de años con la tecnología en cuestión. Por ello, cumple con la característica no. 5) del Subcapítulo 4.1 ¹⁴.

Lo anterior puede verse en el siguiente cuadro que muestra la duración proyectada de las reservas calculadas de Deuterio y litio:

Combustible de fusión	Energía contenida en las reservas [TW*-año]	Tiempo calculado de duración de las reservas [años]
D	5×10^{11}	150 000 000 000
Li (reservas conocidas)	9×10^3	3000
Li (reservas calculadas en agua de mar)	1.7×10^8	60 000 000

* TW = Terawatts

Fuente: Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association "EURATOM - Belgian State"

Cuadro 4.1. Reservas estimadas de combustibles de fusión nuclear

En materia de combustibles, también es relevante indicar que se proyecta que la tecnología de fusión nuclear, durante la operación normal, utilice una cantidad varios órdenes de magnitud menor de combustible, no sólo con respecto a las tecnologías de generación por combustibles fósiles, sino también con respecto a la energía de fisión nuclear utilizada en la actualidad. ¹⁵ Esto puede apreciarse en el siguiente cuadro:

¹⁴ Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association "EURATOM - Belgian State", 6p.

¹⁵ Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association "EURATOM - Belgian State", 4p.

Combustible	Consumo anual de combustible para una planta de 1000 MW [ton]
Carbón	2,700,000
Combustóleo	1,900,000
Fisión (UO ₂) (Uranio enriquecido)	28
Fusión	0.1 D y 0.15 T

Fuente: Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association "EURATOM - Belgian State"

Cuadro 4.2. Consumo de combustible para diferentes fuentes de energía

Adicionalmente, a diferencia de la energía nuclear de fisión, la energía nuclear de fusión no presenta el problema de la gestión de residuos radiactivos de vida media larga, ya que esta última no genera ese tipo de residuos radiactivos.

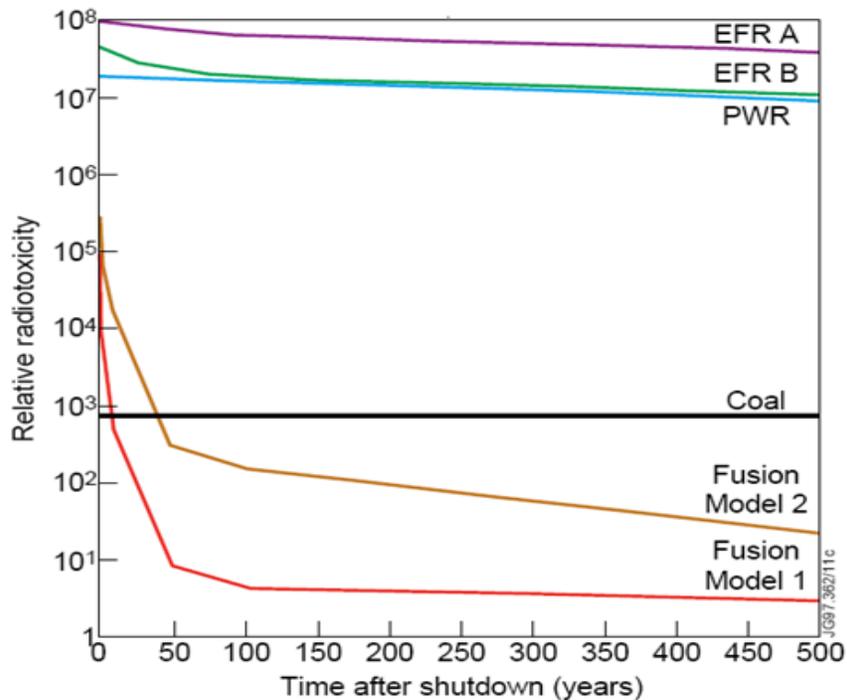
Los combustibles primarios de la tecnología de fusión nuclear, el deuterio y el tritio, durante las reacciones de fusión, producen helio (He), el cual es un gas no radiactivo. No obstante, esta tecnología genera residuos radiactivos de vida media corta provenientes de dos fuentes:

- i) El Tritio, usado como combustible, sobrante ya que este isótopo y los residuos contaminados con el mismo son radiactivos.
- ii) Los materiales del reactor activados por los neutrones producidos en las reacciones de fusión.

Sin embargo, es importante considerar que el ciclo del Tritio es cerrado y que idealmente se consumirá todo el requerido durante las reacciones de fusión. Si las medidas de seguridad se mantienen en niveles adecuados, la fuga de este combustible es muy poco probable. Así mismo, las proyecciones indican que, durante los siguientes años, la investigación generará materiales que minimicen su inducción de radiactividad por neutrones ¹⁶.

¹⁶ Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association "EURATOM - Belgian State", 7p.

La siguiente figura, incluida en el Capítulo 3, muestra una comparación de la radiotoxicidad relativa (toxicidad potencial de un material radiactivo), proveniente de los residuos radiactivos de varias tecnologías de generación. Como puede verse, la radiotoxicidad proveniente de los residuos de la energía nuclear de fusión es mucho menor y de menor duración, respecto a la proveniente de los residuos de la energía nuclear de fisión ¹⁷.



Fuente: Loarte, Alberto, Energía de Fusión La Energía del Siglo XXI o Cómo crear una Estrella en la Tierra, DG Research Comisión Europea, EFDA – Close Support Unit – Garching, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Charla Fusión Nuclear – Abril 2000

Figura 4.3. Comparación de la declinación de la radiotoxicidad relativa proveniente de los residuos de varias fuentes de energía

Por lo anterior, se puede apreciar que, aunque la energía nuclear de fusión genera residuos radiactivos, éstos, al ser de vida media corta, no la hacen incompatible con los requerimientos ambientales internacionales ya que sería suficiente su confinamiento por algunas décadas para eliminar sus amenazas para el ambiente y para la salud humana.

Por lo tanto, con base en lo analizado en este capítulo y en los anteriores, puede afirmarse que, de lograrse su viabilidad técnica y económica, la Energía Nuclear de Fusión sería una opción viable, sustentable, realista y atractiva para cubrir de manera mayoritaria los requerimientos de energía nacionales hacia finales de este siglo y durante los siguientes.

¹⁷ Loarte, Alberto, Energía de Fusión La Energía del Siglo XXI o Cómo crear una Estrella en la Tierra, DG Research Comisión Europea, EFDA – Close Support Unit – Garching, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Charla Fusión Nuclear – Abril 2000, 20p.

4.4. Conclusiones del Capítulo 4

En el Capítulo 2 se determinó que nuestro país, de lograr el crecimiento económico proyectado actualmente, en el año 2100 requerirá una capacidad de generación de energía más de 20 veces mayor a instalada en el año 2010.

En el mismo Capítulo 2 se determinaron los factores que influenciarán de manera determinante la distribución de las tecnologías que generarán durante las siguientes décadas la energía requerida en nuestro país.

Con base en estos factores, en este capítulo se determinaron cinco características que necesariamente deberán tener las fuentes de energía, que cubrirán mayoritariamente los requerimientos energéticos nacionales hacia finales del presente siglo y durante los siguientes, las cuales son de manera resumida: capacidad de generación de más de 500 MW por unidad, alto factor de planta y alta confiabilidad, fuente de energía diferente de los combustibles de origen fósil, nula emisión de gases de efecto invernadero en su proceso primario y disponibilidad de fuente de energía en el largo plazo.

De las tecnologías actualmente utilizadas en México para la generación de energía, la única que cumple con estas características es la energía nuclear de fisión.

La energía nuclear de fisión, genera actualmente un alto porcentaje de la energía a nivel mundial y, debido a sus características y ventajas, es muy factible que sea una de las fuentes de energía más relevantes, que satisfagan los requerimientos energéticos en México y en el mundo en las siguientes décadas.

Aunque su principal limitante son los residuos radiactivos de vida media larga que genera, potencialmente peligrosos para la salud humana, su gestión y manejo se ha desarrollado ampliamente en las últimas décadas.

Por otro lado, la energía nuclear de fusión, analizada en el Capítulo 3, además de contar potencialmente con las virtudes de la energía nuclear de fisión y de cumplir con las características innegociables que deberán tener la mayor parte de las tecnologías de generación nacionales en el largo plazo, tiene la enorme ventaja de no producir residuos radiactivos de vida media larga, ya que genera sólo una cantidad reducida de residuos de vida media corta, convenientemente eliminables en pocos años con las tecnologías actuales.

Por lo anterior, en este capítulo se ha determinado que la energía nuclear de fusión es una opción viable técnica y ambientalmente para cubrir, en la medida que se requiera, las necesidades de energía nacionales en el largo plazo; es decir, hacia finales del presente siglo y en los siglos posteriores.

Es conveniente y necesario, por tanto, generar en México los recursos materiales, técnicos, económicos y humanos que se requieran para desarrollar científica y técnicamente esta tecnología y, poder así, aprovecharla en el futuro a precios competitivos.

Capítulo 5. Acercamiento general a políticas actuales de energía nuclear de fusión en países con características técnicas, económicas y sociales similares a México

5. Acercamiento general a políticas actuales de energía nuclear de fusión en países con características técnicas, económicas y sociales similares a México

En la actualidad, los países que están en mayor o menor medida involucrados con la investigación y desarrollo técnico de la energía nuclear de fusión se cuentan por decenas. En su mayor parte son los llamados “países desarrollados” cuyo PIB per cápita se encuentra entre los más altos del mundo y cuyo Índice de desarrollo humano se acerca a 1 (uno).

Como muestra, cabe recordar del Capítulo 3 que de los grandes Tokamak, el JT60 se encuentra en Japón; el TFTR en Estados Unidos; el JET, el Tokamak más potente operando en la actualidad y con mejores resultados en los indicadores técnicos que indican el acercamiento a la ignición, se encuentra en el Reino Unido, y que el ITER, el proyecto internacional más ambicioso de la actualidad que pretende probar la viabilidad técnica de la fusión nuclear, en el que participan Estados Unidos, Rusia, la Unión Europea, China, Japón, India y Corea del Sur, se está construyendo en Cadarache, Francia.

Sin embargo, muchos más países se encuentran desarrollando programas propios de energía nuclear de fusión de acuerdo con sus posibilidades técnicas, económicas y de cooperación internacional.

El fin del presente capítulo es presentar los avances en la investigación científica y el desarrollo técnico en energía nuclear de fusión de algunos países con similitudes en su desarrollo técnico, económico y social con nuestro país. En primer lugar se justificará la selección de los países analizados y, posteriormente, se hará un resumen de los avances más importantes del desarrollo actual de estos países en la tecnología de generación de energía nuclear de fusión.

5.1. Países seleccionados para su análisis

Como se ha mencionado, existen decenas de países con avances importantes en la investigación técnica y científica de la fuente de energía estudiada en este trabajo. Muchos de ellos han desarrollado programas de investigación y desarrollo a largo plazo, cuyo objetivo es hacer de esta fuente de energía una opción técnica y económicamente viable.

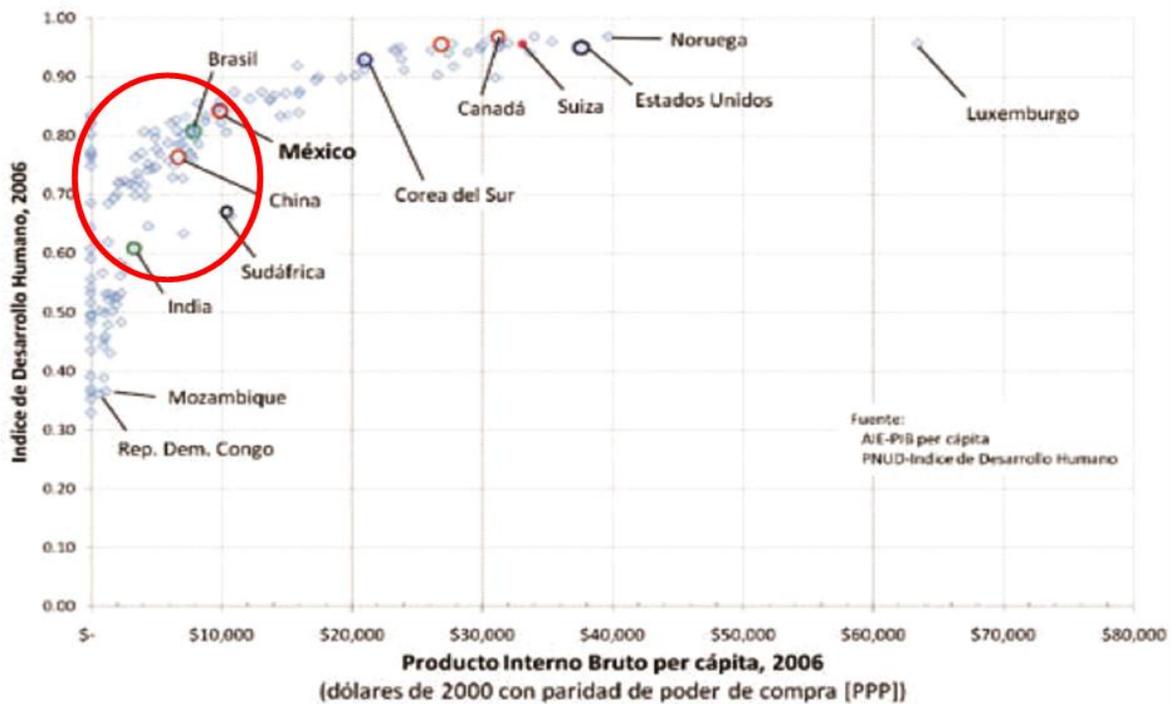
La investigación a gran escala en física de plasmas, la rama de la física que estudia el comportamiento del plasma, medio donde se planea originar las reacciones de fusión, ha requerido en el mundo de varias décadas de investigación física básica, teórica, y se ha requerido del trabajo conjunto y coordinado de muchas instituciones de investigación en decenas de países y de la inversión de miles de millones de dólares.

Como muestra de lo anterior, el reactor Tokamak europeo JET tuvo un costo de USD 1,200,000,000 (mil doscientos millones de dólares) ¹ y se proyecta que el gran reactor internacional Tokamak ITER, tenga un costo de € 10,300,000,000 (diez mil trescientos millones de euros) ².

Sin embargo, la mayor parte de aquellos países que han dedicado porcentajes importantes de su presupuesto a la investigación técnica y científica en energía nuclear de fusión, tienen enormes diferencias en sus desarrollos científicos, técnicos, económicos y sociales con nuestro país, de tal modo que, en la actualidad, sería iluso pensar en alcanzar el mismo desarrollo que ellos en el desarrollo de la tecnología de fusión en el corto plazo.

Por lo anterior, el presente capítulo pretende presentar los esfuerzos que han desarrollado en la investigación nuclear de fusión, aquellos países cuyas características técnicas, económicas y sociales son similares o por lo menos comparables con las de México.

Se presenta, a continuación, una figura donde se comparan el Producto Interno Bruto Per Cápita (PIB per cápita) y el Índice de Desarrollo Humano (IDH) de varios países, tanto desarrollos como algunos de los llamados “países en desarrollo”.



Fuente: SEMARNAT, Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, 2006

Figura 5.1. Comparación internacional de PIB per cápita e IDH, 2006

¹ <http://www.creces.cl/new/index.asp?imat=%20%20%3E%20%209&tc=3&nc=5&art=1771>

² http://www.acohidrogeno.org/index.php?option=com_content&view=article&id=55:atomica&catid=28:alternativas&Itemid=54

Como se puede ver, en los indicadores de PIB per cápita y de IDH, México se encuentra muy por debajo de países altamente industrializados y de las principales economías como Estados Unidos, Suiza, Canadá o Corea del Sur. Muchas de estas naciones han invertido cientos de millones de dólares en investigación en energía nuclear de fusión.

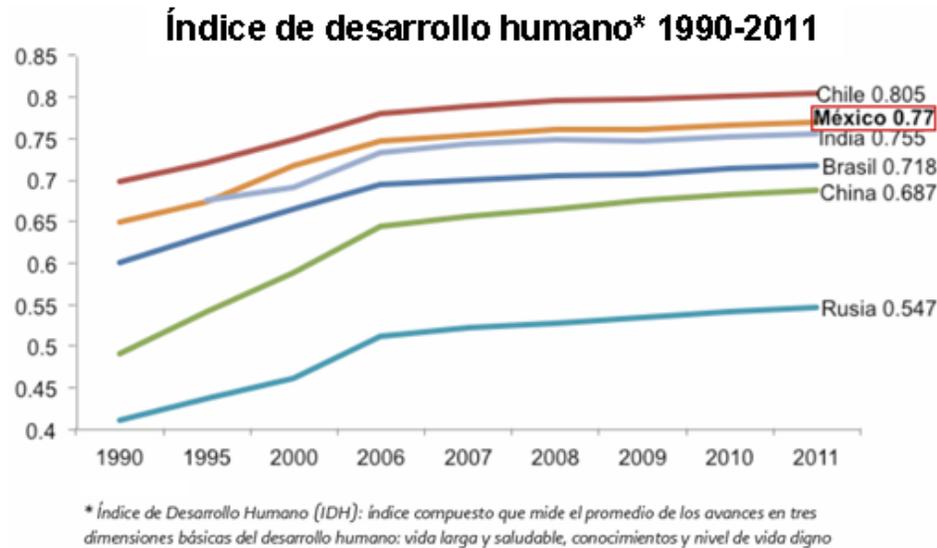
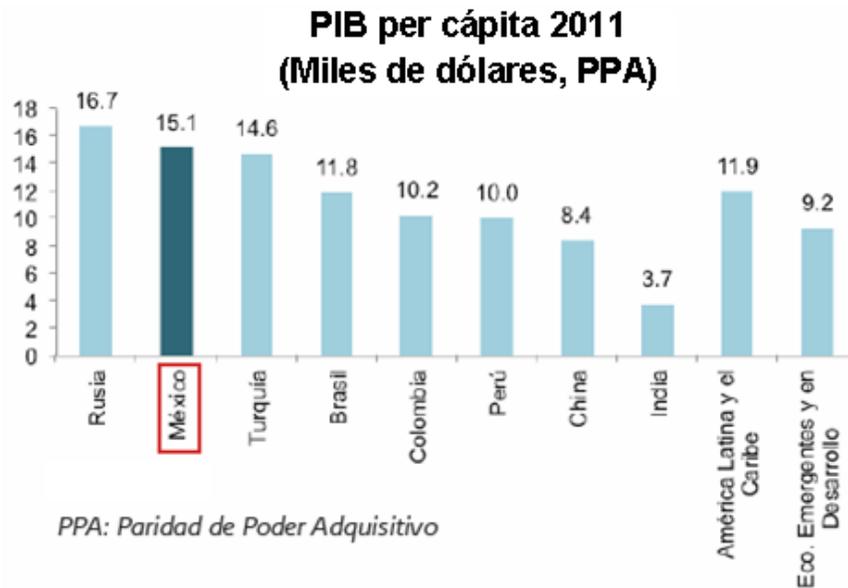
Sin embargo, existen países que se encuentran por debajo de México en los indicadores mencionados y que, sin embargo, se hallan actualmente en una dinámica carrera por integrarse en el desarrollo técnico y científico mundial de la energía nuclear de fusión, en algunos o todos sus aspectos tecnológicos, técnicos, de física teórica o de participación y colaboración internacional.

Con base en esto se han seleccionado tres países para su análisis en este trabajo, que son:

- 1) Brasil
- 2) China
- 3) India

Estos países fueron seleccionados por las siguientes razones:

- a) Estos tres países tienen programas de desarrollo e investigación de energía nuclear de fusión más avanzados que las actividades desarrolladas en México en este tipo de energía.
- b) Los tres se encuentran por debajo y relativamente cerca de nuestro país en los indicadores de PIB per cápita e IDH, por lo que su comparación es factible y pertinente. Esto puede verse en la figura 5.1 y en las siguiente:



Fuente: Secretaría de Economía, Análisis de la Competitividad de México: Cierre 2011, febrero 2012

Figura 5.2. PIB per Cápita e Índice de desarrollo humano de países en desarrollo

- c) Estos tres países compiten a escala mundial con México por inversiones internacionales en el marco globalizado actual.

Por lo anterior, se considera que, de desarrollarse un programa serio de desarrollo tecnológico y científico de la energía nuclear de fusión en México en los sectores público y privado, es posible que se alcance en el corto y mediano plazo un avance similar a los países mencionados y aún mayor.

En los siguientes subcapítulos, se analizarán los antecedentes, la historia y el estado actual que guarda la investigación y desarrollo técnico de la energía nuclear de fusión en los países seleccionados.

5.2. Desarrollo científico y técnico de la energía nuclear de fusión en Brasil

5.2.1. Antecedentes de la energía nuclear de fusión en Brasil

Aunque Brasil cuenta con grandes recursos hidroeléctricos y carboníferos, desde los años 70's, la energía nuclear (tanto de fusión como de fisión) ha sido identificada como una fuente potencial de energía para satisfacer sus requerimientos futuros.

En 1975, el gobierno de Brasil formó con el de Alemania un acuerdo para desarrollar un programa de ciclo completo de combustible nuclear con el fin de generar 10,400 MW. Lo anterior se basó en la suposición de que la demanda de energía eléctrica seguiría, como lo había estado haciendo, creciendo al 11% anual ³.

Sin embargo, en 1981, el crecimiento de la demanda de energía eléctrica en el país de 3.4%, causado por la declinación industrial de esos años, les hizo pensar que no necesitaban aumentar su capacidad de generación, basada en energía nuclear.

5.2.2. Actualidad de la energía nuclear de fusión en Brasil ⁴

En los años ochentas, el Dr. José Goldeberg junto con la Universidad de Sao Paulo, solicitaron al gobierno 1 millón de dólares al año para desarrollar un centro de investigación en fusión nuclear brasileño.

Tras armarse una serie de consensos entre varias instituciones del país, en 2006, el *Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas* (CBPF) con apoyo de la Universidad de Sao Paulo, entre otras instituciones académicas brasileñas, propuso el *Programa Nacional de Fusão Nuclear* para el periodo 2006 – 2010.

³ Sonnenblick Mark, Brazil's nuclear energy program is under fire but not defeated, Issue of EIR Volume 9, Number 5, February 9, 1982, 2p.

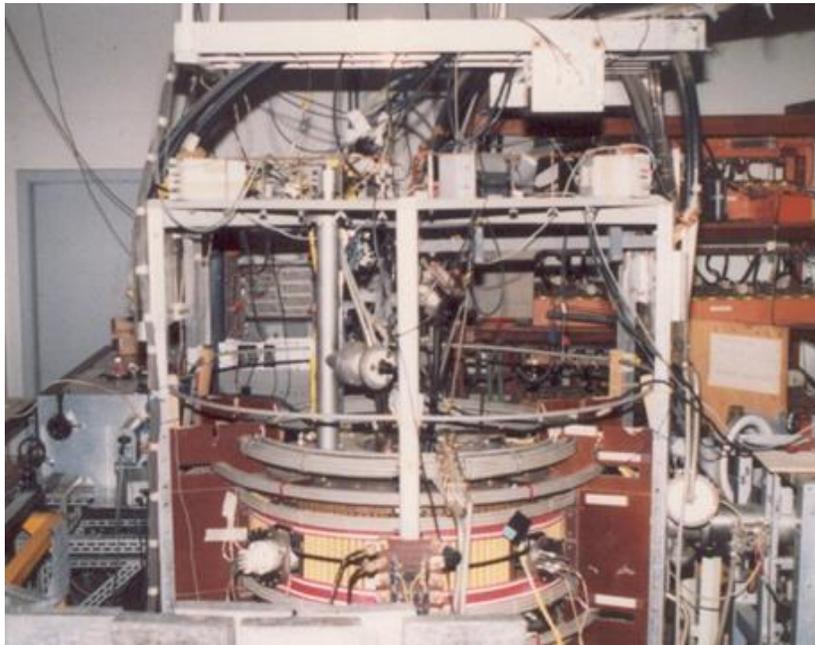
⁴ Fuentes del subcapítulo:

- Sonnenblick Mark, Brazil's nuclear energy program is under fire but not defeated, Issue of EIR Volume 9, Number 5, February 9, 1982
- Programa Nacional de Fusão Nuclear, Detalhamento Periodo 2006 – 2010, CBPF, INPE, IFUSP, Río de Janeiro, 25 de abril de 2006
- Caldas I. L., Viana, R. L. y otros, Control of Chaotic Magnetic Fields in Tokamaks, Brazilian Journal of Physics, vol. 32, no. 4, December, 2002
- Galvao, Ricardo M.O, Brazilian strategy to establish a Fusion Research Program, Brazilian Center for Research in Physics, UNAM, June 2007
- G.O. Ludwig, E. Del Bosco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, Spherical Tokamak Development in Brazil, Brazilian Journal of Physics, vol. 33, no. 4, December, 2003

El objetivo de este programa fue: “Establecer una Red Nacional de Investigación en Fusión Nuclear Controlada que será supervisada por la Comisión Nacional de Energía Nuclear y formada por grupos de investigación que actuarán en esta área, priorizando la consolidación de esta área de investigación en el país y la participación brasileña en proyectos internacionales de relevante interés para el futuro desarrollo de reactores de fusión.”⁵

5.2.2.1. El Tokamak TBR-1 de Brasil

En el año 1978 se diseñó y construyó en el laboratorio de Plasma del Instituto de Física de la Universidad de Sao Paulo el primer Tokamak Brasileño: el TBR-1.



Fuente: Galvao, Ricardo M.O, Brazilian strategy to establish a Fusion Research Program, Brazilian Center for Research in Physics, UNAM, June 2007

Figura 5.3. Vista del Tokamak TBR-1 de Brasil

Hasta el fin de sus operaciones en 1998, los experimentos realizados en él contribuyeron de manera importante en un número significativo de áreas de la física de plasmas, en especial, en la caracterización y el control del modo netohidrodinámico de interacción y en el estudio de los fenómenos de plasmas en fronteras.

⁵ Programa Nacional de Fusao Nuclear, Detalhamento Periodo 2006 – 2010, CBPF, INPE, IFUSP, Río de Janeiro, 25 de abril de 2006, 1 p.

Se muestran a continuación los parámetros técnicos principales del TBR-1:

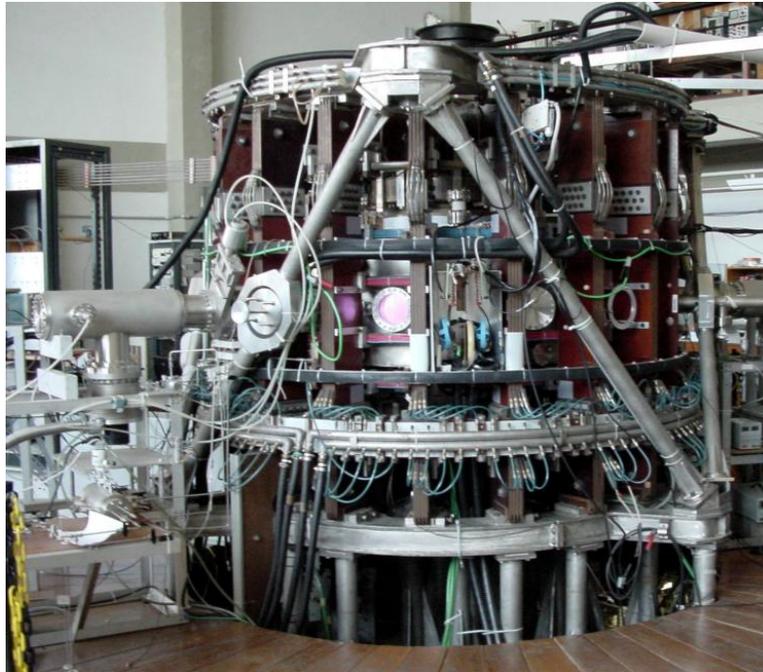
Parámetro	Magnitud
Radio Mayor R_o	0.30 m
Radio Menor (cámara) a_v	0.11 m
Radio Menor (plasma) a_p	0.08 m
Campo magnético Toroidal B_o	0.5 T (en el eje magnético)
Corriente de plasma I_p	0.012 MA
Duración del pulso	7 – 9 ms
Densidad electrónica n_e	$7.0 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$
Temperatura electrónica T_e	200 eV

Fuente: Caldas I. L., Viana, R. L. y otros, Control of Chaotic Magnetic Fields in Tokamaks, Brazilian Journal of Physics, vol. 32, no. 4, December, 2002

Cuadro 5.1. Parámetros técnicos principales del Tokamak TBR-1 en Brasil

5.2.2.2. El Tokamak TCA-BR de Brasil

Cuando en el laboratorio de plasma del Instituto de Física de la Universidad de Sao Paulo se previó la salida de operación del Tokamak TBR-1, se comenzó el diseño de un nuevo Tokamak que le diera continuidad a las investigación del mencionado dispositivo; a este Tokamak se le nombró posteriormente TCA-BR y entró en operación 1997.



Fuente: Galvao, Ricardo M.O, Brazilian strategy to establish a Fusion Research Program, Brazilian Center for Research in Physics, UNAM, June 2007

Figura 5.4. Vista del Tokamak TCA-BR de Brasil

Los principales programas de investigación en el Tokamak TCA-BR se enfocaron en el mejoramiento del control de las líneas caóticas del campo magnético, en la caracterización y control del calentamiento de las partículas alfa y en el mejoramiento de los regímenes de confinamiento magnético.

Se muestran a continuación los parámetros técnicos principales del TCA-BR:

Parámetro	Magnitud
Radio Mayor R_o	0.56 m
Radio Menor a	0.18 m
Campo magnético Toroidal B_o	1.1 T
Corriente de plasma I_p	0.1 MA
Densidad electrónica n_e	$\leq 4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$

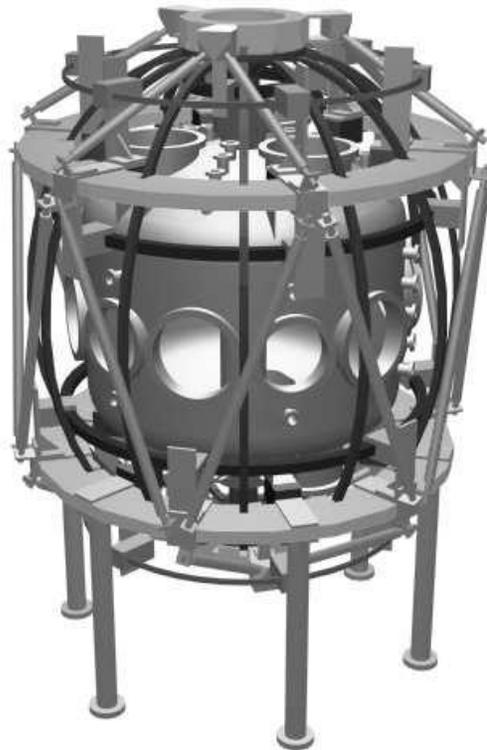
Fuente: Galvao, Ricardo M.O, Brazilian strategy to establish a Fusion Research Program, Brazilian Center for Research in Physics, UNAM, June 2007

Cuadro 5.2. Parámetros técnicos principales del Tokamak TCA-BR en Brasil

5.2.2.3. El Tokamak ETE de Brasil

En el año 2000, comenzó a operar el Tokamak esférico *Experimento Tokamak Esférico* (ETE) en el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE) en Brasil. Este Tokamak fue diseñado en Brasil en el *Laboratório Associado de Plasma* (LAP) del INPE.

Pudo diseñarse y construirse en Brasil, gracias al estudio de los regímenes operativos, de las propiedades de confinamiento y de los esquemas de corriente en bobinas de las configuraciones de Tokamaks de radio pequeño actualmente en operación, los cuales han sido desarrollados en los últimos diez años a escala internacional.



Fuente: G.O. Ludwig, E. Del Bosco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, Spherical Tokamak Development in Brazil, *Brazilian Journal of Physics*, vol. 33, no. 4, December, 2003

Figura 5.5. Visión artística del Tokamak ETE de Brasil

Para el desarrollo y construcción de este tipo de Tokamaks, no es necesario hacer una inversión de miles de millones de dólares como en el caso de los grandes Tokmaks, sin embargo, es posible estudiar y resolver en ellos muchos aspectos del comportamiento del plasma en un medio de confinamiento magnético. Esto abre la puerta para que naciones con una capacidad económica mucho menor a las grandes potencias, puedan explorar las propiedades de los Tokamaks, obtener experiencia y entrenamiento en su diseño y operación y facilitar la cooperación y el intercambio académico con otras instituciones de investigación en energía nuclear de fusión a nivel internacional.

Las características técnicas más importantes del ETE se presentan en el siguiente cuadro:

Parámetro	Primera fase	Modernización
Radio mayor R_o	0.30 m	-
Radio menor a	0.20 m	-
Campo Toroidal B_o	0.4 T	< 0.8 T
Corriente de Plasma I_p	0.2 MA	0.4 MA
Elongación κ	1.6	1.8
Triangularidad δ	~ 0.3	-

Fuente: G.O. Ludwig, E. Del Bosco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, Spherical Tokamak Development in Brazil, Brazilian Journal of Physics, vol. 33, no. 4, December, 2003

Cuadro 5.3. Parámetros técnicos principales del Tokamak ETE en Brasil

El ETE fue parcialmente financiado por la *Financiadora de Estudos e Projetos* (FINEP), por la *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo* (FAPESP) y por la *International Atomic Energy Agency* (IAEA).

Aunque los esfuerzos hechos en Brasil para integrar al país en los esfuerzos internacionales para investigar la fusión nuclear, han sido importantes, los niveles de financiamiento y de recursos humanos destinados a este objetivo han sido insuficientes para permitir el éxito de su Programa Nacional de Fusión Nuclear.

5.3. Desarrollo científico y técnico de la energía nuclear de fusión en China

5.3.1. Antecedentes de la energía nuclear de fusión en China

Actualmente únicamente entre el 1% y el 2% de la energía en China tiene como fuente la energía nuclear de fisión; sin embargo, el gobierno chino ha hecho esfuerzos formales para desarrollar la energía nuclear de fusión desde hace 50 años.

En 1973 la Academia China *SINICA* trató de desarrollar la investigación en energía nuclear de fusión, sin embargo, no existía la infraestructura adecuada para hacerlo. Por ello, en ese año, el Instituto de Física de Beijing tomó la responsabilidad de fundar una nueva división, el Instituto de física de plasma, en la ciudad de Heifei ⁶.

En 1983 se desarrolló en el Instituto de Física de Beijing, un pequeño Tokamak, el CT-6 —China Tokamak-6.

⁶ Interview: Dr. Yuanxi Wan, China's, Ambitious Path, To Fusion Power, EIR, Science & Technology, 2p.

Las actividades y el presupuesto del Instituto crecieron aceleradamente y posteriormente, en él, se diseñaron, desarrollaron y construyeron, dos pequeños Tokamaks: el HT-6 (mejorado posteriormente y renombrado HT-6B) y el HT6F.

5.3.2. Actualidad de la energía nuclear de fusión en China

En 1990 China trajo en barco desde Rusia el primer Tokamak superconductor del mundo: el T-7. En este Tokamak se probó por primera vez la superconductividad en la tecnología de confinamiento magnético. En 1994 se re-ensambló el dispositivo, se modificaron algunos aspectos técnicos, en especial la cámara de vacío, y se renombró como HT-7⁷.

Actualmente, el Instituto de Física de Beijing y su división de física de plasma tienen convenios de cooperación internacional con, por ejemplo, el Laboratorio de Física de Plasma de Princeton en Estados Unidos y el Instituto Kurchatov en Rusia.

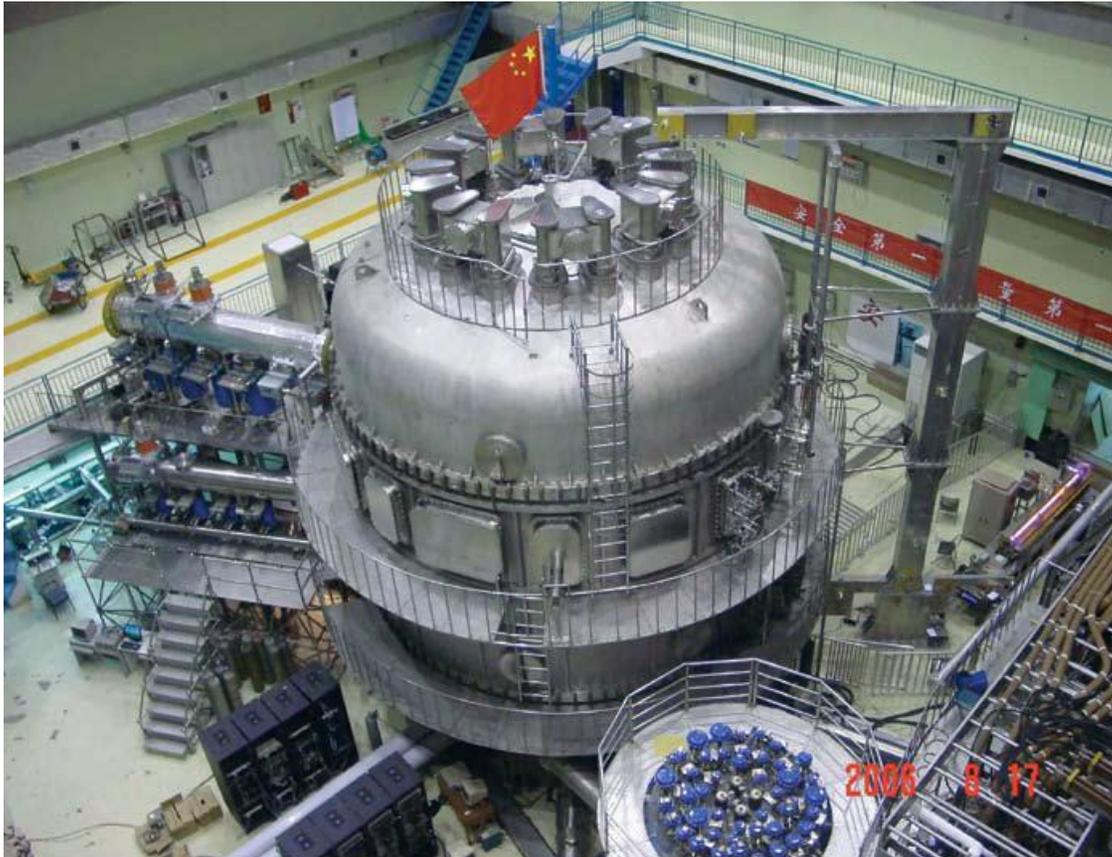
5.3.2.1. El Tokamak superconductor EAST de China

A partir del año 1997, se aprobó en el Instituto de física de plasmas, bajo la dirección de la Academia China de Ciencias, el diseño, desarrollo y construcción del primer Tokamak totalmente superconductor: el Tokamak Superconductor Avanzado Experimental (EAST), su diseño está basado en los avances y experiencia obtenida con el HT-7 y a nivel internacional, en especial, en Estados Unidos y Rusia⁸.

⁷ Interview: Dr. Yuanxi Wan, China's, Ambitious Path, To Fusion Power, EIR, Science & Technology, 4p.

⁸ Interview: Dr. Yuanxi Wan, China's, Ambitious Path, To Fusion Power, EIR, Science & Technology, 3p.

Se muestra a continuación una imagen del Tokamak superconductor EAST:



Fuente: Interview: Dr. Yuanxi Wan, China's, Ambitious Path, To Fusion Power, EIR, Science & Technology

Figura 5.6. Tokamak Superconductor Avanzado Experimental (EAST) de China

El diseño y construcción del EAST ha sido un gran paso en China y en todo el mundo para alcanzar los niveles de energía necesarios para lograr el “plasma en combustión” en los dispositivos de confinamiento magnético. El EAST es un Tokamak más avanzado que el JET y muy similar a en sus características técnicas al ITER. La construcción de este Tokamak tardó cinco años, terminó de construirse en marzo 2006 y se obtuvo el primer plasma en septiembre de 2006.

El EAST tendrá tres diferentes sistemas de calentamiento de plasma por radio frecuencia: el sistema de calentamiento por resonancia de iones de ciclotrón (ICRH), el sistema de conducción de corriente híbrida baja (LHCD) y el sistema de calentamiento por resonancia de electrones de ciclotrón (ECRH).

En mayo de 2009, se obtuvieron de forma repetida descargas de plasma de alta temperatura por más de 60 segundos mediante conducción de corriente híbrida baja (LHCD). En los próximos meses se planea operar el EAST con pulsos largos (con una duración de 1000 segundos como máximo) de descargas de Deuterio-Deuterio (D-D) ⁹.

Se muestran a continuación los parámetros técnicos principales del EAST:

Parámetro	Magnitud
Radio Mayor R_0	1.7 m
Radio Menor a	0.4 m
Campo magnético Toroidal B_0	3.5 T
Corriente de plasma I_p	1 MA
Duración del pulso	1 – 1000 s
Relación de aspecto R/a	4.25
Elongación κ	1.6 - 2
Triangularidad δ	0.6 – 0.8
Calentamiento y operación (primera fase)	
Configuración	Divertor de Simple-cero, divertor de doble-cero, bomba limitadora
Calentamiento por resonancia de iones de ciclotrón (ICRH)	3 – 3.5 MW
Conducción de corriente híbrida baja (LHCD)	3.5 MW
Calentamiento por resonancia de electrones de ciclotrón (ECRH)	0.5 MW

Fuente: Y.X. Wan, P.D. Weng, Progress of the EAST Project in China, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences

Cuadro 5.4. Parámetros técnicos principales del EAST en China

Se tiene proyectado que los experimentos realizados en los próximos años en el EAST serán la base para la modernización de las bobinas superconductoras del ITER.

⁹ Yican Wu, Jiequiong Jiang, Fusion-Fission Hybrids Driven Research in China, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, 230031, China, School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230027, China, 3p.

5.3.2.2. Fusión-Fisión en China

En años recientes, los sistemas híbridos de fusión-fisión han sido considerados como un paso intermedio para alcanzar la fuente de energía de fusión pura. A partir de 1986, China ha considerado implementar un programa nacional para desarrollar los reactores de fusión –fisión.

Las investigaciones en este campo se realizan en el Instituto de Física de Plasmas, en la Academia China de Ciencias (ASIPP) y en el Instituto de Física del Suroeste dentro de un marco de un programa nacional de desarrollo e investigación de alta tecnología (el programa “863”) y apoyado y financiado por la Comisión Estatal de Ciencia y Tecnología de China ¹⁰.

Adicionalmente, en el campo de los sistemas Fusión-Fisión, se tienen en algunas instituciones chinas, programas de desarrollo e investigación en muchos campos de la técnica, entre ellos, los experimentos integrales con neutrones para la cría de Tritio, la producción de neutrones y su multiplicación, la cría de combustible nuclear con barreras de neutrones y los experimentos de producción de Tritio mediante el reactor de fisión nuclear en el Instituto de Física Nuclear y Química del Suroeste (SWINPC).

Los estudios en tecnología híbrida fusión-fisión en el campo de los materiales se extienden al desarrollo de materiales especiales para la estructuras, materiales para cría de Tritio, materiales penetrantes y barreras de Tritio, materiales de contacto con plasma y materiales de baja activación. Estos desarrollos son dirigidos por el ASIPP, el Instituto Chino de Energía Atómica (CIAE), el Instituto de Física del Suroeste (SWIP) y por el Instituto de Física Moderna (IMF) ¹¹.

5.3.2.3. China en el ITER ¹²

En 2008 se estableció en el Ministerio de Ciencia y Tecnología de China el Centro para el Plan Internacional de energía nuclear de fusión para China. Este centro está liderado por el académico Cheng Jingpei que dirigirá los esfuerzos para implementar el programa de desarrollo internacional: “plan para el Reactor Termonuclear Experimental Internacional” (plan ITER).

¹⁰ Yican Wu, Jiequiong Jiang, Fusion-Fission Hybrids Driven Research in China, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, 230031, China, School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230027, China, 1p.

¹¹ Yican Wu, Jiequiong Jiang, Fusion-Fission Hybrids Driven Research in China, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, 230031, China, School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230027, China, 4p.

¹² Fuente del subcapítulo: Center for China International Nuclear Fusion Energy Plan Established, People's Daily Online, October 15, 2008

El plan ITER es un importante programa de cooperación científica internacional y multilateral, sólo comparable con la cooperación en la Estación Espacial Internacional y ésta ha sido la primera vez que China tiene oportunidad y capacidad de participar en un gran proyecto internacional de cooperación científica y tecnológica en igualdad de condiciones.

China entró formalmente en el plan ITER en Noviembre de 2006 y en junio de ese año, el gobierno chino aprobó el establecimiento del Centro para el Plan Internacional de energía nuclear de fusión para China.

5.3.2.4. Reactor HCSB-DEMO de China ¹³

El proyecto del reactor tipo Tokamak nuclear de fusión China DEMO (CN DEMO) es una vertiente muy importante del programa nuclear de fusión de China a largo plazo. Se tiene proyectado diseñar este Tokamak con enfriamiento de helio, mediante enfriamiento sólido (HCSB) del manto y es un diseño propio del país. Usará un combustible compuesto por Deuterio-Tritio.

El manto de cría de Tritio es uno de los componentes clave de un reactor de fusión. Los principales requerimientos del manto del HCSB-DEMO serán generar una cantidad de Tritio que lo haga autosuficiente y extraer una gran cantidad de calor. La tecnología que pretende aplicarse en este proyecto será previamente probada y evaluada en el ITER.

El diseño del HCSB-DEMO será proyectado y diseñado en el SWIP chino.

¹³ Fuente del subcapítulo: Zaixin Li, Kaiming Feng, Activation analysis for the HCSB-DEMO reactor in China, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, P.R. China

5.4. Desarrollo científico y técnico de la energía nuclear de fusión en India ¹⁴

5.4.1. Antecedentes de la energía nuclear de fusión en India

En 1981, el gobierno de India tomó el compromiso de “desarrollar la capacidad para transitar a la tecnología de fusión”, desde entonces comenzaron en ese país los esfuerzos dirigidos hacia el desarrollo de la tecnología de energía nuclear de fusión. El primer paso concreto fue el establecimiento de un Centro de Investigación de Física de Plasma de Alta Energía en la ciudad de Ahmedabad al oeste de India.

Al mismo tiempo, se impulsó la investigación de física de plasmas en muchas instituciones a lo largo del país, como el Instituto Tata de investigación fundamental, el Centro Bhabha de investigación atómica en Bombay, el Instituto Indio de Ciencia en Bangalore, el Instituto Saha de física nuclear en Calcutta, la Universidad de Delhi y el Instituto Indio de tecnología en Delhi.

Dado el poco presupuesto que contó el país para la investigación en este campo, India se enfocó a experimentos de pequeña escala para capacitar recursos humanos y entrar de lleno en la investigación internacional en fusión.

Desde entonces, la investigación en fusión nuclear en India se ha centrado los mecanismos de confinamiento magnético Tokamaks. En esos años, se desarrollaron y construyeron dos pequeños Tokamaks en el Instituto de Investigación de Plasma (IPR) cerca de Ahmedabad.

El plan de desarrollo de energía nuclear de fusión en India tiene como metas diseñar, desarrollar y construir su propia central experimental de generación por energía nuclear de fusión, “DEMO”, para mediados del presente siglo, y tener una capacidad de generación de 2,000 MW a partir de esta tecnología para el año 2060.

¹⁴ Fuentes del subcapítulo:

- P.L. Kaw, The ITER INDIA Project, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12
- Prof. D. Bora, ITER and India's contribution, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12
- Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12
- Zykofsky, Uma, The potential for a nuclear fusion effort, Indias's Future, EIR, Volume 9, Number 5, February 9, 1982
- Kakodkar, Anil, Indian Energy Scenario and Role of Fusion Energy, Presentation at “Monaco ITER International Fusion Energy Days”, Monaco, November 23rd, 2010
- R. Srinivasan, Role of Fusion Energy in India, Institute for Plasma Research, Bhat, Gandhinagar, INDIA, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 (2010)

5.4.2. Actualidad de la energía nuclear de fusión en India

Actualmente, la investigación en fusión en India se desarrolla en dos Tokamak: el Tokamak SINP y el Tokamak ADITYA. Adicionalmente se desarrolló y construyó el nuevo “Tokamak superconductor de operación estable”: el “SST-1”.

5.4.2.1. El Tokamak SINP de India

Se importó el pequeño Tokamak llamado posteriormente SINP desde Toshiba, Japón y se instaló en 1987 en el Instituto Saha de física nuclear en Calcuta.

Se trata de un pequeño Tokamak con núcleo de acero con un pulso de duración de alrededor de 20 ms, sus índices de q_a (factor que determina el grado de enroscamiento de líneas de campo magnético en los bordes) se encuentran entre 1 y 2. Se presenta a continuación una imagen del SINP:



Fuente: Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12

Figura 5.7. Vista del Tokamak SINP de India

En este dispositivo se ha estudiado e investigado de modo intensivo la baja transformación rotacional de las descargas en el Tokamak.

Dentro del programa futuro de investigación del SINP, se incluyen investigaciones de las modalidades del modo H y estudios en la turbulencia del plasma usando nuevas técnicas de análisis de datos mediante análisis de ondas electromagnéticas, análisis fractales y análisis de espectro de alto orden.

5.4.2.2. El Tokamak ADITYA de India

El Tokamak ADITYA fue el primer Tokamak totalmente desarrollado, diseñado y construido en India por ingenieros y físicos indios. Se encuentra en el Instituto para la Investigación del Plasma (IPR) en Gandhinagar y terminó de construirse en el año 1989.

Se trata de un Tokamak de tamaño mediano de bajo campo magnético. Tiene una sección transversal de plasma circular con un radio mayor de 0.75 m y un radio menor de 0.25 m. Su campo toroidal es de 1.5 T producido por 20 bobinas de campo toroidal espaciadas simétricamente alrededor de la cámara de vacío. La cámara de vacío es un toroide con un radio mayor de 75 cm con una sección transversal en forma de cuadrado de 60 cm por lado.

Se muestra a continuación una imagen del Tokamak ADITYA:



Fuente: Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12

Figura 5.8. Vista del Tokamak ADITYA de India

Sus objetivos son los siguientes:

- a) Investigación y control de los fenómenos de borde
- b) Investigación de la densidad y de los límites de corriente en el Tokamak, con especial énfasis en fenómenos como el MARFES, detección de plasma y las inestabilidades disruptivas y su control.
- c) Estudio de nuevos regímenes de operación como con corrientes dominantes dentro de las corrientes portadoras de energía.

Los experimentos en el AITYA se enfocan a los fenómenos relacionados con las turbulencias de borde. Estos trabajos han permitido descubrir la presencia de estructuras coherentes en la turbulencia y permitió eliminar los efectos de transporte.

5.4.2.3. El Tokamak SST-1 de India

El "Tokamak superconductor de operación estable" (SST-1) es un Tokamak superconductor desarrollado y construido en el IPR, India. Sus objetivos incluyen estudiar los procesos físicos del plasma bajo una operación estable y estudiar la tecnología que permite este tipo de operación. Se proyecta que esta investigación permita mantener pulsos de larga duración durante la operación.

El SST-1 es un Tokamak de gran tamaño, diseñado para operar con una configuración de plasma de doble cero en el divertor con una gran elongación (κ) y triangularidad (δ). Tiene un radio mayor de 1.1 m y un radio menor de 0.20 m. La corriente de plasma de 200 kiloamperes (kA) será producida por un campo magnético toroidal de 3 T. Ondas de radiofrecuencia, en diferentes bandas de frecuencia, serán usadas para conducir la corriente y calentar el plasma en pulsos con duración de 1000 s.

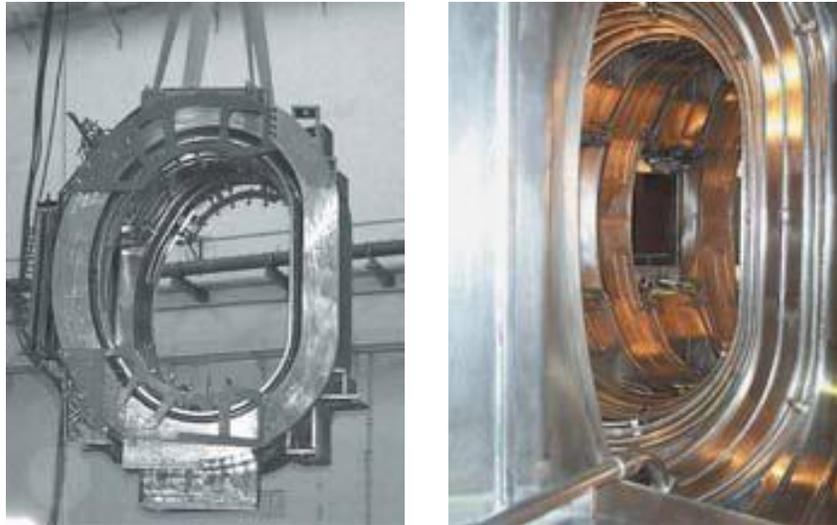
Asimismo, bobinas superconductoras generan los campos magnéticos toroidales y poloidales. Las bobinas de campo toroidal tienen forma de D. Para la máxima corriente de 10 kA por vuelta, la densidad de flujo magnético en el centro del plasma es de 3.0 T. Se muestran a continuación una vista del SST-1:



Fuente: Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12

Figura 5.9. Vista del SST-1 de India

El SST-1 tiene dos cámaras de vacío: una para la producción de plasma y el confinamiento magnético y otra para proveer el ambiente operativo idóneo para los magnetos superconductores. La sección transversal de la cámara de vacío tiene forma de D y tiene 1.62 m de alto y 1.07 m de ancho. Puede verse a continuación una bobina de campo toroidal y la cámara de vacío.



Fuente: Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12

Figura 5.10. Bobina de campo toroidal y cámara de vacío del SST-1, India

De manera similar al EAST Chino, el SST-1 tendrá tres diferentes sistemas de calentamiento por radio frecuencia: el sistema de calentamiento por resonancia de iones de ciclotrón (ICRH), el sistema de conducción de corriente híbrida baja (LHCD) y el sistema de calentamiento por resonancia de electrones de ciclotrón (ECRH), todos ellos para el calentamiento adicional y no inductivo de la corriente de plasma, para sostenerlo en operación estable por arriba de los 1,000 segundos.

El primer “disparo” de plasma en el SST-1 se espera para junio de 2012.

A continuación se presenta un cuadro con los parámetros técnicos principales de los Tokamaks de India en operación:

Parámetro	SINP	ADITYA	SST-1
Radio Mayor R_0	0.30 m	0.75 m	1.1 m
Radio Menor a	0.045 m – 0.075 m	0.25 m	0.20 m
Campo Toroidal B_0	2.00 T	1.50 T	3.0 T
Corriente de plasma I_p	75 kA	250 kA	220 (330) kA
Duración del pulso	0.02 s – 0.03 s	0.25 s	1000 s
Sección transversal de plasma	Circular	Circular	Elongada (D)
Elongación κ	-	-	1.7 – 2.0
Triangularidad δ	-	-	0.4 – 0.7
Configuración	Limitador poloidal	Limitador poloidal	Doble / simple cero divertir poloidal
Tipo de bobinas de campo magnético (TF y PF)	Cobre, enfriadas por aire	Cobre, enfriadas por agua	Superconductoras a 4.5 K
Conducción de corriente	Transformador Ohmico (nucleo de acero)	Transformador Ohmico (nucleo de acero)	Transformador Ohmico (nucleo de aire) + LHCD
Calentamiento	Ohmico	Ohmico	Ohmico + ICRH
Cámara de vacío	Carcasa conductora (Al)	Cámara con corte eléctrico	Cámara sin corte
Localización	SINP, Calcutta	IPR, Gandhinagar	IPR, Gandhinagar
Año de operación	1988	1989	2005
Diseño y fabricación	Toshiba, Japón	India	India

Fuente: Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12

Cuadro 5.5. Principales parámetros técnicos de los Tokamaks en operación en India

5.4.2.4. India en el ITER

India contribuirá en el diseño y construcción del ITER aportando su experiencia técnica obtenida del diseño, construcción y operación de los Tokamaks mencionados anteriormente.

Entre las contribuciones técnicas y tecnológicas de India en el ITER, se incluye el diseño y construcción de:

- 1) El criostato del ITER de 28 m de diámetro y 26 m de alto,
- 2) La cámara de vacío en la pared de escudo,
- 3) Las líneas de criodistribución y las criolíneas,
- 4) El sistema de enfriamiento por agua,
- 5) El sistema de asistencia de encendido de plasma ECH.

Con su participación en el ITER, India pretende:

- 1.- Cumplir con sus responsabilidades técnicas en el proyecto,
- 2.- Contribuir en la investigación del plasma en combustión en el ITER,
- 3.- Adquirir autosuficiencia en áreas críticas de la tecnología de reactores de fusión mediante la participación activa en la construcción y operación en el ITER.

5.5. Conclusiones del Capítulo 5

Es evidente que, en la actualidad, no es viable para nuestro país competir en muchos ámbitos económicos, sociales y técnicos con las grandes economías globales como Estados Unidos, Japón o la Unión Europea.

Son estas naciones las que han marcado desde los años 50's la pauta en el desarrollo y la investigación científica y técnica de la energía nuclear de fusión. Muchas de ellas aportan en la actualidad al desarrollo de esta tecnología, recursos económicos, técnicos y humanos que a nuestro país le sería imposible siquiera plantearse en el corto plazo.

Sin embargo, existen países de los llamados "en vías de desarrollo", o "emergentes", con los que México compite de ordinario en el ámbito internacional, que tienen desde hace décadas planes definidos de desarrollo e investigación de energía nuclear de fusión y que, por tanto, se encuentran hoy trabajando a la par con las grandes economías en el desarrollo de esta tecnología.

China, India y Brasil tienen indicadores económicos (PIB) y sociales (IDH) que los ubican como naciones más atrasadas que México en estos aspectos. El hecho de que hoy se cuenten entre los países que tienen un proyecto dinámico y fructífero de investigación y desarrollo de la energía nuclear de fusión, debe alentar a los responsables de las políticas académicas, técnicas y energéticas en México a no postergar más las acciones necesarias que permitan acceder en los próximos años a los beneficios ligados a la investigación de esta tecnología.

Capítulo 6. El desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

6. El desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

La investigación en energía nuclear de fusión en nuestro país ha tenido un ritmo desigual desde que en los años 60's se concretaron los primeros esfuerzos por crear centros especializados, como el de Salazar en el Estado de México ¹, para desarrollar la energía nuclear de fisión y de fusión.

El desconocimiento mayoritario de la energía nuclear, los pocos recursos que cuenta el país para la investigación científica en general, y para la investigación en energía nuclear en particular, y la falta de objetivos concretos para impulsar el desarrollo de estas tecnologías, ha provocado que México se encuentre muy rezagado en la carrera internacional por lograr hacer viable tecnológicamente y económicamente la energía nuclear de fusión.

Sin embargo, en nuestro país ha habido esfuerzos relativamente importantes para despertar el interés por esta tecnología de parte de los responsables de las políticas energéticas, científicas y educativas. Con ello se ha pretendido acelerar las acciones que lleven a México a integrarse a la cooperación técnica internacional en el desarrollo de la energía nuclear de fusión.

Se presentan a continuación, los esfuerzos más importantes que se han dado en México para investigar y desarrollar este tipo de energía.

6.1. Antecedentes históricos del desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

En el año 1978 se inició en México un proyecto para desarrollar un dispositivo de confinamiento magnético para comenzar la investigación experimental nacional de la física de plasmas.² Esta iniciativa condujo en los años siguientes a la aprobación del diseño, desarrollo y construcción del pequeño Tokamak "Novillo".

6.1.1. El Tokamak Novillo de México

En 1983, se propuso en el Centro Nuclear de Salazar del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el Estado de México, el diseño, el desarrollo y la construcción de un equipo de confinamiento magnético de plasma de baja potencia para investigar en México las propiedades de este estado de la materia.

¹ <http://www.inin.gob.mx/plantillas/acercadeinin.cfm?clave=2>

² La energía de las estrellas, Fuente de Energía, 2005 energía 5 (70) 16, FTE de México, 5 p.

"El proyecto para su construcción fue aprobado oficialmente en junio de 1984 y en noviembre de 1987 estaba avanzado en un 15 por ciento." ³ El diseño conceptual de este dispositivo Tokamak, que posteriormente se le llamó "Novillo", fue discutido entre los ingenieros del ININ e investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts, Estados Unidos de América (EUA) El Tokamak Novillo tuvo un costo de 300,000 dólares de 1983 aproximadamente.⁴

Los objetivos de este proyecto fueron:

- 1) Preparar al personal involucrado en el diseño, construcción y operación de pequeños Tokamaks;
- 2) Una vez que se hubiera adquirido experiencia, proponer una máquina más grande, más cercana a la que se pretende para tener reacciones de fusión.⁵

El Tokamak Novillo es un Tokamak de bajo factor de rizo del campo toroidal (0.7 % en $R = 23$ cm), campo vertical entre 150 G y 180 G, con índices de decaimiento adecuados para equilibrio y muchos puertos de acceso para diagnóstico. Se han diseñado bancos de condensadores como fuentes de energía para excitar las bobinas toroidales y poloidales.⁶ Está diseñado para que el plasma alcance temperaturas de 20 millones de Kelvin.⁷ La configuración del Tokamak Novillo para el diagnóstico de plasmas fue muy básica.

La cámara de vacío se construyó a partir de cuatro codos de 90° de acero inoxidable con 3.2 mm de espesor de pared. El radio mayor de la cámara es de 23 cm y el radio menor de 8 cm.⁸

³ Rubén Cota Meza y Ricardo García Rosas, La Investigación de Fusión en México, Revista Fusión Nuclear, Vol. V. núm. 1, Primer trimestre de 1988, 11p.

⁴ Ibidem

⁵ Ibidem

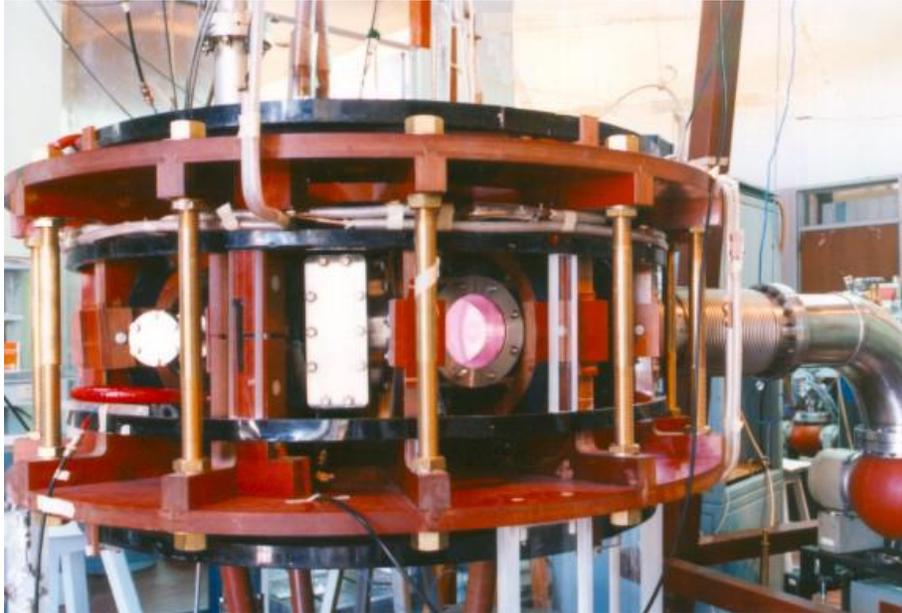
⁶ J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983), 551 p.

⁷ Rubén Cota Meza y Ricardo García Rosas, La Investigación de Fusión en México, Revista Fusión Nuclear, Vol. V. núm. 1, Primer trimestre de 1988, 12 p.

⁸ J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983), 558 p.

Mediante el sistema de vacío se puede alcanzar una presión base estimada de vacío de 1×10^{-7} torr, por medio de la combinación de una bomba rotatoria y otra turbomolecular. La medición de presión se hace mediante medidores pirani y de ionización, ubicados en diversos puntos de la cámara de vacío y de la línea de bombeo.⁹

Se presentan a continuación dos imágenes del Tokamak Novillo:



Fuente: Meléndez, S.R. Barocio, MÉXICO ANTE LA NUEVA PANORAMICA MUNDIAL EN FUSION NUCLEAR CONTROLADA, Laboratorio de Física de Plasmas, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Figura 6.1. Vista lateral del Tokamak Novillo, ININ, México

⁹ J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983) 561 p.



Fuente: Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53

Figura 6.2. Vista superior del Tokamak Novillo, ININ, México

Las bobinas de campo toroidal producen un campo toroidal de 0.5 T con un bajo factor de rizo al centro del plasma de aproximadamente 1%. La corriente de la bobina es de 1.5 kA y el pulso es de 1.2 milisegundos (ms). La bobina toroidal tiene 360 vueltas.¹⁰

El banco de condensadores se descarga sobre la bobina toroidal mediante un ignitrón GL-7703 y se cortocircuita por un arreglo de diodos. Se propuso pulsar el campo magnético a una razón máxima de 1 pulso cada 2 minutos. Este tiempo es suficiente para que la bobina se enfríe y el banco se pueda recargar mediante un circuito rectificador.¹¹

El sistema de bobinas de campo poloidal consta de dos cilindros coaxiales. El cilindro número 1 tiene un radio de 10 cm, una altura de 21 cm y 21 vueltas. El cilindro número 2 tiene un radio de 12 cm, una altura de 21 cm y 21 vueltas también.¹²

¹⁰ J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983) 562 - 567 pp.

¹¹ J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983) 567 - 568 pp.

¹² J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983) 588 p.

La determinación de la temperatura y de la energía del plasma se determinaría mediante la medición de la intensidad de los rayos X que emite. Para ello se contó con un espectrómetro de masas con un rango muy amplio.¹³

Los parámetros principales del Tokamak Novillo se muestran en el siguiente cuadro

Parámetro	Magnitud
Radio Mayor R_o	0.23 m
Radio Menor (cámara) a_v	0.08 m
Radio Menor (plasma) a_p	0.06 m
Campo magnético Toroidal B_o	0.47 T
Campo magnético Poloidal B_p	0.04 T
Corriente de plasma I_p	12 kA
Duración del pulso	1.2 ms
Relación de aspecto R/a_v	3.85
Factor de seguridad q	3
Densidad electrónica n_e	$2 \times 10^{19} / m^3$
Temperatura electrónica T_e	150 eV
Temperatura iónica T_i	50 eV

Fuente: J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983) 557 p.

Cuadro 6.1. Principales parámetros técnicos del Tokamak Novillo

Entre los campos de investigación que en su momento se pretendieron explorar en el Tokamak Novillo, los más importantes fueron los siguientes:

- a) La interacción pared-plasma; sobre todo, la emisión de impurezas y los potenciales de capa, controlando características de la pared como la temperatura y el potencial eléctrico.
- b) La inestabilidad disruptiva, estudiada en pequeños Tokamaks.
- c) La detección de ondas electromagnéticas generadas por el plasma por medio del campo eléctrico involucrado y el estudio de fluctuaciones.
- d) Investigación de materiales que soporten esfuerzos térmicos y que no afecten los parámetros operativos del plasma.

¹³ Rubén Cota Meza y Ricardo García Rosas, La Investigación de Fusión en México, Revista Fusión Nuclear, Vol. V. núm. 1, Primer trimestre de 1988, 11p.

- e) Los electrones desenfundados, cuya energía es mayor a 10 keV, producidos normalmente al iniciar la descarga cuando el campo eléctrico es máximo. Esto produce inestabilidades en el plasma.
- f) Calentamiento del plasma mediante ondas de radio frecuencia por resonancia, optimizando la generación de energía.¹⁴

De 1985 al 2000 se investigó teórica y experimentalmente en este Tokamak muchos de los aspectos técnicos mencionados del confinamiento magnético del plasma. En esos años, el grupo de trabajo encabezado por el doctor Leandro Meléndez, logró importantes apoyos financieros internacionales.¹⁵

Uno de los logros técnicos más importantes del Tokamak Novillo fue su operación sin un sistema de preionización, lo cual fue significativo para la operación de Tokamaks de mayor tamaño.¹⁶

A finales del siglo pasado, la falta de presupuesto provocó la interrupción de las investigaciones desarrolladas en el Tokamak Novillo, como lo menciona L. Meléndez: “En febrero de 1999 la administración del ININ cancela, verbalmente, el proyecto Tokamak arguyendo falta de presupuesto y el fracaso de la investigación en Tokamaks a nivel mundial. La máquina fue readaptada para su uso en la investigación de materiales, con el fin de no ser desmantelada.”¹⁷

De acuerdo al grupo de trabajo del Laboratorio de Física de plasmas del ININ, actualmente se desarrollan en el Tokamak Novillo, la modelación y caracterización de diversos plasmas y algunas aplicaciones de éstos a la ciencia de materiales, el medio ambiente y las ciencias médico-biológicas.¹⁸

¹⁴ J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983) 553 y 554 pp.

¹⁵ La energía de las estrellas, Fuente de Energía, 2005 energía 5 (70) 16, FTE de México, 5 p.

¹⁶ L. Meléndez, S.R. Barocio, MÉXICO ANTE LA NUEVA PANORAMICA MUNDIAL EN FUSION NUCLEAR CONTROLADA, Laboratorio de Física de Plasmas, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 14 p.

¹⁷ L. Meléndez, S.R. Barocio, MÉXICO ANTE LA NUEVA PANORAMICA MUNDIAL EN FUSION NUCLEAR CONTROLADA, Laboratorio de Física de Plasmas, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 14 p.

¹⁸ Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53, 6 p.

6.2. Actualidad del desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

6.2.1. El Laboratorio de Física de Plasmas del ININ

Dado que las reacciones de fusión en los dispositivos de confinamiento magnético se logran en un medio de gas ionizado, conocido como plasma, el estudio de su comportamiento físico y su control tiene una relevancia muy importante en la investigación de la tecnología de fusión nuclear. Por ello, actualmente, el Tokamak Novillo se encuentra en el Laboratorio de Física de Plasmas del ININ.

En este laboratorio se desarrollan experimentos e investigación relacionados con la modelación y caracterización de plasmas generados con sistemas de alimentación de corriente directa y alterna y sus aplicaciones a las ciencias de materiales, medio ambiente y ciencias médicas.

En el área de ciencia de materiales, se trabaja con tres diferentes sistemas para el desarrollo de la implantación de iones inmersos en plasma. Mediante la introducción de una pieza metálica en un plasma de corriente directa o de radio frecuencia, se implantan iones positivos mediante su atracción hacia la pieza por la aplicación de un voltaje negativo.¹⁹ A continuación se muestra una imagen de la cámara para plasmas de radiofrecuencia del laboratorio:

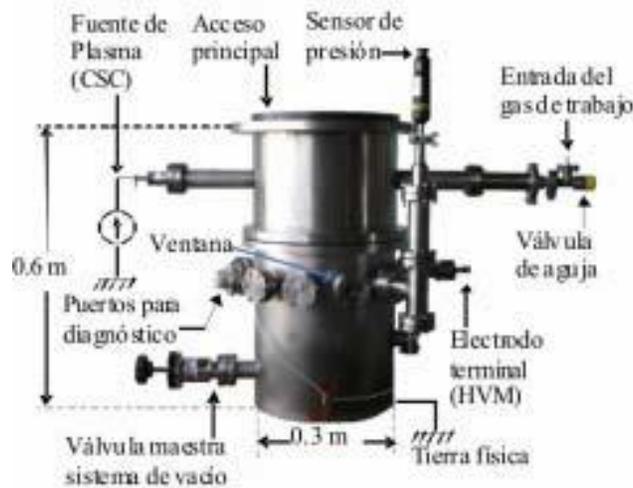


Fuente: Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53

Figura 6.3. Cámara para plasmas de Radio Frecuencia

¹⁹ http://www.inin.gob.mx/principal_miniportal.cfm?cve_area=LFP&codigo_opc=600000000

Las piezas de acero inoxidable, titanio y aluminio que se han tratado de este modo, han mostrado una importante mejoría en su resistencia al desgaste y a la corrosión.²⁰ A continuación se muestra la cámara cilíndrica del equipo para la implantación de iones por plasma:



Fuente: Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53

Figura 6.4. Cámara cilíndrica del equipo para la implantación de iones por plasma

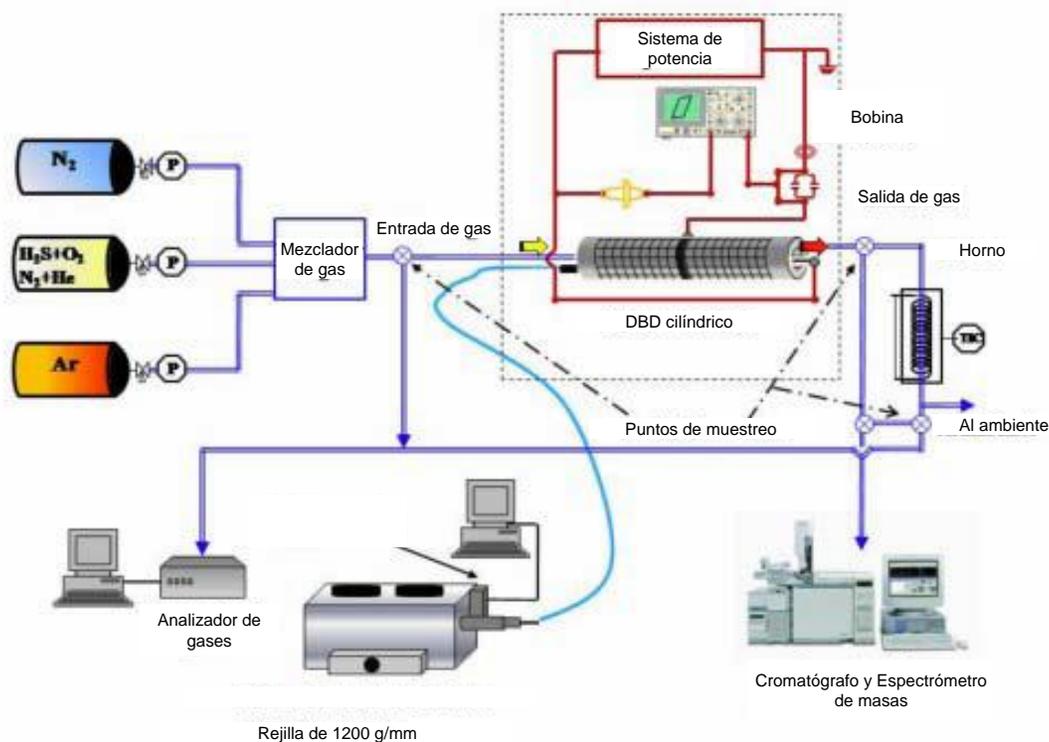
En el área medioambiental, se lleva a cabo la eliminación de óxidos de azufre mediante descargas de tipo corona y eliminación de sulfuro de hidrógeno por medio de descargas de barrera dieléctrica.²¹ En la actualidad, se encuentra en fase de desarrollo la eliminación de sustancias orgánicas dañinas al ambiente, solubles en soluciones acuosas. Estas sustancias son residuos resinas, adhesivos, pinturas e insecticidas que llegan a desecharse en canales y cuerpos de agua.²²

Se muestra a continuación el esquema del dispositivo experimental utilizado en la eliminación de óxidos de azufre y sulfuro de hidrógeno:

²⁰ Ibidem

²¹ Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53, 6p.

²² http://www.inin.gob.mx/principal_miniportal.cfm?cve_area=LFP&codigo_opc=600000000



Fuente: Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53

Figura 6.5. Dispositivo experimental utilizado en la eliminación de SO₂ y H₂S

Así mismo, en el campo de la aplicación médica, se ha desarrollado instrumentación para generar descargas eléctricas a presión atmosférica, por medio de las cuales se ha demostrado la eliminación de microorganismos patógenos. Así mismo, se ha desarrollado instrumentación para el tratamiento cutáneo y el tratamiento superficial de medios biológicos y alimentos.²³ A continuación se muestra una imagen de la cauterización por medio de plasma:

²³ Ibidem



Fuente: Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53

Figura 6.6. Cauterización por plasma

Adicionalmente, investigadores del ININ han publicado documentos y artículos científicos relacionados con la física de plasmas y la fusión, relevantes para el desarrollo de este campo en nuestro país, como por ejemplo ²⁴:

- Chávez Alarcón, Esteban; Herrera Velázquez, J Julio E, “Código 3D-MAPTOR para Construcción Tridimensional del Campo Magnético de Tokamaks”, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 2009.
- Barocio, Samuel R., “Modelando la influencia de la densidad de las corrientes de plasma en el mejoramiento del corte reversible en Tokamaks”, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 2009.
- Nieto, Martín; Chávez, Esteban, “Diseño Preliminar de un Tokamak esférico pequeño para el Programa Mexicano de Fusión”, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 2009.
- C. Gutiérrez Tapia y O. Hernández Aguirre, “Interacción Ciclotrónica de Partículas Energizadas con el Rizo de un Campo Toroidal”, LII Congreso Nacional de Física, Acapulco, Gro. Octubre 26-30, 2009.

²⁴ Fuente: Sociedad Mexicana de Física, LII Congreso Nacional de Física, XXIV Encuentro Nacional de Divulgación Científica, XV Congreso de la División de Fluidos y Plasmas, PROGRAMA Y RESÚMENES, Acapulco, Guerrero, (Hotel Acapulco Princess), del 26 al 30 de octubre de 2009

6.2.2. El Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

El primer antecedente del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM puede encontrarse en el Laboratorio Nuclear de la UNAM, fundado en 1967 en el piso 14 de la entonces Torre de Ciencias, en un laboratorio cedido en calidad de préstamo por la Facultad de Química; su fundador y primer director fue el M. en C. Luis Gálvez Cruz. A finales del año 1972 el Rector Pablo Gonzáles Casanova acuerda que el Laboratorio Nuclear se convierta en el Centro de Estudios Nucleares (CEN). En 1988 el Centro de Estudios Nucleares se convierte en el actual Instituto de Ciencias Nucleares.²⁵

Dentro del Instituto de Ciencias Nucleares se encuentra el departamento de Física de Plasmas y de Interacción de Radiación con Materia. Uno de sus programas académicos se enfoca a la solución de problemas de equilibrio, estabilidad y transporte de plasmas confinados magnéticamente, en el contexto de la investigación de fusión nuclear controlada. Se estudian en particular, mecanismos que permitan mejorar el confinamiento de plasmas en aparatos de confinamiento toroidal, como son los Tokamaks y los Stellarators.²⁶

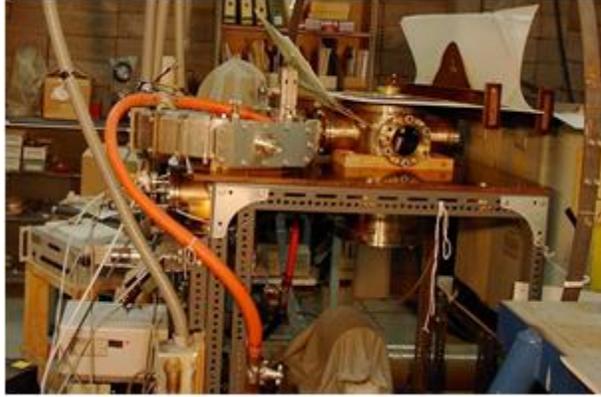
Adicionalmente, “se desarrollan códigos de fluidos y cinéticos para el estudio de los plasmas en el laboratorio y en astrofísica, particularmente en lo relativo a la simulación de chorros estelares. El experimento Fuego Nuevo II consiste de un aparato tipo Plasma Focus en donde se estudia la física de plasmas magnetizados de densidades y temperaturas altas y sus posibles aplicaciones como fuente de radiación.”²⁷

Para el enfoque experimental de las investigaciones, el instituto cuenta también con un Laboratorio de Física de Plasmas que se centra en el estudio de plasmas densos magnetizados. En este laboratorio se encuentra el foco de plasma denso, o Plasma Focus llamado Fuego Nuevo II. Mediante este dispositivo es posible producir una columna de plasma de densidad y temperatura altas; su diseño es relativamente simple, en comparación con otros sistemas de experimentación de fusión nuclear. A continuación puede verse una imagen de este dispositivo.

²⁵http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=219&Itemid=113

²⁶http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=56&Itemid=78

²⁷ Ibidem



Fuente: Página Web del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM
http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=325&Itemid=130

Figura 6.7. Dispositivo Plasma Focus llamado Fuego Nuevo II instalado en el Laboratorio de Física de Plasmas del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM

Debido a su bajo costo de inversión y operación, en contraste con otros dispositivos de investigación de fusión nuclear controlada, equipos de este tipo se han instalado en diversos países, principalmente en vías de desarrollo como Polonia y Rusia. En estos equipos se estudian, bajo el punto de vista de la ciencia básica, fenómenos físicos de interés, por ejemplo, la aceleración de partículas en un plasma y la generación de campos magnéticos intensos. Este equipo puede ser una fuente de radiación basada en plasmas para aplicaciones en radiografía de alto contraste, microlitografía y prospección mediante neutrones rápidos.

Se proyecta que este dispositivo sirva también como una fuente de radiación pulsada. En los próximos años se buscará la reducción de sus dimensiones para que pueda ser transportado. Es importante también lograr que su comportamiento sea más uniforme y reducir sus requerimientos de mantenimiento. Para resolver estos problemas se deberán hacer estudios con nuevos diseños y materiales.²⁸

Adicionalmente, investigadores del Instituto de Ciencias Nucleares de la UNAM han publicado documentos y artículos científicos relacionados con la física de plasmas y la fusión, relevantes para el desarrollo de este campo en nuestro país, como por ejemplo²⁹:

- Martinel J.J., “Cálculos del campo eléctrico radial en el stellarator TJ-II”, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009

²⁸http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=325&Itemid=130

²⁹ Sociedad Mexicana de Física, LII Congreso Nacional de Física, XXIV Encuentro Nacional de Divulgación Científica, XV Congreso de la División de Fluidos y Plasmas, PROGRAMA Y RESÚMENES, Acapulco, Guerrero, (Hotel Acapulco Princess), del 26 al 30 de octubre de 2009

- Castillo, Fermín, “Detección de neutrones y partículas cargadas con detectores de espectro CR-39 en experimentos de fusión: una revisión”, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009
- Trejo Uribe Z.I.; Martinel, J.J., “Variación del campo magnético en la transición L-H en plasmas toroidales”, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009

6.2.3. Symposium: “Hacia un programa mexicano de fusión”, México 2007

Con el fin de difundir la conveniencia de desarrollar la tecnología de fusión nuclear en nuestro país, del 21 al 22 de junio de 2007 se llevó cabo el Symposium: “Hacia un programa mexicano de fusión”, en el Auditorio Marcos Moshinsky, dentro del Instituto de Ciencias Nucleares, en el campus de Ciudad Universitaria de la UNAM, en la Ciudad de México.

El propósito de este evento fue identificar áreas en las que la comunidad científica Mexicana pudiera participar significativamente para desarrollar la energía nuclear de fusión y establecer mecanismos de colaboración internacional.³⁰

Para compartir sus experiencias en el campo de la cooperación internacional en la investigación de la fusión nuclear, se invitaron investigadores de muchos centros académicos internacionales de investigación en esta área, como por ejemplo, de la Universidad de California en los Ángeles en EUA, del EURATOM y Centro de Fusión Nuclear en Portugal, de la Asociación por la combustión de plasma en EUA y de la Universidad de Sao Paulo en Brasil.

Algunos temas relevantes que se expusieron fueron: “Revisión a la fusión y por qué la necesitamos”, “ITER y sus planes”, “Introducción a los aspectos de la tecnología de fusión nuclear”, “El programa brasileño de fusión”, “Efectos de algunas estabilidades del plasma sobre las cubiertas de la cámara de vacío de los equipos Tokamaks” y “Escenarios de Fisión-Fusión”.

³⁰ Towards a Mexican Fusion Programme, 21-22 June, 2007, Programme, 1 p.

6.2.4. El Tokamak “T” desarrollado por la UANL ³¹

En la Universidad Autónoma de Nuevo León ubicada en el Municipio de San Nicolás de los Garza, en el estado de Nuevo León, se desarrolla actualmente uno de los esfuerzos más importantes que se han dado en nuestro país por avanzar en la investigación de la energía nuclear de fusión.

El proyecto de desarrollo e investigación (R+D) Tokamak “T” fue aprobado por el Programa para el Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) de la Secretaría de Educación Pública (SEP), con la clave: UANLEXB- 156 en 2007 y actualmente se encuentra en la fase de desarrollo en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Su objetivo es consolidar un programa mexicano de energía de fusión mediante el desarrollo de un dispositivo Tokamak experimental y generar una propuesta tecnológica atractiva para los centros mexicanos de investigación con miras a participar activamente en el gran Tokamak internacional ITER. Así mismo, se pretende fomentar la comprensión, la innovación y el desarrollo científico y tecnológico de la tecnología de fusión nuclear; en especial, de la investigación de la fusión por confinamiento magnético de plasma.

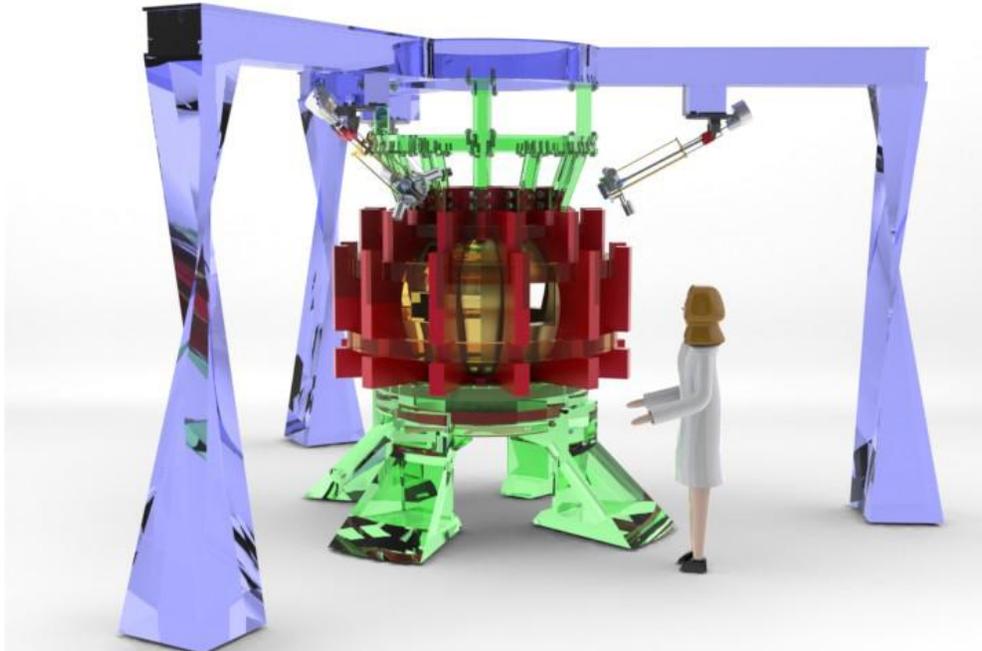
El Tokamak “T” es un sistema de confinamiento magnético de plasma tipo Tokamak esférico de baja potencia. De manera similar al ITER, tendrá una sección toroidal y bobinas toroidales en forma de “D”.

A continuación se muestra una imagen esquemática en 3D del diseño del Tokamak “T”:

³¹ Fuentes del subcapítulo:

- Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Mexican Design of a Tokamak Experimental Facility, FTP/P6-36

- Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Diseño de un Sistema Inyector de Cápsulas para Confinamiento Magnético, MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 23 al 25 DE SEPTIEMBRE, 2009 CD. OBREGON, SONORA. MEXICO, ISBN 978-607-95309-1-4, 2009



Fuente: Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Mexican Design of a Tokamak Experimental Facility, FTP/P6-36

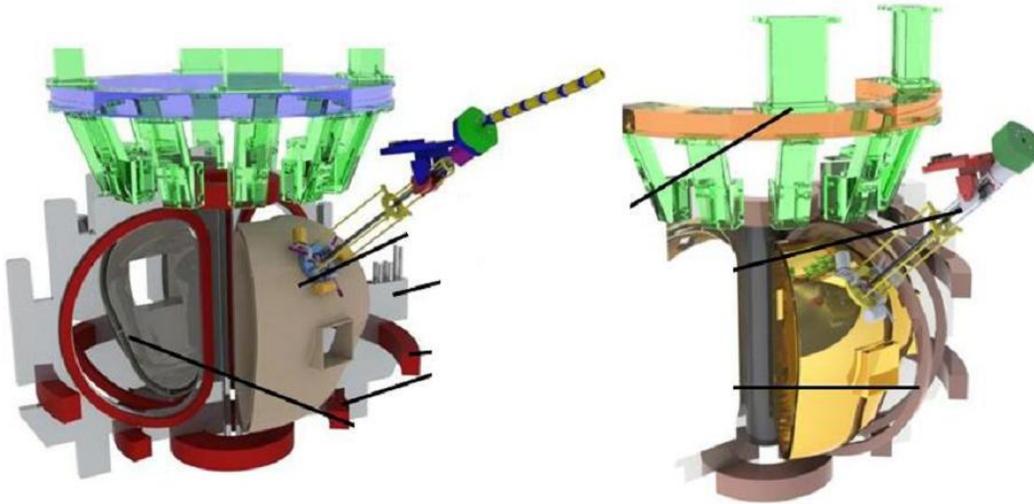
Figura 6.8. Vista esquemática en 3D del Tokamak "T", México (en proyecto)

Tendrá un solenoide central, 12 bobinas de campo toroidal, 6 bobinas de campo poloidal, 2 bobinas pequeñas para el divertor y de 10 a 12 bobinas de corrección. Generarán un campo magnético total de aproximadamente 1.6 T. El pulso de descarga de energía tendrá una duración de entre 300 ms y 1 s.

Se propuso una cámara de vacío hecha de acero inoxidable 304 LN con un volumen interior de 0.84 m^3 . Está diseñada para que su material pueda ser cambiado en el futuro. El diseño tiene tres ventanas de acceso para inyectar cápsulas de combustible congelado (hidrógeno o sus isótopos), localizadas a 120° cada una, mejorando con ello el esquema general de confinamiento. En la zona ecuatorial se instalarán sondas de diagnóstico.

Tendrá seis sectores toroidales y entre las paredes interior y exterior tendrá circulación de líquido refrigerante. El diseño de la cámara hace eficientes los campos magnéticos, en especial el vertical, permitiendo conservar la distancia interior del plasma.

La siguiente imagen muestra dos vistas esquemática 3D de la cámara de vacío del Tokamak "T":



Fuente: Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Mexican Design of a Tokamak Experimental Facility, FTP/P6-36

Figura 6.9. Dos vistas esquemáticas 3D de la cámara de vacío del Tokamak “T”, México (en proyecto)

La presión de vacío se generará por medio de tres bombas de difusión por ser muy económicas. Estarán localizadas a 120° simétricamente colocadas unas de las otras y cada una tendrá la capacidad de generar una presión de 1.33×10^{-4} pascales (Pa). La capacidad total de bombeo será de 0.04 a $0.045 \text{ m}^3/\text{s}$. Las bobinas y la cámara de vacío serán refrigeradas por un sistema de enfriamiento a base de aire y agua tratada.

El sistema de calentamiento de plasma será por calentamiento por resonancia de electrones de ciclotrón (ECRH) e inyección de átomos neutros energéticos (NBI). El Tokamak “T” tendrá un sistema divertor para descargar el flujo de energía de las partículas cargadas y eliminar impurezas resultantes en la operación. El divertor estará hecho de tungsteno y carbono para soportar altas temperaturas.

A continuación se muestran los parámetros técnicos principales del Tokamak “T” mexicano:

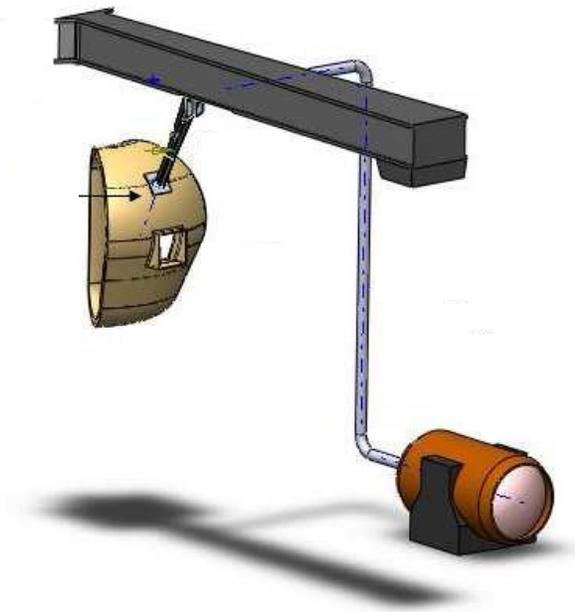
Parámetro	Magnitud
Radio Mayor R_o	0.41 m
Radio Menor a	0.185 m
Campo magnético Toroidal B_o	1.3 T
Corriente de plasma I_p	277 kA (max)
Duración del pulso	300 ms – 1 s
Relación de aspecto R/ a	2.2162
Factor de seguridad q	1.9552
Densidad electrónica n_e	$2 \times 10^{13} - 3 \times 10^{13}$ por cm^3
Temperatura electrónica T_e	~ 516 eV
Temperatura iónica T_i	~ 280 eV
Anchura de pared de cámara de vacío	7- 10 mm
Altura de cámara de vacío	1 m
Velocidad de inyección de cápsulas de hidrógeno	500 – 800 m/s
Sistema de calentamiento	Calentamiento Ohmico (OH) etapa, inyección de microondas y/o partículas neutras en las segunda etapa
Material de cámara de vacío	Acero inoxidable 304 LN
Secciones de cámara de vacío	6, con 3 ventanas superiores para la inyección de cápsulas solidificadas localizadas a 120° cada una, con placas de carbón intercambiables
Divertor	Diseñado con placas de carbón reemplazables
Estructura de soporte	Primera interna y secundaria externa, acero inoxidable 304 LN

Fuente: Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Mexican Design of a Tokamak Experimental Facility, FTP/P6-36

Cuadro 6.2. Parámetros técnicos principales del Tokamak “T” (en proyecto)

Adicionalmente, el Tokamak "T" estará equipado con un inyector neumático de cápsulas de combustible congelado (hidrógeno o sus isótopos) con ángulo seleccionable (SICIAV). Su principal característica funcional será su desplazamiento angular y articulado a lo largo del volumen toroidal del plasma. Con ello se podrá controlar la dirección y la velocidad de inserción de las cápsulas de combustible congelado dentro de la cámara de vacío, con el fin de controlar la densidad del plasma y sus características operativas.

Las cápsulas de combustible congelado inyectadas tendrán un diámetro de entre 3 y 4 milímetros y su velocidad de inserción variará entre 500 y 800 m/s. Este inyector de cápsulas fue presentado en el *Symposium de Tecnología de Fusión 2010*. A continuación se muestra una imagen del diseño del inyector de cápsulas de combustible:



Fuente: Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Diseño de un Sistema Inyector de Cápsulas para Confinamiento Magnético, MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 23 al 25 DE SEPTIEMBRE, 2009 CD. OBREGON, SONORA. MEXICO, ISBN 978-607-95309-1-4, 2009

Figura 6.10. Vista isométrica del inyector neumático de cápsulas de hidrógeno congelado con ángulo seleccionable (SICIAV) (en proyecto)

Mediante el Tokamak "T" mexicano se pretende desarrollar experimentos para la investigación de los siguientes aspectos del confinamiento magnético de plasma:

- a) Estabilidad del plasma (efectos del transporte turbulento y mecanismos propuestos para explicar las barreras de transporte en el borde)
- b) Los regímenes de confinamiento

- c) Las desviaciones en el campo de confinamiento asimétrico usual debido a esfuerzos producidos por la dinámica del plasma con perturbaciones del campo magnético resonante.

6.3. Conclusiones del Capítulo 6

Desde los años 70's del siglo pasado, se han llevado a cabo esfuerzos relativamente importantes en nuestro país para desarrollar la investigación en energía nuclear de fusión en los campos de la academia y la investigación teórica y experimental.

Existen iniciativas de cooperación multidisciplinar, tales como el diseño y construcción del Tokamak Novillo en el ININ, o el desarrollo y posible construcción del Tokamak "T" en la UANL, para dotar a las instituciones académicas nacionales de los equipos necesarios para realizar experimentos básicos de física de plasmas, tal y como lo hacen otras naciones que buscan sumarse a los esfuerzos internacionales por hacer de la energía nuclear de fusión una opción técnica y económicamente viable.

Sin embargo, como se desprende de este capítulo y del anterior, México se encuentra muy rezagado en la investigación de la tecnología de fusión nuclear con respecto, no sólo a los países desarrollados que están a la vanguardia en la investigación teórica y experimental en este tipo de energía, sino que también respecto a países menos desarrollados económica y socialmente como China, India y Brasil.

Es evidente que si las autoridades nacionales pretenden plantearse la energía nuclear de fusión como una opción técnica y económicamente viable para cubrir una parte importante de los requerimientos energéticos de México en el largo plazo, deben cuanto antes tomar las acciones necesarias para insertarlo más rápida y eficientemente en los esfuerzos de cooperación internacional para investigar este tipo de energía.

Capítulo 7. Propuesta de Plan Nacional de Fusión Nuclear (PLANAFUN)

7. Propuesta de Plan Nacional de Fusión Nuclear (PLANAFUN)

Como se analizó en el Capítulo 6, desde el año 1984, año en que se aprobó el pequeño Tokamak “Novillo”, se realizan en México esfuerzos por investigar y desarrollar la energía nuclear de fusión en nuestro país. Proyectos como el Tokamak “T” que planean desarrollar investigadores y estudiantes de la Universidad Autónoma de Nuevo León, analizado con detenimiento en el Capítulo 6, demuestran que en México no faltan personas comprometidas con el desarrollo en el mediano y largo plazo de esta tecnología.

Sin embargo, como se analizó en los Capítulos 5 y 6, México no sólo se encuentra muy atrasado en los recursos económicos, tecnológicos y humanos invertidos en la tecnología de fusión nuclear con respecto a países desarrollados como Estados Unidos, Japón o Inglaterra, sino que su rezago también es altísimo con respecto a países con indicadores económicos y sociales similares a los suyos como China, India y Brasil.

Por lo anterior, el objetivo del presente capítulo es proponer de manera general pero concreta, un Plan Nacional de Fusión Nuclear (que provisionalmente se nombrará PLANAFUN) que permita a nuestra nación, detener el atraso en el que se encuentra en esta tecnología y lograr en el mediano y largo plazo, insertarla de lleno en su investigación y desarrollo en beneficio de las siguientes generaciones.

El plan se basa en el estado de la investigación actual en México de la tecnología de fusión nuclear, analizado en el capítulo anterior, y, sobre todo, en las acciones concretas, analizadas en el Capítulo 5, que han llevado a cabo países económica y socialmente menos desarrollados que el nuestro para involucrarse de lleno en el desarrollo y en el intercambio internacional de conocimientos técnicos y científicos de esta fuente de energía.

7.1. Objetivos generales del PLANAFUN

Con base en lo analizado a lo largo de este trabajo, se plantean los siguientes objetivos generales del PLANAFUN:

- 1) Incrementar y acelerar, cuantitativa y cualitativamente, la investigación y el desarrollo técnico y científico de la energía nuclear de fusión en México durante las siguientes décadas.
- 2) Capacitar y formar los recursos humanos necesarios en las siguientes décadas para investigar, desarrollar, construir, operar y gestionar las centrales de generación eléctrica de fusión nuclear.
- 3) Participar activamente en los programas internacionales de investigación de la energía nuclear de fusión de manera concreta, integrada, útil y con beneficios para el país.

- 4) Obtener beneficios técnicos y económicos para un gran número de empresas establecidas en México, derivados de los desarrollos tecnológicos de la investigación nacional de la fusión nuclear.
- 5) Asegurar a largo plazo la cobertura de los requerimientos energéticos de México en función del crecimiento económico esperado, y considerando la declinación de reservas de hidrocarburos.
- 6) Limitar a largo plazo de manera importante la emisión de gases de efecto invernadero producidos por la generación de energía.

7.2. Vías Conservadora y Ambiciosa del PLANAFUN

Se proponen a continuación dos caminos para lograr los objetivos generales indicados en el subcapítulo anterior. Se propone en primer lugar una Vía Conservadora del PLANAFUN y, a continuación, una Vía Ambiciosa del PLANAFUN. Para cada vía se proponen en primer lugar objetivos específicos verificables y cuantificables y, posteriormente, líneas concretas de acción.

7.2.1. Vía Conservadora del PLANAFUN

7.2.1.1. Objetivos específicos de la Vía Conservadora del PLANAFUN

Se proponen los siguientes objetivos específicos para la Vía Conservadora del PLANAFUN, que sirvan como meta cuantificable y como medida verificable de éxito de los objetivos generales:

- 1) Contar en México con dos dispositivos experimentales Tokamak antes del año 2028.
- 2) Participar activamente en por lo menos cuatro líneas de investigación a nivel internacional antes del año 2030.
- 3) Lograr que por lo menos diez empresas nacionales participen en la financiación de la investigación de la energía nuclear de fusión antes del año 2030.
- 4) Contar con una planta generadora experimental de fusión nuclear con tecnología parcialmente de origen internacional para el año 2060.

7.2.1.2. Líneas de acción de la Vía Conservadora del PLANAFUN

Se proponen a continuación las siguientes líneas de acción que deberán seguir las instituciones públicas y privadas para cumplir con los objetivos específicos y generales de la Vía Conservadora del PLANAFUN. Están divididas en líneas de acción en Investigación, en Infraestructura, en Capacitación y en Financiamiento.

7.2.1.2.1. Líneas de acción en Investigación de la Vía Conservadora del PLANAFUN

1. Crear antes del año 2016 la Comisión Nacional de Fusión Nuclear, que dependa de la Secretaría de Energía, que coordine y dirija las acciones necesarias para cumplir con los objetivos del PLANAFUN y que aglutine y coordine a todos los órganos e instituciones nacionales que busquen realizar actividades de investigación, desarrollo e innovación de la energía nuclear de fusión.
2. Instituir un Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear, que dependa de la Comisión Nacional de Fusión Nuclear antes del año 2021.
3. Facilitar la apertura antes del año 2024 de por lo menos tres centros de investigación, estudio y desarrollo de física de plasmas y tecnología de fusión nuclear en las principales instituciones académicas de nuestro país, como por ejemplo:
 - Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México (ICN-UNAM)
 - Instituto Politécnico Nacional (IPN)
 - Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
 - Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)
 - Universidad de Guanajuato (UGTO)
 - Universidad de Guadalajara (UDG)
 - Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
4. Realizar convenios internacionales de cooperación, intercambio de conocimientos y capacitación antes del año 2026, entre los centros nacionales de investigación en fusión nuclear (mencionados en la línea de acción anterior) y cuando menos tres de las principales instituciones internacionales de investigación y desarrollo de tecnología de fusión nuclear, como por ejemplo ¹:
 - La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), Austria
 - El Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión (CIIF), Austria
 - El Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton (PPPL), EUA
 - La Agencia Japonesa de Energía Atómica (JAEA), Japón
 - La Universidad de Osaka, Japón

¹ Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA).

- La Universidad de Tokyo, Japón
 - El Centro Culham para la Fusión Nuclear (CCFE), UK
 - El Instituto Nacional de Ciencia de Fusión (NIFS), EUA
 - El Laboratorio Nacional de Fusión (CIEMAT), España
 - El Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (DENIM), España
 - El Instituto Kurchatov Rusia
 - El Instituto de Física de Plasma de Beijing, China
 - El Centro Bhabha de Investigación Atómica en Bombay, India
 - El Instituto Indio de Ciencia en Bangalore, India
 - El Instituto Saha de física nuclear en Calcuta, India
5. Participar activamente, antes del año 2030, en por lo menos cuatro líneas de investigación en el marco de programas internacionales, mediante la experimentación en los Tokamaks nacionales y/o mediante el procesamiento, análisis e interpretación de datos experimentales de alguno de los grandes dispositivos de confinamiento magnético del mundo, utilizando sistemas y equipos computacionales e informáticos establecidos en territorio nacional.
 6. Participar en por lo menos un programa de investigación en fusión internacional que consista en el procesamiento, análisis e interpretación de datos experimentales de alguno de los grandes dispositivos de confinamiento magnético del mundo, mediante sistemas y equipos computacionales e informáticos establecidos en territorio nacional, antes del año 2030.²
 7. Estudiar en los Tokamaks nacionales antes del año 2045 fenómenos relacionados con el control y comportamiento de plasma; en especial, los fenómenos que en la actualidad presentan dificultades especiales como las inestabilidades del plasma en los bordes, el calentamiento ohmico, la superconductividad de las bobinas y la activación del material de las paredes de las cámaras de vacío.

² Los equipos de tipo computacional e informático requeridos para el análisis e interpretación de datos experimentales provenientes de dispositivos de confinamiento magnético son mucho menos onerosos que éstos últimos, y colaborar con ellos en los programas internacionales de investigación experimental en fusión es una opción realista para países en vías de desarrollo como el nuestro.

7.2.1.2.2. Líneas de acción en Infraestructura de la Vía Conservadora del PLANAFUN

1. Edificar antes del año 2023 las instalaciones del Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear, por lo menos comparables con las existentes para centros dedicados al estudio de a energía de fusión en países como China, India y Brasil.
2. Importar del extranjero un Tokamak superconductor ya probado, montarlo en el Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear, y realizar las modernizaciones necesarias para su operación y uso para la investigación de física de plasmas, y para la capacitación y formación de investigadores nacionales de fusión nuclear, antes del año 2024.
3. Diseñar, desarrollar, construir y operar antes del año 2028 por lo menos un Tokamak de baja energía (posiblemente esférico), en el Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear, para su uso en la investigación de física de plasmas y para la capacitación y formación de investigadores nacionales de fusión nuclear.
4. Diseñar, desarrollar y construir antes del año 2030, un Centro de Procesamiento de Datos (CPD) destinado exclusivamente a la investigación experimental de cooperación internacional, y cuyo equipo informático tenga la capacidad suficiente para analizar e interpretar datos experimentales de los grandes dispositivos de confinamiento magnético del mundo.
5. Diseñar, desarrollar, construir y operar una planta generadora experimental de fusión nuclear de por lo menos 500 MW de capacidad, con diseño, tecnología y recursos humanos parcialmente nacionales y parcialmente extranjeros, antes del año 2060.

7.2.1.2.3. Líneas de acción en Capacitación de la Vía Conservadora del PLANAFUN

1. Crear la carrera de “Ingeniería Nuclear” antes del año 2018 en por lo menos tres de las instituciones académicas más importantes de nuestro país, como por ejemplo, de las indicadas en la línea de acción número 3 del Subcapítulo: 7.2.1.2.1.
2. Crear el posgrado en “Ingeniería de Fusión Nuclear” antes del año 2022 en por lo menos tres de las instituciones académicas más importantes de nuestro país, como por ejemplo, de las indicadas en la línea de acción número 3 del Subcapítulo: 7.2.1.2.1, que esté abierto para cualquier persona con estudios profesionales en el área físico-matemática e ingeniería.

3. Crear el posgrado en “Física de Plasmas” antes del año 2022 en por lo menos tres de las instituciones académicas más importantes de nuestro país, como por ejemplo, de las indicadas en la línea de acción número 3 del Subcapítulo: 7.2.1.2.1, que esté abierto para cualquier persona con estudios profesionales en el área físico-matemática e ingeniería.
4. Facilitar y promover antes del año 2030 la formación y capacitación de por lo menos cuatrocientos investigadores, académicos y técnicos de origen nacional, en las principales instituciones internacionales académicas y de investigación de tecnología de fusión nuclear como, por ejemplo, las indicadas en la línea de acción número 4 del Subcapítulo: 7.2.1.2.1.
5. Aprovechar ampliamente los dos Tokamaks nacionales (que operarán antes del año 2028) para capacitar, formar y adiestrar a los investigadores y a los recursos humanos necesarios para involucrar de lleno a México en los programas internacionales de investigación de la energía nuclear de fusión, antes del año 2045.

7.2.1.2.4. Líneas de acción en Financiamiento de la Vía Conservadora del PLANAFUN

Un parte importante del financiamiento requerido para la investigación en fusión nuclear que realizan algunos países en vías de desarrollo (por ejemplo, Corea del Sur), proviene de empresas privadas que buscan beneficiarse de los desarrollos e innovaciones tecnológicas que se deriven de la investigación y experimentación de esta fuente de energía.³

Con base en lo anterior, se propone que en México se financie el diseño, el desarrollo, la construcción y la operación de los dispositivos de experimentación en fusión, de forma parcial o total, por medio de empresas privadas que puedan beneficiarse con las innovaciones derivadas de estas actividades.

Las empresas candidatas para financiar parcial o totalmente la investigación nacional en fusión nuclear serán aquellas cuyas actividades principales estén relacionadas con los desarrollos técnicos necesarios para lograr la viabilidad de este tipo de energía, como, por ejemplo, los desarrollos en el campo de la superconductividad, la criogenia y la ciencia de materiales radiactivos.

Se presentan a continuación algunos ejemplos de empresas establecidas en México (nacionales o extranjeras) cuyas actividades están relacionadas con esos campos.

³ Herrera Velázquez, Julio, Estado actual de la fusión nuclear controlada y sus perspectivas, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Departamento De Física de Plasmas e Interacción de la Radiación con la Materia, La transición energética y las energías alternas, 4 de mayo de 2011, 42 p.

Empresas en México cuyas actividades se relacionan con la superconductividad:

- VIACON Conductores Monterrey
- 3M
- Burndy Products
- Condumex
- Condelmex
- General Cable
- Conductores y Cableado Estructurado
- Alcoa
- Demacables
- Armex
- Componentes y Ensamblajes de México
- Siemens
- General Electric
- ABB
- Chrysler
- General Motors
- Honda
- Nissan Toyota
- Volkswagen
- Ford
- Mastretta

Empresas en México cuyas actividades se relacionan con la criogenia:

- Praxair
- Infra
- Liquid Carbonic de México
- PEMEX
- Premium Engineering
- Packo
- Bajo Cero Tecnología Criogénica Industrial

- Indura
- Cahdez
- CarboGas de México
- Cold Jet Monterrey
- Especialistas en Hielo
- Hielo Seco Bajo Cero
- Ingeniería en Válvulas, INVAL
- Chaul Mart
- Uquifa México

Se proponen las siguientes líneas de acción en este rubro:

1. Lograr antes del año 2020, el financiamiento para el diseño, desarrollo, construcción y operación de los Tokamaks nacionales de al menos tres empresas privadas que, como las indicadas en este subcapítulo, puedan beneficiarse de las innovaciones técnicas derivadas de esas actividades.
2. Lograr antes del año 2025, el financiamiento para el diseño, desarrollo, construcción y operación de los Tokamaks nacionales de al menos cinco empresas privadas que, como las indicadas en este subcapítulo, puedan beneficiarse de las innovaciones técnicas derivadas de esas actividades.
3. Lograr antes del año 2030, el financiamiento para el diseño, desarrollo, construcción y operación de los Tokamaks nacionales de al menos diez empresas privadas que, como las indicadas en este subcapítulo, puedan beneficiarse de las innovaciones técnicas derivadas de de esas actividades.
4. Lograr la asignación de los recursos económicos públicos que falten (además de los privados) para la compra, la importación, el montaje y la operación de un Tokamak superconductor construido y probado en el extranjero, antes del año 2021.
5. Lograr la asignación de los recursos económicos públicos que falten (además de los privados) para el diseño, el desarrollo, la construcción y la operación de un Tokamak de baja energía antes del año 2023.

7.2.2. Vía Ambiciosa del PLANAFUN

7.2.2.1. Objetivos específicos de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN

Se proponen los siguientes objetivos específicos para la Vía Ambiciosa del PLANAFUN que sirvan como meta cuantificable y como medida verificable de éxito de los objetivos generales:

- 1) Contar en México con tres dispositivos experimentales Tokamak antes del año 2028.
- 2) Participar activamente en por lo menos seis líneas de investigación a nivel internacional antes del año 2030.
- 3) Lograr que por lo menos veinte empresas nacionales participen en la financiación de la investigación de la energía nuclear de fusión antes del año 2030.
- 4) Contar con una planta generadora experimental de fusión nuclear con tecnología parcialmente de origen internacional para el año 2050.

7.2.2.2. Líneas de acción de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN

Se proponen a continuación las siguientes líneas de acción que deberán seguir las instituciones públicas y privadas para cumplir con los objetivos específicos y generales de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN. Están divididas en líneas de acción en Investigación, en Infraestructura, en Capacitación y en Financiamiento.

7.2.2.2.1. Líneas de acción en Investigación de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN

1. Crear antes del año 2015 la Comisión Nacional de Fusión Nuclear, que dependa de la Secretaría de Energía, que coordine y dirija las acciones necesarias para cumplir con los objetivos del PLANAFUN y que aglutine y coordine a todos los órganos e instituciones nacionales que busquen realizar actividades de investigación, desarrollo e innovación de la energía nuclear de fusión.
2. Instituir un Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear, que dependa de la Comisión Nacional de Fusión Nuclear antes del año 2019.
3. Facilitar la apertura antes del año 2024 de por lo menos cinco centros de investigación, estudio y desarrollo de física de plasmas y tecnología de fusión nuclear en las principales instituciones académicas de nuestro país, como por ejemplo:
 - Instituto de Ciencias Nucleares de la Universidad Nacional Autónoma de México (ICN-UNAM)

- Instituto Politécnico Nacional (IPN)
 - Universidad Autónoma Metropolitana (UAM)
 - Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)
 - Universidad de Guanajuato (UGTO)
 - Universidad de Guadalajara (UDG)
 - Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
4. Realizar convenios internacionales de cooperación, intercambio de conocimientos y capacitación antes del año 2026, entre los centros nacionales de investigación en fusión nuclear (mencionados en la línea de acción anterior) y cuando menos cinco de las principales instituciones internacionales de investigación y desarrollo de tecnología de fusión nuclear, como por ejemplo ⁴:
- La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA), Austria
 - El Consejo Internacional de Investigaciones sobre la Fusión (CIIF), Austria
 - El Laboratorio de Física de Plasmas de Princeton (PPPL), EUA
 - La Agencia Japonesa de Energía Atómica (JAEA), Japón
 - La Universidad de Osaka, Japón
 - La Universidad de Tokyo, Japón
 - El Centro Culham para la Fusión Nuclear (CCFE), UK
 - El Instituto Nacional de Ciencia de Fusión (NIFS), EUA
 - El Laboratorio Nacional de Fusión (CIEMAT), España
 - El Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid (DENIM), España
 - El Instituto Kurchatov Rusia
 - El Instituto de Física de Plasma de Beijing, China
 - El Centro Bhabha de investigación atómica en Bombay, India
 - El Instituto Indio de Ciencia en Bangalore, India
 - El Instituto Saha de física nuclear en Calcutta, India

⁴ Fuente: Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA)

5. Participar activamente, antes del año 2030, en por lo menos seis líneas de investigación en el marco de programas internacionales, mediante la experimentación en los Tokamaks nacionales y/o mediante el procesamiento, análisis e interpretación de datos experimentales de alguno de los grandes dispositivos de confinamiento magnético del mundo, utilizando sistemas y equipos computacionales e informáticos establecidos en territorio nacional.
6. Participar en por lo menos tres programas de investigación en fusión internacional que consista en el procesamiento, análisis e interpretación de datos experimentales de grandes dispositivos de confinamiento magnético del mundo, mediante sistemas y equipos computacionales e informáticos establecidos en territorio nacional, antes del año 2030.
7. Estudiar en los Tokamaks nacionales antes del año 2040 fenómenos relacionados con el control y comportamiento de plasma; en especial, los fenómenos que en la actualidad presentan dificultades especiales como las inestabilidades del plasma en los bordes, el calentamiento ohmico, la superconductividad de las bobinas y la activación del material de las paredes de las cámaras de vacío.

7.2.2.2.2. Líneas de acción en Infraestructura de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN

1. Edificar antes del año 2021, las instalaciones del Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear, por lo menos comparables con las existentes para centros dedicados al estudio de a energía de fusión en países como China, India y Brasil.
2. Diseñar, desarrollar, construir y operar antes del año 2028, por lo menos tres Tokamaks: dos de baja energía, posiblemente esféricos, y al menos uno superconductor. Un Tokamak de baja energía se ubicaría en alguno de los centros de investigación, estudio y desarrollo de física de plasmas y tecnología de fusión nuclear de las instituciones académicas nacionales. El otro Tokamak de baja energía y el superconductor se ubicarían en el Centro Nacional de Investigación en Fusión Nuclear. Sus objetivos serían la investigación de física de plasmas y la capacitación y formación de investigadores nacionales de fusión nuclear
3. Diseñar, desarrollar y construir antes del año 2025, un Centro de Procesamiento de Datos (CPD) destinado exclusivamente a la investigación experimental de cooperación internacional, y cuyo equipo informático tenga la capacidad suficiente para analizar e interpretar datos experimentales de los grandes dispositivos de confinamiento magnético del mundo.

4. Diseñar, desarrollar, construir y operar una planta generadora experimental de fusión nuclear de por lo menos 500 MW de capacidad, con diseño, tecnología y recursos humanos nacionales antes del año 2050.

7.2.2.2.3. Líneas de acción en Capacitación de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN

1. Crear la carrera de “Ingeniería Nuclear” antes del año 2018 en por lo menos cinco de las instituciones académicas más importantes de nuestro país, como por ejemplo, de las indicadas en la línea de acción número 3 del Subcapítulo: 7.2.2.2.1.
2. Crear el posgrado en “Ingeniería de Fusión Nuclear” antes del año 2022 en por lo menos cinco de las instituciones académicas más importantes de nuestro país, como por ejemplo, de las indicadas en la línea de acción número 3 del Subcapítulo: 7.2.2.2.1, que esté abierto para cualquier persona con estudios profesionales en el área físico-matemática e ingeniería.
3. Crear el posgrado en “Física de Plasmas” antes del año 2022 en por lo menos cinco de las instituciones académicas más importantes de nuestro país, como por ejemplo, de las indicadas en la línea de acción número 3 del Subcapítulo: 7.2.2.2.1, que esté abierto para cualquier persona con estudios profesionales en el área físico-matemática e ingeniería.
4. Facilitar y promover antes del año 2030 la formación y capacitación de por lo menos ochocientos investigadores, académicos y técnicos de origen nacional en las principales instituciones internacionales académicas y de investigación de tecnología de fusión nuclear como, por ejemplo, las indicadas en la línea de acción número 4 del Subcapítulo: 7.2.2.2.1.
5. Aprovechar ampliamente los tres Tokamaks nacionales (que operarán antes del año 2028) para capacitar, formar y adiestrar a los investigadores y a los recursos humanos necesarios para involucrar de lleno a México en los programas internacionales de investigación de la energía nuclear de fusión, antes del año 2045.

7.2.2.2.4. Líneas de acción en Financiamiento de la Vía Ambiciosa del PLANAFUN

1. Lograr antes del año 2020, el financiamiento para el diseño, desarrollo, construcción y operación de los Tokamaks nacionales de al menos cinco empresas privadas que, como las indicadas en el Subcapítulo 7.2.1.2.4., puedan beneficiarse de las innovaciones técnicas derivadas de esas actividades.

2. Lograr antes del año 2025, el financiamiento para el diseño, desarrollo, construcción y operación de los Tokamaks nacionales de al menos diez empresas privadas que, como las indicadas en el Subcapítulo 7.2.1.2.4., puedan beneficiarse de las innovaciones técnicas derivadas de esas actividades.
3. Lograr antes del año 2030, el financiamiento para el diseño, desarrollo, construcción y operación de los Tokamaks nacionales de al menos veinte empresas privadas que como las indicadas en el Subcapítulo 7.2.1.2.4., puedan beneficiarse de las innovaciones técnicas derivadas de de esas actividades.
4. Lograr la asignación de los recursos económicos públicos que falten (además de los privados) para el diseño, el desarrollo, la construcción y la operación del primer Tokamak de baja energía antes del año 2018.
5. Lograr la asignación de los recursos económicos públicos que falten (además de los privados) para el diseño, el desarrollo, la construcción y la operación del segundo Tokamak de baja energía antes del año 2021.
6. Lograr la asignación de los recursos económicos públicos que falten (además de los privados) para el diseño, el desarrollo, la construcción y la operación de un Tokamak superconductor, antes del año 2023.

7.3. Conclusiones del Capítulo 7

Como se analizó en los Capítulos 3 y 4, la tecnología de energía nuclear de fusión es una opción realista para asegurar la cobertura de las necesidades energéticas de nuestro país hacia finales del presente siglo.

En el Capítulo 5 pudo comprobarse cómo, algunas naciones que tienen un desarrollo social y económico menor al de México (China, India y Brasil) tienen varias décadas asignando un porcentaje importante de sus recursos económicos, técnicos y humanos para investigar y desarrollar esta tecnología; de tal modo que, en la actualidad, se encuentran cooperando y aportando a nivel internacional para hacer de la tecnología de fusión nuclear una opción viable tecnológica y económicamente para cubrir las demandas futuras de energía a nivel mundial.

En el Capítulo 6 se pudo comprobar que nuestro país, se encuentra muy atrasado en el desarrollo e investigación de la energía nuclear de fusión con respecto, no sólo a las naciones que llevan la vanguardia en la investigación de esta tecnología, sino con los países analizados en el Capítulo 5, con los que compite en la actualidad para atraer inversiones en el ámbito internacional.

En el presente capítulo se ha propuesto un plan concreto para llevar a nuestro país en las próximas décadas a participar activamente en la carrera internacional por hacer técnicamente viable la energía nuclear de fusión y a beneficiarse de ello.

Se han propuesto objetivos generales que expresan las metas a lograr, objetivos específicos para medir el éxito del plan y líneas de acción concretas para alcanzar éstos, basadas en las experiencias previas de naciones comparables con la nuestra desde el punto de vista técnico, económico y social.

Finalmente, se ha propuesto de manera realista, asignar recursos económicos, públicos y privados, suficientes para solventar la infraestructura necesaria para alcanzar los objetivos planteados.

De este modo, se considera que es viable desde el punto de vista técnico, económico, social y humano - y urgente por lo analizado en el presente trabajo - no continuar aplazando las acciones que tarde o temprano se revelarán como indispensables para asegurar el abasto de la energía que México requerirá en el largo plazo.

Conclusiones generales

Conclusiones generales

El suministro de energía en México, como en todo el mundo, es un factor estratégico para garantizar el desarrollo social y económico de su población, en el presente y en los próximos años. Ésta es la razón principal por la que el Estado tiene la obligación de realizar en el presente las acciones necesarias para asegurar que el suministro de energía, para los diferentes sectores del país, esté garantizado en el futuro.

México puede considerarse un país afortunado en vista del acceso relativamente fácil y barato que ha tenido en toda su historia, a las fuentes de energía más importantes que la tecnología ha permitido aprovechar en cada época. Como se analizó en el Capítulo 1, existe una importante abundancia en nuestro país de recursos energéticos solares, eólicos, hidráulicos, geotermoeléctricos y, sobre todo, de combustibles fósiles.

El hallazgo en el territorio de nuestro país de enormes reservas petroleras, como Cantarell en los años 70's del siglo pasado, provocó en los dirigentes nacionales un engañoso optimismo que llevó a nuestro país, por un lado, mediante políticas energéticas irresponsables al despilfarro energético y, por otro, a una altísima dependencia económica y energética del petróleo.

La situación energética actual de México plantea a sus gobernantes retos importantes en el corto, mediano y largo plazo. Los principales retos del sector a corto plazo son: la cobertura total de electricidad, el ahorro energético y el aumento de la eficiencia energética de la infraestructura de generación. Como se analizó en el Capítulo 2, los retos más importantes del sector energético mexicano a largo plazo son: el aumento exponencial del consumo de energía, la declinación nacional y mundial de las reservas de combustibles fósiles y consiguiente aumento continuo de su precio, y el calentamiento global causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero producidos por su combustión.

Derivado de lo anterior, es obligación del estado mexicano tomar en cuenta desde hoy los factores anteriores para planificar a corto, mediano y largo plazo el sistema eléctrico nacional.

Dado el destino económico y técnico que actualmente se sabe tendrán los combustibles fósiles, es imposible que la generación eléctrica en México continúe dependiendo en su mayor parte de ellos, por lo que es prioritario anticipar, planificar y desarrollar las tecnologías y las fuentes de energía con las que se cubrirán las necesidades energéticas nacionales en el futuro.

En el Capítulo 3, se hizo un análisis detallado de la energía nuclear de fusión. Esta fuente de energía, aunque aún no es técnicamente viable y es muy poco conocida en nuestro país, ha tenido en el mundo un continuo desarrollo científico y técnico desde mediados del siglo pasado, de tal modo que, actualmente, se espera que dispositivos experimentales que se encuentran en desarrollo, como el ITER, demuestren la posibilidad técnica de obtener energía eléctrica a partir de ella y, sobre todo, demuestren las grandes ventajas y virtudes que tendría en comparación con el resto de las tecnologías actualmente utilizadas para la generación de energía eléctrica, incluyendo la energía nuclear de fisión.

Entre las ventajas proyectadas más relevantes que tendrá la energía nuclear de fusión están: generar energía con independencia de los combustibles fósiles, reservas prácticamente inagotables de sus combustibles, capacidad de instalar plantas con gran capacidad de generación y nula emisión de gases de efecto invernadero en su proceso de generación primario.

Por otra parte, en los Capítulos 2 y 4, se determinó que la o las tecnologías que cubrirían mayoritariamente las necesidades energéticas de nuestro país en el mediano y largo plazo, no deberían depender de los combustibles de origen fósil, dado el eminente agotamiento de sus reservas, ni podrían basarse en fuentes de energía renovables de naturaleza intermitente, como la solar o eólica, en razón de su baja disponibilidad y confiabilidad.

A raíz de lo anterior, se determinó, en el mismo Capítulo 4, que: "...de lograrse su viabilidad técnica y económica, la Energía Nuclear de Fusión sería una opción viable, sustentable, realista y atractiva para cubrir de manera mayoritaria los requerimientos de energía nacionales hacia finales de este siglo y durante los siguientes"¹

A pesar de esto, como se analizó en los Capítulos 5 y 6, México se encuentra muy rezagado en la investigación de la tecnología de fusión nuclear con respecto, no sólo a los países desarrollados que están a la vanguardia en la investigación teórica y experimental en este tipo de energía, sino que también respecto a países con un desarrollo económico y social similar al suyo como China, India y Brasil.

Estos países, con los que México compite de ordinario en el ámbito económico internacional, participan activamente desde hace décadas en el desarrollo y en la investigación de la energía nuclear de fusión, y, por ello, se encuentran actualmente trabajando a la par con las grandes economías en el desarrollo de esta tecnología.

¹ Subcapítulo 4.3.2 del presente trabajo

Como se analizó en el Capítulo 6, en México hay esfuerzos relevantes, aunque aislados, para detonar la investigación de la energía nuclear de fusión; sin embargo, es evidente el rezago nacional en el desarrollo de esta tecnología y en la cooperación técnica internacional para hacerla viable. Este retraso puede acarrearle a nuestro país costos económicos y ambientales importantes en el futuro, cuando el aprovechamiento de esta fuente de energía no sea una opción y sea de las pocas, o la única, técnica y ambientalmente sustentable, para la generación eléctrica a gran escala.

Finalmente, en el Capítulo 7, con base en las líneas de investigación técnica internacionales más exitosas, de la actual situación nacional en la investigación de la tecnología en cuestión y, sobre todo, en el éxito de los programas de investigación de China, India y Brasil, se presenta un plan concreto para llevar a nuestro país en las próximas décadas a participar y beneficiarse de la carrera internacional por hacer técnicamente viable esta fuente de energía.

Para cuantificar el éxito de este plan, se han propuesto objetivos específicos y líneas de acción concretas para alcanzarlos, en los ámbitos de Investigación, Infraestructura, Capacitación y Financiamiento.

Actualmente en México, la energía nuclear de fusión, incluso en los círculos especializados en fuentes de energía, es muy poco conocida y comprendida. Dado que su desarrollo ha durado muchas décadas, generalmente se le ve como una fuente de energía técnicamente inviable o que, en caso de llegar a serlo, su aprovechamiento aún estaría muy lejano en el tiempo. Esto ha provocado que los responsables de las políticas nacionales de desarrollo tecnológico y de energía, no consideren a esta tecnología como una opción viable para cubrir las necesidades energéticas de México en los próximos años.

Sin embargo, con base en todo lo analizado en este trabajo, es evidente que, a medida que las reservas internacionales de combustibles fósiles se agoten, la energía nuclear de fusión será una opción prioritaria para cubrir las necesidades mundiales de energía.

Si las proyecciones de los programas internacionales de investigación más importantes de energía de fusión, incluso las más pesimistas, se concretan, esta tecnología será técnica y económicamente viable en algún momento de las próximas décadas.

Es ineludible que las autoridades nacionales lleven a cabo cuanto antes, las acciones necesarias para desarrollar técnicamente en México la energía nuclear de fusión; sólo así, nuestro país podrá acceder a esta tecnología con recursos humanos capacitados, a precios suficientemente competitivos, y con desarrollos técnicos propios que ofrecer al mundo.

Bibliografía

Capítulo 1. La situación actual de los recursos energéticos en México

1. Balance Nacional de Energía, 2010, Subsecretaría de Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico, Dirección General de Planeación Energética, México, 2011
2. Energy Balances of OECD Countries y Energy Balance of Non-OECD Countries, edición 2010
3. Estrategia Nacional de Energía 2012 – 2026, Secretaría de Energía, Febrero de 2012
4. Estrategia Nacional de Energía, Secretaría de Energía, Febrero de 2010

Capítulo 2. Análisis del requerimiento de energía en México en el mediano y largo plazo y factores prioritarios para su planeación

1. Programa de Obras e Inversiones del Sector Eléctrico 2012-2026 (POISE 2012-2026), Subdirección de Programación, CFE
2. Gerardo Gil Valdivia y Susana Chacón Domínguez, La Crisis del Petróleo en México, Foro Consultivo Científico y Tecnológico, Abril 2008
3. Bullón Miró, Fernando. El Mundo ante el Cenit del Petróleo. Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN), enero, 2006
4. Indicadores de Operación y Financieros de Petróleos Mexicanos y sus Organismos Subsidiarios, Evaluación al primer semestre 2011, PEMEX
5. Hiriart Le Bert, Gerardo, Evaluación de la Energía Geotérmica en México , Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, México, DF, mayo de 2011 La energía eólica en México, Coordinación de Proyectos Termoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, 2012
6. Tellez Bastida, Alejandro. Nota Informativa: Propuesta de planta piloto solar fotovoltaica de *Irradia Energy*. Coordinación de Proyectos Termoeléctricos de la CFE, Noviembre de 2010
7. INE Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2006, SEMARNAT

Capítulo 3. La energía nuclear de fusión

1. Fontanet Saez, Joan, Simulación de plasmas de dispositivos de fusión por confinamiento magnético tipo tokamak y stellarator. Validación experimental y aplicación al estudio del Helic Flexible TJ-II, Univeritat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 5 de julio de 2001
2. Zambra, Marcelo, Importancia del Litio en el Futuro Proceso Comercial de la Fusión Nuclear: Informe, Gobierno de Chile, Comisión Chilena de Energía Nuclear, Santiago, 12 Agosto 2008

3. <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/hidrogeno>
4. <http://www.encyclopediadetareas.net/2010/09/deuterio-y-tritio.html>
5. Martinel Benito, Julio, Los Prometeos Modernos o El Esfuerzo para Controlar la Fusión Nuclear, Fondo de cultura económica, 2da edición, México, 1995
6. McCracken, Garry, Fusion: The energy of the Universe, ELSEVIER ACADEMIC PRESS, 2004
7. Meade, Dale, 50 years of fusión research, IOP Publishing and International Atomic Energy Agency, Nuclear Fusion, Nucl. Fusion 50 (2010) 014004 (14pp), 2010,
8. European Fusion Development Agreement, Fusión, la energía de las estrellas, Assoc. Euroatom – Consorzio RFX, 2003
9. Barrera López de Turiso, Eduardo, Arquitectura PXI Multiprocesadora para Adquisición y Procesado de Datos en Tiempo Real. Aplicación a Diagnósticos en Entornos de Fusión por Confinamiento Magnético, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2008
10. Perlado Martín, José Manuel, La fusión nuclear como fuente masiva de energía, Revista Ingeniería y territorio No. 90, 2010
11. Herrera Velázquez, J. Julio E., La Fusión Nuclear como Opción Energética para el Siglo XXI, Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, 2007
12. Perlado Martín, José Manuel, Proyección de la Fusión Nuclear: una Energía de Futuro, Instituto Fusión Nuclear (DENIM), E.T.S.I.I., Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Encuentro: Energía Nuclear para el siglo XXI, UIMP Santander 18-19 Julio 2007
13. Herrera Velázquez, Julio, Estado actual de la fusión nuclear controlada y sus perspectivas, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Departamento De Física de Plasmas e Interacción de la Radiación con la Materia, La transición energética y las energías alternas, 4 de mayo de 2011
14. http://www-fusion.ciemat.es/New_fusion/es/Fusion/Prensa/abc_02_08_2002.html
15. Summary of the ITER, Final Design Report, July 2001, Presented by the ITER Director, G A0 FDR 4 01-07-21 R 0.4

Capítulo 4. La energía nuclear de fusión como una opción viable para México

1. Velarde, Guillermo, LA ENERGÍA NUCLEAR, SEGURA, LIMPIA Y BARATA PARA CUMPLIR CON KYOTO, papeles FAES, fundación para el análisis y los estudios sociales, No 40, 05/03/2007
2. Universidad Politécnica de Madrid, Futuro de la energía nuclear, Industriales ETSII, UPM, 2008

3. Ongena, J. y Van Oost, G., Energy For Future Centuries Will Fusion Be An Inexhaustible, Safe And Clean Energy Source?, Laboratorium voor Plasmafysica - Laboratoire de Physique des Plasmas, Koninklijke Militaire School - Ecole Royale Militaire, Association"EURATOM - Belgian State"
4. Casanovas, José Baró y Lic. Echagüe Méndez de Vigo, Gonzalo, Origen y gestión de residuos radiactivos, Ilustre Colegio Oficial de Físicos, 3° Ed., julio 2000
5. Rao, K.R., Radioactive waste: The problem and its management, General Article, India
6. Smith, Chris Llewellyn, The Fast Track to Fusion Power, EURATOM/UKAEA Fusion Association Chairman Consultative Committee for Euratom on Fusion, UKAEA, Vilamoura 1 November 2004
7. Loarte, Alberto, Energía de Fusión La Energía del Siglo XXI o Cómo crear una Estrella en la Tierra, DG Research Comisión Europea, EFDA – Close Support Unit – Garching, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Charla Fusión Nuclear – Abril 2000

Capítulo 5. Acercamiento general a políticas actuales de energía nuclear de fusión en países con características técnicas, económicas y sociales similares a México

1. <http://www.creces.cl/new/index.asp?imat=%20%20%3E%20%209&tc=3&nc=5&art=1771>
2. http://www.acohidrogeno.org/index.php?option=com_content&view=article&id=55:atomica&catid=28:alternativas&Itemid=54
3. Sonnenblick Mark, Brazil's nuclear energy program is under fire but not defeated, Issue of EIR Volume 9, Number 5, February 9, 1982
4. Programa Nacional de Fusao Nuclear, Detalhamento Periodo 2006 – 2010, CBPF, INPE, IFUSP, Río de Janeiro, 25 de abril de 2006
5. Caldas I. L., Viana, R. L. y otros, Control of Chaotic Magnetic Fields in Tokamaks, Brazilian Journal of Physics, vol. 32, no. 4, December, 2002
6. Galvao, Ricardo M.O, Brazilian strategy to establish a Fusion Research Program, Brazilian Center for Research in Physics, UNAM, June 2007
7. G.O. Ludwig, E. Del Bosco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, Spherical Tokamak Development in Brazil, Brazilian Journal of Physics, vol. 33, no. 4, December, 2003
8. Interview: Dr. Yuanxi Wan, China's, Ambitious Path, To Fusion Power, EIR, Science & Technology
9. Yican Wu, Jiequiong Jiang, Fusion-Fission Hybrids Driven Research in China, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, 230031, China, School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230027, China

10. Center for China International Nuclear Fusion Energy Plan Established, People's Daily Online, October 15, 2008
11. Zaixin Li, Kaiming Feng, Activation analysis for the HCSB-DEMO reactor in China, Southwestern Institute of Physics, Chengdu, P.R. China
12. P.L. Kaw, The ITER INDIA Project, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12
13. Prof. D. Bora, ITER and India's contribution, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12
14. Prof. Y.C. Saxena, Fusion Devices in India, Institute for Plasma Research, Nuclear India, May-June 2006/ VOL. 39/ No. 11-12
15. Zykofsky, Uma, The potential for a nuclear fusion effort, India's Future, EIR, Volume 9, Number 5, February 9, 1982
16. Kakodkar, Anil, Indian Energy Scenario and Role of Fusion Energy, Presentation at "Monaco ITER International Fusion Energy Days", Monaco, November 23rd, 2010
17. R. Srinivasan, Role of Fusion Energy in India, Institute for Plasma Research, Bhat, Gandhinagar, INDIA, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9 (2010)

Capítulo 6. El desarrollo de la energía nuclear de fusión en México

1. <http://www.inin.gob.mx/plantillas/acercadeinin.cfm?clave=2>
2. La energía de las estrellas, Fuente de Energía, 2005 energía 5 (70) 16, FTE de México, 5 p.
3. Rubén Cota Meza y Ricardo García Rosas, La Investigación de Fusión en México, Revista Fusión Nuclear, Vol. V. núm. 1, Primer trimestre de 1988
4. J. Ramos S., J. de Urquijo C., Diseño del Tokamak Novillo, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Centro Nuclear, Salazar. Edo. De México, Revista Mexicana de Física 29 no. 4 (1983)
5. L. Meléndez, S.R. Barocio, MÉXICO ANTE LA NUEVA PANORAMICA MUNDIAL EN FUSION NUCLEAR CONTROLADA, Laboratorio de Física de Plasmas, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
6. Grupo de trabajo del Laboratorio de Física de Plasmas del ININ, ¿Qué se hace en un laboratorio de física de plasmas?, Revista Contacto Nuclear, Número 53
7. http://www.inin.gob.mx/principal_miniportal.cfm?cve_area=LFP&codigo_opc=600000000

8. Sociedad Mexicana de Física, LII Congreso Nacional de Física, XXIV Encuentro Nacional de Divulgación Científica, XV Congreso de la División de Fluidos y Plasmas, PROGRAMA Y RESÚMENES, Acapulco, Guerrero, (Hotel Acapulco Princess), del 26 al 30 de octubre de 2009
9. http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=219&Itemid=113
10. http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=56&Itemid=78
11. http://www.nucleares.unam.mx/icn2/index.php?option=com_content&view=article&id=325&Itemid=130
12. Towards a Mexican Fusion Programme, 21-22 June, 2007, Programme
13. Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Mexican Design of a Tokamak Experimental Facility, FTP/P6-36
14. Max Salvador Hernández, Omar Alejandro Muñoz Ovalle, Diseño de un Sistema Inyector de Cápsulas para Confinamiento Magnético, MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 23 al 25 DE SEPTIEMBRE, 2009 CD. OBREGON, SONORA. MEXICO, ISBN 978-607-95309-1-4, 2009

Capítulo 7. Propuesta de Plan Nacional de Fusión Nuclear (PLANAFUN)

1. Herrera Velázquez, Julio, Estado actual de la fusión nuclear controlada y sus perspectivas, Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM, Departamento De Física de Plasmas e Interacción de la Radiación con la Materia, La transición energética y las energías alternas, 4 de mayo de 2011