

DEL

FUEGO

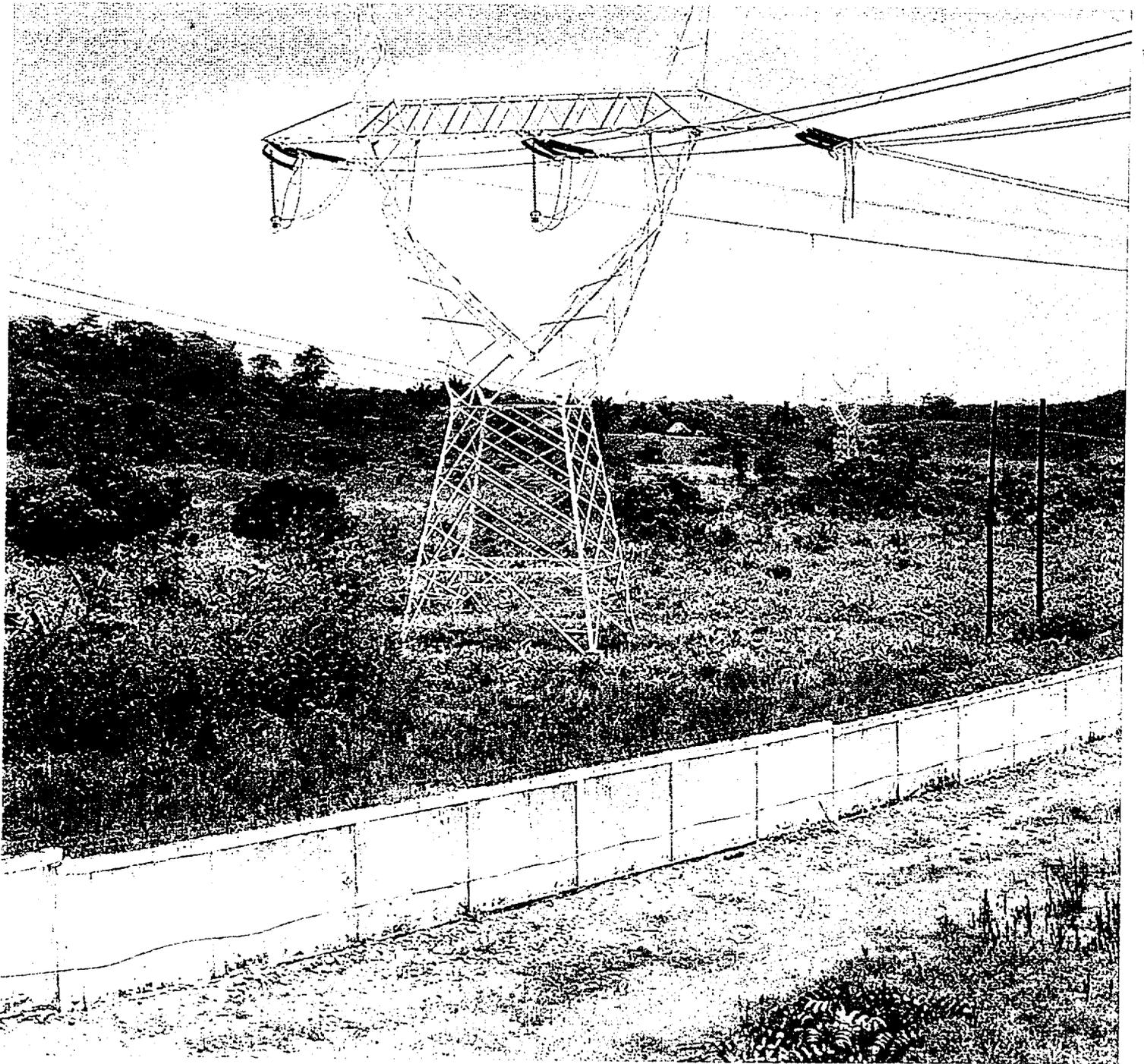
A LA

ENERGIA
NUCLEAR

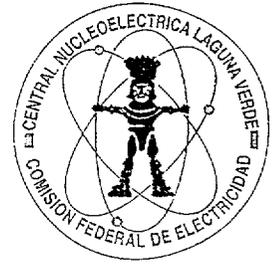


R11

***“Del fuego a la energía nuclear”
se terminó de imprimir en noviembre
de 1997, en los talleres de
Artes Gráficas Graphos, S.A. de C.V.
El tiraje fue de 80,000 ejemplares
más reposiciones.
Tercera reimpresión.***



Línea de transmisión.



COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

ENERGIA NUCLEAR



... y la energía eléctrica transformó la noche en día.

INDICE

	1. La energía y su importancia en la evolución de la humanidad	5
	2. Fuentes naturales y formas de energía	7
	Energía térmica o calórica	
	Energía mecánica	
	Energía eléctrica	
	3. La producción de energía eléctrica	11
	4. La energía nuclear	17
	5. Las centrales nucleoelectricas	24
	Combustible	
	Moderador	
	Refrigerante	
	Reactor de agua pesada a presión (PHWR o CANDU)	
	Reactor de agua a presión (PWR)	
	Reactor de agua hirviente (BWR)	
	Reactor enfriado por bióxido de carbono moderado por grafito (GCR)	
	Reactor rápido de cría enfriado por sodio (LMFBR)	
	6. Las radiaciones	33
	Radiaciones naturales	
	Radiaciones artificiales	
	7. La seguridad en las centrales nucleares	41
	El sitio	
	El diseño	
	Sistemas de control y garantía de calidad	
	Operación calificada y controlada	
	8. Los residuos radioactivos	48
	9. Las centrales nucleoelectricas en el mundo	51
	10. Los recursos energéticos de México y la generación de energía eléctrica	53
	Hidrocarburos	
	Energía hidráulica	
	Energía geotérmica	
	Carbón térmico	
	Uranio	
	Nuevas fuentes de energía	
	Perspectivas	
	11. Datos técnicos de la Central Nucleoelectrica de Laguna Verde	56

1.

La energía y su importancia en la evolución de la humanidad

Es más fácil explicar para qué sirve la energía que tratar de definir su esencia. Quizás esa sea la causa por la cual la definición más breve y común establezca que la energía es todo aquello capaz de producir o realizar algún trabajo, lo cual en última instancia no es sino la expresión de una relación física.

La evolución de la humanidad ha estado indisolublemente ligada a la utilización de la energía en sus distintas formas. Sin lugar a dudas, el descubrimiento del fuego, su producción y control marcan el primer acontecimiento importante en la historia de la sociedad, que al correr de los siglos, cada vez que el hombre ha encontrado una nueva fuente de energía o creado un procedimiento distinto para aprovecharla, ha experimentado grandes avances.

El aprovechamiento de la fuerza de tracción de los animales permitió el desarrollo de la agricultura; fue así como algunos pueblos nómadas se asentaron y establecieron las bases para el surgimiento de las antiguas culturas.



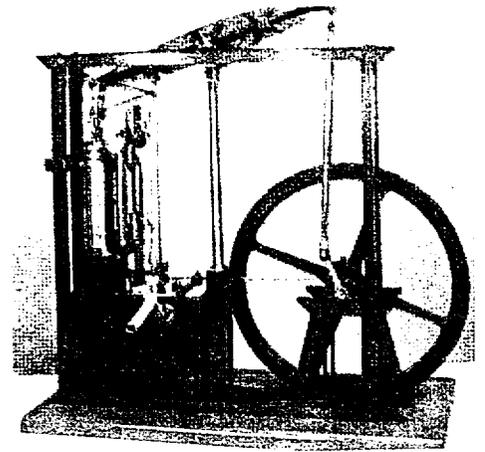
El descubrimiento del fuego es un acontecimiento fundamental en la historia del hombre.

La utilización de la energía del viento mediante la invención de la vela dio un fuerte impulso a la navegación, al comercio y al intercambio de ideas y conocimientos entre los pueblos de la antigüedad.

El empleo de la energía cinética de las corrientes de agua, gracias a la rueda hidráulica, liberó al hombre de cantidad de tareas que requerían gran esfuerzo físico y dio lugar a la creación de los primeros talleres y fábricas, remotos antecedentes de las modernas plantas industriales.

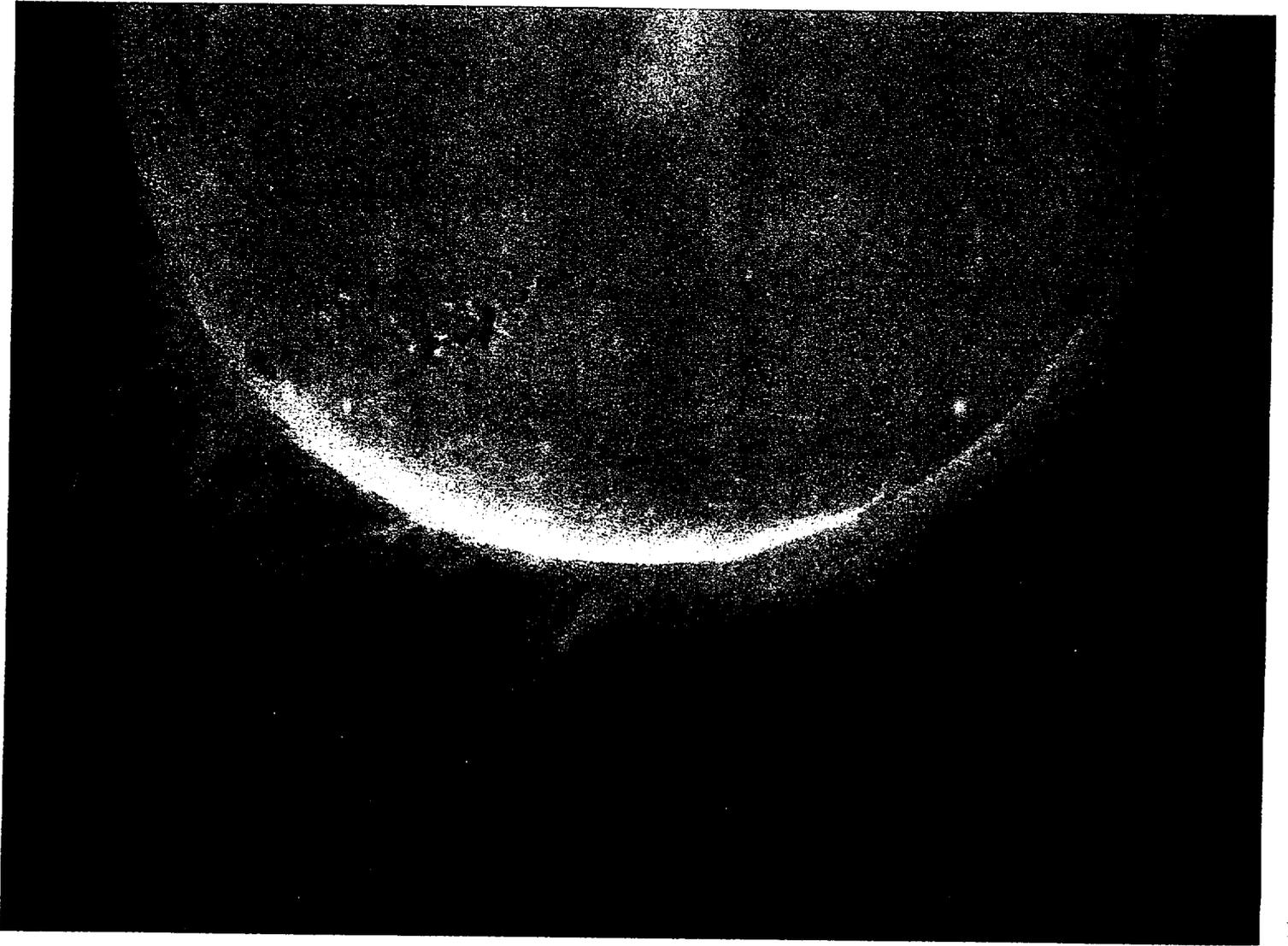
La invención de la máquina de vapor propició la transición del trabajo artesanal a la producción masiva y dio origen a una verdadera revolución social y económica a fines del siglo XVIII y principios del XIX.

Asimismo, los enormes avances de nuestra época han sido posibles, fundamentalmente, debido al uso de la energía eléctrica, al aprovechamiento del petróleo y, más recientemente, al empleo de la energía nuclear.



Los inventos de James Watt contribuyeron al desarrollo de la revolución industrial. En la foto puede apreciarse el motor de doble acción.

6
El sol es la fuente más importante de energía térmica.



2.

Fuentes naturales y formas de energía

Energía térmica y calorífica

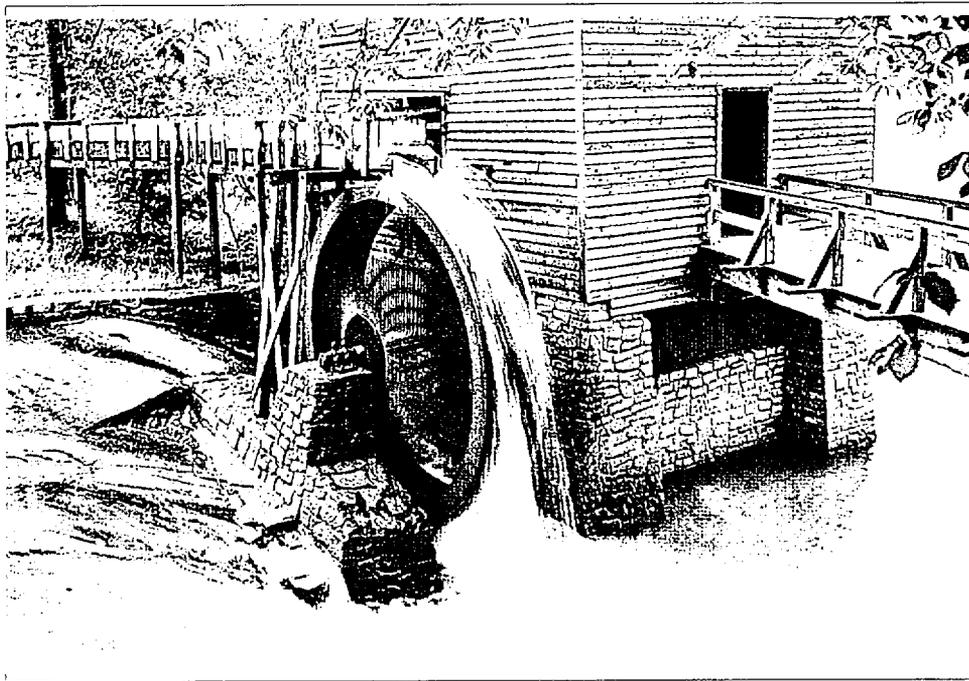
Desde luego, la fuente más importante de este tipo de energía es el Sol. Si todos los combustibles disponibles se quemaran para proporcionar a la Tierra el calor que diariamente recibe de este astro, en unos cuantos días se agotarían todas nuestras reservas.

Los hidrocarburos y el carbón, que en última instancia son producto de la energía solar, siguen al Sol en orden de importancia como fuentes de energía térmica, que liberan calor al quemarse.

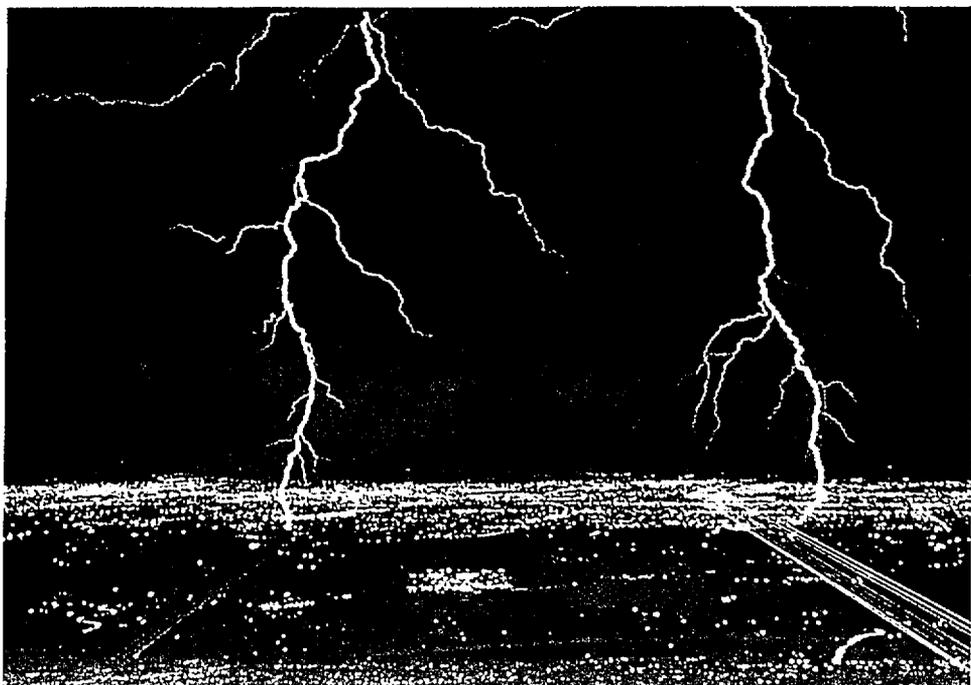
A pesar de que de dichos combustibles, ha sido el carbón el primero que fue empleado por el hombre, son el petróleo y el gas natural los que actualmente se encuentran en vías de desaparecer, debido a su explotación exhaustiva. Las reservas detectadas apenas garantizan su disponibilidad hasta los primeros lustros del siglo XXI de

acuerdo con las tasas actuales de incremento en su consumo.

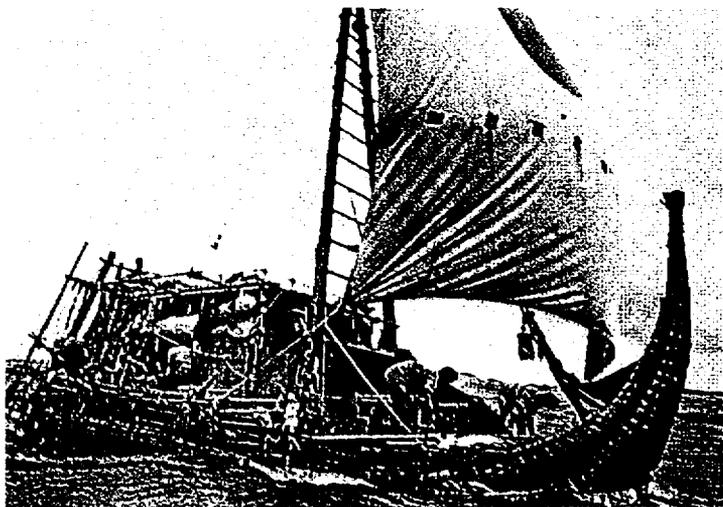
La más moderna fuente de energía térmica es el núcleo del átomo. A principios de este siglo Albert Einstein postuló que todo el Universo es energía; que la energía y la materia son la misma cosa; que entre ambas existe una relación definida que puede expresarse en la fórmula $E=mc^2$ (en la que E es igual a la energía; m a la masa, y c, a la velocidad de la luz). Un numeroso y selecto grupo de hombres de ciencia llevó a cabo los experimentos que culminaron con la fisión o ruptura de los núcleos de átomo de uranio 235, reacción en la que una pequeña parte de la materia se transforma en energía térmica, corroborando así las teorías de Einstein. Gracias a esta propiedad, el hombre dispone hoy de una fuente importante de energía, que le permitirá a corto plazo sustituir y complementar a las otras fuentes.



Esta rueda hidráulica ejemplifica el empleo de la energía cinética de las corrientes de agua.



La energía eléctrica también proviene de la naturaleza; sus manifestaciones más espectaculares tienen lugar durante las tormentas. Desgraciadamente no es aprovechable como fuente natural y es necesario producirla utilizando otras fuentes de energía



El hombre se apropió de la energía del viento para surcar los mares.

Energía mecánica

Para explicarla de manera simple, diremos que la energía mecánica es aquella que poseen los cuerpos en movimiento. Su fuente natural por excelencia es la fuerza de gravedad o atracción terrestre, que hace que cualquier objeto colocado por encima de cierto nivel de referencia, posea energía mecánica potencial, que se manifiesta en el momento de soltar el objeto, mediante el movimiento mismo.

El hombre ha aprovechado este fenómeno desde hace siglos, deteniendo en represas las corrientes de agua para acumular energía. El agua así almacenada es posteriormente liberada y conducida hacia las aspas de una rueda; la corriente hace girar la rueda y se obtiene así energía mecánica utilizable.

Otra fuente natural de energía mecánica es el viento que, independientemente de su empleo en la navegación a vela, se ha utilizado desde hace mucho para mover los molinos de viento.

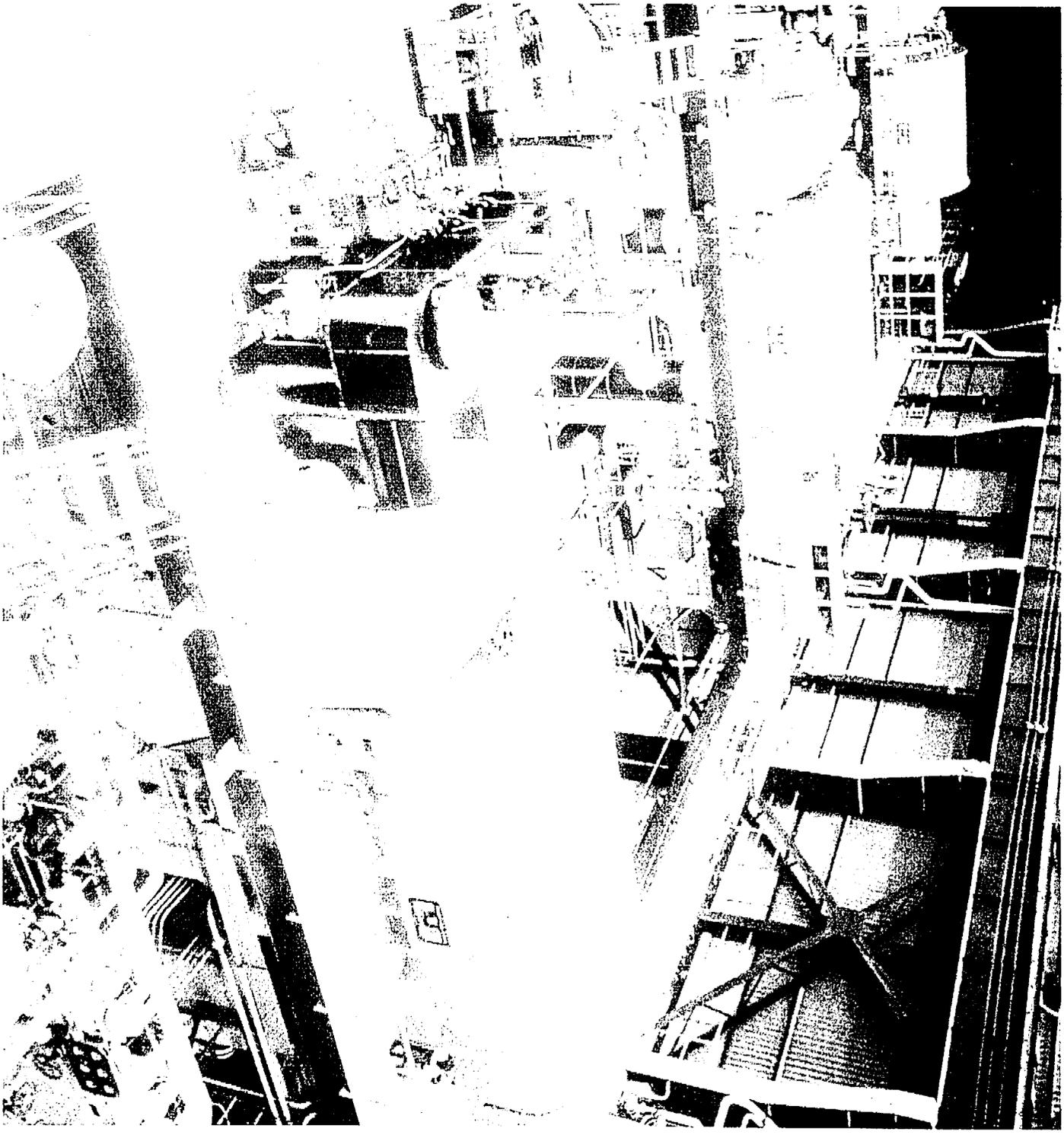
El mar también es una fuente importante de energía mecánica. El movimiento de las aguas es consecuencia de la fuerza de gravedad cuando se producen las mareas y del viento cuando se trata del oleaje.

Energía eléctrica

Esta importante forma de energía también proviene de la naturaleza y sus manifestaciones más espectaculares comunes son las descargas atmosféricas conocidas como rayos. Desafortunadamente, no es posible aprovechar éstos como fuente natural y es necesario emplear ciertos dispositivos para producirla a partir de otras fuentes.



Los molinos de viento representan una de las expresiones más antiguas del aprovechamiento de las fuentes naturales de energía.



Sala de turbogeneradores de una central termoeléctrica.

3.

La producción de energía eléctrica

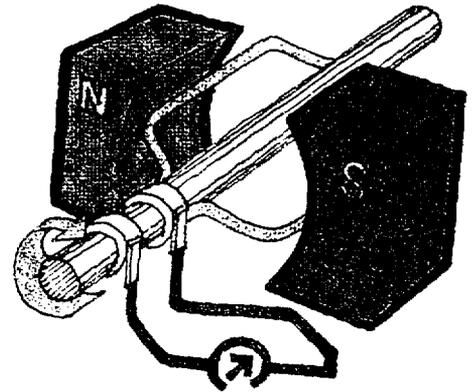
Gracias a que la producción de esta forma de energía es relativamente simple, el hombre ha contado con ella desde fines del siglo pasado. En efecto, se puede obtener energía eléctrica con sólo mover una serie de espiras de cobre (bobina) en el seno del campo magnético producido por un imán. En las terminales de la bobina se generará un voltaje. Si conectamos un foco a ellas, veremos que su filamento se torna incandescente debido al paso de una corriente de electrones.

El conjunto que forman el campo magnético y la bobina se denomina generador y no es otra cosa que una máquina que transforma la energía mecánica, utilizada para mover la bobina, en electricidad.

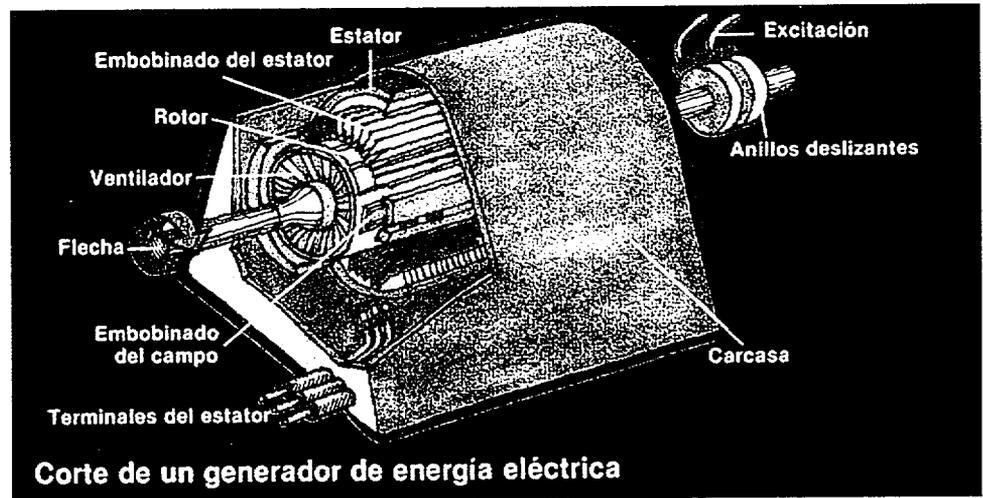
De acuerdo con lo anterior, para producir energía eléctrica es necesario disponer de un generador y de suficiente energía mecánica para moverlo, de donde se desprende que la energía eléctrica no es más que energía mecánica transformada.

Basándose en este principio, desde hace tiempo el hombre ha podido

obtener gran parte de la electricidad que requiere empleando el agua almacenada en grandes presas para mover ruedas provistas de aspas, llamadas turbinas hidráulicas, las cuales a su vez dan movimiento a los generadores. Las centrales de este tipo se conocen como centrales hidroeléctricas y en nuestro país suministran aproximadamente el 35% de la energía eléctrica que se consume.



Esquema de un generador de energía eléctrica



Corte de un generador de energía eléctrica

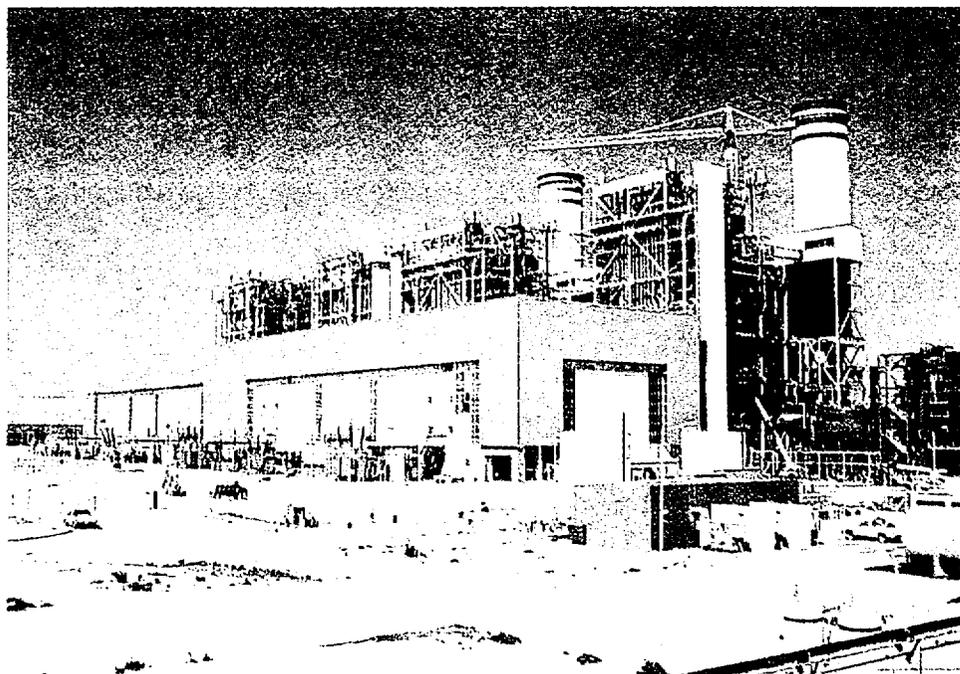
El descubrimiento de que el vapor de agua podía mover también una rueda de aspas, incrementó de manera decisiva las posibilidades de generar energía eléctrica, sin más límite que el de la disponibilidad de la energía térmica necesaria para la producción de vapor. En 1996 las centrales termoeléctricas suministraron alrededor del 55% de la electricidad que se consumió en el país.

El vapor se produce en grandes recintos cerrados denominados calderas, cuyas paredes, pisos y techos se encuentran cubiertos por tubos llenos de agua. En el interior del recinto se quema algún combustible, y el calor que se desprende hace hervir el agua en el interior de los tubos, produciéndose el vapor que mueve a la turbina y que posteriormente es condensado y regresado a la caldera.

Existen dos tipos de centrales termoeléctricas: las que utilizan carbón mineral, y aquellas que consumen gas natural o petróleo.

En nuestro país se han empleado casi exclusivamente las del segundo tipo por ser el petróleo y el gas los combustibles más abundantes; sin embargo, nuestras reducidas reservas carboníferas, ya están siendo utilizadas en dos centrales carboeléctricas y ubicadas al norte del estado de Coahuila.

En algunas regiones es posible obtener vapor directamente del subsuelo, gracias al contacto del agua subterránea con capas calientes de la corteza terrestre. Las centrales de esta clase reciben el nombre de geotérmicas. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) tiene instaladas una central en Cerro Prieto, Baja California y otras en Los Azufres, Michoacán y los Hume-



Central Termoeléctrica

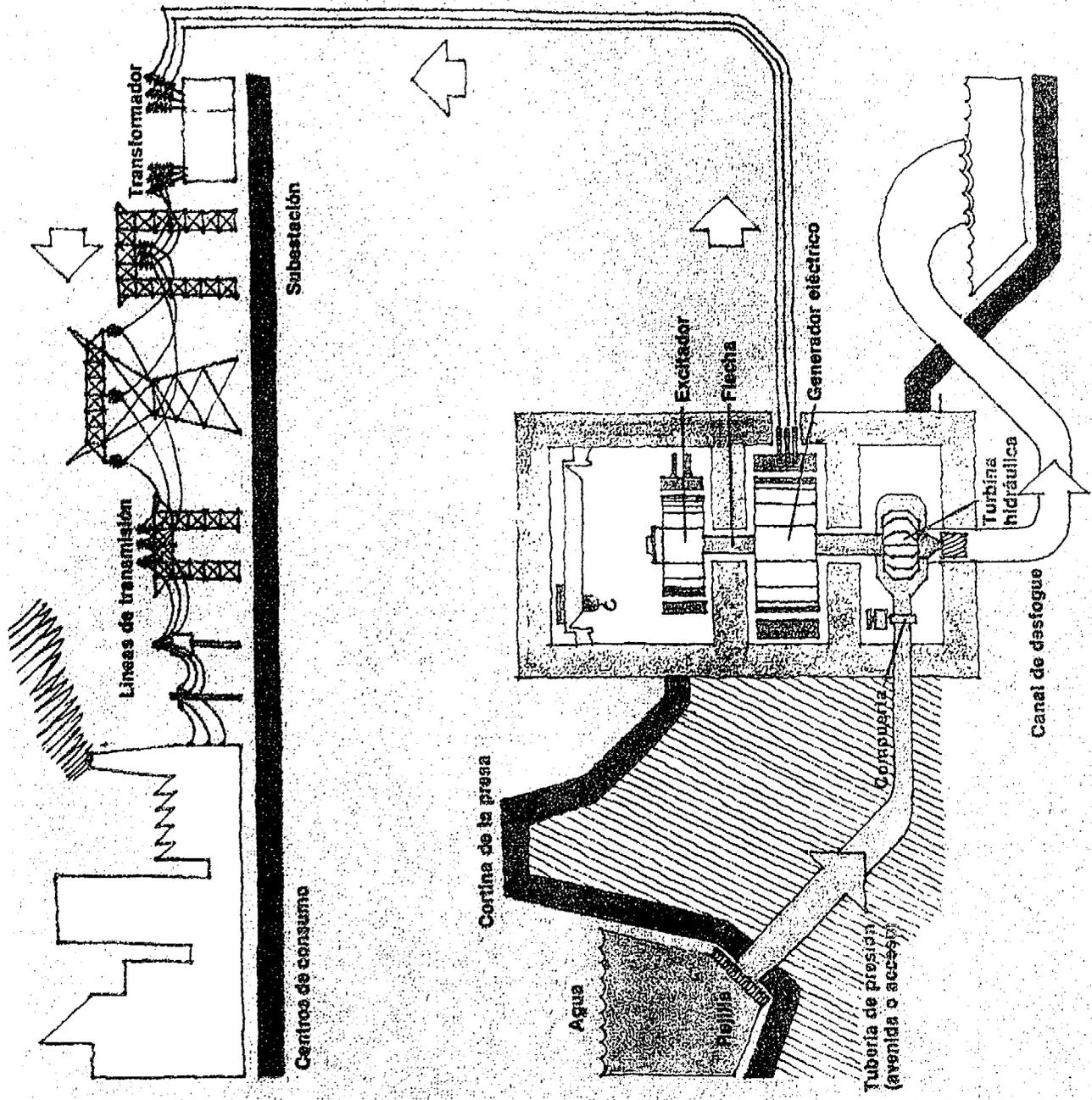


Diagrama de una central hidroeléctrica

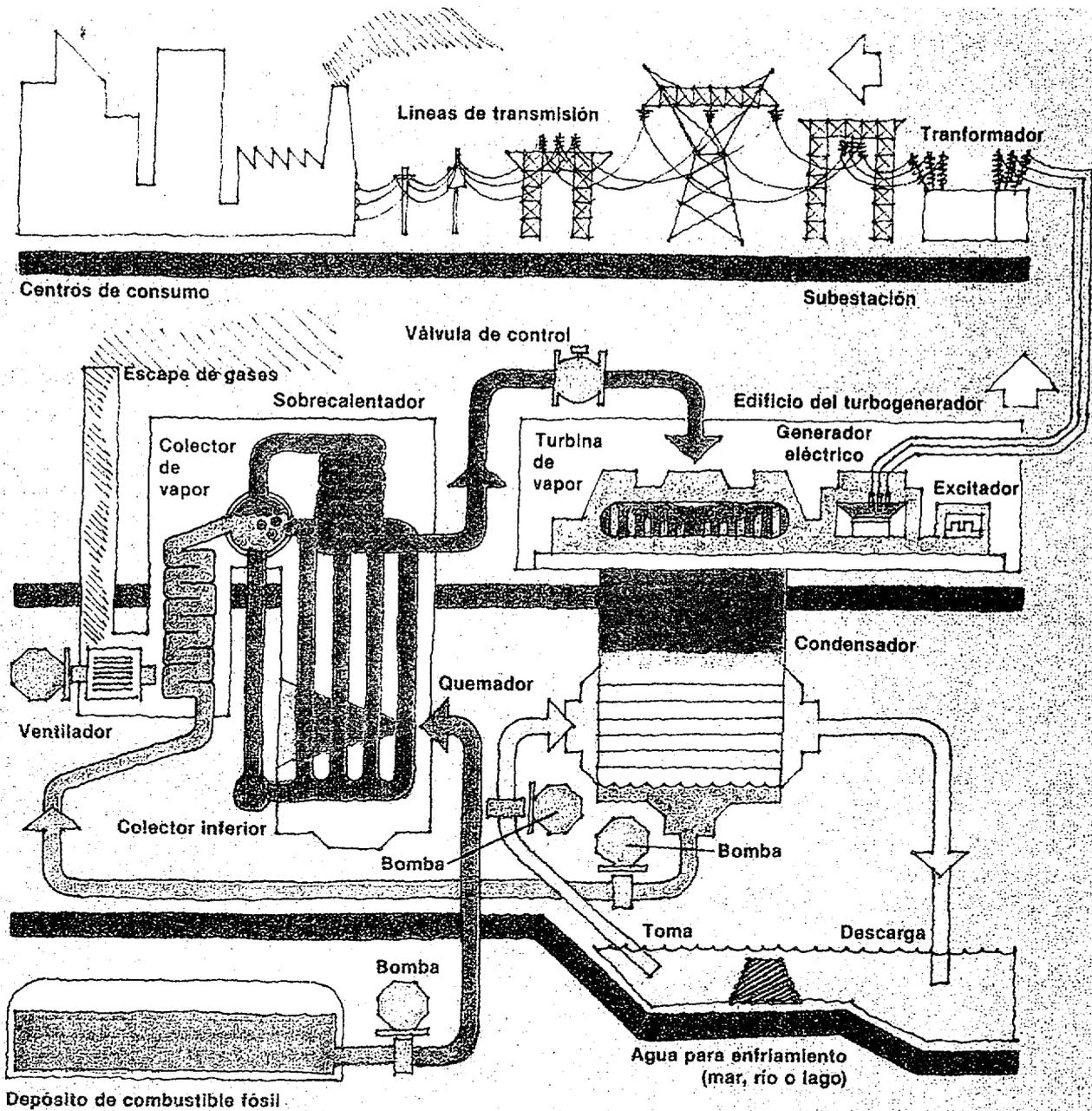


Diagrama de una central termoelectrica

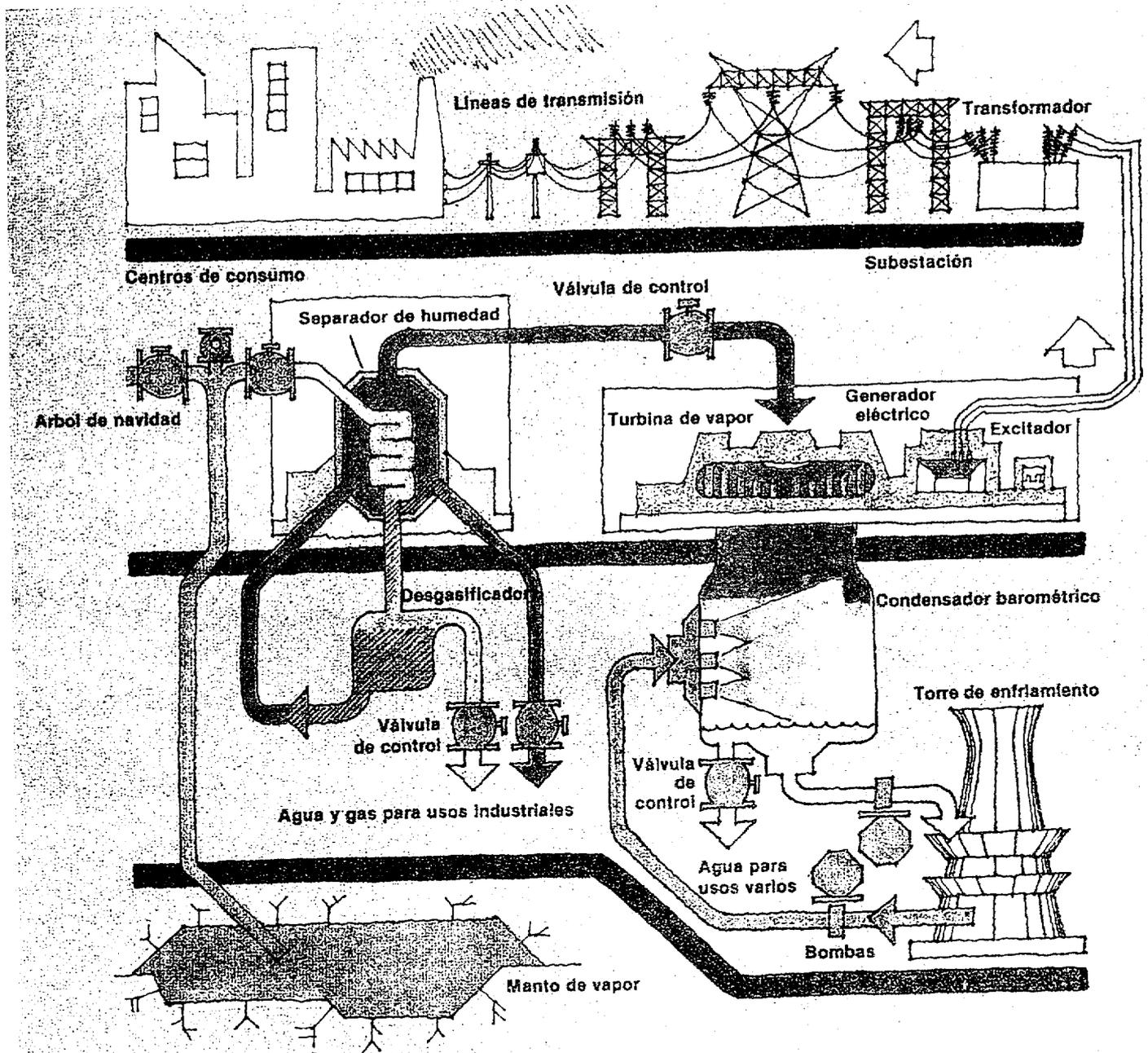
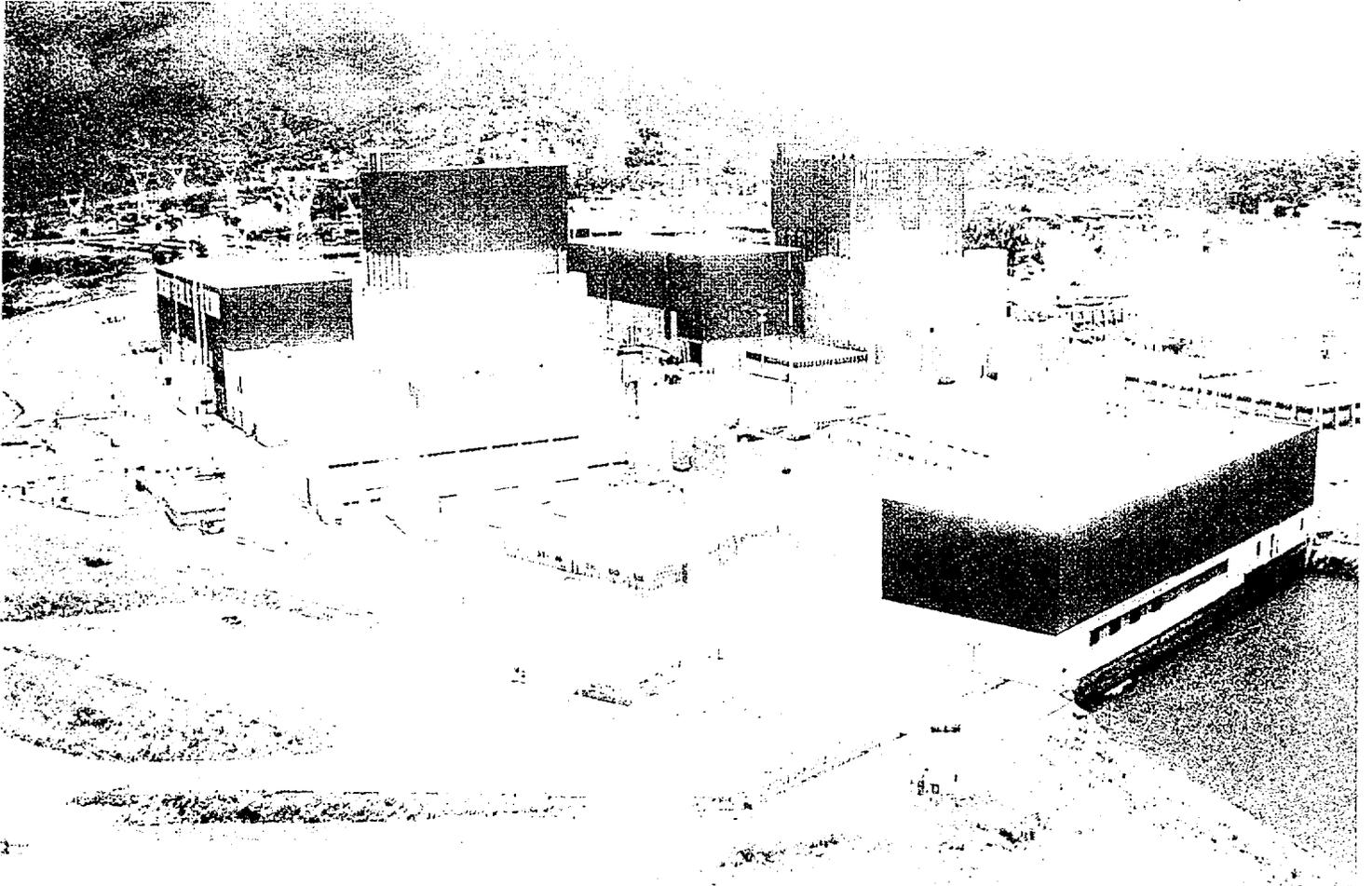


Diagrama de una central geotérmica

ros, Puebla. Se tienen también localizados y en estudio muchos otros sitios, algunos de los cuales pudieran ser susceptibles de explotación.

Como se mencionó al hablar de las fuentes de energía térmica, el procedimiento más reciente para producir grandes cantidades de energía, consiste en partir o fisiónar núcleos de un

tipo de uranio que tiene 235 partículas en su núcleo, llamado uranio 235. Ello abre la posibilidad de, junto con las otras fuentes, satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica, a pesar del inminente agotamiento del petróleo y el gas natural. Laguna Verde es la primera central nuclear construida en nuestro país.



Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde

4.

La energía nuclear

Toda la materia del Universo está formada por moléculas que a su vez están constituidas por átomos, pequeñísimas unidades que durante mucho tiempo se consideraron indivisibles. En la actualidad sabemos que el átomo está constituido fundamentalmente, por un núcleo compuesto de protones y neutrones y por electrones que giran alrededor de éste.

El protón y el neutrón tienen prácticamente la misma masa, pero se diferencian en que el primero posee una carga eléctrica positiva (+), mientras que el segundo carece de carga. Protones y neutrones fuertemente unidos entre sí, integran lo que se denomina el núcleo del átomo, cuya masa es casi igual a la suma de las masas de los protones y neutrones que lo componen. La carga eléctrica total del núcleo es positiva y es igual a la suma de las cargas de sus protones.

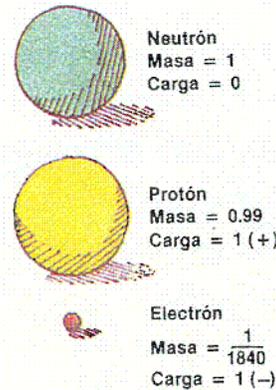
El tercer tipo de partícula del átomo es el electrón, el cual, aunque es 1840 veces más ligero que el protón, posee una carga eléctrica negativa (-) equivalente a la de éste.

Los electrones se localizan girando alrededor del núcleo, formando lo que pudiéramos llamar una "nube". La cantidad de electrones de un átomo es igual al número de protones que contiene el núcleo, razón por la cual sus cargas eléctricas se encuentran balanceadas.

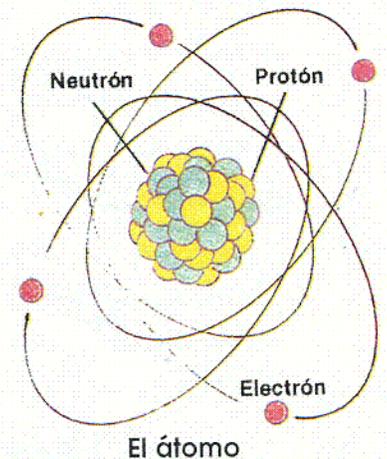
Un enorme vacío separa a los electrones del núcleo atómico. Esto podemos explicarlo recurriendo a la analogía entre el átomo de hidrógeno (el más simple que existe, pues sólo está formado por un protón y un electrón) y nuestro Sistema Solar. Si pudiéramos amplificar el protón que constituye el núcleo de este átomo al tamaño del Sol, su único electrón se encontraría girando a una distancia 30 veces mayor que la que existe entre este astro y la Tierra.

El número de protones que contiene el núcleo de un átomo se denomina número atómico y es igual al número de electrones orbitales.

La suma del número de protones y el de neutrones se conoce como número de masa. Este número proporciona una idea aproximada de la masa del átomo.



Comparación entre el neutrón, el protón y el electrón



COI



Los experimentos de Madame Curie permitieron entender cómo los elementos radiactivos se transforman en otros, debido a la desintegración espontánea.

mo, ya que las masas de ambas partículas son aproximadamente iguales y la masa de los electrones es comparativamente despreciable.

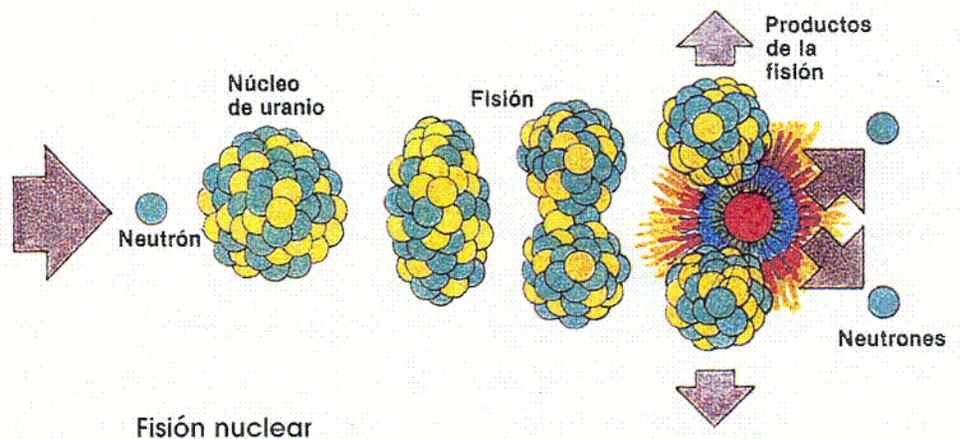
En la naturaleza existen 272 átomos estables con distintos números de masa que dan lugar a los 103 elementos plenamente identificados. Cada elemento está formado por átomos del mismo número atómico, pero que pueden tener diferente número de masa. Estos átomos de un mismo elemento reciben el nombre de isótopos. Así, el elemento uranio, con número atómico 92, por ejemplo, tiene fundamentalmente dos isótopos, cuyos números de masa son 235 y 238.

Los experimentos sobre la radioactividad de ciertos elementos como el uranio, el polonio y el radio, llevados a cabo a fines del siglo pasado por Henri Becquerel y por Pierre y Marie Curie, condujeron en 1902 al descubrimiento del fenómeno de la transmutación de un átomo en otro diferente, a partir de una desintegración espontánea que ocurría con gran desprendimiento de energía.

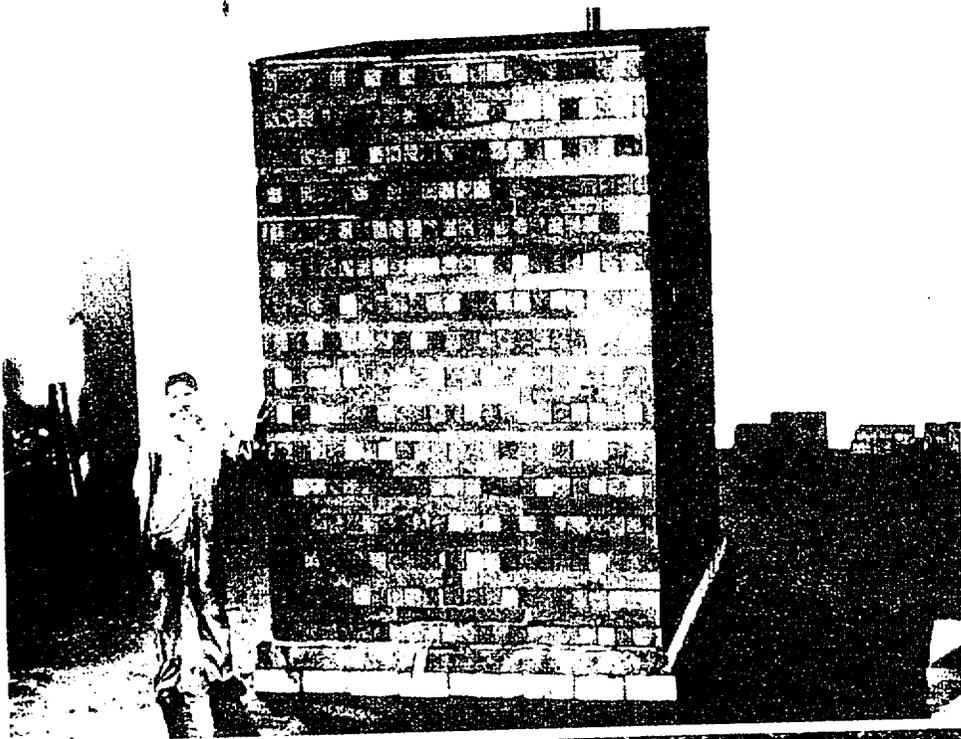
Poco después, en 1905, los estudios de Einstein explicaron que dicho desprendimiento de energía era el resultado de la transformación de pequeñas cantidades de masa de acuerdo con la equivalencia $E = mc^2$ (Energía es igual a la masa multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz).

Ambos hechos condujeron a la conclusión de que si se lograba desintegrar a voluntad los átomos de algunos elementos, seguramente se podrían obtener cantidades fabulosas de energía. En 1938 Otto Hahn, Fritz Strassman y Lise Meitner pudieron comprobar el fenómeno de la fisión nuclear, bombardeando con neutrones núcleos del isótopo de uranio 235. En esta reacción cada núcleo se parte en dos núcleos de masa inferiores, emite radiaciones, libera energía que se manifiesta en forma térmica y emite dos o tres nuevos neutrones.

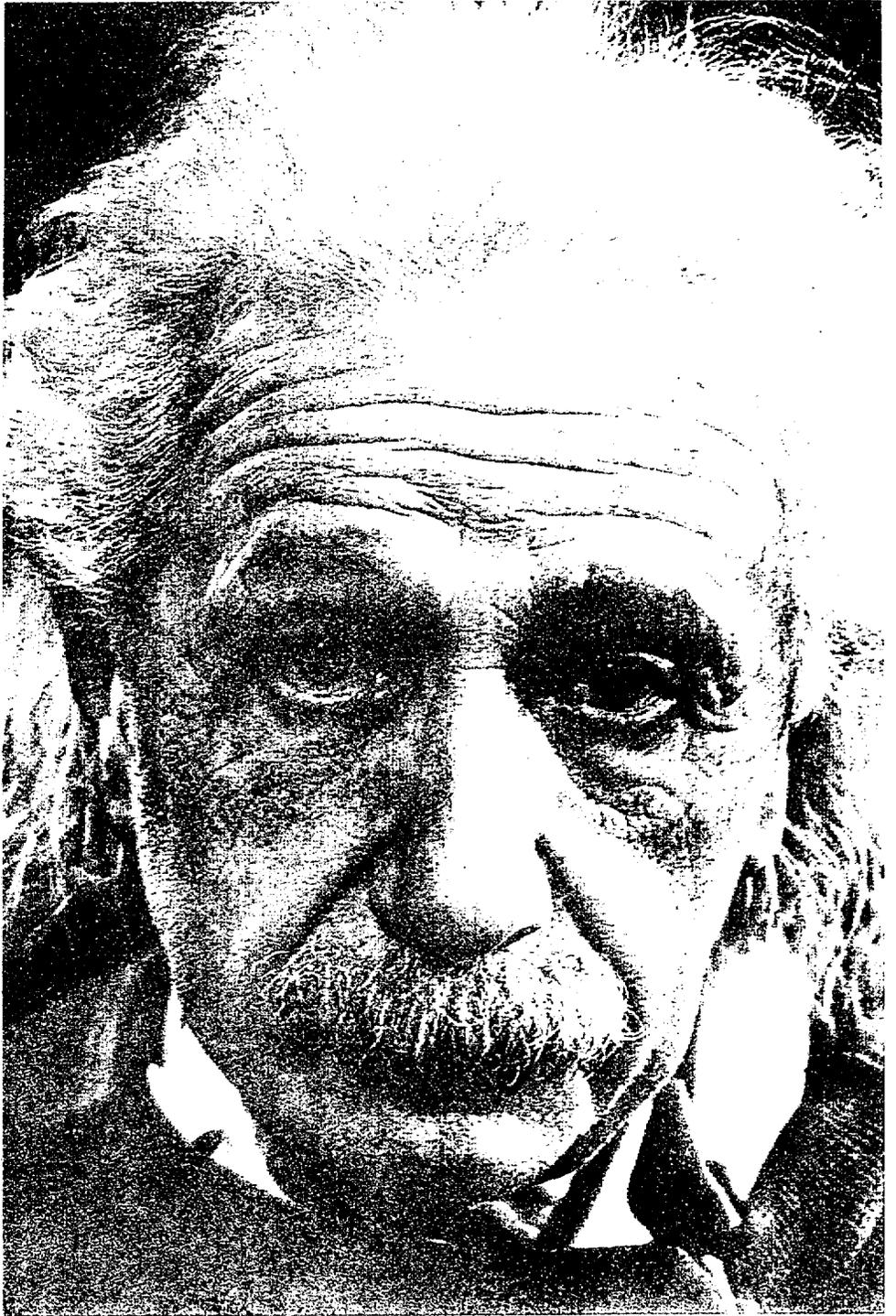
Esta última circunstancia llevó al físico italiano Enrico Fermi a tratar de mantener y controlar una reacción nuclear utilizando los neutrones producidos en la fisión de núcleos de U^{235} (uranio 235).



CO2



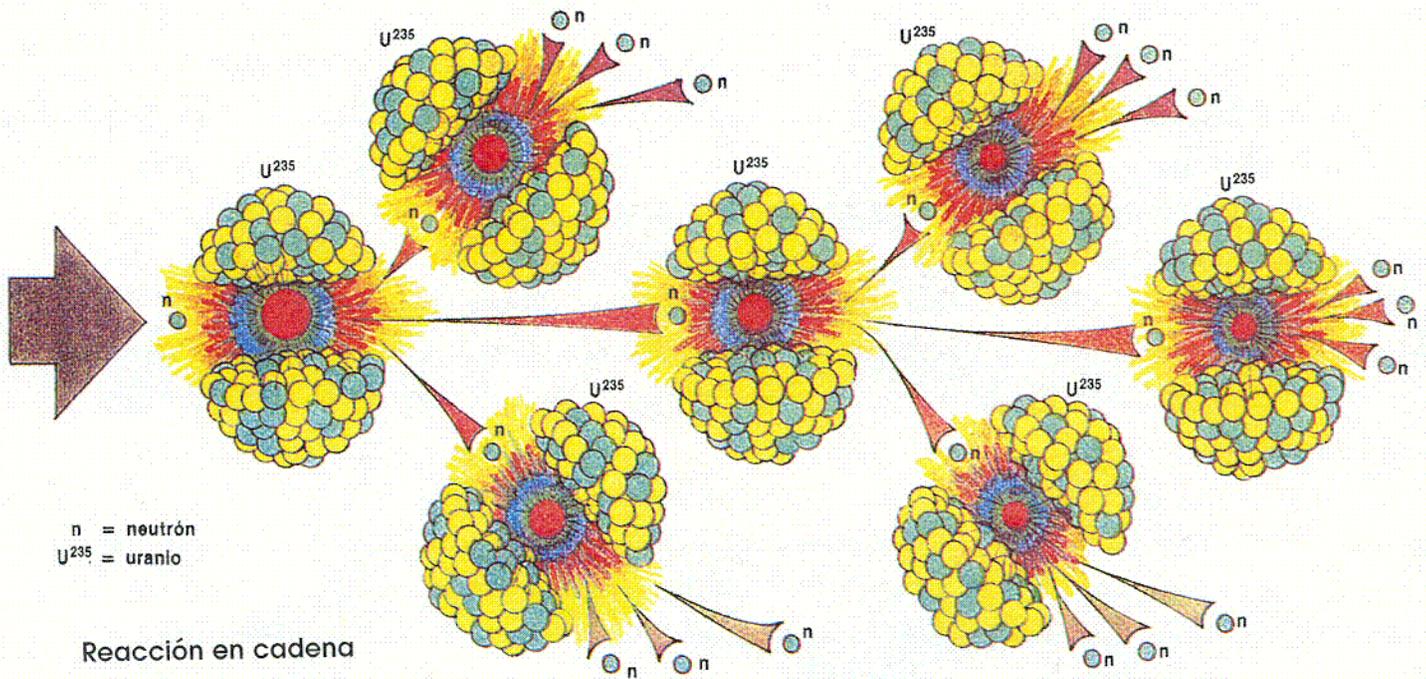
En la foto superior se observa el primer reactor atómico del mundo, en el que se utilizó grafito como moderador y uranio metálico como combustible. La foto inferior muestra a Enrico Fermi (segundo de derecha a izquierda), develando la placa de inauguración en diciembre de 1942.



Albert Einstein (1879-1955)

para fisiónar otros núcleos del mismo isótopo, en lo que se denomina una "reacción en cadena", que finalmente logró producir en diciembre de 1942; el control de la reacción en cadena se obtuvo mediante la absorción de neutrones por elementos como el boro y el cadmio.

Desafortunadamente, todos estos extraordinarios descubrimientos, tuvieron como primera aplicación la manufactura de bombas atómicas que fueron lanzadas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki. No fue sino hasta la primera mitad de la década de los cincuenta, cuando por primera vez se empleó la energía nuclear para generar electricidad.



Reactor BWR-5

1. Rociador y ventila de la cabeza
2. Orejas de levantamiento del secador
3. Ensamble del secador de vapor
4. Salida de vapor
5. Entrada del rociador del núcleo
6. Ensamble del separador de vapor
7. Entrada de agua de alimentación
8. Esprea de agua de alimentación
9. Entrada de inyección del Sistema de Enfriamiento de Baja Presión
10. Línea de rociado del núcleo
11. Esprea de rociado del núcleo
12. Guia superior
13. Ensamble de la bomba de chorro
14. Contenedor del núcleo
15. Ensamble del combustible
16. Barra cruciforme
17. Placa del núcleo
18. Bomba de chorro y entrada del agua de circulación
19. Salida del agua de recirculación
20. Soporte de la vasija
21. Muro de blindaje
22. Barras de control
23. Líneas hidráulicas de las barras de control
24. Monitor del flujo en el interior del núcleo

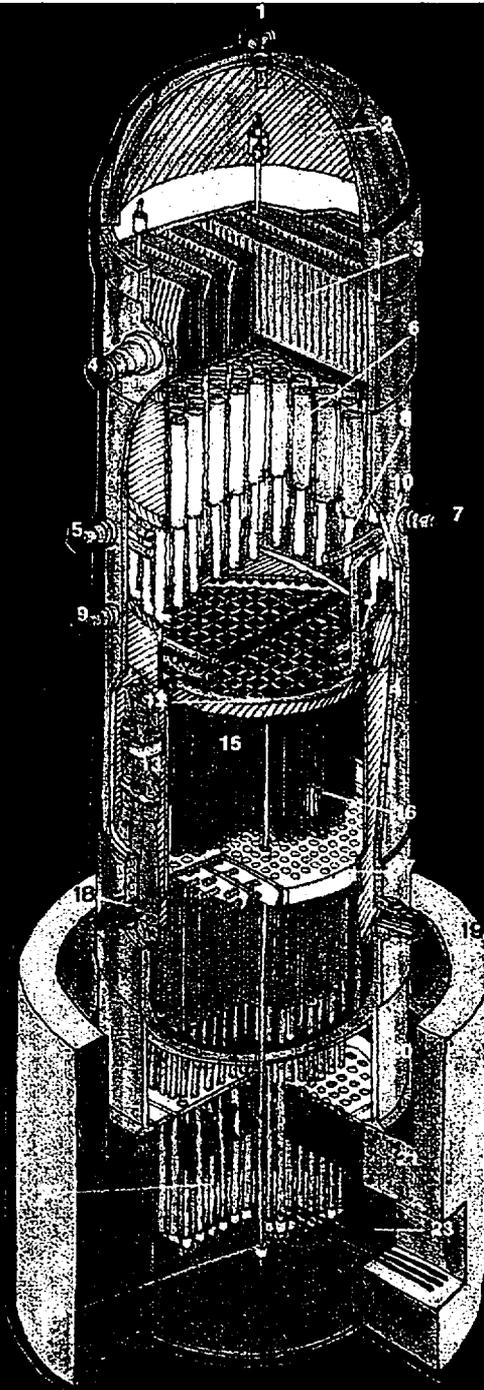


Diagrama de un reactor de Agua Hirviente (BWR), semejante a los de la Centra Nucleoeléctrica de Laguna Verde.

5.

Las centrales nucleoelectricas

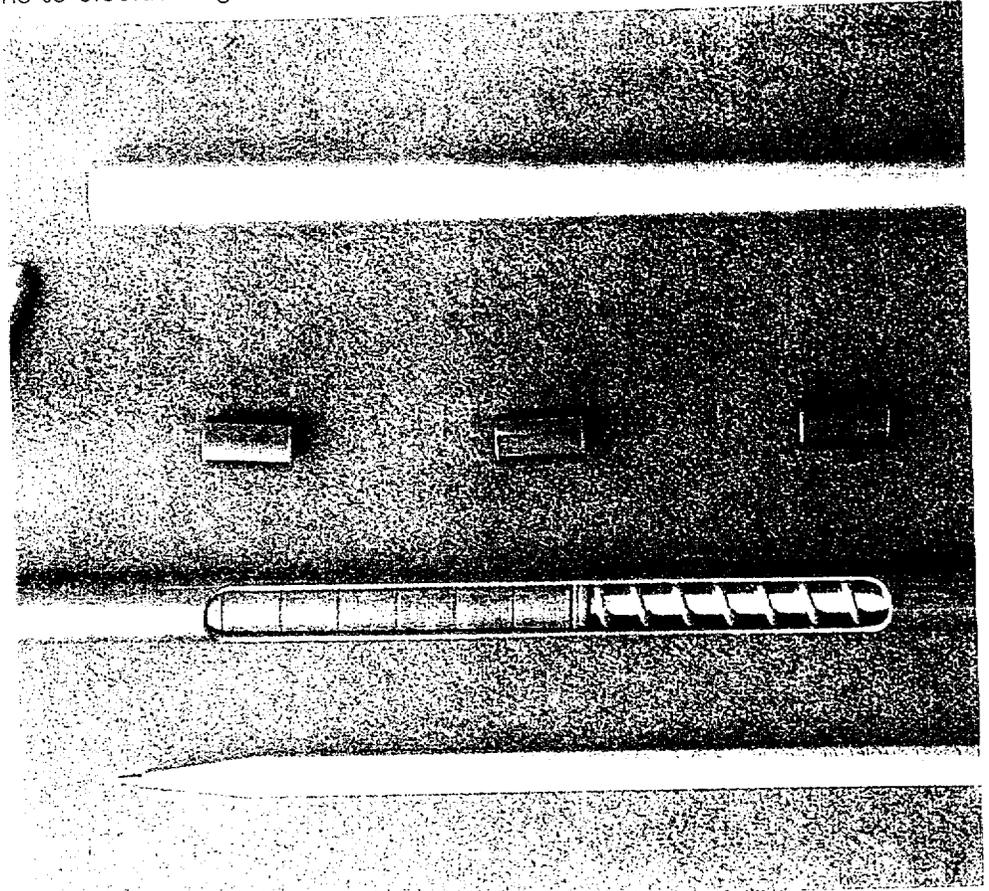
Estas centrales tienen cierta semejanza con las termoeléctricas convencionales, ya que también utilizan vapor a presión para mover los turbinogeneradores, pero en lugar de emplear combustibles fósiles para producirlo, aprovechan el calor que se obtiene al fisurar átomos de los isótopos U^{235} y Pu^{239} (plutonio 239), en dispositivos denominados reactores. Existe gran variedad de ellos, pero todos tienen los siguientes elementos en común.

Combustible

Aun cuando dentro de los reactores no se efectúa ninguna combustión en

el sentido real de la palabra, se denomina combustible, por analogía, al material cuyos núcleos se fisuran al bombardearse con una fuente de neutrones para obtener calor. En un reactor puede emplearse como combustible uranio natural, en el cual el isótopo U^{238} representa el 99.3% y el isótopo U^{235} tan sólo el 0.7%, o bien uranio enriquecido, en el que la proporción de U^{235} aumenta aproximadamente hasta 3%.

Existen otros materiales fisurables que pueden usarse como combustible. Estos son el plutonio 239 y el uranio 233 que se producen artificialmente a partir del uranio 238 y del torio 232, respectivamente.



El combustible que utilizan los reactores BWR es uranio enriquecido, constituido aproximadamente de 97% de uranio 238 y 3% de uranio 235. En la foto se observa una vaina de zircaloy con las pastillas de combustible.

Moderador

Los neutrones que se generan como consecuencia de la fisión de los núcleos de U^{235} tienen al emitirse velocidades del orden de 20 000 km/s.

Para que estos neutrones puedan a su vez fisiónar a otros núcleos de U^{235} de una manera eficiente y prosiga así la reacción en cadena, se debe disminuir su velocidad hasta 2 km/s aproximadamente, proceso que se conoce como termalización de los neutrones. Esto se logra intercalando alguna sustancia cuyos átomos se encargan de frenar a los neutrones, por medio de choques, provocando que éstos últimos pierdan velocidad. Dicha sustancia se denomina moderador.

Entre los moderadores más comunes podemos citar a: el agua, el grafito y el agua pesada; esta última es un líquido semejante al agua natural, pero en lugar de tener moléculas formadas por átomos de hidrógeno, está constituida por áto-

mos de un isótopo de dicho elemento llamado deuterio, cuya masa es prácticamente el doble de la del hidrógeno, y que mientras el núcleo del hidrógeno consta tan sólo de un protón, el del deuterio está formado por un protón y un neutrón.

Las sustancias que sirven de moderadores absorben distintas cantidades de neutrones; por ejemplo, el agua natural absorbe más neutrones que el agua pesada y, para compensar el efecto que esta disminución de neutrones tiene sobre el número de fisiones, se debe aumentar el número de átomos de U^{235} , enriqueciendo el combustible.

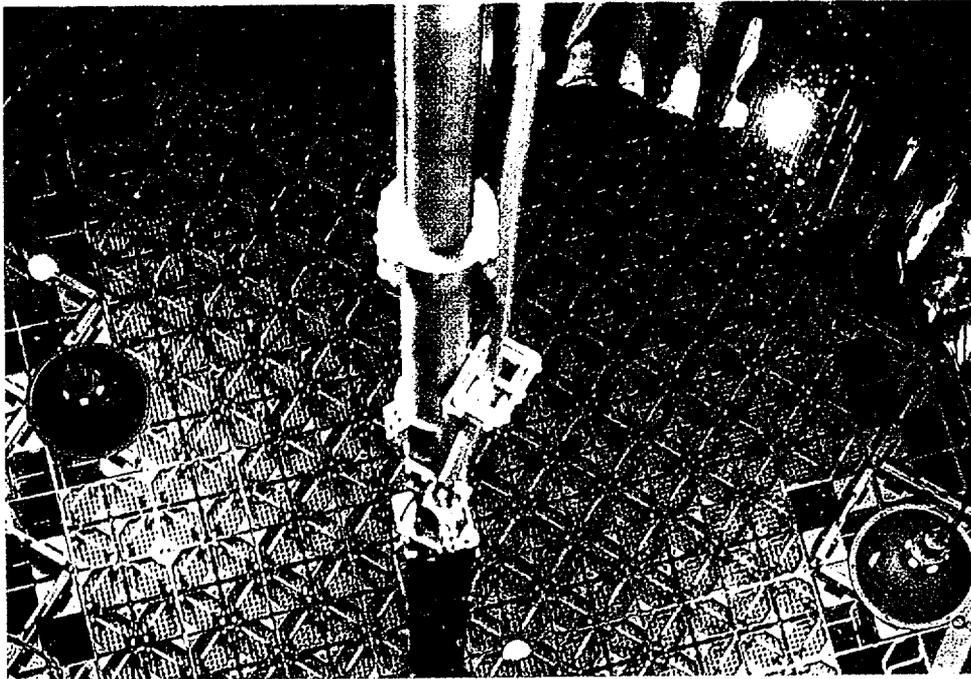
Refrigerante

La gran cantidad de calor que se genera en el reactor a consecuencia de la reacción nuclear, debe ser extraída para producir el vapor que se requiere en la generación de energía eléctrica y, al mismo tiempo, mantener lo suficientemente baja la temperatura de los distintos elementos que se encuentran en su interior para que éstos no sufran ningún deterioro. Esto se consigue mediante la acción de un fluido que se conoce como refrigerante y que puede ser un gas como el bióxido de carbono (CO_2) o el helio, o algún líquido como el agua pesada o el sodio fundido.

Las diferentes combinaciones entre combustibles, moderadores y refrigerantes dan lugar a los diversos tipos de reactores. A continuación se mencionan los más comunes.

Reactor de agua pesada a presión
(Pressurized heavy water reactor-PHWR o CANDU)

Vista interna de la vasija de uno de los reactores de Laguna Verde.



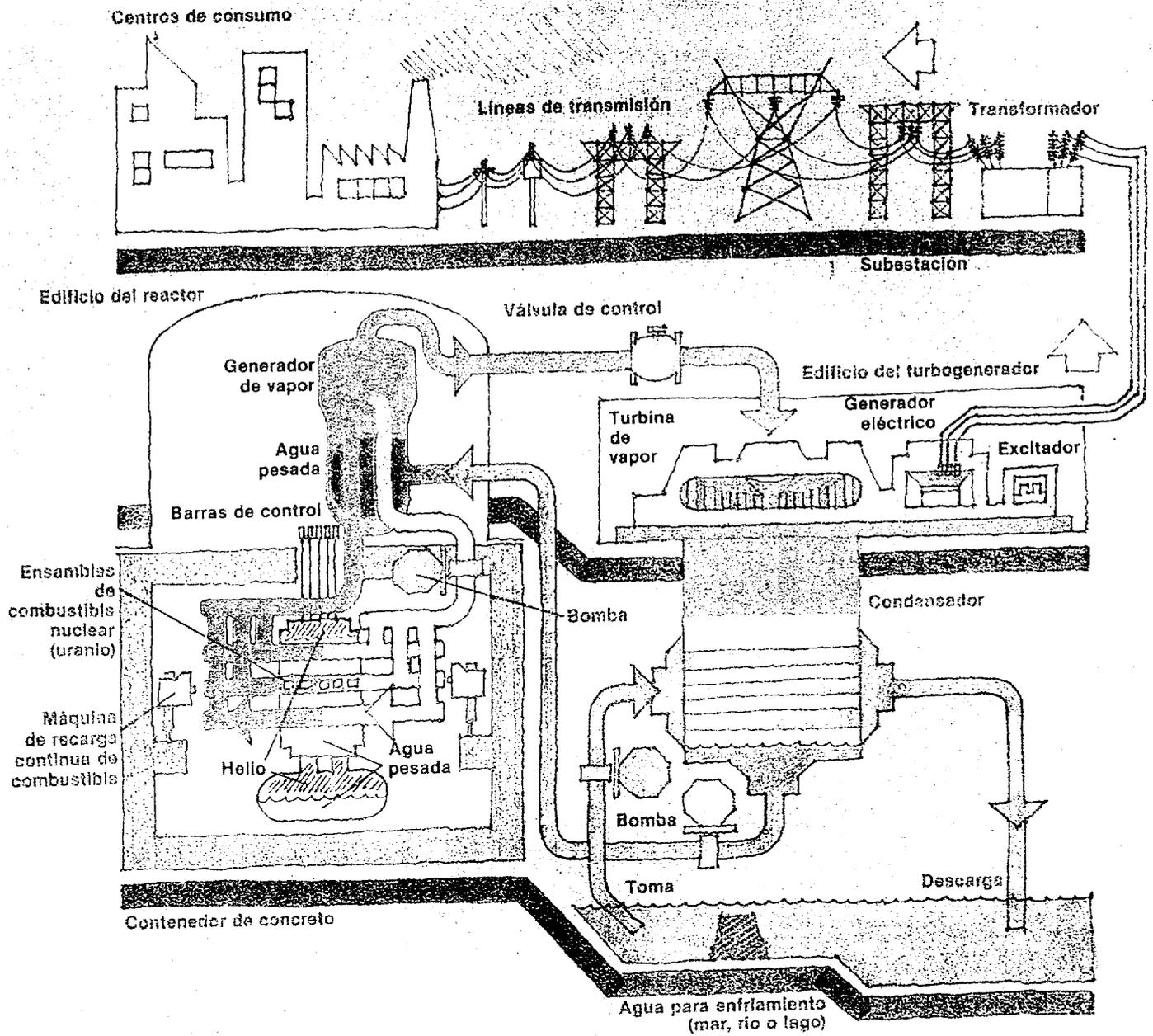


Diagrama de un Reactor de Agua Pesada a Presión (PHWR o CANDU)

conocido también como CANDU, consiste en que utiliza uranio natural como combustible y agua pesada como moderador y enfriador.

El núcleo del reactor se encuentra dentro de un cilindro denominado calandria, atravesado axialmente por tubos de paredes relativamente gruesas llamados tubos de presión, en cuyo interior se alojan los elementos combustibles. La calandria está llena de agua pesada, que actúa como moderador de los neutrones.

Por dentro de los tubos de presión, bañando los elementos combustibles, circula agua pesada que actúa como refrigerante de dichos elementos, lo cual provoca que su temperatura se eleve sin llegar a entrar en ebullición, debido a que la presión en el interior de los tubos es muy alta.

El agua pesada caliente pasa después al generador de vapor, donde transfiere su energía térmica a un circuito de agua natural y la hace hervir.

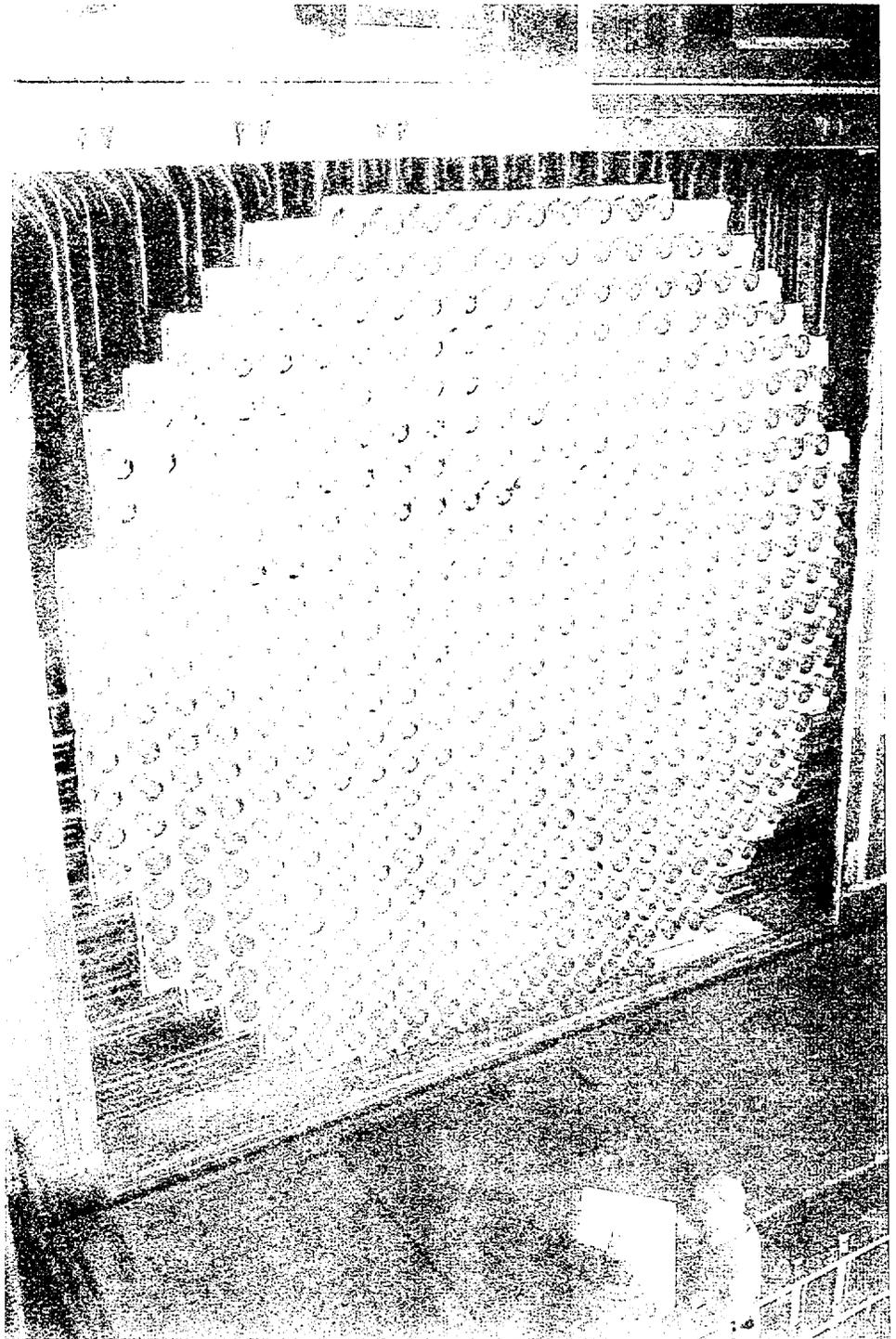
El vapor generado mueve el turbogenerador para producir energía eléctrica; después se condensa y regresa de nuevo al generador de vapor. Por su parte, el agua pesada regresa al reactor para continuar refrigerando los elementos combustibles.

Reactor de agua a presión

(Pressurized water reactor-PWR)

En este tipo de reactor los elementos combustibles se encuentran dentro de una vasija a presión llena de agua, que desempeña el papel tanto de moderador como de refrigerante. Como en el caso del reactor CANDU, el agua no hierve debido precisamente a la presión interna de la vasija. Después, el

Extremo de los tubos de presión del núcleo de un reactor canadiense.



agua transmite su energía térmica a otro circuito de agua natural y la hace entrar en ebullición, fenómeno que tiene lugar en el generador de vapor. Dicho vapor se utiliza para mover el turbogenerador, después de lo cual es condensado y regresa de nuevo al generador de vapor. Por su parte, el agua a presión, después de haber transferido su calor, se reintegra al reactor para repetir su ciclo.

Este tipo de reactores utiliza como combustible uranio enriquecido, en el cual la proporción del isótopo U^{235} aumenta de 0.7% a 3%, como se mencionó anteriormente.

Reactor de agua hirviente (Boiling water reactor-BWR)

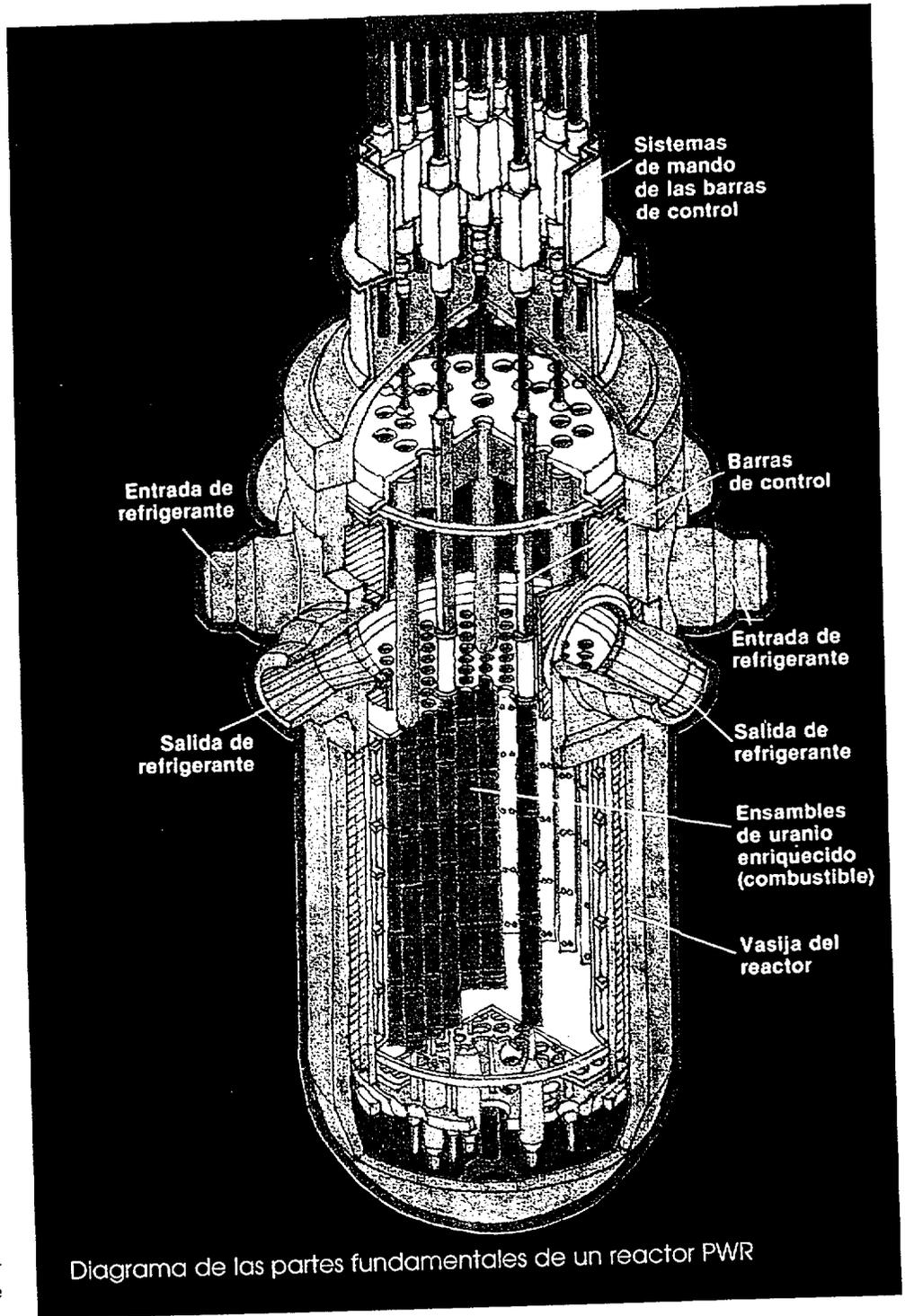
Se asemeja mucho al PWR, ya que también utiliza agua natural como moderador y enfriador y uranio enriquecido como combustible.

La diferencia estriba en que en el reactor BWR, el agua sí entra en ebullición dentro de la vasija, gracias a que la presión interior es menor que el PWR, produciéndose directamente el vapor que se utiliza para mover el turbogenerador.

Como en los casos anteriores, después de efectuar esta operación, el vapor se condensa y regresa al reactor para repetir el ciclo.

Ambos reactores integran la familia de los reactores de agua natural, que denomina ampliamente el mercado de la industria nucleoelectrónica. De las 431 unidades que existían en operación a fines de 1996, aproximadamente el 75% eran de alguno de estos tipos; proporción que se sostenía en los 39 reactores que estaban en etapa de construcción, en la misma fecha.

El tipo de reactor utilizado en la central nucleoelectrónica de Laguna Verde es precisamente el BWR.



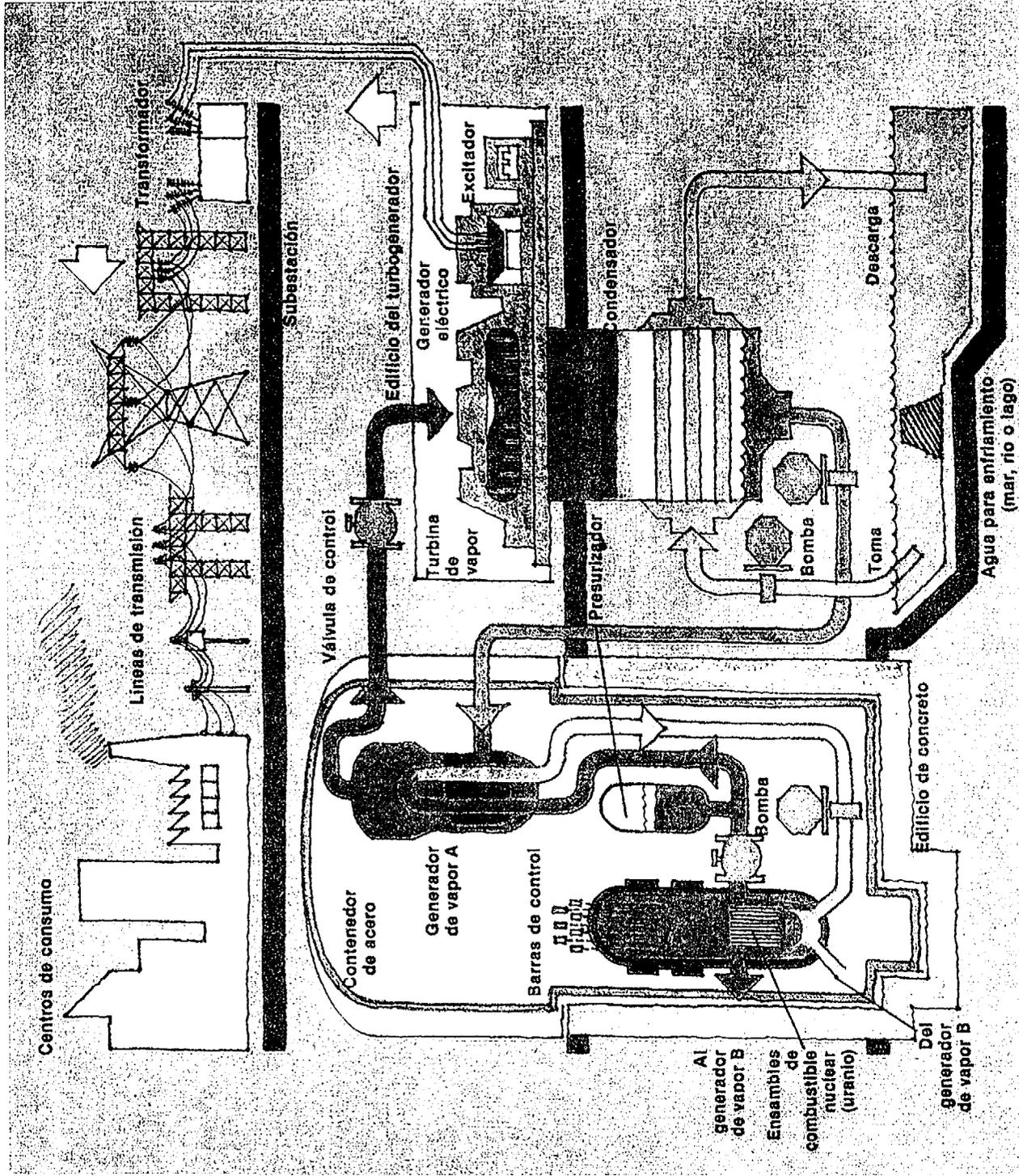


Diagrama de un Reactor de Agua a Presión (PWR)

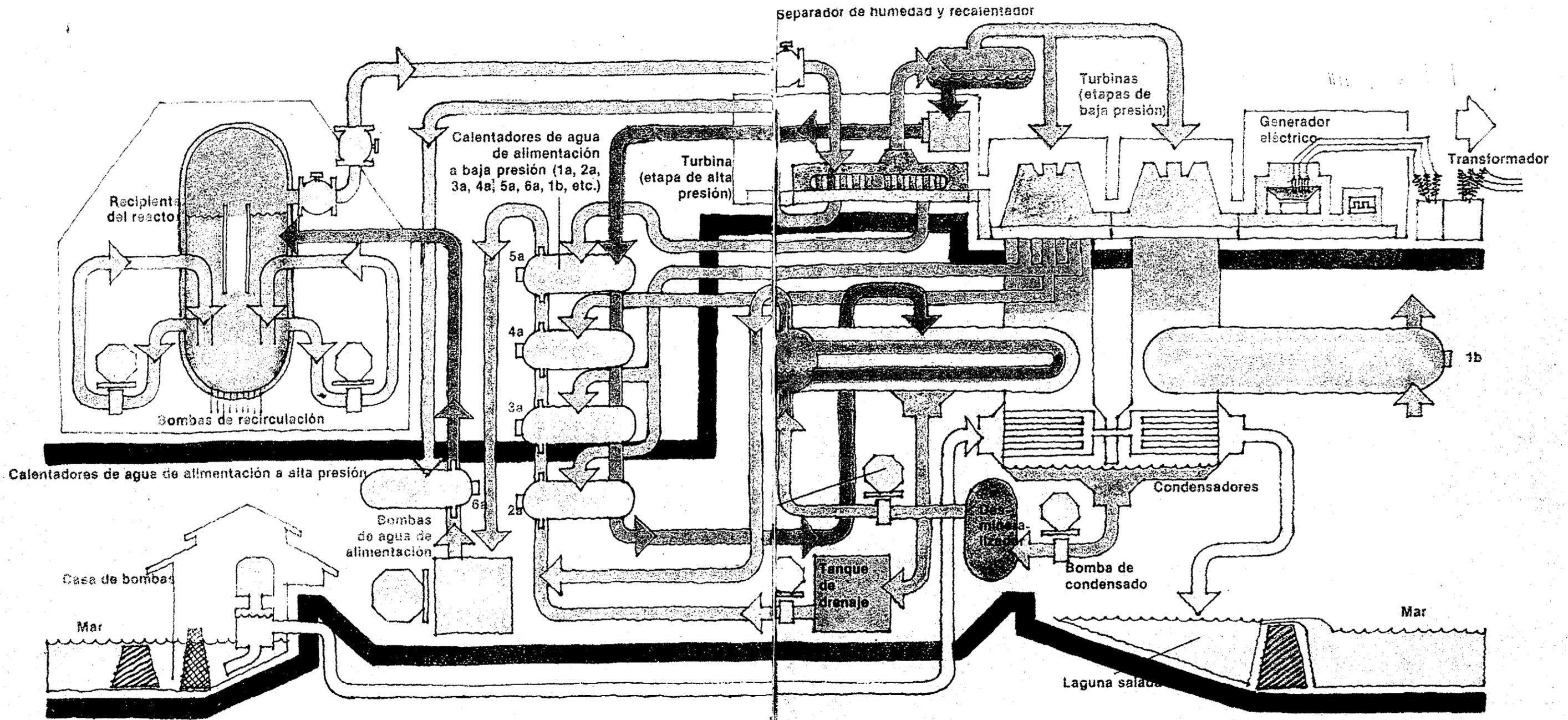


Diagrama esquemático de una unidad de la Central Nucleolétrica de Lagunde (reactores tipo BWR)

Reactor enfriado por bióxido de carbono y moderado por grafito.
(Gas cooled reactor- GCR)

Aun cuando en las primeras etapas de desarrollo de la industria nucleolétrica estos reactores ocuparon un lugar importante, su popularidad ha disminuido sensiblemente con el tiempo debido principalmente a razones económicas.

A diferencia de los anteriores, este sistema no utiliza agua como enfriador, sino bióxido de carbono; emplea grafito como moderador y uranio natural en forma metálica como combustible.

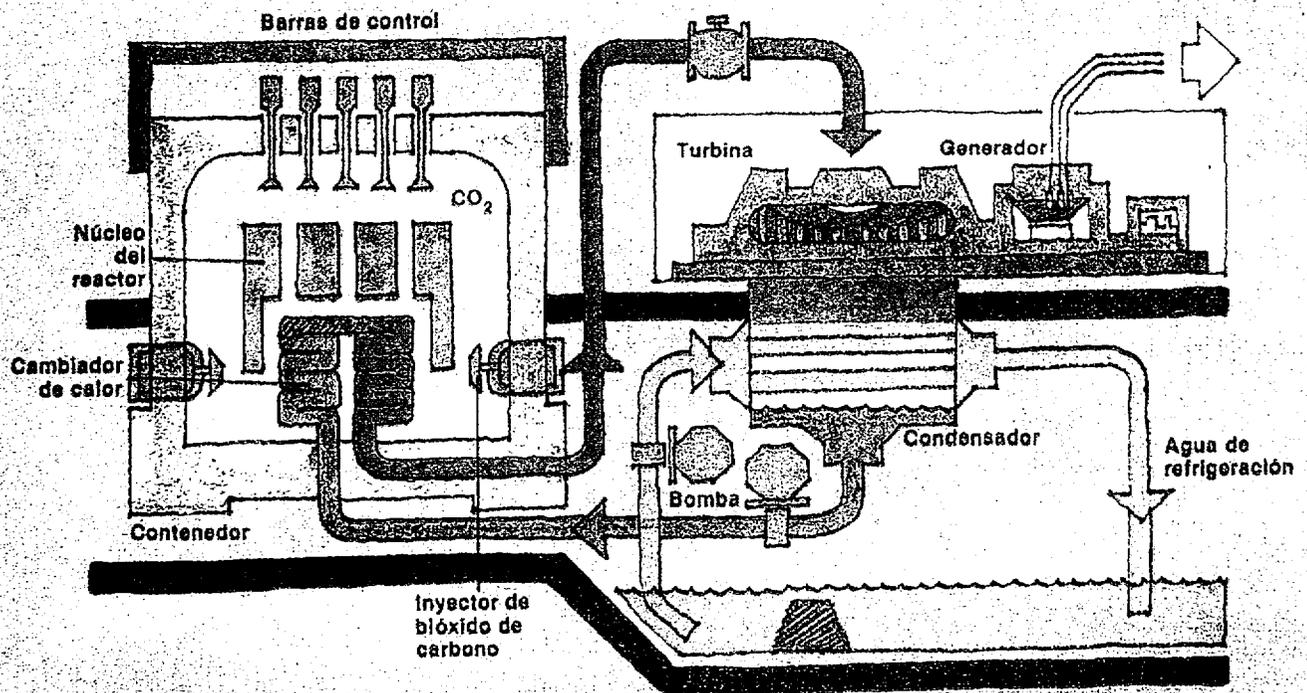
Reactor rápido de cría enfriado por sodio.
(Liquid metal fast breeder reactor-LMFBR)

Este reactor utiliza combustible enriquecido en más del 20 por ciento, ya sea uranio235 o plutonio 239. Su peculiaridad es que el núcleo se rodea con un manto de uranio natural o empobrecido, que al absorber neutrones poco moderados, se transforma en plutonio y de esta manera cría nuevo combustible en mayor cantidad que el que consume.

El plutonio criado puede utilizarse como carga inicial de nuevos reactores

de cría o como recargas de reactores CANDU, PWR, BWR, o GCR. El enfriador de estos reactores es sodio fundido, el cual también modera incipientemente los neutrones, aunque no es ese su propósito pues la reacción de cría se favorece con neutrones rápidos.

Existen varios tipos de reactores que por su escasa significación o por escapar a los propósitos que perseguimos, no serán abordados. Tal es el caso del reactor avanzado enfriado por gas (AGR) de Gran Bretaña; del reactor moderado por grafito y enfriado por agua (RBMK) de la Unión Soviética, etc.



Esquema de una central nuclear con reactor rápido de cría enfriado por sodio (LMFBR)



Las radiaciones

Las radiaciones forman parte del mundo en que vivimos. La humanidad ha estado siempre expuesta a radiaciones visibles e invisibles que proceden de la materia existente en todo el Universo. Todos estamos familiarizados con varias formas de radiación.

La luz es una radiación que vemos; es, por lo tanto, visible. El calor es una radiación que sentimos y, por ello, es sensible. Los rayos ultravioleta que proceden del Sol y los rayos X con que se toman las radiografías son formas de radiación que no son visibles, aunque sí perfectamente detectables.

Las radiaciones pueden ser así mismo ionizantes o no ionizantes. Las primeras, como la luz y el calor, no alteran la naturaleza de la materia en la que inciden, a menos que sean excesivas, mientras que las segundas, tienen la facultad de ionizar los átomos de dicha materia, lo cual las hace potencialmente peligrosas ya que al actuar sobre los tejidos vivos, pueden, mediante la ionización de las sustancias que componen las células, originar la alteración o muerte de las mismas. Por esta razón, las radiaciones ionizantes pueden ocasionar la enfermedad y en casos

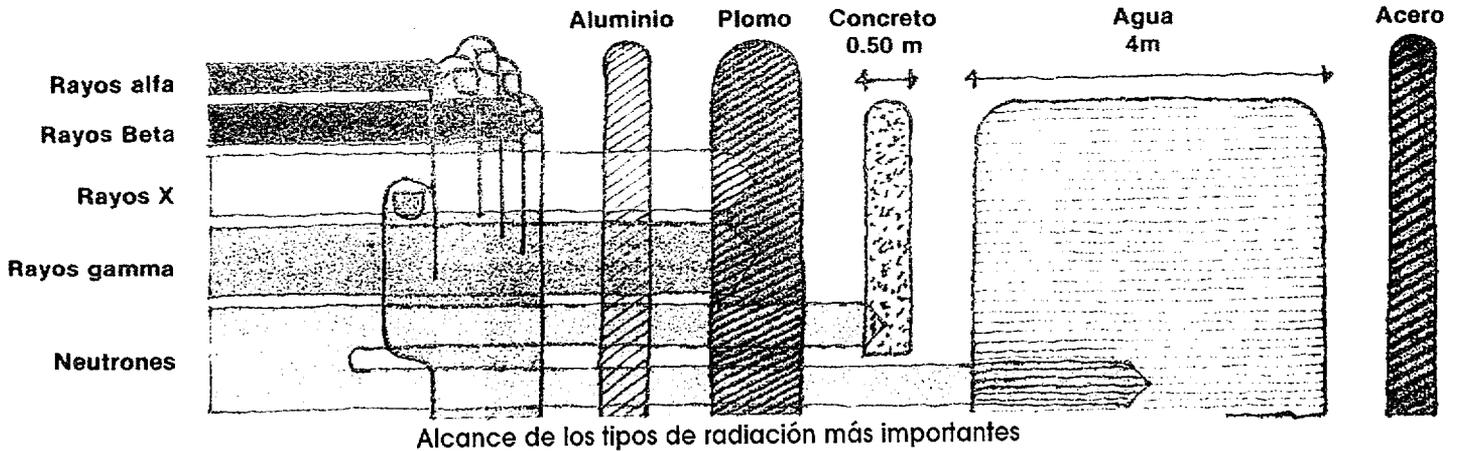
extremos la muerte de los individuos severamente irradiados. En lo sucesivo cuando hablemos de radiación no estaremos refiriendo precisamente a la radiación ionizante.

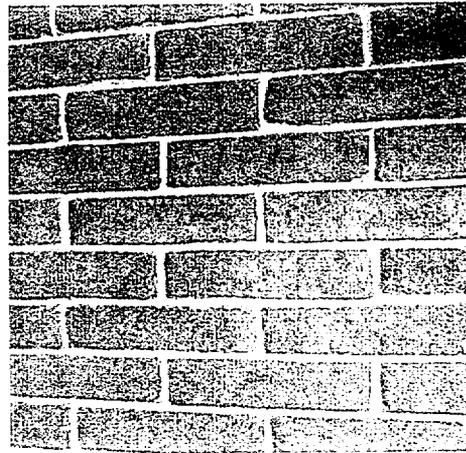
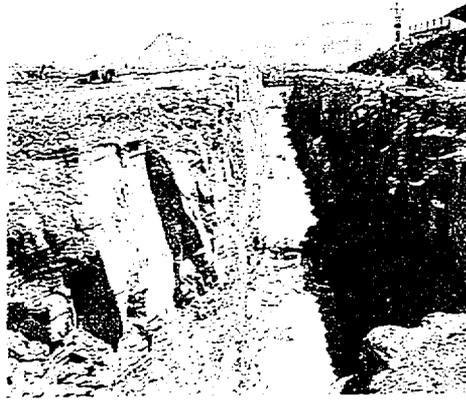
Se conoce como radiación nuclear a las partículas o a las ondas electromagnéticas que emiten ciertos núcleos de átomos inestables para convertirse en estables. Los tipos de radiación y partículas emitidas más importantes son:

- *Radiación alfa.* Núcleos de helio compuestos por dos protones y dos neutrones.
- *Radiación beta.* Partículas con la masa de los electrones que pueden ser positivas o negativas.
- *Radiación gamma.* Ondas electromagnéticas semejantes a las de la luz, pero de mayor energía.
- *Rayos X.* Similares a los gamma, pero originados fuera del núcleo atómico.
- *Neutrones.* Partículas neutras componentes de los núcleos, emitidas con diversas energías.

Radiaciones naturales.

Las radiaciones naturales provienen de los rayos cósmicos que nos llegan





del espacio exterior (del Sol y de otras estrellas) y de los elementos llamados radiactivos, que se encuentran incluso en los materiales con los que se fabrican las casas-habitación, en el aire que respiramos, en el agua que bebemos y en los alimentos que ingerimos. Entre estas sustancias emisoras de radiaciones se pueden mencionar el uranio, el torio y el radio. El uranio y el radio, por ejemplo, se encuentran en rocas tan comunes como el granito, si bien en pequeñas cantidades. El radio produce el gas radiactivo radón que está presente en el aire que respiramos.

Las radiaciones naturales provienen también de nuestro propio cuerpo, principalmente del potasio y del carbono que hay en él.

El orden de magnitud de la radiación natural es de aproximadamente 100 milirems (mrem)*; aunque puede variar considerablemente por razones de altitud o de composición del suelo.

Radiaciones artificiales

Se llaman radiaciones artificiales a las que provienen de fuentes creadas por el hombre, tales como: aparatos de televisión, relojes con carátulas luminosas, aparatos de radiografía utilizados en medicina, centrales nucleares, etcétera.

* El rem es una unidad de medida de la absorción de energía en los tejidos, debida a la radiación ionizante; sin embargo, para fines prácticos es una unidad muy grande, razón por la cual se acostumbra utilizar el milirem (mrem), que equivale a la milésima parte del rem. Las unidades modernas de dosis absorbida son el sievert y el millisievert, equivalentes a 100 rem y 100 milirems respectivamente

La cantidad de radiación natural que recibe un ser humano durante un año es de aproximadamente 100 milirems.

De todas las radiaciones artificiales, los aparatos utilizados para las radiografías son las fuentes que emiten mayor cantidad de ellas.

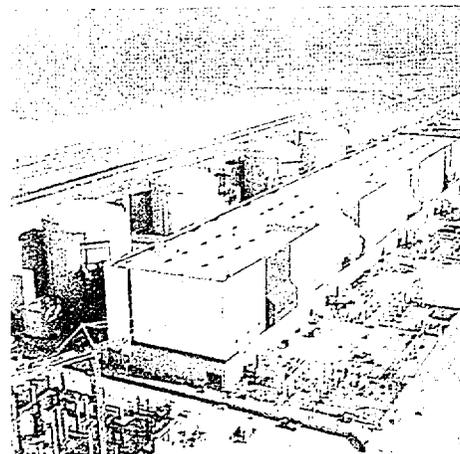
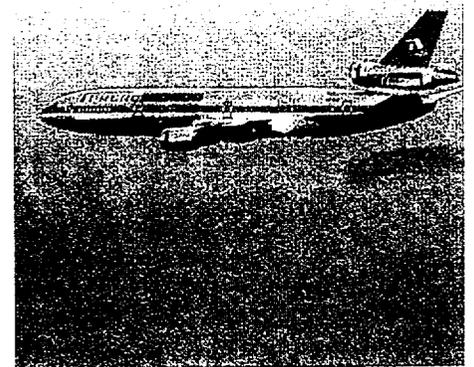
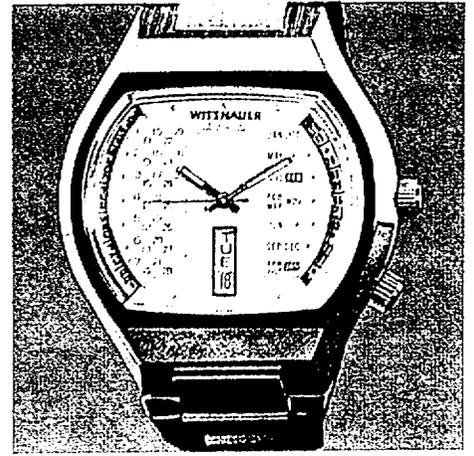
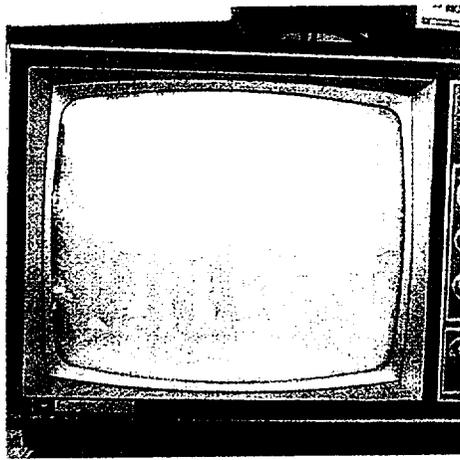
Las radiaciones artificiales que recibimos a lo largo del año, incluidas las que provienen de centrales nucleares, pueden sumar poco más de 50 mrem y son inferiores a las radiaciones naturales que recibimos en promedio; una persona que vive a nivel del mar y en terrenos no radiactivos puede recibir fácilmente de 100 a 200 mrem menos que otra que viva en una zona montañosa de estructura granítica. En ocasiones, estas diferencias naturales son aún mucho más apreciables.

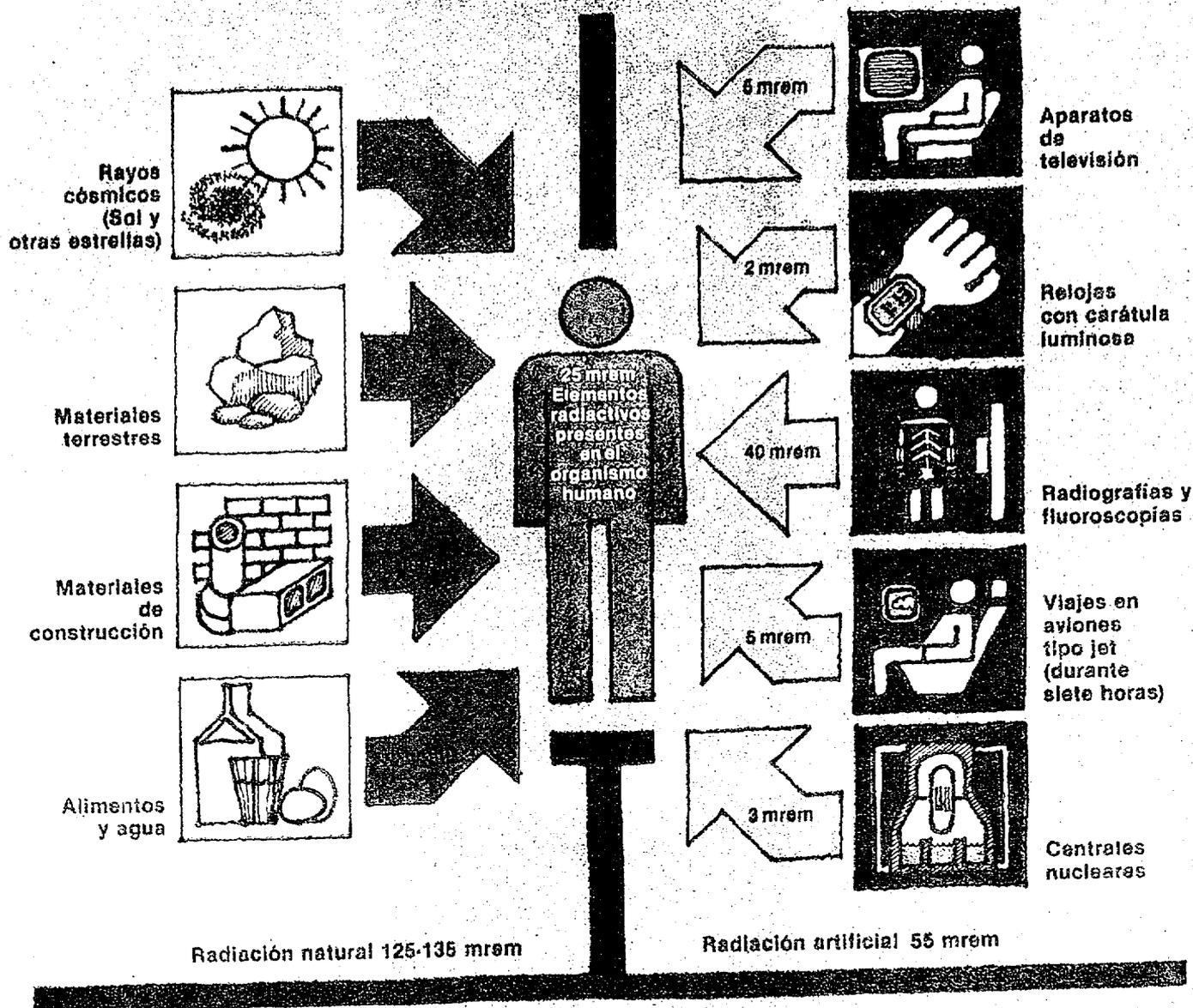
Algunas de las nuevas costumbres de vida, aunque no crean radiactividad artificial, contribuyen a aumentar la cantidad de radiación natural recibida como, por ejemplo, la práctica de los deportes de invierno, el alpinismo y los viajes en avión, ya que las radiaciones procedentes del espacio exterior, al haber menos capas de aire que las absorban, son más intensas a grandes alturas que a nivel del mar.

La cantidad de radiación que recibe el hombre a lo largo de un año se muestra en la página siguiente.

En total se estima que la dosis anual recibida por una persona que viva al nivel del mar es de 150 milirems por año. El efecto de una dosis de radiación varía enormemente, de acuerdo con el tiempo durante el cual se haya recibido. Las consecuencias de la

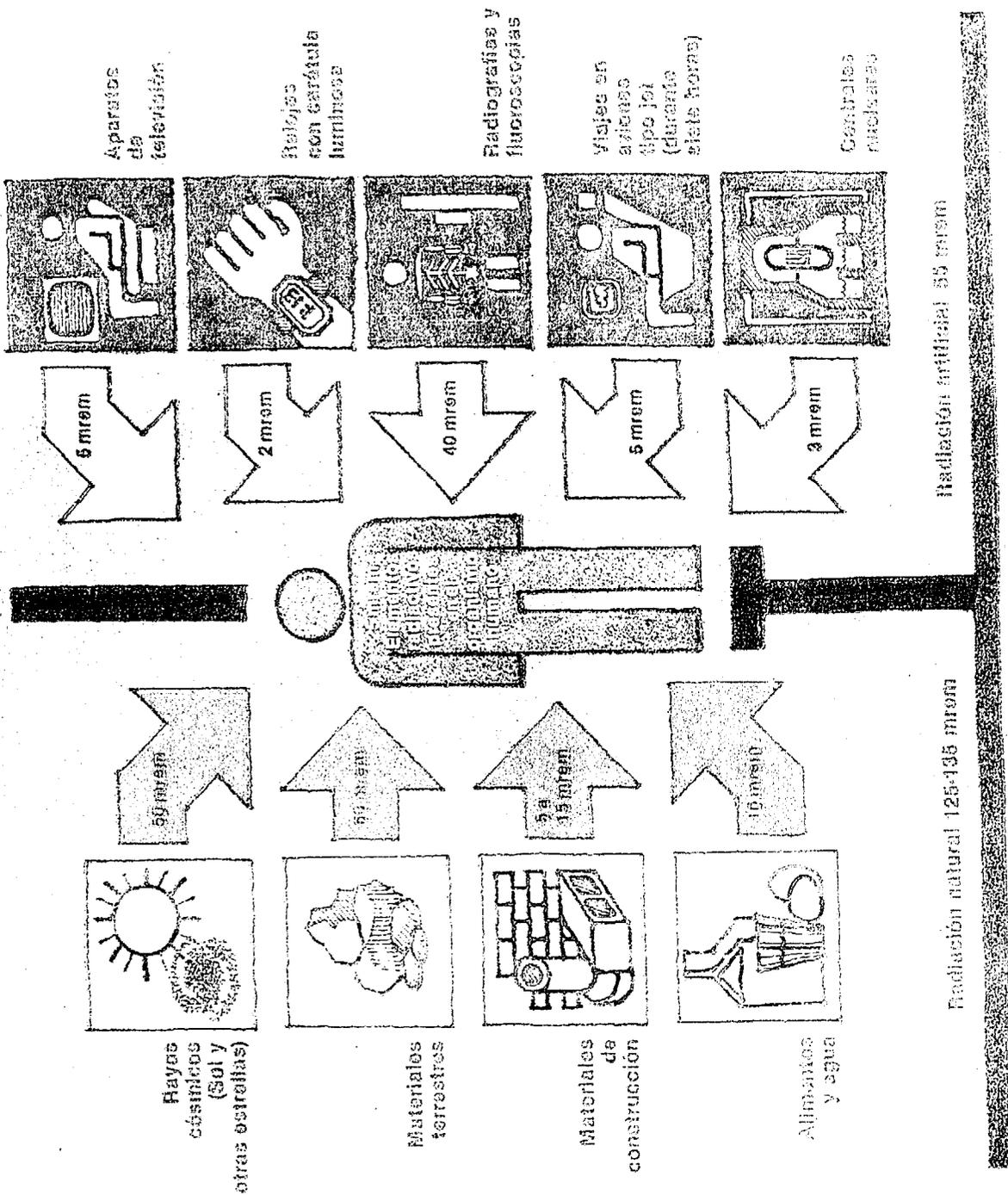
Las radiaciones generadas por una central nuclear son menores a las provenientes de los aparatos e instrumentos que aquí aparecen. La dosis de radiación que origina una central como la de Laguna Verde en sus alrededores no es mayor a 5 milirems por año; sólo representa el 3% de la radiación que recibe normalmente un ser humano en el mismo tiempo.





La dosis anual de radiación que recibe una persona al nivel del mar es de alrededor de 150 mrem. Las centrales nucleares están diseñadas para que durante su operación normal no generen dosis de radiaciones superiores a 5 mrem por año, sobre los habitantes de los alrededores.

Cantidad normal de radiación que recibe un hombre durante un año



La dosis anual de radiación que recibe una persona al nivel del mar es de alrededor de 150 mrem. Las centrales nucleares están diseñadas para que durante su operación normal no generen dosis de radiaciones superiores a 5 mrem por año, sobre los habitantes de los alrededores.

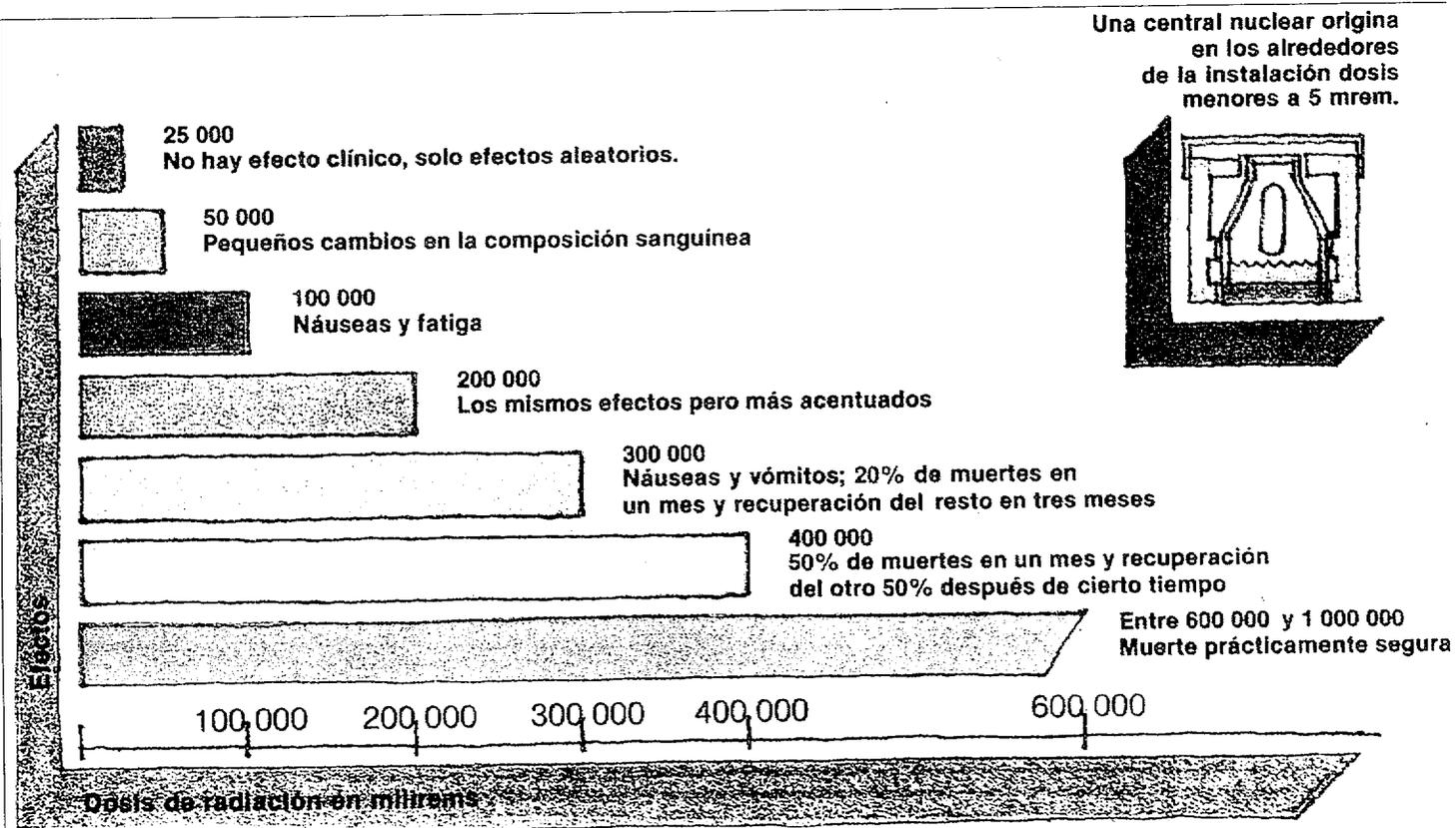
Cantidad normal de radiación que recibe un hombre durante un año

exposición del cuerpo humano a las radiaciones durante algunas horas aumentan de acuerdo con la dosis, tal como se muestra en el diagrama de barras que aparece a continuación.

Por el contrario, si la dosis es el resultado de la acumulación ocurrida durante largo tiempo, los efectos son totalmente distintos. Un científico o técnico que maneje material radiactivo puede recibir 125 mil milirems a lo largo de 25 años sin sufrir ninguna consecuencia somática o genética.

Se sabe que debido a su efecto ionizante, la radiación puede inducir en los seres vivos alguna forma de cáncer incluyendo la leucemia, o bien ciertas alteraciones genéticas (mutaciones).

Puede afirmarse, sin embargo, que en términos generales esa posibilidad ha sido sobrestimada, debido principalmente al desconocimiento del público acerca de las observaciones y estudios llevados a cabo desde hace más de 50 años por asociaciones científicas internacionales de tanto prestigio como I



Un científico o un técnico que maneje material radiactivo puede recibir 125 000 milirems a lo largo de 25 años, sin sufrir ninguna consecuencia somática o genética

Efectos de la radiación en el cuerpo humano

Comisión Internacional de Protección contra Radiaciones (CIPR), el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) y el Comité Asesor para el Estudio del Efecto Biológico de las Radiaciones Ionizantes (ACBEIR), que depende de la Academia de Medicina de Estados Unidos.

Los informes de estos organismos indican que entre los 285 mil japoneses que sobrevivieron al bombardeo de Hiroshima y Nagasaki, después de haber recibido elevadas dosis de radiación, el incremento en la mortalidad por cáncer fue de 0.175%.

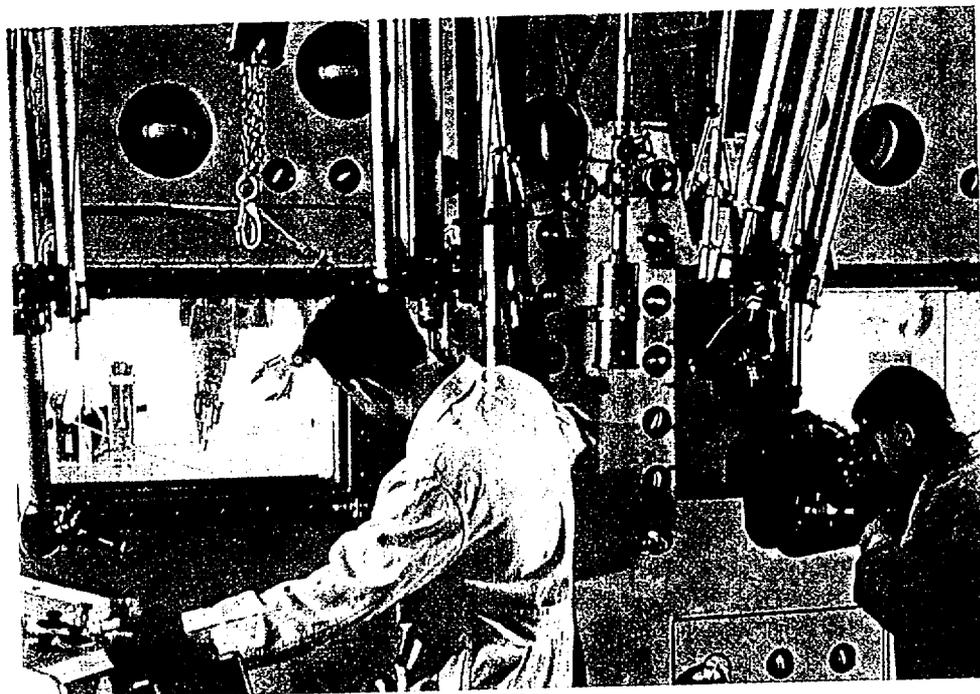
Por su parte, el incremento observado en la incidencia de leucemia, en el grupo de 1 200 sobrevivientes, que recibieron las más elevadas dosis de radiación, fue tan sólo de 1%.

En general, se acepta internacionalmente que la probabilidad de contraer

cualquier tipo de cáncer se incrementa en 1/10 000 000 por cada milirem de radiación recibida; es decir, que dicho incremento en una persona que reciba 100 000 mrem, será de un centésimo.

Asimismo, las observaciones minuciosas realizadas durante cerca de 45 años, en los descendientes de los 24 mil japoneses que resultaron más irradiados en los bombardeos, no detectaron incrementos en la frecuencia de taras congénitas o variaciones en la morfología o la longevidad.

Las centrales nucleoelectricas están diseñadas para que durante su operación normal no originen en los habitantes de los alrededores, dosis de radiación superiores a 5 milirems por año (apenas 3% de lo que recibe comúnmente cualquier ser humano en forma natural, en el mismo periodo).

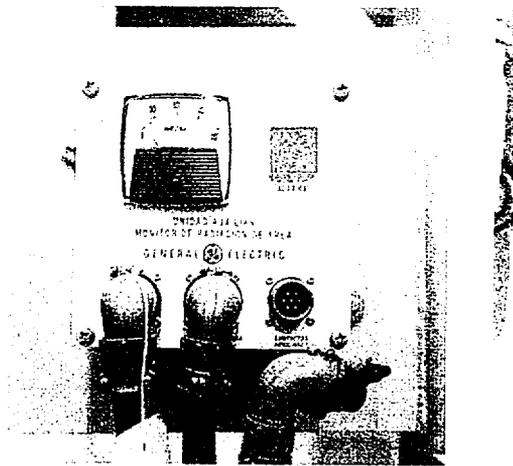


El personal que manipula material radiactivo está protegido contra las radiaciones.

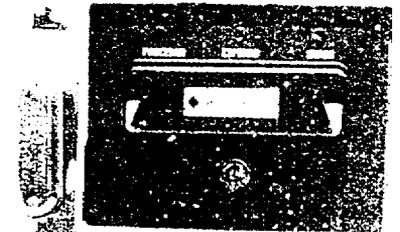
Lo anterior es posible gracias a la adopción de estrictas normas de seguridad observadas en la construcción y en la operación, que son celosa y permanentemente vigiladas por los organismos reguladores especializados de cada país. Cualquier violación de esas normas originaría la suspensión temporal o definitiva de la actividad de la central.

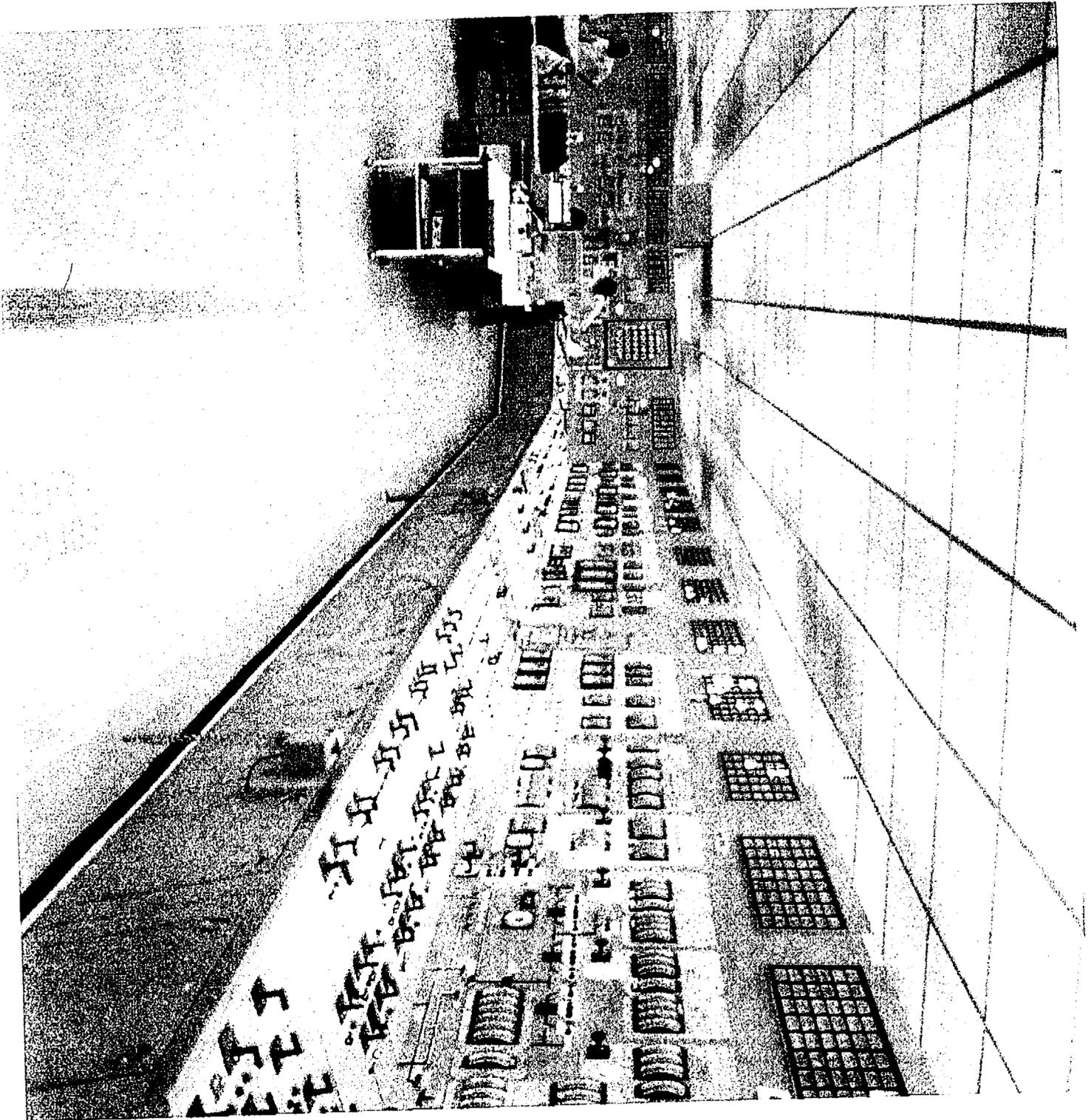
El bajísimo nivel de contaminación radiactiva que producen las centrales nucleares, se debe al riguroso control que en ellas se tiene de todas las sustancias sólidas, líquidas o gaseosas que pudieran ocasionarla, lo que garantiza que ningún efluente pueda ser arrojado

En todas las áreas de acceso a las centrales nucleoelectricas se colocan medidores radiactivos de zona.



Para entrar a cualquier parte del reactor se requiere poseer una tarjeta magnética que permite el acceso, previa identificación del portador de la misma.







La seguridad en las centrales nucleoelectricas

Al tratar este tema se impone antes que nada desvanecer el temor infundado, pero por desgracia bastante frecuente, de que una de estas centrales pueda estallar como una bomba atómica. Para que ocurra una explosión atómica, el artefacto explosivo requiere de material fisionable (uranio 235 o plutonio 239), cuya pureza sea superior al 95% y, además, que se construya a base de piezas con formas específicas que se unan rápidamente por medio de explosivos convencionales.

Ninguna de estas condiciones se cumple en el caso de los reactores nucleares, cuyo combustible apenas contiene 3% de material fisionable, en forma de pequeñas pastillas cerámicas.

La reacción que provoca una explosión atómica es incontrolada, mientras que en el caso de los reactores nucleares dicha reacción está continuamente bajo estricto control.

Todos los reactores disponen de ciertos elementos denominados barras de control, que son verdaderas pantallas en cuyo interior se encuentra una sustancia que como el carburo de boro, tiene la propiedad de absorber neutrones. Si se deseara abatir al mínimo la reacción de fisión que ocurre dentro del reactor, bastaría con intercalar entre los ensamblajes de combustible dichas barras que, al capturar gran parte de los neutrones libres, evitaría que éstos provocaran nuevas fisiones.

El riesgo en las plantas nucleoelectricas proviene del material radiactivo que se produce durante la reacción de fisión, pero una vez aclarado que no puede haber explosión, examinemos los distintos factores que determinan que una central nucleoelectrica, como la de Laguna Verde, sea una instalación industrial de máxima seguridad.

El sitio

Es de excepcional importancia la adecuada selección del sitio en el que se localizará la central. En el caso de Laguna Verde, éste se escogió después de un análisis de las distintas alternativas disponibles; se eligió tomando en cuenta, principalmente, sus características geológicas y sismológicas, mediante estudios que efectuaron la CFE, el Instituto de Geofísica y el Instituto de Ingeniería, de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los resultados aseguran que el sitio seleccionado es de baja sismicidad y que no se encuentra cerca de ninguna falla geológica activa.

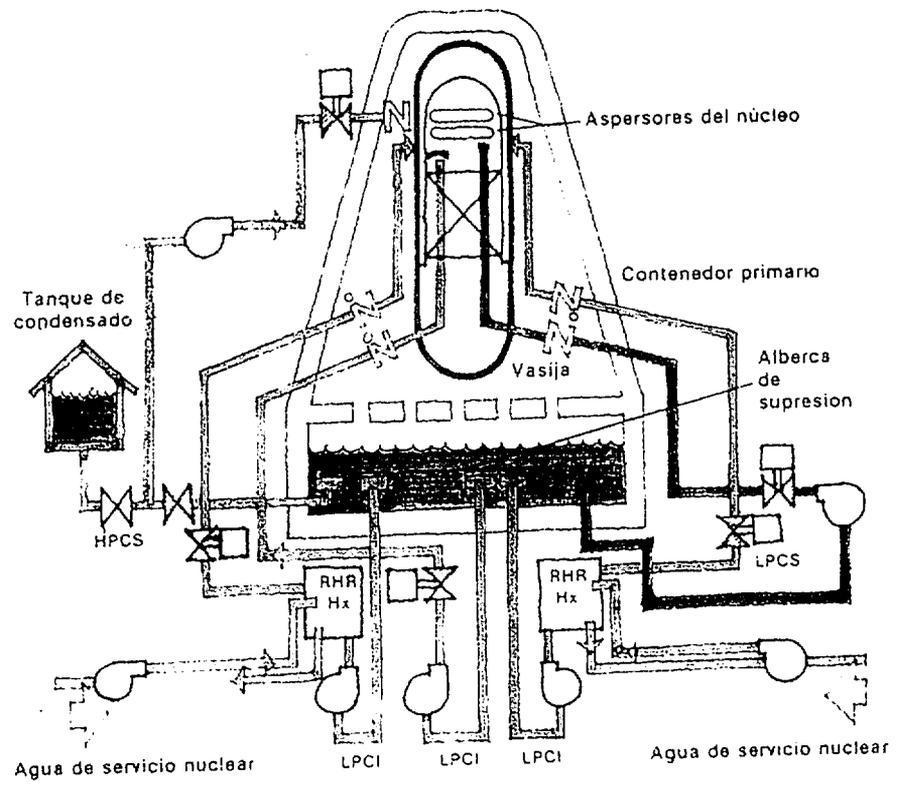
Además, se contó con el apoyo de consultores internacionales expertos, algunos de ellos del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), y se utilizaron las normas técnicas vigentes en Estados Unidos.

También se analizó el comportamiento de los vientos durante huracanes o tornados y los posibles efectos de tsunamis (olas gigantes que se forman en los maremotos), ya que es condición obligatoria de fundamental importancia, que de llegar a ocurrir cualquiera de estos fenómenos naturales en el transcurso de la vida activa de la Central, sus distintas estructuras y edificios los soporten, sin menoscabo alguno de su seguridad.

El diseño

El diseño de una central nucleoelectrica se concibe previniendo no la ocurrencia de un accidente cualquiera, sino precisamente la de aquél que tuviera lugar durante las peores condiciones que pudieran presentarse en el sitio, en función de los requisitos y características determinados. Es éste precisa-

- RHR Sistema de Remoción de Calor Residual
- HPCS Sistema de Enfriamiento de Alta Presión
- LPCS Sistema de Enfriamiento de Baja Presión
- LPCI Inyección Refrigerante de Baja Presión
- Hx intercambiador de calor
- Bomba
- Válvula normalmente abierta
- Válvula normalmente cerrada
- Válvula motorizada
- Válvula de no retorno



Sistemas de enfriamiento de emergencia del núcleo (ECCS) para reactor de Laguna Verde

mente el que se conoce como Accidente Base de Diseño y los criterios de diseño requieren que se analice ante condiciones de sismo y vientos máximos posibles.

El diseño incluye una serie de sistemas cuya misión es:

a) Detener la operación del reactor ante cualquier situación que pudiera poner en riesgo la seguridad. Esto se logra mediante la inserción súbita de las barras de control en el núcleo del reactor, operación que se conoce

como *scram* y que se lleva a cabo en unos cuantos segundos.

b) Asegurar que el núcleo estará adecuadamente refrigerado en cualquier condición. Durante la operación normal, esta función la desempeña el Sistema de Agua de Alimentación, que consta de dos ramas independientes; cada una de ellas puede proporcionar el 50% del flujo total que se requiere para refrigerar el núcleo en condiciones de máxima generación térmica.

Para que este sistema quedara fuera de servicio, sería necesario que fallasen ambas ramas. De ser así, el enfriamiento del reactor quedaría a cargo de los Sistemas de Enfriamiento de Emergencia del Núcleo (ECCS), cuya misión consiste en evitar que éste llegue a alcanzar temperaturas superiores a 1 500 °C, situación que provo-

caría la fusión de las vainas de combustible.

Estos sistemas de enfriamiento son tres: el de Aspersión del Núcleo de Alta Presión, el de Aspersión del Núcleo de Baja Presión y el Sistema de Inyección de Refrigerantes a Baja Presión. Cualquiera de los tres tiene capacidad para mantener refrigerado al núcleo

Barreras de seguridad para la Central Nucleo-eléctrica de Laguna Verde

Contenedor secundario

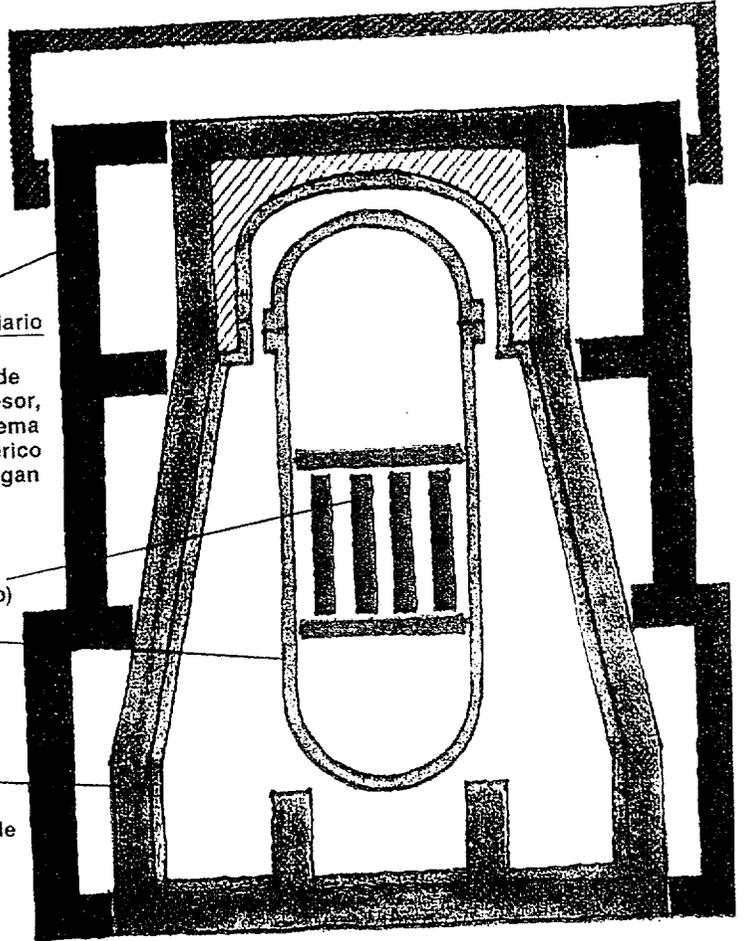
Edificio del reactor (Concreto armado de 1.2 a 1.5 m de espesor, provisto de un sistema de control atmosférico que impide que salgan los productos radiactivos)

Núcleo del reactor (Material radiactivo)

Vasija del reactor
(Acero forjado de 15 a 20 cm de espesor)

Contenedor primario

(Concreto armado de mínimo 1.5 m de espesor, forrado internamente con una placa de acero de 1.5 cm)



Barreras de contención de la Central Nucleoeléctrica de Laguna Verde

son totalmente independientes entre sí y, por lo tanto, la probabilidad de que llegasen a fallar simultáneamente es muy pequeña. No obstante lo anterior, el diseño prevé que dicho evento pudiese tener lugar. De ser así el calor generado en el núcleo podría fundir las pastillas de combustible y las vainas de zircaloy que las contienen. Esto podría ser sumamente peligroso, si el diseño no incluyera los medios adecuados para evitar la dispersión de los productos radiactivos de fisión, contenidos en el combustible fundido. Afortunadamente tales medios existen gracias a un sistema escalonado de barreras que evitaría dicha contingencia.

En el caso de la central nucleoelectrica de Laguna Verde las barreras son las siguientes:

1. Vasija del reactor. Consiste en un recipiente de acero forjado de 22 m de altura, 5.60 de diámetro y paredes cuyo espesor varía entre 15 y 20 cm. Para que los productos de la fisión pudieran traspasar esta barrera tendrían que fundir el fondo de la vasija, en cuyo caso quedarían bajo el control de la segunda barrera, denominada contenedor primario.

2. Contenedor primario. Es un edificio de concreto armado con paredes de 1.5 m de espesor mínimo, forrado internamente con una placa de acero de 1.5 cm de grueso que garantiza una hermiticidad absoluta.

La posibilidad de que el material radiactivo pudiese salvar esta barrera es ya muy pequeña. No obstante se cuenta con una tercera protección: el contenedor secundario.

3. Contenedor secundario. El también llamado edificio del reactor, está diseñado para rodear al contenedor primario. Es una construcción de con-

creto armado cuyas paredes tienen de 1.2 a 1.5 m de espesor. Está provisto de un sistema de control atmosférico que mantiene siempre una presión inferior en el aire del interior, de tal manera que los productos radiactivos no puedan escapar al exterior.

En resumen, esta tercera barrera permite afirmar que aun cuando la probabilidad de que llegue a ocurrir un accidente importante es muy pequeña, en caso de presentarse, no daría lugar a un escape significativo de material radiactivo.

Sistemas de control y garantía de calidad.

Para tener máxima seguridad en la central, no basta con disponer de un diseño óptimo, es indispensable cuidar que la construcción sea fiel a las especificaciones del mismo. Esto se logra mediante la adopción de sistemas de control y garantía de calidad, que hacen imposible la utilización de componentes que no cumplan con las normas establecidas lo cual certifica la calidad de la obra.

Operación calificada y controlada.

Tan importante como tener una buena selección del sitio, un diseño óptimo y una construcción perfecta, es que la operación de las instalaciones sea segura y confiable a lo largo de toda la vida útil de la central.

Es condición obligada que el personal sea idóneo y que la operación esté sujeta a una estrecha supervisión a cargo de algún organismo independiente, que vigile continuamente el cumplimiento estricto de las normas vigentes.

En el caso de la central de Laguna Verde, el personal necesario fue seleccionado entre un numeroso grupo de ingenieros y técnicos que se encontraban laborando en las centrales termoeléctricas de la CFE, trabajo en el que contaban con una experiencia mínima de cuatro años. La rigurosa selección se hizo no sólo atendiendo a sus conocimientos, sino también a sus características psicológicas.

El personal seleccionado se dividió en dos grupos: uno de ellos fue enviado a España y el otro a Estados Unidos. En dichos países realizaron los estudios, y adquirieron la experiencia necesaria para operar la central, habiendo obtenido los certificados que así lo acreditan, expedidos por los organismos reguladores.

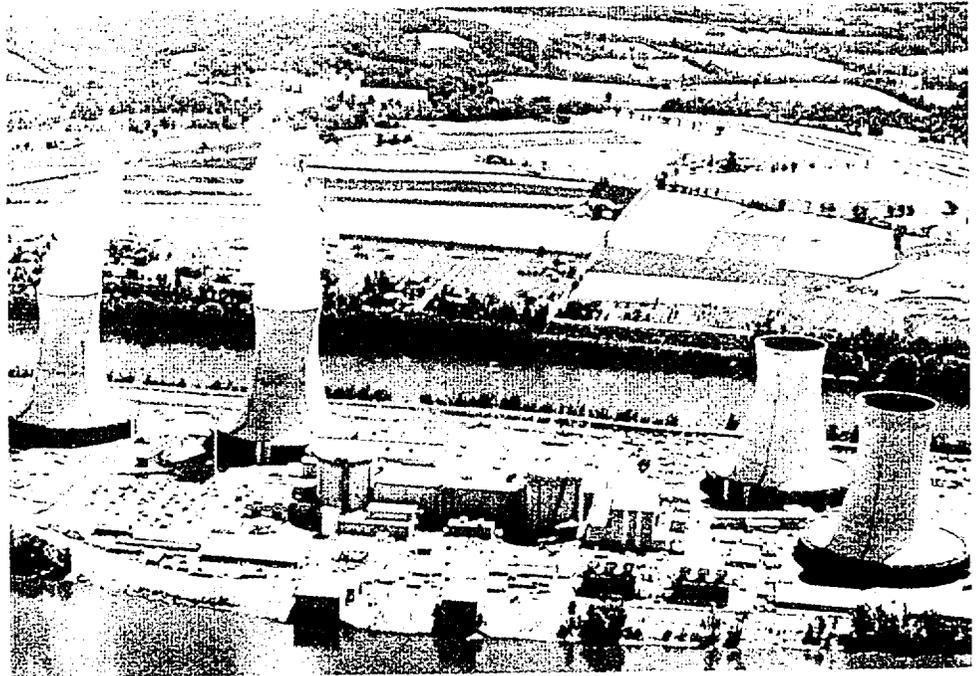
Este personal ha demostrado que los técnicos mexicanos están tan capacitados como los mejores que pueden encontrarse en el extranjero, tal y como

lo hicieron con anterioridad nuestros constructores de presas, pilotos y mecánicos de aviación y operadores de equipos de perforación y explotación petrolera en el mar.

La licencia para operar la central la expide la Secretaría de Energía.

La estrecha supervisión de su funcionamiento y el examen previo a la expedición de la licencia están encomendados a la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias, organismo desconcentrado, que tiene la responsabilidad de verificar el estricto cumplimiento de todas las normas de calidad y seguridad a las que deben ceñirse el diseño, la construcción y la operación de las centrales nucleoelectricas.

La experiencia acumulada en el mundo occidental en la operación de centrales que, como Laguna Verde, cumplen con las normas de la OIEA,



Central nuclear de Three Mile Island.

ascendían en 1996 a más de 5 000 años-reactor sin que hayán ocurrido daños a las personas o contaminación del ambiente.

Este impresionante récord de seguridad tiene únicamente una mancha: a fines del mes de marzo de 1979, el reactor número dos de la central nucleoelectrónica de Three Mile Island, ubicada en el estado de Pennsylvania, en Estados Unidos, sufrió el más serio accidente que jamás haya ocurrido en algún reactor del área occidental.

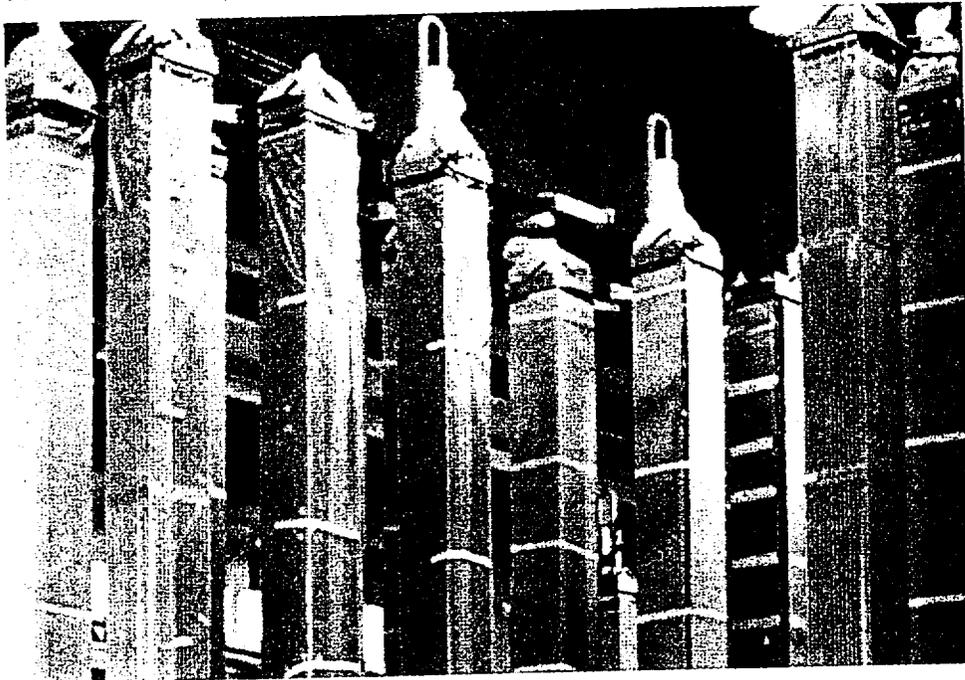
El accidente, que ocasionó la fusión parcial del núcleo del reactor, sirvió para comprobar que si bien es cierto que las centrales nucleoelectrónicas no son perfectas, sí son las instalaciones más seguras que el hombre ha construido.

El sistema de barreras múltiples funcionó perfectamente, evitando la diseminación del material radiactivo; la segunda barrera no fue violada, de ahí que la dosis promedio de radiación ocasionada a las personas que vivían

alrededor de la central, fuera apenas de 8 mrem; aproximadamente una quinta parte de la que genera una simple radiografía del tórax.

Por otra parte, a fines del mes de abril de 1986, el reactor número cuatro de la central nucleoelectrónica de Chernobyl, en la URSS, sufrió el accidente más grave en toda la historia de las centrales nucleoelectrónicas. Una explosión de vapor produjo la destrucción e incendio de su núcleo que aunada a la carencia de un sistema de barreras escalonadas, provocaron el esparcimiento de cantidades importantes de material radiactivo que afectaron principalmente al territorio de la antigua URSS y al de algunos países europeos.

Vale la pena insistir en que este reactor es radicalmente diferente a los del mundo occidental y, particularmente, a los de Laguna Verde, en los que es imposible la ocurrencia de un accidente semejante.



Ensamblados de combustible de un reactor BWR.

8.

Los residuos radiactivos

La operación de una central nucleoelectrónica produce residuos radiactivos sólidos, líquidos y gaseosos. Estos pueden ser de alta, mediana o baja intensidad y de larga, mediana o corta vida media. La vida media es el tiempo que tarda cierta cantidad de material radiactivo en perder la mitad de su actividad.

Los residuos sólidos son materiales que sufrieron contaminación radiactiva durante los trabajos normales de operación o mantenimiento, tales como herramientas, ropa, equipo de trabajo y principalmente los ensambles de combustible que fueron extraídos del reactor por haberse terminado su vida útil. Aquéllos por lo general son de baja intensidad y de corta o mediana vida media, mientras que los últimos contienen una gran diversidad de isótopos radiactivos de elevada intensidad, que pueden ser de corta, mediana o larga vida media.

Los residuos líquidos y gaseosos son generalmente de baja intensidad y de mediana o corta vida media. Dentro de los primeros podemos mencionar a los drenes del equipo o del piso, algunos desechos químicos y agua mezclada con detergentes. Los residuos gaseosos son gases no condensables que acompañan al vapor y que se separan de él precisamente en el condensador.

Los residuos líquidos son recogidos cuidadosamente y sometidos a un proceso de filtrado, mediante filtros de resinas de intercambio iónico que retienen las partículas radiactivas. Posteriormente, pueden ser descargados al exterior, previa verificación de que su nivel radiactivo no alterará el ambiente.

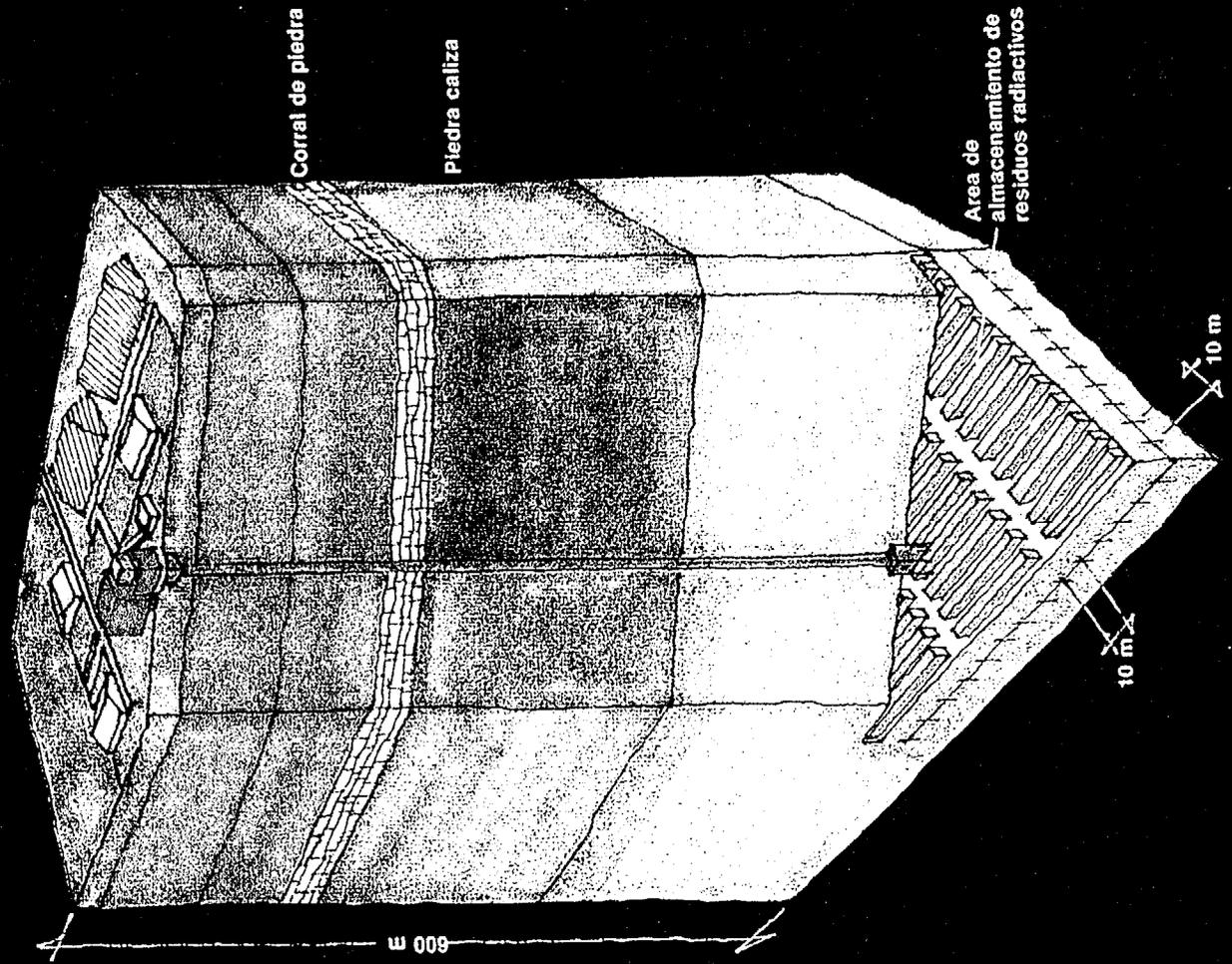
Los residuos gaseosos son extraídos del condensador y transportados a un equipo de tratamiento, en donde per-

manecen el tiempo suficiente para que decaiga su actividad a un nivel tal que puedan ser desalojados hacia la atmósfera en altas diluciones, sin provoca alteraciones en el nivel radiactivo natural del sitio. El mismo equipo se encarga de retener indefinidamente algunos gases radiactivos que, como el yodo 131, tiene una vida media más larga.

Los residuos sólidos de baja intensidad se colocan en tambores de acero especiales, mezclados con alguna resina, asfalto (como es el caso en Laguna Verde) o simplemente ahogados en cemento. Posteriormente, se almacenan en lugares seguros, durante el tiempo necesario para garantizar que su actividad ha dejado de ser peligrosa.

Debido a la actividad y cantidad de productos de fisión, el mayor problema se presenta con los ensambles de combustible irradiado que son extraídos del reactor. Estos se almacenan temporalmente en grandes albercas localizadas en los propios edificios de los reactores en espera de que decrezca la radiactividad de los radioisótopos de vida corta o media, contenidos en las pastillas del combustible irradiado. Basta alrededor de 18 meses para que la radiactividad acumulada en los ensambles de combustible disminuya en más de un 97%. En la práctica, la permanencia del combustible irradiado en estas albercas es considerablemente mayor, pues se ha llegado a la conclusión de que dicho sitio tiene considerables ventajas como almacén temporal.

Los reactores de Laguna Verde están dotados de albercas de decaimiento, con capacidad para almacenar el combustible gastado durante toda la vida activa de la central. Muchas centrales en el mundo se han



Depósito permanente de residuos radiactivos sólidos

acogido a esta solución y otras más han adoptado la práctica de construir albercas adicionales.

Al término de este almacenamiento transitorio, tendrá que adoptarse alguna solución definitiva. Las tres opciones conocidas son las siguientes:

a) Introducir los ensambles de combustible irradiado en contenedores especiales, diseñados para conservarse durante miles de años, y enviarlos posteriormente a un depósito de residuos radiactivos. El depósito debe ser subterráneo y construido en un lugar despoblado, donde los estudios geológicos demuestren la estabilidad de las estructuras del subsuelo durante millones de años.

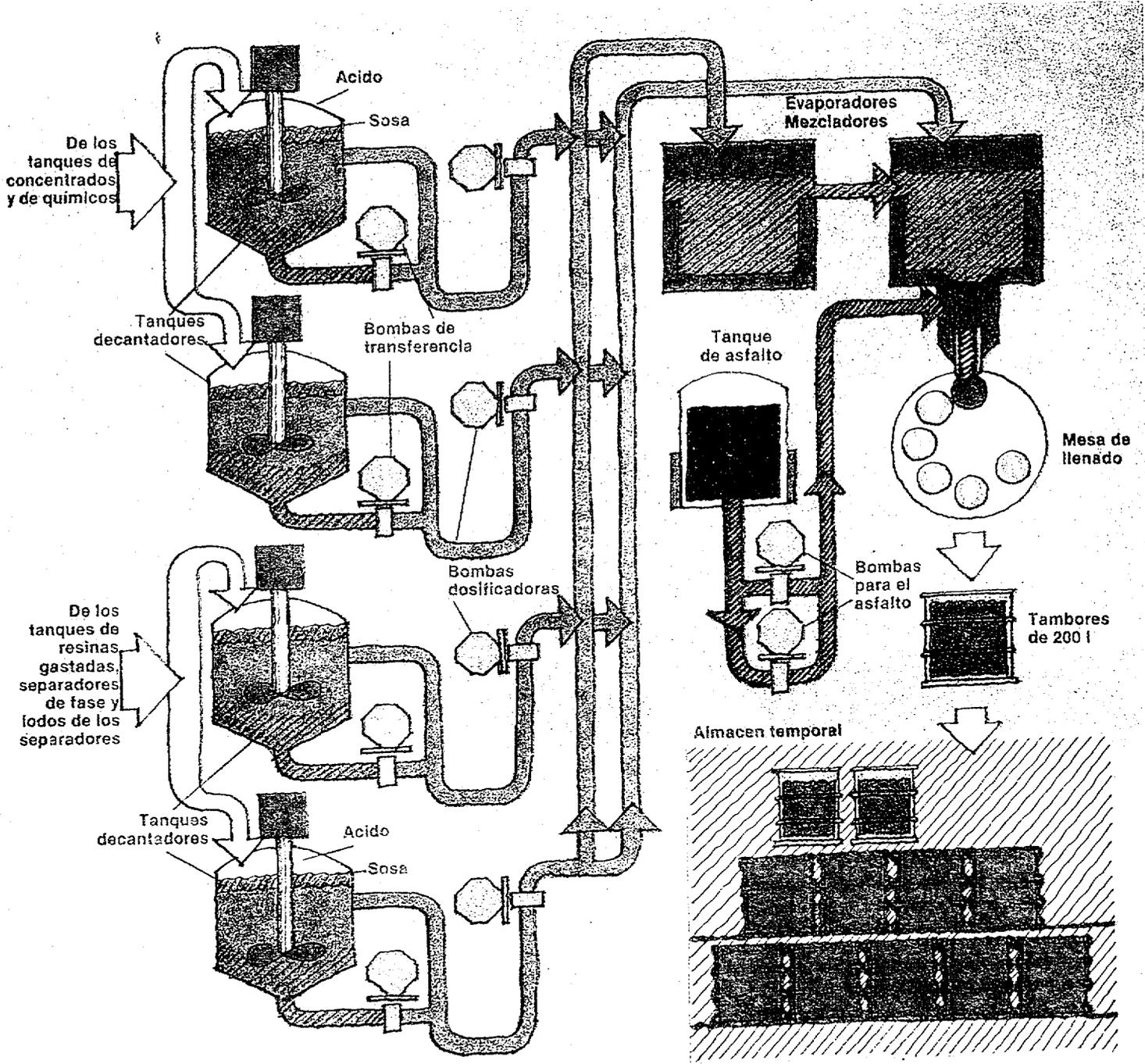
b) Colocar el combustible gastado en los contenedores; almacenarlos en alguna instalación a flor de tierra que sea adecuada durante 30 o 40 años y enviarlos posteriormente al depósito de residuos radiactivos.

La ventaja de esta alternativa estriba en primer lugar, en la posibilidad de diferir una gran inversión como la que se requiere para construir el depósito y, en segundo, que las dimensiones del mismo disminuirán sensiblemente, ya que durante el periodo de almacenamiento temporal en la superficie, los contenedores perderían hasta las nueve décimas partes de su temperatura inicial, que podría ser de cientos de grados.

c) Enviar el combustible gastado en sus contenedores a una planta para su reprocesamiento. Esta solución es costosa, pero sería compensada por el uranio y el plutonio obtenidos, que podrían ser vendidos o aprovechados en la fabricación de nuevo combustible para reactores nucleares. Además, se recuperarían otros radioisótopos útiles en la medicina, la agricultura y la industria. Otra ventaja es que después de extraer todas las sustancias utilizables del combustible gastado, el volumen final de los auténticos residuos radiactivos se reduciría notablemente, se simplificaría su control y disminuiría el monto de la inversión correspondiente al depósito que habría de construirse para almacenarlos definitivamente.

Cualquiera que sea la alternativa que se adopte para salvaguardar los residuos radiactivos de Laguna Verde, en ningún caso llegarán a constituir un riesgo para la salud de la población o para la preservación del medio ambiente.

Debe decirse también que existen soluciones para el almacenamiento definitivo y seguro de residuos radiactivos, porque siempre es posible darles una configuración insoluble y estable para evitar su diseminación. El almacenamiento es técnicamente posible y como el volumen de los residuos es relativamente pequeño, su costo es razonable.



Sistema para el tratamiento de residuos radiactivos sólidos
 Central Nucleolétrica de Laguna Verde



Las centrales nucleoelectricas en el mundo.

La contribución de la tecnología nuclear para satisfacer la demanda de energía a nivel mundial, se ha incrementado fuertemente desde 1954, año en que entró en operación la primera central nucleoelectrica del mundo, en la ciudad de Obnisk, Rusia, hasta nuestros días. A pesar de su relativa corta edad, este tipo de centrales tiene en los albores del siglo XXI, casi el mismo nivel de producción que el de las centrales hidroelectricas a escala mundial; éstas representan el 18% de la producción total de energía eléctrica, mientras que aquéllas producen el 17%. El 65% restante se genera casi en su totalidad en centrales que utilizan algún combustible fósil, ya que las geotérmicas apenas si contribuyen con un poco menos del 3%.

A diciembre de 1996, se encontraban en operación 431 reactores nucleoelectricos en 34 países del mundo y 39 más en construcción en 14 de esos países. La capacidad total instalada, era de 371,508 MW (miles de KW) y la experiencia acumulada, ascendía ya a 5,300 años reactor.

La tecnología de los reactores de agua en ebullición, o reactores BWR, semejantes a los de nuestra central de Laguna Verde, es de las más aceptadas a nivel mundial; 94 de los 431 reactores antes mencionados eran de esta clase y 4 más se encontraban en etapa de construcción en ese entonces.

Aproximadamente la tercera parte de los reactores existentes, están localizados en los países de la Europa Occidental y en un lapso de 30 años, se han convertido en la columna vertebral de los sistemas de suministro de energía eléctrica. Algunos países de esta región, cubren más del 30% de su demanda de electricidad por medios

nucleares, dándose casos como el de Francia en el que dicho porcentaje se eleva hasta el 76%. A principios del siglo XXI, este país, estará produciendo en centrales nucleoelectricas, el 80% de la energía eléctrica que requiera y en dicho nivel tiene planeado permanecer.

Los principales fabricantes de reactores BWR, son los Estados Unidos, cuando Suecia, Alemania y Japón también tienen una producción importante. Incidentalmente en este último país, la compañía eléctrica privada más grande del mundo, ha escogido para sus centrales nucleares el mismo tipo de reactor (el BWR-5) y el mismo tipo de edificio de contención (el Mark II) que son utilizados en la Central de Laguna Verde, lo cual contradice la afirmación que en alguna ocasión se ha hecho, en el sentido de que la tecnología utilizada en nuestra central, es obsoleta.

En México, la producción de energía eléctrica por medios nucleares, se inició formalmente en julio de 1990, con el arranque de la operación comercial de la unidad No. 1 de Laguna Verde, cuya capacidad de 675 MW, se duplicó en abril de 1995, al entrar en servicio la unidad No. 2.

El funcionamiento de esta central ha sido sumamente satisfactorio. Sus factores de capacidad y disponibilidad promedio hasta mediados de 1997 fueron 79% y 84% respectivamente, valores que la hacen destacarse entre las mejores centrales del mundo, que cuentan con reactores de tecnología similar.

Su producción anual de energía eléctrica, que es del orden de 9,250 GWH (millones de KWH), equivale al 6% de la producción total del país en el año de 1996.

CENTRALES NUCLEOELÉCTRICAS DE MÉXICO Y PAISES DE EUROPA



MEXICO

1'973,000 km²
 91'120,433 Hab.
 2
 1,308 Mw

ALGUNOS PAISES DE EUROPA

SUPERFICIE 1'955,344 km²
 POBLACION 292'722,000 Hab.
 No. DE REACTORES 143
 POTENCIAL TOTAL 122,615 Mw

El comportamiento excepcional de la central, se pone de manifiesto en hechos como los siguientes:

La unidad No. 1, alcanzó durante su primer ciclo de operación, 250 días de funcionamiento continuo a plena potencia, estableciendo un récord que la colocó a la cabeza de todos los reactores de tecnología similar instalados en el mundo; en su segundo ciclo quedó ubicada en el tercer lugar con 277 días, cifra que se redujo a 194 días en el tercer ciclo, en el que ocupó el octavo lugar; sin embargo para el quin-

to ciclo, logró ingresar al exclusivo grupo de centrales BWR, que en el mundo han logrado superar la barrera de los 300 días de operación continua a plena potencia, al totalizar 354 días.

Laguna Verde ha comprobado fehacientemente, durante el tiempo que lleva en funcionamiento, que las centrales nucleoelectricas constituyen una de las mejores alternativas para producir energía eléctrica en forma económica, segura y limpia, es decir, sin que su operación altere o contamine el medio ambiente.

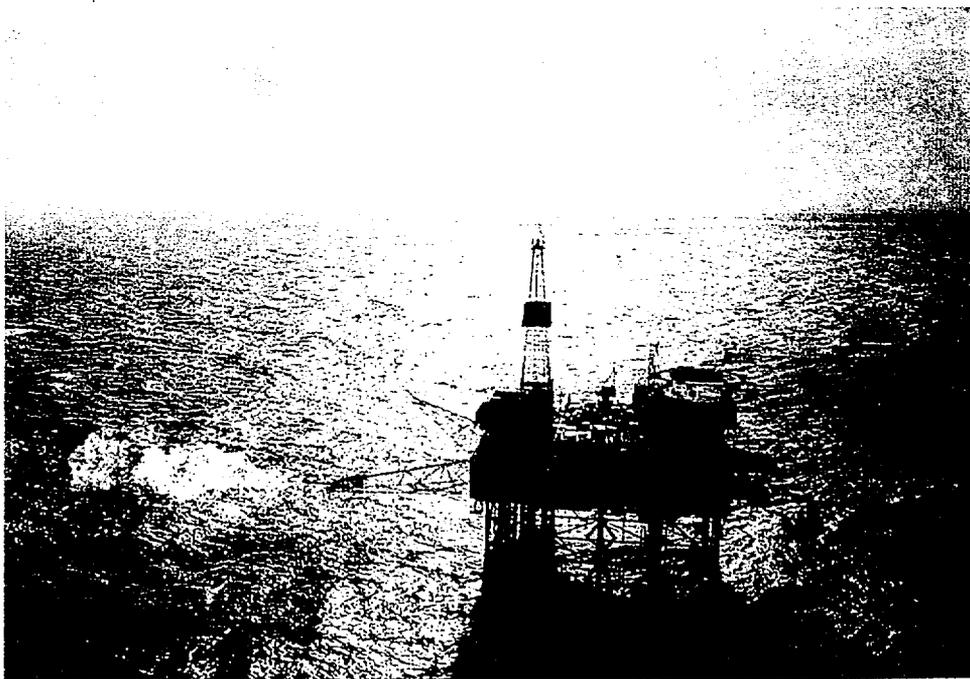
Los recursos energéticos de México y la generación de energía eléctrica

En términos generales podemos afirmar que nuestro país es rico en recursos energéticos, aunque los más importantes son de tipo no renovable. A continuación haremos una breve revisión de los mismos. Dado que la energía eléctrica es la que en mayor grado influye en el desarrollo económico y social de los pueblos, dicha revisión la haremos desde el punto de vista del potencial que los distintos recursos tienen, por lo que se refiere a la producción de electricidad.

Hidrocarburos

Estos son con mucho los más significativos; cabe hacer mención de que México es básicamente un país monoenergético, ya que la oferta interna bruta de energía, ha dependido en más del 85% de estos recursos.

Según reportes oficiales, a fines de 1996, nuestras reservas de hidrocarburos ascendían a 60,900 millones de barriles de petróleo crudo equivalentes. Considerando que a principios de la década de los 80 tales reservas eran de 72,000 millones de barriles, la explotación del recurso lo hizo disminuir en un 15.3% a pesar de las adiciones a la reserva ocurridas en esos 16 años. El crecimiento de la producción industrial, así como de la población, harán seguramente que la extracción de hidrocarburos que ya era de 3 millones de barriles diarios a principios de 1997 continúe aumentando, lo cual hará que las reservas se agoten a mediados del siglo XXI, si no se consigue elevarlas significativamente o no se frena la explotación, desplazando hacia otro tipo de energéticos la demanda de hidrocarburos.



Las reservas de hidrocarburos muy probablemente se agotarán a mediados del siglo XXI.

Energía hidráulica

Aun cuando en 1979 se estimaba que el potencial hidráulico del país ascendía a 172,000 millones de kwh (172 TWH), estudios posteriores revelaron que el potencial aprovechable era tan solo de 80 TWH, de los cuales para 1995, las 76 centrales hidroeléctricas en funcionamiento, con capacidad total de 9,131 MW (miles de kw), representaban ya alrededor del 33% de ese potencial.

Para el año 2004, la Comisión Federal de Electricidad ha programado la instalación de 2,507 MW adicionales de este tipo de instalaciones, con lo cual la utilización del potencial disponible, se elevará al 52%; los 37 TWH restantes, seguramente se aprovecharán totalmente, antes de que concluya la primera mitad del siglo XXI.

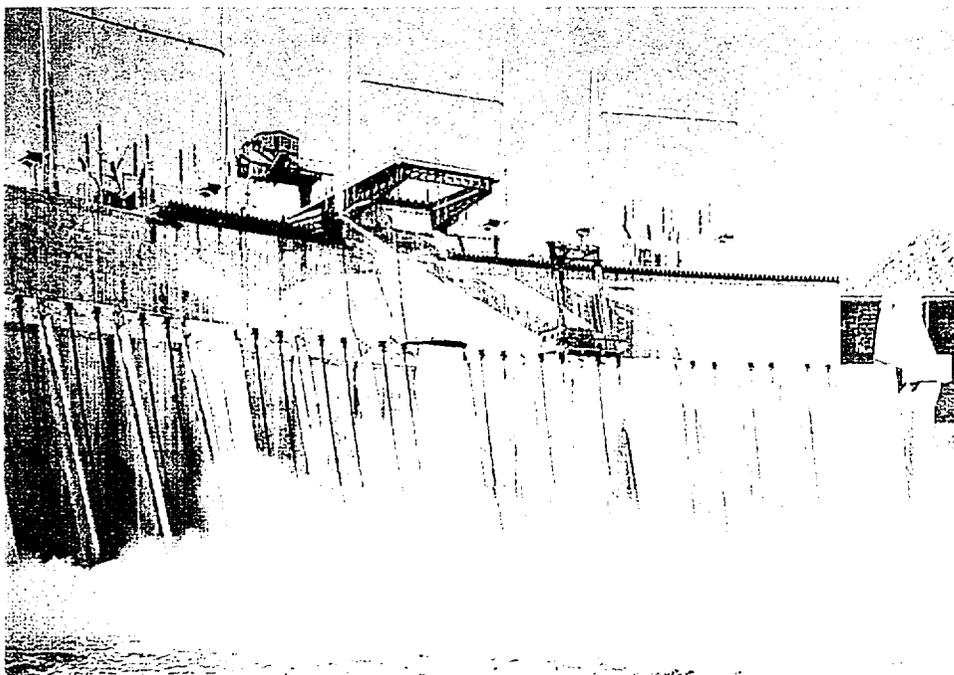
Energía geotérmica

La reserva probada era en 1995 alrededor de 1,300 MW y la probable, del orden de 4,500 MW, repartidos en poco más de 15 sitios.

Para 1995 existían ya 5 centrales geotérmicas con capacidad de 740 MW, más 133 MW adicionales, cuyas instalaciones se encontraban en proceso de construcción, planeándose llegar al año 2004 con una capacidad total de 853 MW, con lo cual se estará utilizando el 66% de la reserva probada.

Carbón térmico

No analizaremos aquí las reservas de carbón mineral susceptible de industrializarse que existen en el país, sino únicamente las del carbón térmico, es decir,



Al inicio del siglo XXI estaremos utilizando el 52% del potencial hidroeléctrico.

de aquel mineral que por su bajo contenido carbonífero, sólo puede utilizarse como combustible.

La reserva probada de este energético es del orden de 100 millones de toneladas, aun cuando la probable asciende hasta 650 millones.

En 1995 existían ya dos centrales carboeléctricas, Río Escondido y Carbón II, con capacidad total de 1,900 MW y 700 MW adicionales en proceso de construcción.

Se estima que el carbón térmico disponible, apenas si servirá para satisfacer las necesidades de combustible de estas instalaciones, en el término de su vida útil.

Uranio

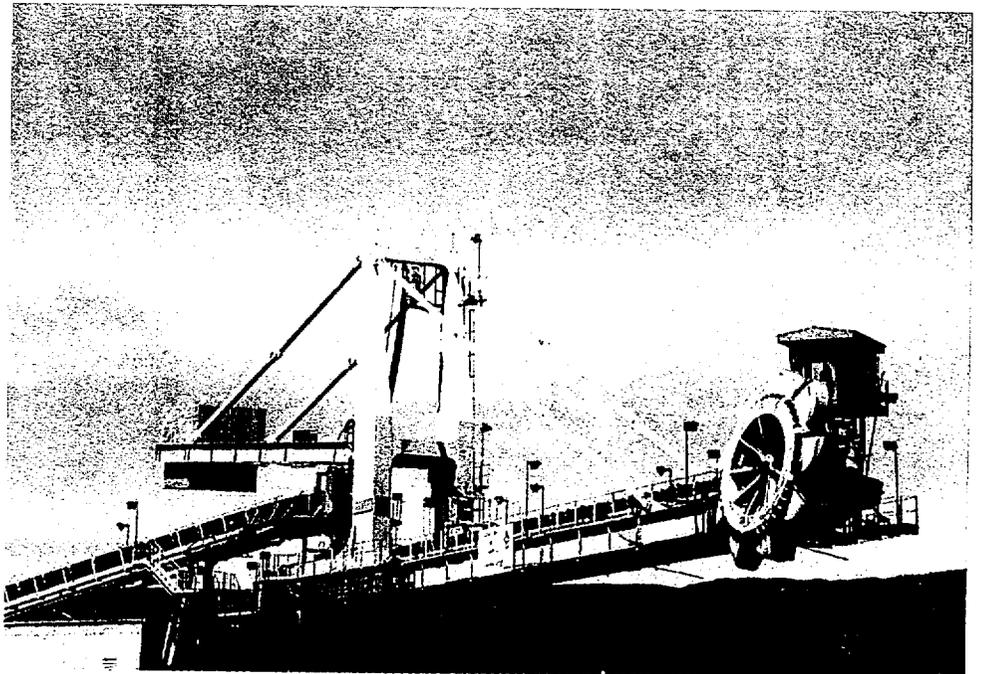
Las reservas probadas de uranio en México, son de 14,600 tons., de las cuales 10,600 son económicamente explotables. Estas reservas aseguran el com-

combustible necesario, para abastecer los dos reactores de la central nuclear de Laguna Verde durante toda su vida, con un excedente de 30%.

Cabe mencionar que la exploración del territorio mexicano en busca de este recurso, ha cubierto solamente una pequeña parte de su superficie, por lo que es muy probable que las reservas aumenten al reanudarse los trabajos de exploración.

Nuevas fuentes de energía

Existe un gran interés tanto en la Secretaría de Energía como en la Comisión Federal de Electricidad, por aprovechar significativamente las llamadas energías "blandas" particularmente por lo que se refiere a la energía solar, de la cual existe un elevado potencial y de la eólica, que aunque en menor grado, también es abundante.



Las centrales carboeléctricas de Río Escondido y Carbón II, consumirán durante su vida útil la totalidad de las reservas conocidas de carbón térmico.

A mediados de la década de los 90, se contaba ya con varias instalaciones experimentales para el aprovechamiento de la energía solar y la primera eólica, con una capacidad de 1,575 kw (1.575 MW) en siete unidades de 225 kw.

A pesar de lo anterior, se estima que la contribución de estas fuentes, a la satisfacción de las necesidades de energía eléctrica del país, no será importante, por lo menos durante los veinte primeros años del siglo XXI.

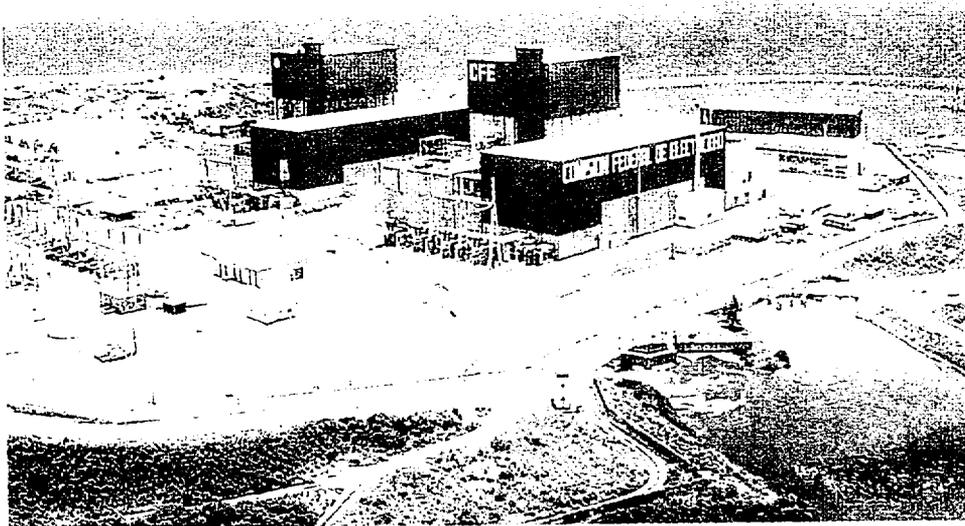
Perspectivas

Suponiendo que en un afán de preservar nuestras reservas de hidrocarburos, congelásemos la utilización de estos recursos para la producción de energía eléctrica al valor que tenían en 1996 y que adicionalmente desarrolláramos totalmente nuestros recursos

hidroeléctricos, geotérmicos y uraníferos conocidos, México sería capaz de producir alrededor de 197.5 TWH anuales a expensas de su potencial energético.

Suponiendo asimismo que la tasa media de crecimiento anual de la producción eléctrica, en el periodo 1997-2010 fuese del 5% (en realidad dicha tasa fue de 5.3% en el periodo comprendido entre 1980 y 1996, a pesar de las tres severas crisis económicas que el país sufrió en dicho lapso), la producción anual eléctrica para el 2010, deberá ser alrededor de 297 TWH y los 197.5 TWH que seríamos capaces de producir anualmente a expensas de nuestros propios recursos, si congeláramos el empleo de nuestros hidrocarburos para este propósito el valor que tuvo en 1996 no resolverían el problema del abastecimiento eléctrico más allá del año 2002.

Es fácil ver por lo mismo, que no será posible evitar que el consumo de hidro-



Las reservas de uranio bastan para garantizar el consumo de Laguna Verde con un exceso de 30%

carburos en la producción eléctrica continúe aumentando, aunque es evidente que estamos obligados a realizar todos los esfuerzos posibles, para que los aumentos sean reducidos.

Tales incrementos en el consumo de hidrocarburos, afectarán principalmente a nuestras reservas de gas natural, cuya combustión es la que menos efectos nocivos produce al medio ambiente; adicionalmente, el gas natural es el combustible ideal para las centrales termoeléctricas de ciclo combinado, que son las que menos inversión requieren y las que producen energía eléctrica al más bajo costo.

Para moderar la afectación de nuestras reservas de hidrocarburos, tendremos que recurrir a la importación de energéticos; siendo el carbón la fuente de calor más económica entre los combustibles tradicionales, será seguramente el que se seleccione para complementar nuestras necesidades de energía eléctrica, a pesar de los graves problemas de contaminación ambiental que su combustión origina.

Una de las mejores opciones disponibles para frenar el consumo de hidrocarburos, serán siempre las centrales nucleoelectricas, como lo ha demostrado el funcionamiento de la central de Laguna Verde, que desde el

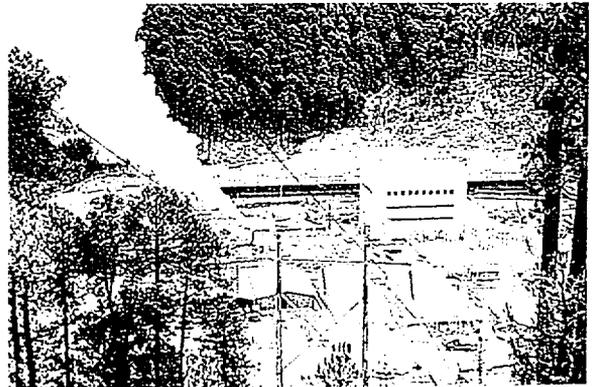
inicio de su operación comercial en julio de 1990, ha venido produciendo energía eléctrica con un factor de disponibilidad del orden del 84% y un factor de capacidad promedio de 79%

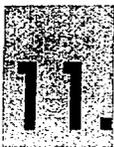
Las nucleoelectricas tienen a su favor dos grandes ventajas: no ocasionan contaminación alguna al medio ambiente y producen electricidad a un costo más bajo que las centrales termoeléctricas convencionales que utilizan combustóleo o carbón. La única desventaja importante que se le puede imputar, es el elevado monto de la inversión inicial que requieren, factor que por sí sólo, ha sido el principal obstáculo que ha frenado su utilización

En el caso de nuestro país, la importancia del potencial uranífero existente en el 75% de nuestro territorio que aún no ha sido explorado, determinará seguramente que en el curso del siglo XXI, tan pronto la economía se haya estabilizado y fortalecido, las centrales nucleoelectricas sean el recurso más eficaz para preservar nuestra riqueza de hidrocarburos.

Aún en el caso de que la cuantificación total de nuestros yacimientos uraníferos no aumentaran las reservas conocidas en forma sustancial, siempre será más económico y benéfico importar uranio en lugar de carbón.

Según estimaciones hechas en 1995, la reserva probada de energía geotérmica era de 1,300 MW y la probable de 4,500 MW.





Datos técnicos

1.- REACTOR

Número de unidades	2 x 654 Mwe Netos
Tipo	De agua hirviendo (BWR)
Combustible	UO ₂ enriquecido
Enriquecimiento alto	2.19% de U ₂₃₅ (en peso)
Enriquecimiento medio	1.76% de U ₂₃₅ (en peso)
Sin enriquecimiento	0.711% de U ₂₃₅ (en peso)
Número de ensamblajes	444 con 62 barras de combustibles y 2 de agua por ensamblaje
Número total de barras de combustible	27,528
Peso total de uranio	81.285 Toneladas de uranio
Longitud activa del combustible	381 cm
Diámetro exterior de la barra	1.226 cm
Espesor del encamisado	0.0813 cm
Diámetro exterior de la pastilla	1.041 cm
Material de encamisado	Zircaloy 2
Material del canal de combustible	Zircaloy 4
Material de las placas de sujeción	Acero inoxidable 304
Barras cruciformes de control de boro	de boro
Sistema en reversa de control líquido	109
Presión de servicio	Pentaborato de Sodio
Potencia térmica del reactor	71.79 kg/cm ²
Pérdidas en los sistemas	1,931 Mwt
Potencia térmica al ciclo de la turbina	3.8 Mwt
Flujo de vapor	1,933 Mwt
Presión del vapor a la salida	3,774 Ton/h
Humedad del vapor	68.2 kg/cm ²
Entalpia	0.3%
Bombas de recirculación	669.75 cal/gr
Potencia de cada bomba de recirculación	2
Flujo de recirculación	4,500 caballos de potencia
Bombas de chorro de recirculación interior	9,600 Ton/h
Flujo de recirculación interior	20
Vasija	27,950 Ton/h
	Acero al carbón revestido interiormente de acero austenítico

2.- TURBINA

Tipo	De flujo cuádruple impulso-reacción
De alta presión	1 turbina
Presión a la entrada	68.2 kg/cm ²
Presión a la salida	13.7 kg/cm ²
Presión en el primer paso	52.8 kg/cm ²
Frecuencia de rotación	1,800 rpm
Temperatura del vapor a la entrada	283°C

No. de extracciones	4
De baja presión	2 turbinas
Presión a la entrada	13.3 kg/cm ²
Presión a la salida	710 mm de Hg.
Temperatura del vapor a la entrada	267°C
No. de extracciones	10

3.- GENERADOR

Tipo	Cerrado con polos no salientes autoventilados
Capacidad máxima	674.5, MWC
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	22 KV
Frecuencia de rotación	1,800 rpm
Corriente	19,683 A
Factor de potencia	0.9

4.- EXCITADOR

Tipo	Directamente acoplado sin escobillas
Capacidad	3,000 KW
Voltaje	525 V
Corriente	5,715 A

5.- CONDENSADOR

Tipo	De superficie de dos cuerpos con dos cajas en la entrada y dos en la salida
Capacidad	1.072 x 10 ⁶ Kcal/h
Número de tubos	40,784
Superficie efectiva total	47,117 m ²
Caudal de agua de mar para enfriamiento	28.2 m ³ /seg

6.- BOMBAS DE CONDENSADO

Tipo	Centrífugas verticales con difusor
Número de bombas	3
Capacidad de diseño	352.5 l/seg.
Carga total	120 m
Frecuencia de rotación	1,170 rpm
Temperatura de diseño en la succión	60°C

7.- BOMBAS DE REFUERZO DE CONDENSADO

Tipo	Centrífugas horizontales
Número de bombas	3
Capacidad de diseño	353.5 l/seg.
Carga total	311 m
Frecuencia de rotación	3,570 rpm
Temperatura de diseño en la succión	40°C

8.- BOMBAS DE ALIMENTACION AL REACTOR

Tipo	Turbo bombas, centrífugas horizontales
------------	---

Capacidad de diseño	685 l/seg
Carga total.	598.3 m
Frecuencia de rotación	Variable (5,200 rpm, nominal)
Temperatura de diseño en la succión	188.9°C

9.- CALENTADORES DE AGUA DE ALIMENTACION AL REACTOR

Tipo	De dos trenes en paralelo
Número de calentadores de baja presión	10
Presión de diseño	56 kg/cm ²
Número de calentadores de alta presión	2
Presión de diseño	161.7 kg/cm ²

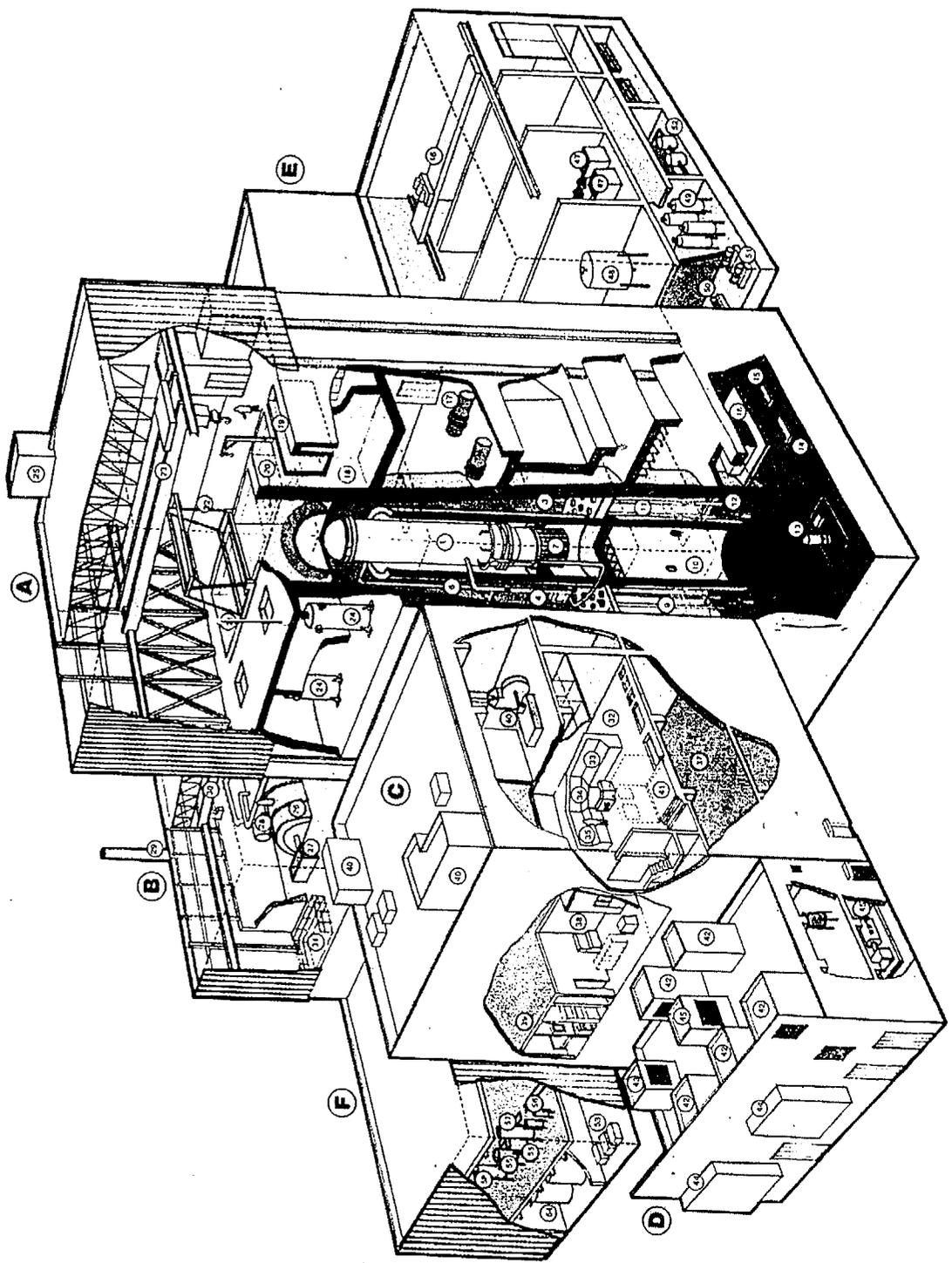
Corte de la Unidad I

A.- EDIFICIO DEL REACTOR

- 1.- Vasija del reactor
- 2.- Muro de blindaje
- 3.- Contenedor primario
- 4.- Pozo seco
- 5.- Tuberías y bombas de recirculación (2)
- 6.- Tuberías de vapor (4)
- 7.- Tubos guía de las barras de control (109)
- 8.- Losa diafragma separación del pozo seco y el pozo húmedo
- 9.- Pozo húmedo
- 10.- Alberca de supresión de presión
- 11.- Tuberías de descarga de vapor (68)
- 12.- Descargas de las válvulas de alivio (10)
- 13.- Bomba de aspersión del núcleo a baja presión.
- 14.- Bombas de carga del sistema de aspersión del núcleo a baja presión
- 15.- Bombas de carga del sistema de aspersión del núcleo a alta presión
- 16.- Unidad de aire acondicionado
- 17.- Cambiadores de calor del sistema cerrado para enfriamiento de componentes nucleares
- 18.- Almacén de combustible nuevo
- 19.- Alberca de almacenamiento de contenedores para transporte de combustible
- 20.- Alberca de combustible irradiado
- 21.- Alberca para almacenar el separador y secador de vapor durante el recambio de combustible
- 22.- Máquina de recambio de combustible
- 23.- Grúa del edificio del reactor
- 24.- Cambiadores de calor del sistema de remoción de calor residual
- 25.- Chimenea de salida de gases

B- EDIFICIO DEL TURBOGENERADOR

- 26.- Turbina de alta presión
- 27.- Válvula principal de paro
- 28.- Recalentadores de vapor
- 29.- Chimenea de la caldera auxiliar
- 30.- Grúa del edificio
- 31.- Pozo de salida y entrada de equipo.



Corte de la Unidad I

C.- EDIFICIO DE CONTROL

- 32.- Sala de control
- 33.- Tablero de control del turbogenerador
- 34.- Tablero de control del reactor
- 35.- Tablero de control de sistemas auxiliares
- 36.- Pantalla impresora de la computadora
- 37.- Cuarto de cableado
- 38.- Cuarto de computación
- 39.- Residencia para operadores
- 40.- Equipos de aire acondicionado
- 41.- Cuarto de observación para visitantes

D.- EDIFICIO DE GENERADORES DIESEL

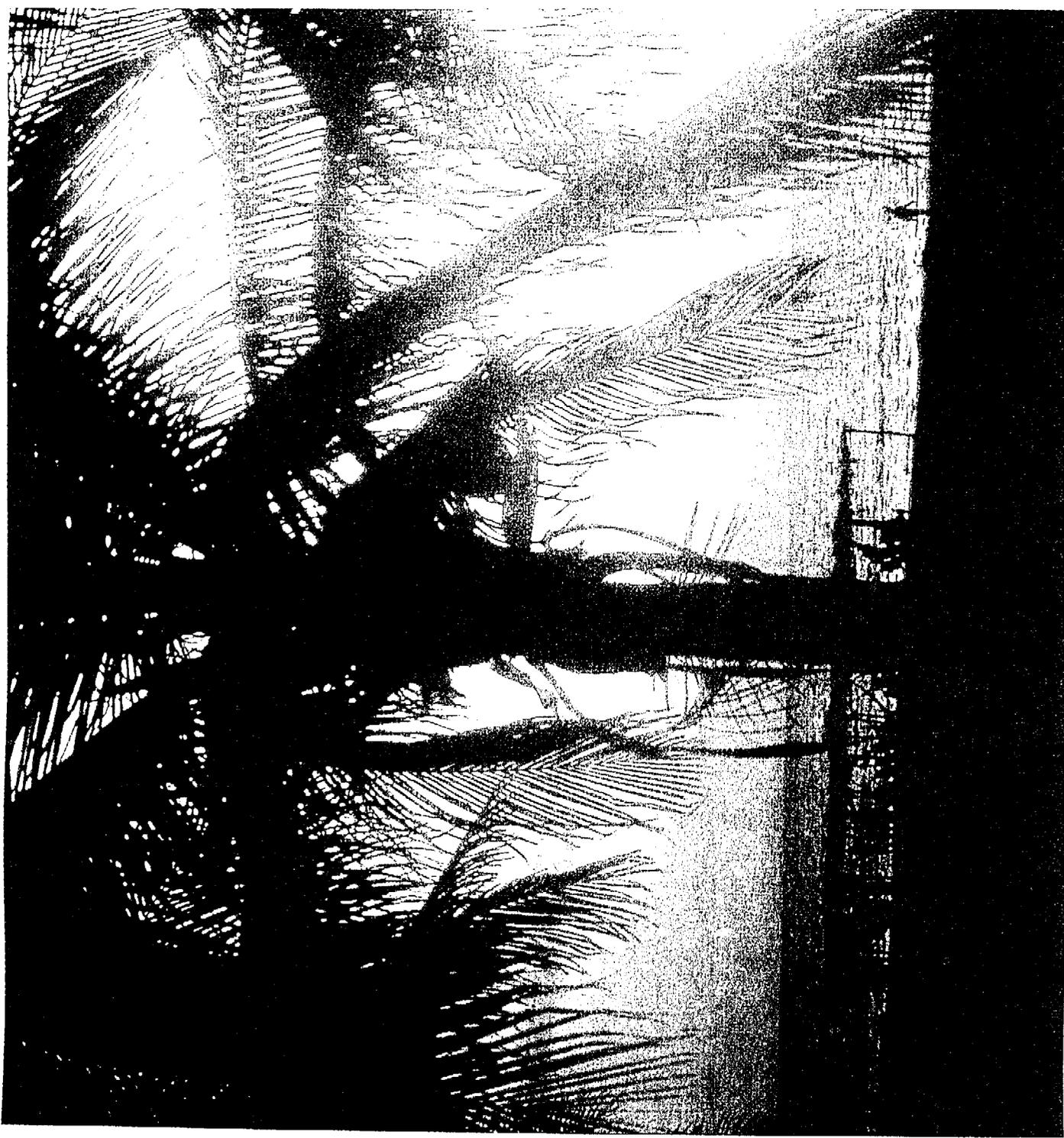
- 42.- Salidas de aire de los generadores
- 43.- Salidas de aire del sistema de aire acondicionado
- 44.- Entradas de aire a los generadores
- 45.- Generador diesel (3)

E.- EDIFICIO DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIATIVOS

- 46.- Grúa del edificio
- 47.- Mezcladores evaporadores del sistema de desechos sólidos (2)
- 48.- Tanque de concentrados de los evaporadores (2)
- 49.- Adsorbentes de carbón activado (8)
- 50.- Bomba de glicol (4)
- 51.- Máquina de refrigeración (2)
- 52.- Preenfriadores (4)

F.- EDIFICIO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA DE TALLER MECANICO

- 53.- Bombas de agua desmineralizada (3)
- 54.- Tanques de agua potable (2)
- 55.- Intercambiadores catiónicos (2)
- 56.- Lechos intercambiadores de iones (2)
- 57.- Intercambiador de iones
- 58.- Regenerador de agua caliente



El principal reto que enfrentará la industria eléctrica mundial en el siglo XXI será el de producir electricidad sin ocasionar alteraciones al medio ambiente.



COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD