

04.82.54

CNEA-AC 20/82

REPUBLICA ARGENTINA
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
Dependiente de la Presidencia de la Nación



GERENCIA DE DESARROLLO

TECNOLOGIA DE COMBUSTIBLES NUCLEARES

Ing. Roberto O. CIRIMELLO

Clases dictadas en el Instituto Balseiro, Carrera de Ingeniería Nuclear, Centro Atómico Bariloche. Febrero de 1980

Buenos Aires

1982

INDICE

INTRODUCCION	1
1. Necesidad del Combustible Nuclear	
1.1. Consumo de Energía	2
1.2. Recursos de Energía Primaria	4
1.3. Consecuencias del uso creciente de energía	6
1.4. Proyección del consumo de energía y posibilidades de satisfacerlo	7
1.5. Fundamentos del uso del combustible nuclear en la Argentina	8
Bibliografía	10
Figuras	11
2. Ciclo de Combustible de Uranio Natural	
2.1. Generalidades	23
2.2. Logística del Ciclo de Combustible	23
2.3. Costo del Ciclo de Combustible	25
Bibliografía	31
Figuras	32
3. Implementación y manejo de la Tecnología de Combustibles Nucleares	41
Figuras	42
4. Diseño de Elementos Combustibles	
4.1. Bases del Diseño	45
4.2. Diseño de Detalle	53
4.3. Descripción de E.C. de Potencia.	60
Figuras	67
5. Comportamiento de Elementos Combustibles.	83
5.1. Cambios estructurales y de las principales propiedades físicas	83
5.2. Comportamiento de los productos de fisión.	84

5.3. Cambio de propiedades mecánicas de la vaina	87	
5.4. Interacción Combustible Vaina (PCI)	87	
5.5. Interacción entre Barras Combustibles y Componentes del ensamble	91	
Bibliografía	93	
Figuras	94	
6. Performance de Elementos Combustibles		
6.1. Fundamentos	114	
6.2. Factores que limitan la vida de los elemen- tos combustibles.	118	
6.3. Comportamiento de los EC en un LOCA.	120	
Bibliografía	123	
Figuras	124	
7. Procesos de Fabricación de Elementos Combustibles		130
7.1. Descripción de la fabricación	130	
7.2. Procesos de interés particular en la fabricación de elementos combustibles	135	
7.3. Proceso de soldadura por "Brazing"	143	
Bibliografía	145	
Figuras	146	
8. Garantía de Calidad		
8.1. Métodos y Sistemas	163	
8.2. Ensayos de calidad especiales en la fabricación de EC.	164	
Bibliografía	167	
Figuras	168	

INTRODUCCION

Este curso es presentado como complemento del que dictara el Dr. F.P. Berger denominado "Nuclear Materials and Fuel Elements".

Se ha denominado "Tecnología de Combustibles Nucleares" por cuanto describe los aspectos tecnológicos relevantes que surgen de la utilización del combustible nuclear como fuente de energía primaria y en particular aquellos relativos al tipo de elementos combustibles usados en reactores de potencia de la Argentina.

Se han incluido algunos temas que significan una repetición parcial del curso dictado por el Dr. Berger por cuanto se requería encuadrarlos en el contexto de su implicancia local o bien para destacar la magnitud relativa de algunos fenómenos a luz de su influencia práctica.

Los apuntes que siguen no son el resultado de una redacción esmerada por lo cual tienen un caracter transitorio hasta que una revisión cuidadosa permita editar una versión definitiva. X

El autor desea expresar que muchos de los temas expuestos relacionados con la experiencia local se debe al trabajo de numerosas personas del Departamento de Combustibles Nucleares de la Gerencia de Desarrollo de la CNEA, en los cuales se considera un mero relator de los conocimientos alcanzados.

Finalmente agradece a las autoridades del Centro Atómico Bariloche y de la Carrera de Ingeniería Nuclear la posibilidad que le han brindado de participar en la tarea emprendida en esta área.

Esta posibilidad ha sido concretada además por el consentimiento de la Gerencia de Desarrollo, para dictar el presente curso.

1. Necesidad del Combustible Nuclear

1.1. Consumo de energía:

1.1.1. Evolución del Consumo de Energía

El consumo diario de energía per capita fue calculado por E. Cook^{1/} para seis etapas de desarrollo humano, con una precisión que decrece con la antigüedad (Fig. 1.1.)

El hombre primitivo (Africa del Este hace 1.000.000 años) sin el fuego, sólo disponía de la energía de los alimentos que comía.

El hombre cazador (Europa hace 100.000 años) tuvo más alimentos y fuego, usando la madera para calefacción y cocinar.

El hombre agricultor primitivo (Oriente 5000 AC) tuvo cosechas crecientes y ganó la energía de los animales.

El hombre agricultor avanzado (Noroeste Europa 1400 de nuestra era) incorporó el carbón para calefacción, algo de energía hidráulica y transporte con animales.

El hombre industrial (Inglaterra 1875) incorpora la máquina de vapor.

El hombre tecnológico (USA 1970) incorpora el uso masivo de la electricidad producida en centrales de potencia y el autotransporte.

En la actualidad las regiones industrializadas usan 80% de la energía del mundo con 30% de la población mundial. U.S.A. consume el 35% de la energía con 6% de la población mundial.

1.1.2. Consumo de energía y el Producto Bruto Nacional

De acuerdo a la experiencia resultante de los tipos de sociedades actualmente vigentes resulta que la llamada tecnológica requiere no sólo un gran suministro de energía sino un alto consumo de energía per capita y la economía social como el nivel de vida está determinado por la interrelación entre reservas, población, eficiencia de los procesos de conversión y la aplicación particular de la energía.

Una forma en que algunos especialistas representan esta relación es a través del consumo de energía en función del Producto Bruto Nacional (Fig. 1.2.)

Esta forma de analizar el desarrollo económico implica una línea particular que se expone aquí a modo de ejemplo.

La relación mencionada refleja diferentes relaciones en que se hallan incorporadas para los distintos países la industria pesada con uso intensivo de energía y la liviana para uso consumidor así como las industrias de servicios.

También incluye la eficiencia de los procesos de conversión en energía utilizable.

A modo de ejemplo puede mencionarse que los que dependen del carbón tienen más requerimientos de energía por unidad de producción que aquellos que usan petróleo.

1.1.3. Consumo de energía y población

De acuerdo a los datos publicados^{2/} que se vuelcan en la tabla de la Fig. 1.3., resulta interesante destacar que el consumo de energía crece en forma exponencial con el aumento de la población mundial, en el presente siglo.

El valor de Q utilizado en la tabla 1 corresponde a 10^{12} BTU ó 10^{21} Joule ó $250 \cdot 10^{15}$ kcal ó $7 \cdot 10^{14}$ KW-h.

1.1.4. Fuentes de energía usadas hasta el presente

La Fig. 1.4. (2) muestra la producción y consumo anual mundial de energía en función del tiempo, mostrándose el cambio operado en la fuente primaria utilizada.

Antes de 1900 sólo se utilizó madera y carbón incorporándose el petróleo y el gas natural a partir de esa fecha, en forma preponderante.

El aporte de la energía nuclear comienza a notarse a partir de 1975.

1.1.5. Factores de planeamiento

El control del planeamiento de energía depende del tipo de nación y modelo socioeconómico que se aplique^{1/}.

Aceptando como premisa que la proyección de una nación, para mejorar la calidad de vida, implica que se tienda a la sociedad industrial, el crecimiento energético seguiría creciendo en forma exponencial por la enorme cantidad de población mundial en un nivel de subsistencia.

A partir de este punto en general los análisis y el planeamiento, entonces, requiere de un estudio particular de la región o nación de que se trate.

Para los países no desarrollados, que incluyen la mayoría de la población del mundo, están por ahora preocupados en mantener o alcanzar un nivel de subsistencia, no tienen disponibles las fuentes necesarias para una transición real a una sociedad agrícola avanzada, urbana e industrial.

Esa transición dependerá de la disponibilidad de energía.

El planeamiento depende de ciertos interrogantes de carácter social e individual. ¿Qué reservas se deben utilizar? ¿Dónde debe ser generada? ¿Quién recibirá la polución de tal actividad? Son algunas de las preguntas de orden social.

Dar libertad de elección de la fuente de energía primaria implica libertad de polución de residuos y calor residual.

El problema se resuelve considerando los beneficios y desventajas que trae aparejado el uso de cierta fuente de energía.

En este sentido surgen algunas consideraciones que los especialistas se plantean:

1. ¿Cómo debemos aplicar o usar las reservas actuales para beneficio de las futuras generaciones?
2. El desarrollo de nuevas fuentes de energía es una inversión para el futuro, no un medio de resolver un problema de hoy.
3. ¿Cómo disponer ahora gran cantidad de energía a bajo costo para los países subdesarrollados?
4. Se debe enfatizar y ordenar el desarrollo de las fuentes disponibles para nosotros con la tecnología existente lo cual significa combustibles fósiles y Fisión Nuclear

La Tabla de la Figura 1.5. resume la relación existente entre estos factores.

1.2. Recursos de energía primaria

1.2.1. Tipos de fuentes primarias y problemas de uso.

La Tabla de la Figura 1.6. muestra un listado de las fuentes de energía primaria actualmente en uso o potencialmente utilizables.

El problema del suministro de energía a largo plazo es extremadamente complejo y plantea tres grupos principales de cuestiones: 1) si puede suministrarse la cantidad necesaria de una cierta clase de energía primaria en un momento y en una zona determinados,

- 2) si se puede conseguir ese suministro en condiciones competitivas;
 3) si está asegurada la satisfacción de las necesidades totales de energía primaria durante siglos en escala mundial.

Estos grupos de cuestiones están interrelacionados y resulta entonces necesario analizar las disponibilidades de fuentes primarias de energía 3/.

1.2.2. Existencias de combustibles fósiles y nucleares

En las Figuras 1.7 y 1.8 se muestran las reservas de combustibles fósiles y su distribución geográfica en el mundo 3/.

La Fig. 1.7 muestra que los depósitos establecidos y probables pueden suministrar alrededor de $9 \text{ a } 22 \times 10^{18}$ Kcal.

La Fig. 1.8 indica la distribución geográfica de esas reservas de acuerdo a lo que actualmente se conoce.

La Figura 1.9 representa las existencias de combustibles nucleares de fisión (Uranio y Torio). La energía potencial de la energía nuclear de fisión alcanza a 3,5 veces la de los combustibles fósiles. La Figura 1.10 muestra la distribución geográfica de las reservas.

Para la Argentina la situación es la siguiente:

Según datos publicados en 2/, la existencia de combustibles fósiles es la siguiente:

0,014	Q*	de Petróleo
0,003	Q	de Carbón
0,007	Q	de Gas Natural

La energía hidroeléctrica aprovechable es de 0,0007 Q/año y la existencia de Uranio es de aproximadamente 1 Q.

Esto revela que la existencia de U es 100 veces mayor en energía utilizable que de combustibles fósiles.

* Ver definición de Q en el punto 1.1.5. de este trabajo.

1.5. Consecuencias del uso creciente de energía

Los límites para el uso de energía son (4):

- a) El suministro de combustible
- b) Disipación de calor
- c) Almacenamiento y eliminación de residuos radiactivos
- d) Almacenamiento y eliminación de otros residuos.

El punto a) ha sido discutido en el punto 1.2. de este trabajo. El punto d) no constituye una limitación importante excepto si toda la energía requerida en los próximos 100 años provendría del carbón, lo cual implicaría la remoción de miles de Km³ de mineral.

1.3.1. Disipación de Calor

La Figura 1.11. muestra una relación entre la fuente primaria de energía las formas intermedias que adopta en una sociedad industrial y el uso final.

El agua de refrigeración requerida para Centrales de Potencia constituyen en EEUU el 10% del total del flujo de agua disponible.

Los diseños actuales de Centrales Nucleares requieren 50% más agua de refrigeración que las plantas a combustibles fósiles, para igual tamaño.

El rendimiento térmico es de 32% lo cual implica una cantidad de calor considerable, si se debe disipar en ríos, lagos o con torres de refrigeración.

El límite de polución térmica en ríos y lagos está determinado por el mantenimiento de faunas y principalmente el cambio local de clima lo cual es severo en caso de disiparlo con torres de refrigeración.

El único sumidero de calor aceptable para un uso creciente ilimitado de energía serían los mares y océanos.

Esto está avalado por cuanto el efecto global es de sólo 0,1°C de aumento de temperatura de la tierra para un consumo 100 veces superior al actual, mientras que se han registrado variaciones de la temperatura media de hasta 0,4°C por causas naturales.

1.3.2. Desechos Radioactivos

En la Tabla de la Figura 1.12. se dan los valores de actividad (Ref. 4) que corresponden a los desechos radioactivos provenientes de una producción mundial de energía 36 veces superior a la actual (mundial).

Se han desarrollado técnicas de solidificación de desechos de alta actividad.

Se ha planeado una demostración en escala natural para almacenar estos residuos en formaciones salinas, las cuales no tienen contacto con aguas de napas utilizables y son buenas conductoras del calor disipado.

Se estima 4/, que se requerirían alrededor de 70 Km² de estratos salinos para los desechos de un año de desechos provenientes de una producción de energía como las estimadas para el año 2000.

Existen alrededor de 10^6 Km² de estos estratos en EEUU y decenas de millones en todo el mundo.

Estas previsiones permiten asegurar que el almacenamiento de desechos no constituirá una limitación en el uso de energía proveniente de los combustibles nucleares.

1.4. Proyección del consumo de energía y posibilidades de satisfacerlo

1.4.1. Población y consumo per capita

Desde el punto de vista mundial se hacen estimaciones de crecimiento que por diversas razones conducen a una llamada "Sociedad Asintótica" de aproximadamente 15.000 millones de habitantes. Se estima que dicha sociedad alcanzaría un régimen de consumo de 20 Kw continuos per capita lo cual conduce a un consumo anual de alrededor de 20 Q, lo cual implica unas 60 veces el consumo actual.

Esta proyección considera que se alcanzarían estas cifras en los próximos 200 años.

1.4.2. Reservas totales de Energía Primaria

De acuerdo a las estimaciones existentes la disponibilidad de energía primaria es la siguiente 5/

Reservas No Renovables

Petróleo	30 Q
Carbón	200 Q
Gas Natural	40,7Q
Fisión	10 ¹⁷ Q
Fusión	10 ¹⁷ Q

Fuentes Regenerables

Solar	70 Q/año
Hidro	0,05 Q/año
Eólica	0,1 Q/año
Geotérmica	0,1 Q/año

1.4.3. Historia del uso de fuentes de energía

En base a lo visto en relación con el consumo, reservas existentes, limitaciones en el uso creciente de energía y las proyecciones en el uso futuro de energía puede darse una idea de la historia y predicción respecto al predominio de las distintas fuentes de energía.

Se ha descartado en este análisis el aporte de la energía solar por cuanto se estima que la misma podrá ser predominante en caso de no hallarse solución tecnológica a la fusión nuclear.

La Tabla de la Figura 1.13. (Ref. 3) muestra el resumen del análisis mencionado.

1.5. Fundamentos del Uso del Combustible Nuclear en la Argentina

1.5.1. Fuentes de Energía Primaria

Hoy nadie duda de la necesidad de fuentes alternativas de energía primaria si se mantiene la tendencia de la sociedad moderna hacia una sociedad industrial avanzada.

El consumo creciente de energía en sus diversas formas y usos agotará rápidamente los recursos de combustibles fósiles los cuales prácticamente desaparecerán a mediados del próximo siglo. La energía solar y la fusión, actualmente en etapas muy preliminares de desarrollo, no estarán disponibles para ser usadas en forma económica hasta mediados del próximo siglo.

El gap en los próximos 100 años sólo puede llenarlo el combustible nuclear de fisión.

En la Argentina la utilización del combustible nuclear resulta legítima y fundamenta la intención de implementar en forma integral las etapas del ciclo de combustible en base a las reservas de fuentes de energía primaria.

En el punto 1.2.2. se ha mencionado la relación existente entre las distintas fuentes o reservas no renovables y la hidráulica en la Argentina. La confirmación de la existencia de 24.000 toneladas de Uranio en el país aseguran el funcionamiento de la Central de Atucha (340 MW), Embalse (600 MW) y 6 Centrales más de 600 MW durante 30 años.

Una reserva probablemente 10 veces mayor a la cantidad mencionada permiten asegurar y fundamentar una seria vía de acción en el aprovechamiento de esta fuente.

En otras palabras la autonomía energética de la Argentina depende sustancialmente del aprovechamiento de sus reservas de Uranio.

1.5.2. Características del Combustible Nuclear

Sin embargo el Uranio no puede utilizarse tal cual sale de la mina o con un tratamiento químico. El proceso de fisión que tiene lugar en un reactor nuclear requiere de una geometría definida, y los productos de fisión que se producen deben ser retenidos y confinados durante operación y después de la misma.

Además la economía neutrónica, las temperaturas de trabajo, y el efecto de las radiaciones a que están sometidos los elementos combustibles exigen materiales muy especiales.

Por otra parte el combustible usado no puede desecharse en forma convencional por razones económicas (contiene material fisionable Pu-239) y por razones de seguridad (contiene productos radiactivos de larga vida)

Esto conduce a dos aspectos diferenciales de la explotación del combustible nuclear: el primero por la existencia de un ciclo que parte de la extracción y se cierra en la reutilización del Plutonio producido en el reactor, y el segundo a la necesidad de una tecnología altamente especializada aunque económicamente factible frente a la de combustibles fósiles.

BIBLIOGRAFIA

- 1/ Scientific American, 225 (3), September 1971.
- 2/ "Survey of Energy resources 1974", published by US National Committee of the World Energy Conference.
- 3/ Mandel, H., Resources of Primary Energy, 4th Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, Paper A/CONF 49/ 8/359, 27 p., 1971.
- 4/ Weinberg et al; Global Effects of increased use of Energy, 4th Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy, Paper A/CONF.49/P/33, 8 p., 1971.
- 5/ M. Crespi, Comunicación Privada.

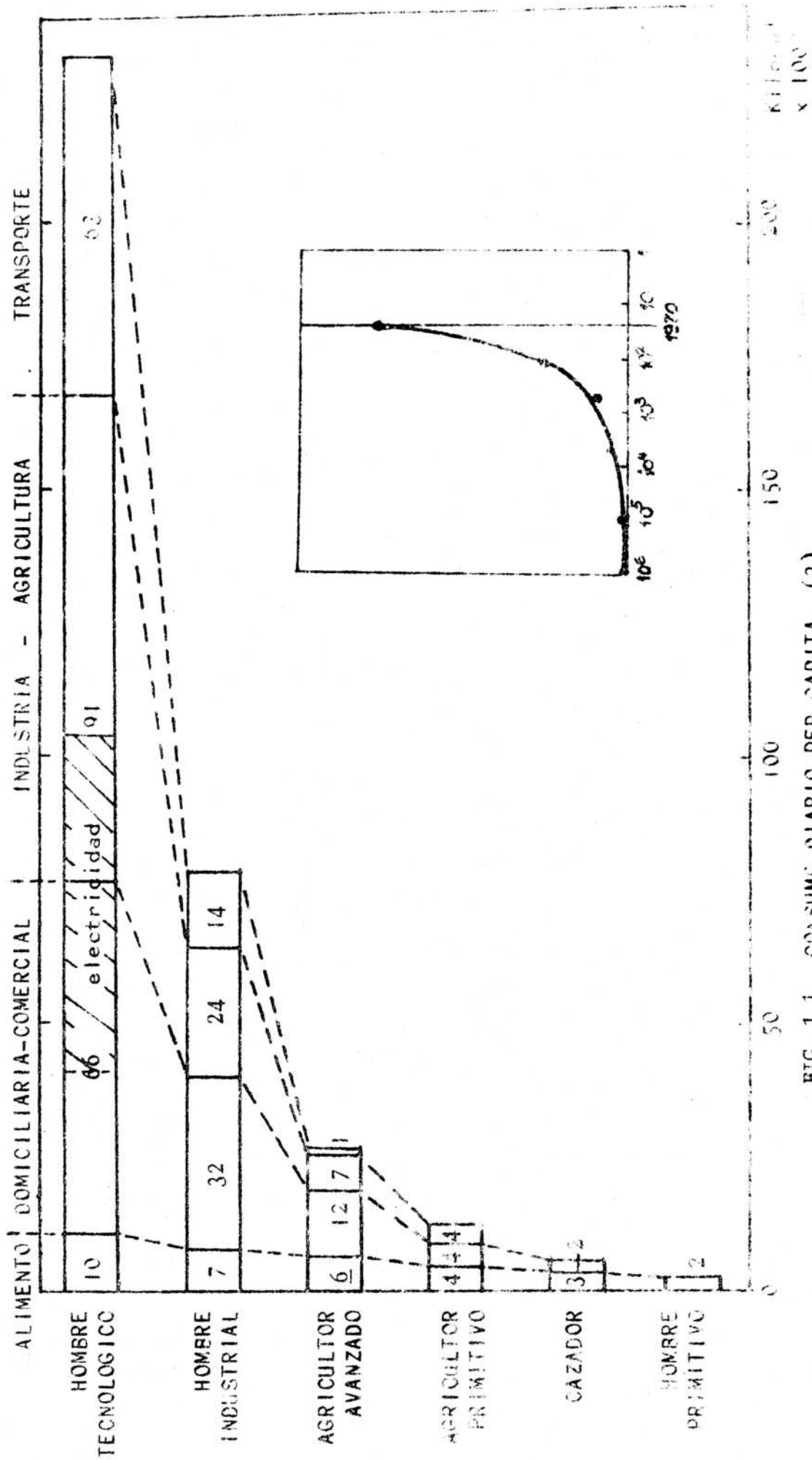
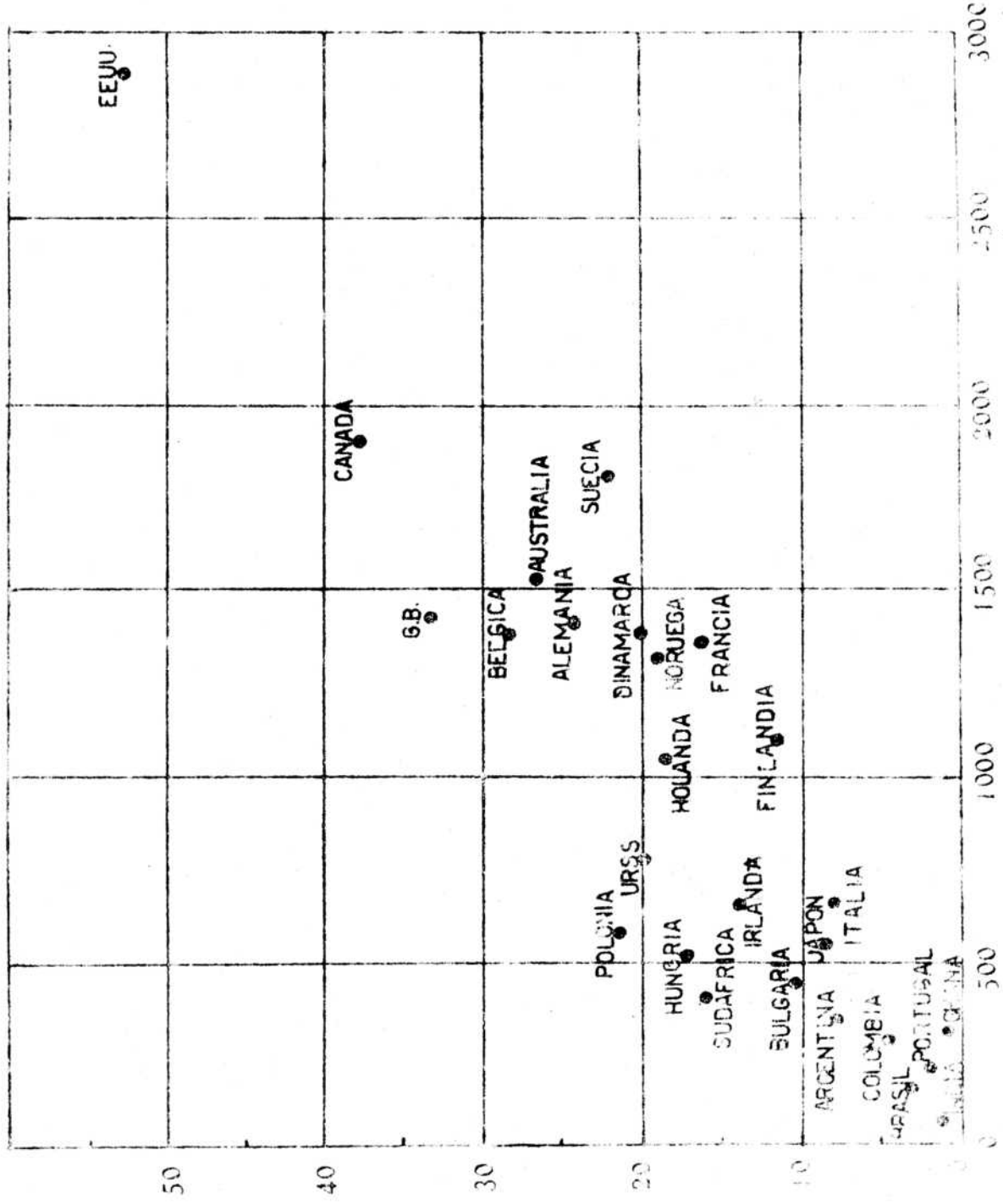


FIG. 1.1. CONSUMO DIARIO PER CAPITA (2).

FIG. 1.2. CONSUMO DE ENERGIA COMERCIAL (1000 KW-h per capita)



PRODUCTO BRUTO NACIONAL (US\$ per cápita) (2)

FIGURA 1.3.

CONSUMO DE ENERGIA Y POBLACION EN EL SIGLO 20

AÑO	CONSUMO (Q)	POBLACION (x10 ⁶)
1900	0.022	1571
1925	0.045	1965
1950	0.08	2486
1960	0.118	2982
1965	0.155	3289
1970	0.201	3632
1975	0.30	3855
1985	0.39	4838

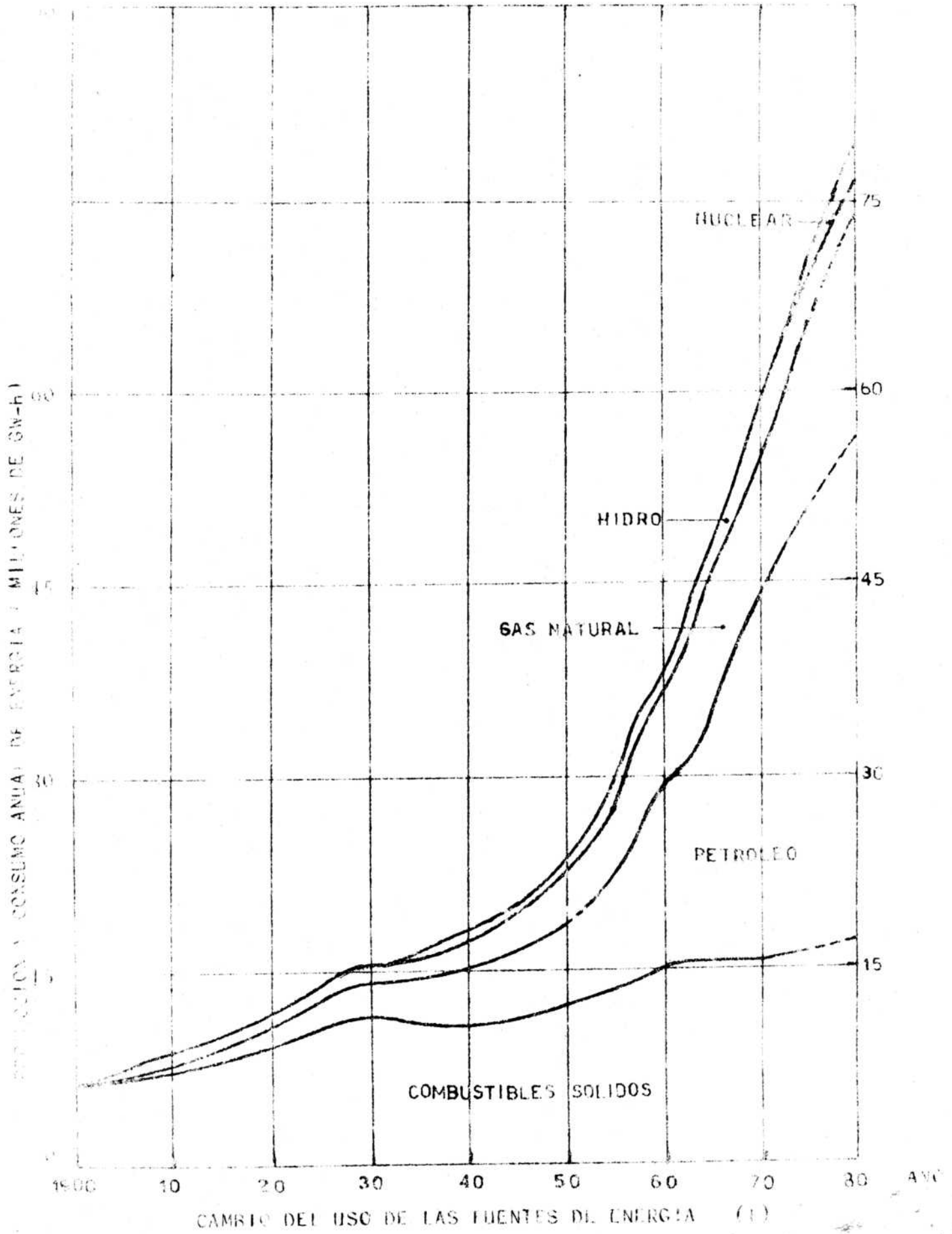


FIGURA 1.5.

CONTEXTO DE IMPLEMENTACION	SELECCION INDIVIDUAL	SELECCION COLECTIVA	EFECTIVIDAD TECNICO-ECONOMICA	LIMITACIONES NATURALES
TIEMPO (años)	1	10	10-100	100-1000
COSTO EN US\$	$10^2 - 10^4$	$10^6 - 10^8$	$10^9 - 10^{11}$	
USOS OPCIONALES	Confort Entretenimiento Comunicación Hogar Transporte Ayuda Tareas	FUENTES UTILIZADAS Estación Central vs. Generación Local Método de Conversión Alternativas de Distribución	RECURSOS ESPECULATIVOS Energía Solar Fusión Fotosíntesis Biológica Celdas de combustible Magnetomotriz Conversión Directa	RECURSOS Reservas Finitas de combustibles Aprovechamiento de Uranio dependiente de los convertidores
CRITERIOS	Costo Relativo Seguridad Personal Calidad de Vida Bases Intangibles y subjetivas	DESARROLLO RECURSOS Carbón Petróleo y Gas Natural Nuclear Petr Petróleo Marino Gasificación de Carbón Fusión Solar	COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS Alcohol Hidrogeno Líquido Amoníaco	FUENTES REGENER. Son limitadas excepto Solar
		SELECCION EMPLAZAMIENTO En Origen del Combustible Vecino al Usuario Consideraciones estéticas Alternativa Uso en el Campo Desechos de Residuos Deterioro Ambiental	EFFECTOS AMBIENTALES Reciclado de desechos Almacenamiento desechos radiactivos Seguridad	EFFECTOS AMBIENTE Límite termodinámico de eficiencia de conversión (Calor Residual) Efectos Climáticos Regionales Producción CO ₂ ineliminable de combustibles
		REGULACION Y CONTROL Legislación Regulaciones Normas		

FIGURA 1.6.

CLASES DE ENERGIA PRIMARIA

COMBUSTIBLES FOSILES	CARBON
	PETROLEO
	GAS NATURAL
COMBUSTIBLES NUCLEARES	URANIO
	TORIO
	DEUTERIO (agua)
	TRITIO (Litio-6)
FUENTES DE ENERGIA REGENERABLES	RADIACION SOLAR
	HIDRAULICA
	MAREOMOTRIZ
	EOLICA
	GEOTERMICA
	MADERA

FIGURA 1.7.

RESERVAS MUNDIALES DE COMBUSTIBLES FOSILES

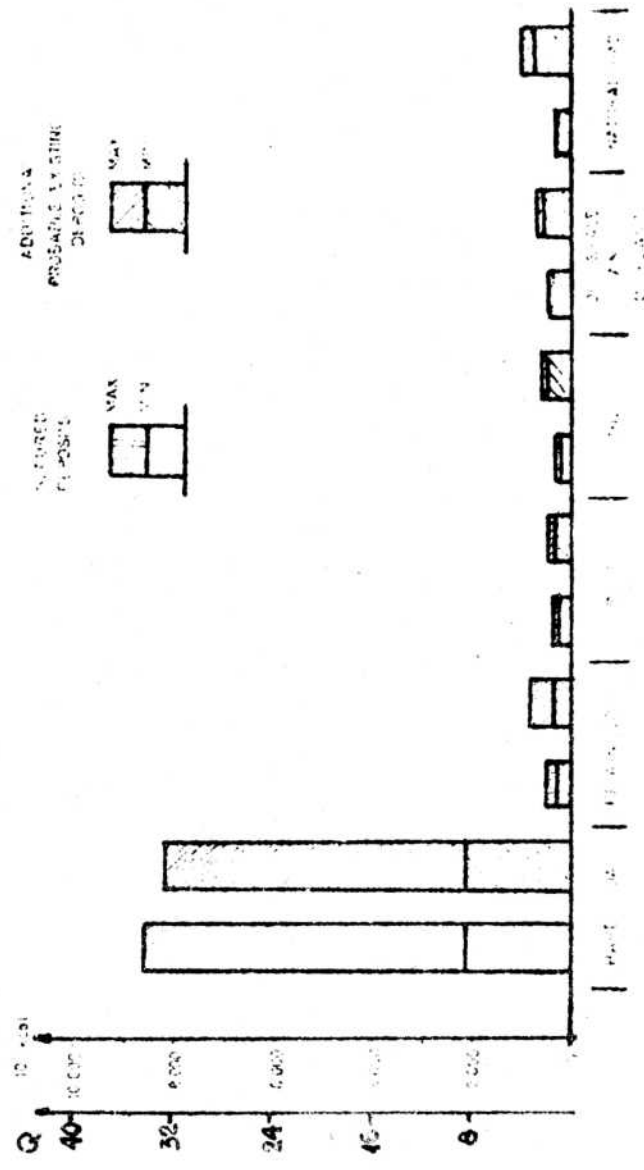


FIGURA 1.8.

DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE COMBUSTIBLES FOSILES

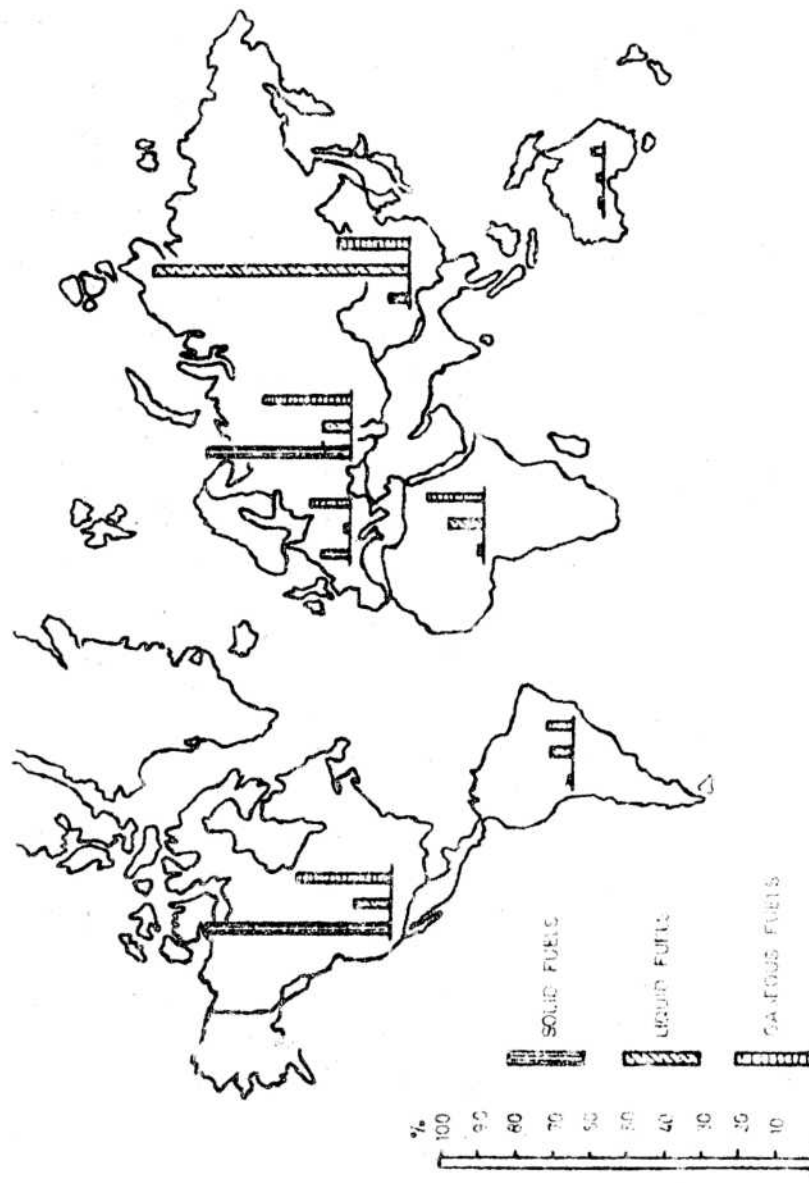


FIGURA 1.9.

RESERVAS DE U y Th
(CHINA Y URSS INCLUIDOS)

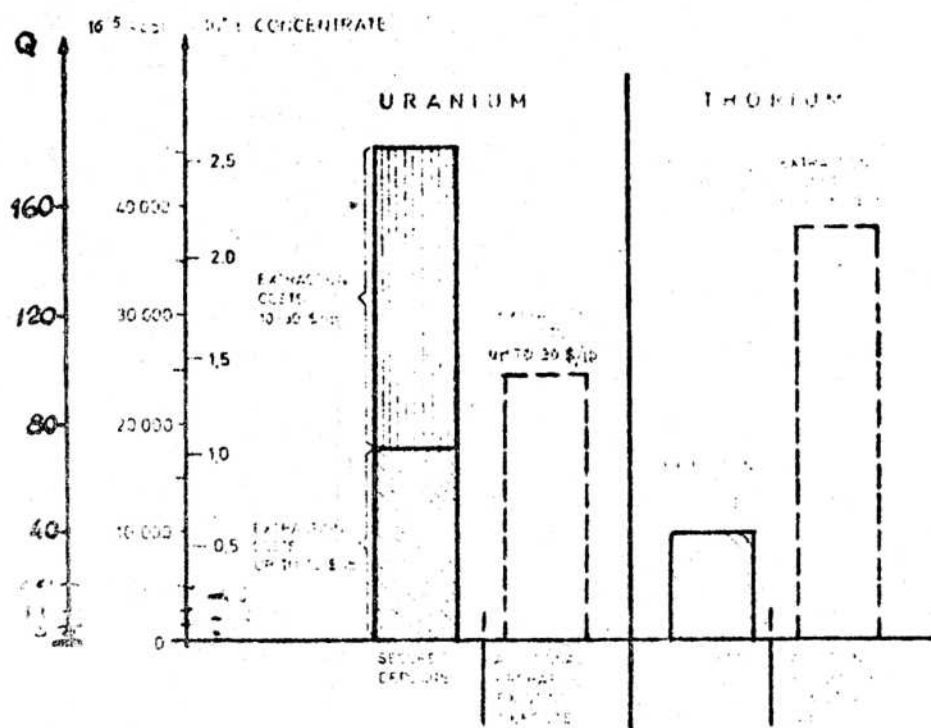


FIGURA 1.10.

DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LAS DISTINTAS
CATEGORIAS DE DEPOSITOS DE U y Th

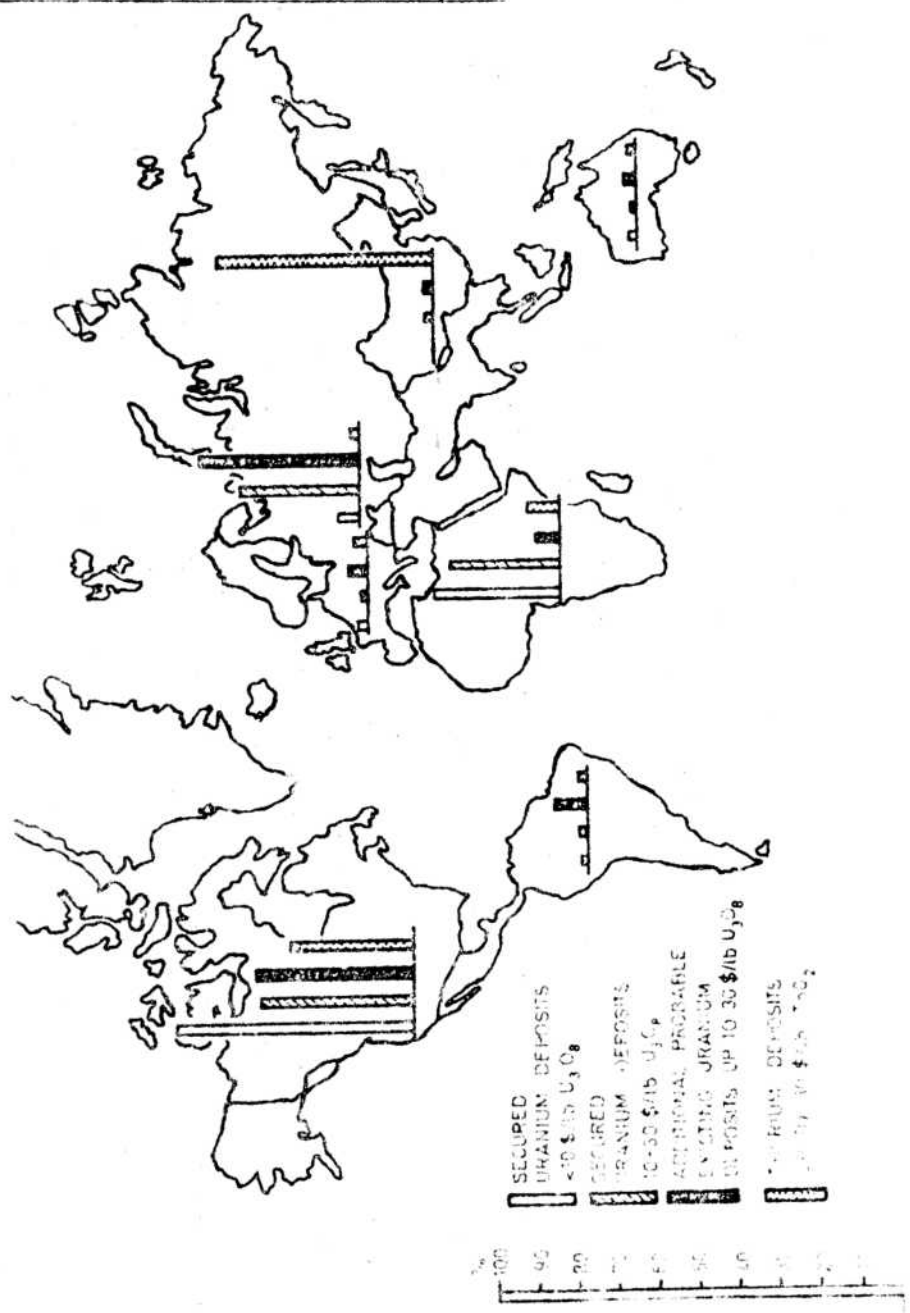
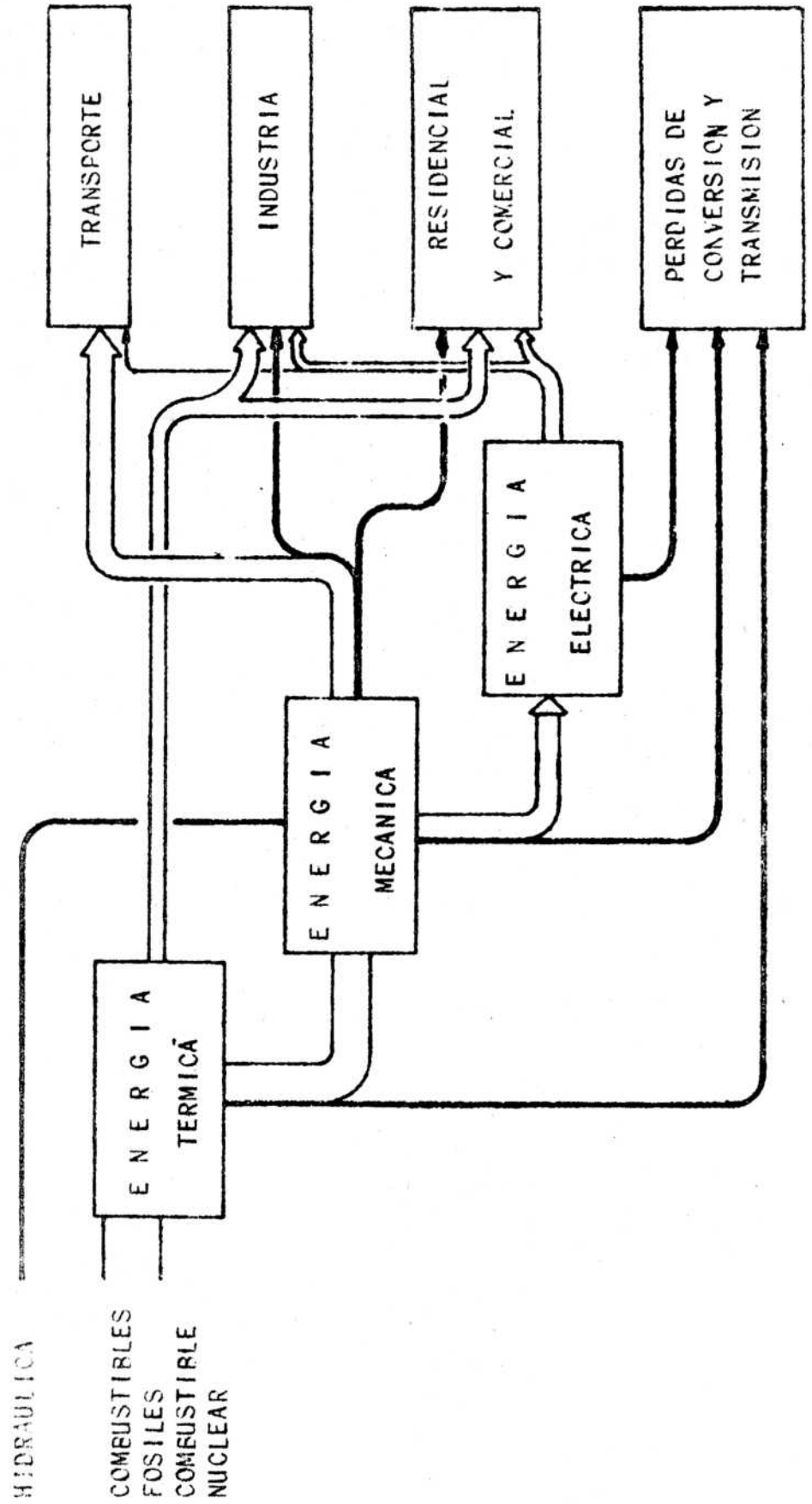


FIGURA 1.11.



FORMA CONVULSIONADA DE ENERGIA

FORMA CONVULSIONADA DE ENERGIA

CANTIDAD DE DESECHOS RADIOACTIVOS CREADOS POR UNA PRODUCCION MUNDIA
DE ENERGIA DE (0.3)

NUCLEIDO	VIDA MEDIA (años)	ACTIVIDAD ACUMULADA EN 1 AÑO (Mci)	ESTADO ESTACIONARIO ACTIVIDAD (M Ci)	CALOR 10 ⁶ (KW)
Sr ⁹⁰	40.4	200.000	8.1 10 ⁶	56.0
Cs ¹³⁷	43.2	279.000	12.1 10 ⁶	64.0
I ¹²⁹	2.5 10 ⁷	0.1	2.5 10 ⁶	1.08
Kr ⁸⁵	15.2	28.500	434.000	0.7
H ³	17.7	1.800	31.900	0.001
Tc ⁹⁹	3.0 10 ⁵	38	11.4 10 ⁶	7.72
Pu ²³⁸	128	270	34.500	1.14
Pu ²³⁹	35.200	4.5	158.000	4.90
Pu ²⁴⁰	9.750	12	117.000	3.65
Am ²⁴¹	660	465	307.000	10.25
Am ²⁴³	11.000	47	517.000	16.7
Cm ²⁴⁴	26.1	6.450	168.000	5.86
TOTAL		516.586,6	35.867.400	172.9

FIGURA 1.12.

EVOLUCION DE LA UTILIZACION DE ENERGIA

AÑO	E P A	FUENTE DE ENERGIA PRINCIPAL	ENERGIA POTENCIAL DIFERENTES FUENTES	CONSUMO ACUMULADO DE ENERGIA
1870	ENERGIA RENOVABLES	ENERGIA MUSCULAR MADERA MAX. ALRED. \$500	FUENTE ENERGIA RENOVABLE UTIL POR AÑO 0,24 G	Acumulado Hasta 1870 5 G
1960	COMBUSTIBLES FOSILES	CARBON (Max. alrededor 1910) PETROLEO Y GAS NATURAL (Max. alrededor 1950)	DEPOSITOS EXISTENTES CARBON = 24 a 76 G PETROLEO = 7 a 9 G GAS NATURAL = 4 a 5 G	1870-1960 15 G
2000				1960-2000 17 G
2030	ENERGIA NUCLEAR	FISION NUCLEAR FUSION NUCLEAR	DEPOSITOS EXISTENTES URANIC = 6 x 10 ³ G TORIC = 7 x 10 ³ G REACCION D - D 10 ¹⁰ G REACCION D - T (Usando Litio G) 10 ⁷ G	2000-2030 4 G
2100	ENERGIA SOLAR	SOL		

2. CICLO DE COMBUSTIBLE DE URANIO NATURAL

2.1. Generalidades

El nombre de "ciclo" es el resultado de la esperanza inicial en el uso del combustible nuclear de lograr la utilización total de los isotopos fisionables.

En el estado actual por razones económicas, políticas y/o estratégicas el "ciclo" no se ha cerrado en forma industrial o comercial y por ello se habla de "ciclo abierto".

La utilización del combustible nuclear requiere de diversas etapas de transformación las cuales introducen no sólo el empleo de nuevas técnicas y actividades de quienes lo manipulean sino de un costo aditivo que finalmente computado globalmente constituirá la base de la economía de su utilización.

Las fuentes primarias de energía en los combustibles nucleares de fisión son el Uranio y el Torio, los cuales proveen los tres isotopos fisionables de utilidad.

La Figura 2.1. muestra una relación entre la fuente primaria, el elemento natural contenido, la vía de utilización o conversión isotópica y finalmente la conversión a energía utilizable.

De esta representación puede destacarse que el reactor actúa en un caso como productor del isotopo fisionable y en el otro como máquina térmica, transformando energía de fisión en térmica. La optimización de su funcionamiento depende del uso preferencial o combinado de ambas funciones.

Si bien nos referiremos en esta parte del curso al ciclo de Uranio natural resulta interesante destacar algunas características diferenciales de los reactores:

Los HWR, LWR y FBR usan el ciclo de Uranio-Plutonio.

Los HTGR usan torio enriqueciendo con Uranio 235 (o Pu) y Uranio 233 reciclado.

Los HWR pueden usar torio enriqueciendo con Plutonio y luego reciclando el Uranio-233 producido.

Los HWR, LWR y FBR producen plutonio utilizable en los cuatro tipos de reactores considerados.

2.2. Logística del ciclo de combustible

Se entiende por logística del ciclo de combustible el conjunto de decisiones y operaciones necesarias para un eficiente suministro, utilización y recuperación del combustible nuclear.

Desde el punto de vista del suministro la Figura 2.2. muestra un esquema donde se han incluido todas las operaciones involucradas en el uso del Uranio y el Torio.

Tomando la parte del ciclo de Uranio natural, este comprende:

- Minería, purificación, conversión a UO_2 , fabricación de elementos combustibles, el uso en el reactor, el almacenamiento temporario del combustible irradiado y el almacenamiento definitivo.

Si se considera la posibilidad de la recuperación y utilización del Plutonio debe agregarse:

- Transporte de elementos combustibles irradiados, reprocesamiento, conversión a PuO_2 , fabricación de elementos combustibles con óxidos mixtos, almacenamiento de residuos radioactivos y productos de fisión.

La etapa de concentración está asociada al lugar de la extracción del mineral y consiste en la extracción de un concentrado denominado "yellow cake" compuesto principalmente de U_3O_8 .

La purificación es la etapa en la cual el concentrado se lo lleva a condiciones de pureza nuclear. Ello implica la separación o reducción de la concentración de los elementos químicos indeseables por su alta sección de captura neutrónica.

La conversión a dióxido de Uranio puede considerarse parte de la fabricación de los elementos combustibles ya que se definen características importantes de funcionamiento del combustible que entrará al reactor:

El polvo de dióxido de Uranio se compacta y sintetiza en las así llamadas "pastillas combustibles" (Pellets) las cuales tienen forma cilíndrica y son de aproximadamente 12 a 14 mm de diámetro e igual altura; estas pastillas se encapsulan en tubos de zircaloy (una aleación de Zr, Sn, Cr, Fe) cerrados en sus extremos por tapones del mismo material que se sueldan al tubo mencionado; con ayuda de algunos componentes estructurales se hacen manojos de varias de estas cápsulas.

Dichos manojos se introducen en el reactor, etapa en la cual los elementos combustibles generan calor por fisión y calientan agua o producen vapor el cual es utilizado para mover las turbinas o bien destinados a usos industriales.

Una vez que el combustible es usado en el reactor y son descargados, se almacenan transitoriamente en piletas ad hoc.

Luego se pueden destinar a almacenamientos permanentes o a una planta de reprocesamiento donde, por medios químico-físicos, se separa el Plutonio 239 que se puede utilizar nuevamente como combustible. Para ello es necesario fabricar nuevos elementos combustibles con óxidos mixtos de Uranio y Plutonio. Esta operación se realiza en instalaciones especiales para confinar el Plutonio por su alta toxicidad.

Desde el punto de vista económico el costo de todas estas operaciones se computan para obtener lo que se denomina: "Costo del Ciclo de Combustible".

2.3. Costo del Ciclo de Combustible

2.3.1. Generalidades

Existen dos razones principales para conocer el costo del ciclo de combustible expresado en términos de su influencia en el costo del KW-h.

1. En el planeamiento, diseño y evaluación de varios tipos de centrales y soluciones tecnológicas, el costo específico de combustible puede servir para determinar el diseño más económico.

Para esta finalidad interesa el costo del ciclo computado para toda la vida de la central

2. Cuando varias centrales están sincronizadas en una red, el costo específico de combustible obtenido es el parámetro de control decisivo para una programación económica del despacho de carga.

En el primer caso se trata de una estimación ya que depende de suposiciones de valores futuros o tendencias de los precios o costos de producción.

Por ello el valor de estos cálculos es el de servir para estudios comparativos en donde interesa el valor relativo y no absoluto.

Se utiliza el método del "valor presente" o actualización, a una fecha especificada.

Se contabilizan así todos los gastos involucrados en el ciclo incluido los tiempos muertos, reservas, mermas, interés de almacenamiento, etc.

Deben considerarse además factores técnicos tales como el quemado, eficiencia térmica y el valor residual de la posible recuperación del Plutonio.

También se consideran los factores operacionales tales como el factor de carga y disponibilidad.

De la misma manera se calcula la energía a generar durante la vida útil considerada.

Ambos valores se dividen para obtener el costo del ciclo de combustible por KW-h.

El segundo caso, denominado "costo corriente" del ciclo de combustible en una central en operación requiere de otro método.

En este caso se toma un período de tiempo y se actualiza a la mitad del mismo. Se computan los elementos combustibles cargados y descargados en ese período y se divide por los KW-h generados en el mismo.

A modo de ejemplo y a fin de ilustrar la capacidad e inversión requerida para las instalaciones del ciclo de combustible, se ha utilizado un estudio 1/ realizado en CNEA 1974.

En dicho estudio se analiza el requerimiento de combustible y agua pesada en un sistema en expansión el cual prevé la utilización de reactores de agua pesada y reproductores rápidos para satisfacer la demanda de energía nucleoelectrónica.

La Figura 2.3. muestra la proyección de potencia nucleoelectrónica instalada.

La misma lleva -con una proyección optimista- a 10.000 MW eléctricos en el año 2000 la componente nuclear.

Esta proyección se integra con doce centrales de 600 MWe y dos reactores rápidos para ver las características que tendrían las instalaciones del ciclo en particular las inversiones requeridas y otros parámetros económicos de interés.

Las Figuras 2.4., 2.5., 2.6. y 2.7. muestran los requerimientos de Uranio natural, capacidad de producción de elementos combustibles, requerimientos de agua pesada y material a reprocessar, respectivamente.

En la Tabla de la Figura 2.8. se han listado las instalaciones típicas del ciclo de combustible a los que se agregan las centrales nucleares como comparación.

Se dan asimismo las capacidades de producción requeridas para satisfacer la demanda de la mencionada potencia nucleoelectrónica considerando un factor de producción de 0,8.

Se ha incluido la inversión requerida en millones de dólares para cada una de las plantas industriales en base a costos unitarios internacionales.

Se da también los costos unitarios de producto, la venta anual y la vida útil de las instalaciones.

Como conclusión puede decirse que la inversión requerida para las instalaciones industriales del ciclo de uranio natural incluidas aquellas involucradas en el reciclado de Plutonio es del orden de 900 millones de dólares contra 12.000 millones de dólares requeridos para las centrales nucleares. Esto implica sólo el 7,5% de la inversión total.

La necesidad de instalaciones experimentales y plantas pilotos para asegurar un suministro en calidad y precio adecuado, es decir para el manejo integral de la tecnología requiere de una inversión del orden de 60 millones de dólares, lo cual constituye menos del 7% de lo necesario para las plantas industriales.

Como resulta entonces de estas consideraciones es necesario un análisis de la utilización del combustible en el reactor para definir la logística del ciclo.

Características tales como: Potencia específica, el quemado de descarga, el tipo de material combustible, la geometría del ensamble, el peso de material combustible por elemento combustible y el porcentaje de material fisionable en los elementos combustibles afectan a dicha logística.

Si se considera el Plan Nuclear Argentino aprobado hasta fines de siglo, que incluye 4 Centrales Nucleares de 600 MW, además de Atucha I y Embalse, los datos mencionados antes serían:

	u\$s x 10 ⁶	%
Inversión en Centrales Nucleares	7.500	93
Plantas Industriales del Ciclo (incluye agua pesada)	400	}
Instalaciones de Apoyo	60	
Reactor de Irradiación	100	
TOTAL	8.060	100

2.3.2. Estimaciones Corrientes

El costo del ciclo de combustible se calcula en forma corriente según la siguiente expresión:

$$C_c = C_U + C_F + C_A$$

donde: C_c = costo del Ciclo de Combustible

$$C_U = f \left(\frac{K_{U_3O_8}}{\eta B} \right) \quad \text{influencia del costo del Uranio}$$

en donde $K_{U_3O_8}$ es el costo de Uranio en u\$s/lb U_3O_8

η eficiencia térmica del reactor

B quemado en Mwd/TnU

$$C_F = f \left(\frac{K_f}{\eta B} \right) \quad \text{influencia del costo de fabricación donde}$$

K_f es el costo de fabricación en u\$s/KgU

$$C_A = f \left(\frac{K_a}{\eta B} \right) \quad \text{influencia del costo de almacenamiento donde}$$

K_a es el costo de almacenamiento.

El costo del Ciclo de Combustible se expresa usualmente en mills (u\$s x 10^{-3})/KW-h para ello se divide la expresión anterior por la energía a generar o generada.

$$C \left(\frac{\text{u\$s } 10^{-3}}{\text{KW-h}} \right) = \frac{\int_{t_0}^{L+A} C(t)p(t)dt}{\int_{t_0}^L E(t)p(t)dt}$$

donde C es el costo del ciclo mencionado antes, E la energía generada o a generar y $p(t)$ un factor de actualización.

Si se considera el efecto del primer núcleo y las constantes de conversión se llega a las siguientes expresiones:

Costo de Uranio ($C_{U_1} + C_{U_2}$)

(primer núcleo)

$$C_{U_1} = \frac{2,6(1+i)^t}{\eta H} K_{U_3O_8}$$

donde i es el interés anual, t_u tiempo de recibido el Uranio hasta utilización y H potencia específica del núcleo.

(núcleo en equilibrio)

$$C_{U_2} = \frac{2,6(1+i)^{t_u}}{\eta B} \frac{1000}{24} K_{U_{308}} F_c$$

F_c = factor de carga de la Central

Costo de fabricación ($C_{F_1} + C_{F_2}$)

(Primer núcleo)

$$C_{F_1} = \frac{(1+i)^{t_f}}{\eta H} K_F$$

(núcleo en equilibrio)

$$C_{F_2} = \frac{(1+i)^{t_f}}{\eta B} K_F \frac{1000}{24} F_c$$

t_f tiempo de fabricación

Costo de almacenamiento

$$C_a = K_a(1+i)^{-t_{ai}} \frac{F_c}{\eta B} \frac{1000}{24}$$

t_{ai} = tiempo (desde salida reactor) de almacenamiento en pileta.

Considerando los siguientes valores típicos:

	CANDU	ATUCHA I
η	0.28	0.32
B (mwd/t_u)	6.700	5.500
t_u (años)	0.5	0.5

n (años)	30	30
i (%/año)	10	10
t_f (años)	1	1
t_a (años)	15	15
$R_{U_3O_8}$ (u\$s/KgU)	60	60
K_F (u\$s/KgU)	60	200
K_A (u\$s/Kg/U)	30	80
F_C	0.8	0.8

Sin considerar el efecto del primer núcleo, se llega a los siguientes valores del costo de ciclo de combustible:

	CANDU	ATUCHA I
C_C (mills/KW-h)	4.15	7.45

Con la incidencia que se detalla a continuación:

	CANDU	ATUCHA I
C_U (mills/KW-h)	2.9	3.1
C_F (mills/KW-h)	1.12	4.00
C_A (mills/KW-h)	0.13	0.35

Desde el punto de vista de la fabricación la muestra una estimación del costo de fabricación de Elementos Combustibles tipo CANDU y Atucha I, detallada según los factores que intervienen en el costo.

Esta estimación es de carácter indicativo y se cita como ejemplo de la incidencia de los distintos factores intervinientes en la producción.

BIBLIOGRAFIA

- 1/ R. Solanilla "Participación Óptima de cada Tipo de Reactor en un Parque Nucleoeléctrico en Expansión",
CNEA, 370 (AG ISSN 0020-0867), 1974

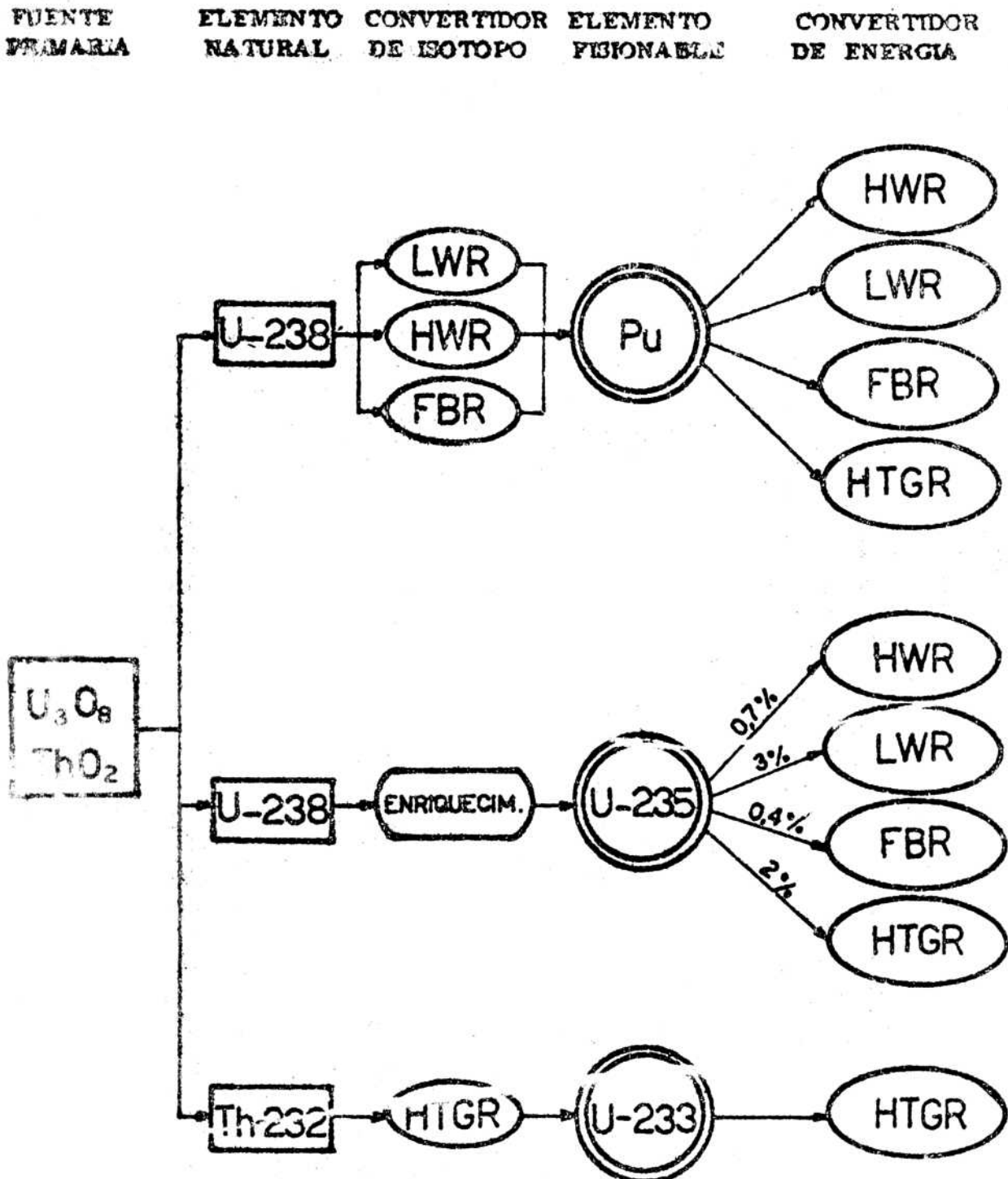


FIG 2.1 RELACION ENTRE LA FUENTE PRIMARIA-CONVERSION-UTILIZACION DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR DE FISION.

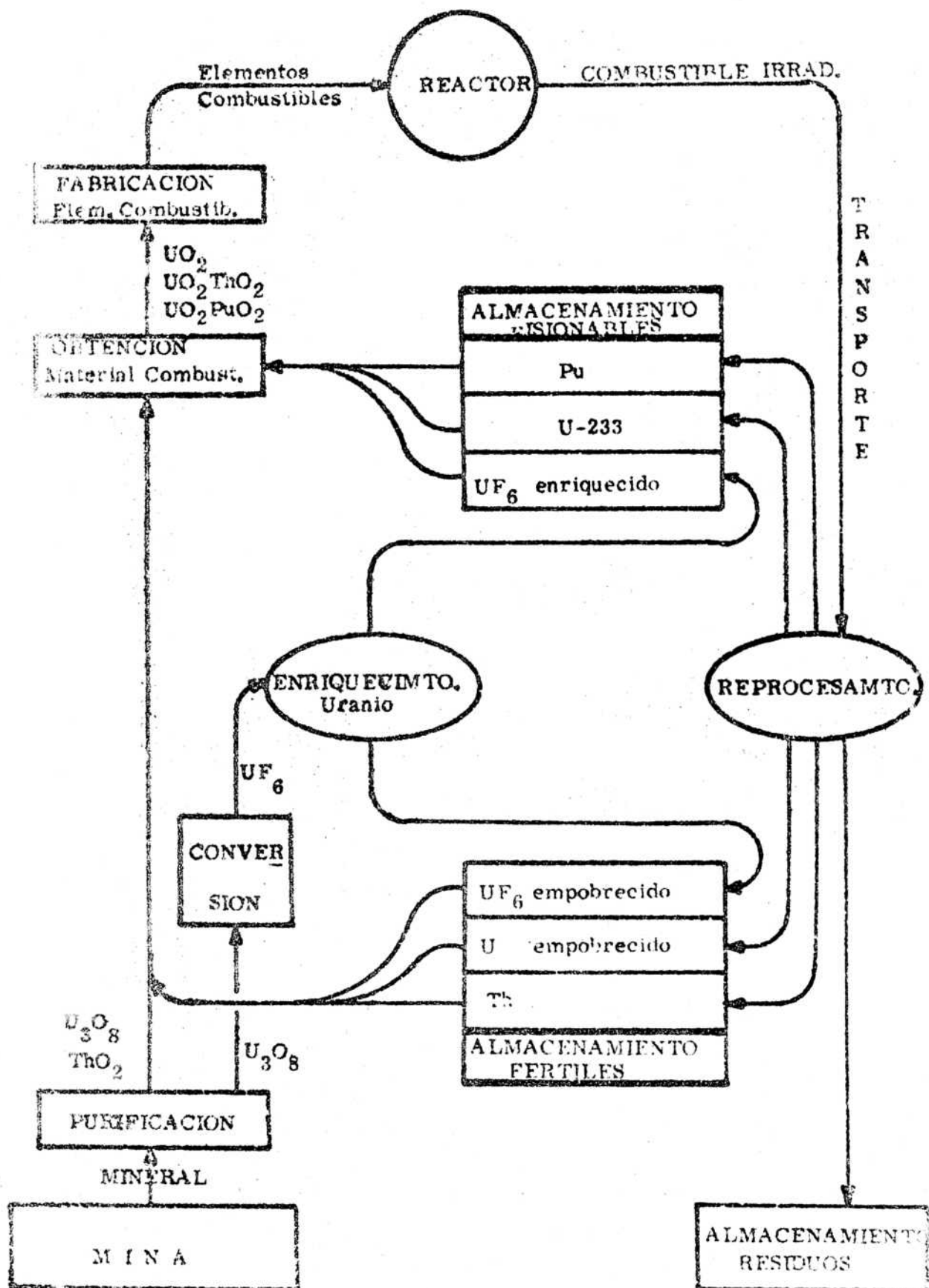


FIG. 2.2. CICLOS DE COMBUSTIBLES NUCLEARES.

FIGURA 2.3. POTENCIA NUCLEOELECTRICA

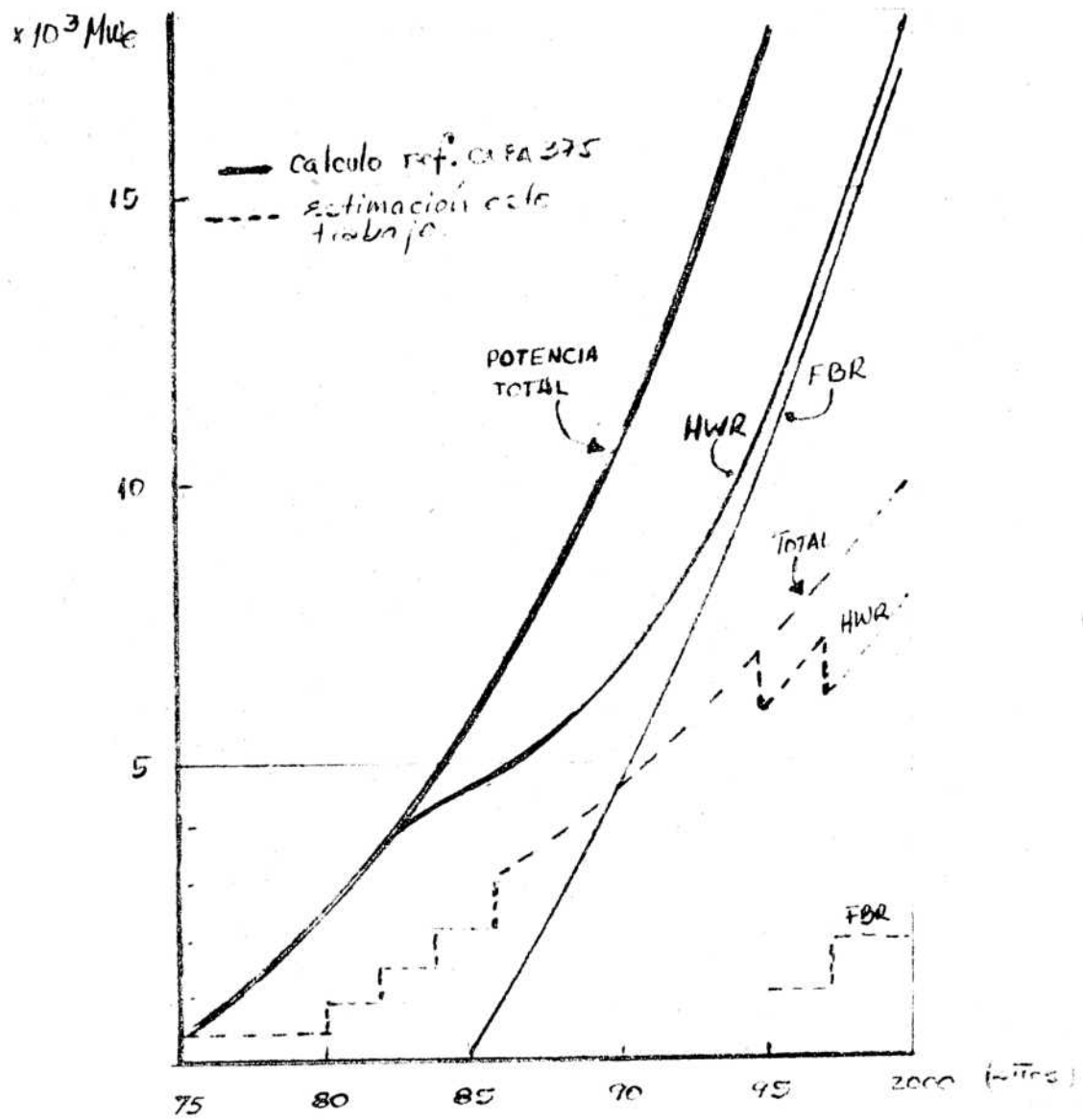


FIGURA 2.4.

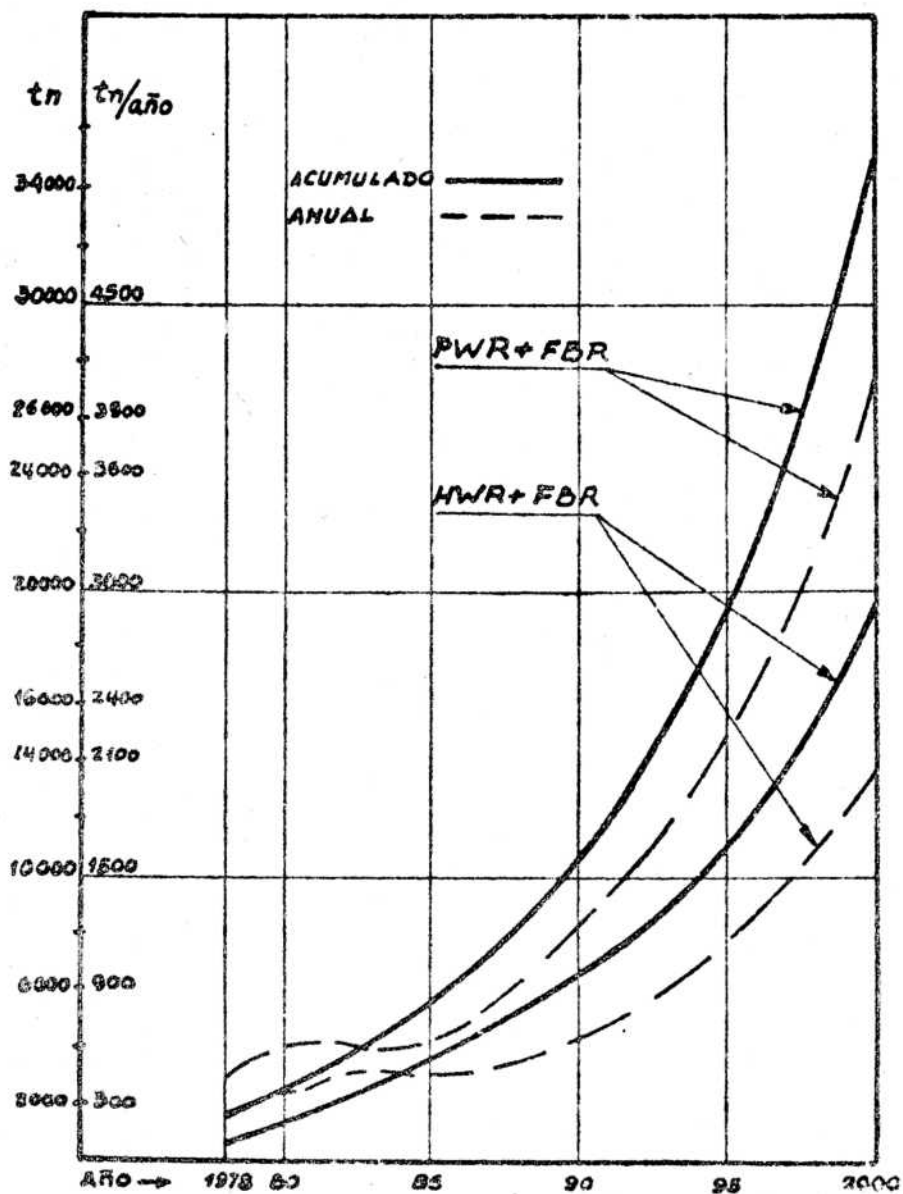
-REQUERIMIENTO DE URANIO NATURAL

FIGURA 2.5.

CAPACIDAD DE PRODUCCION DE EC

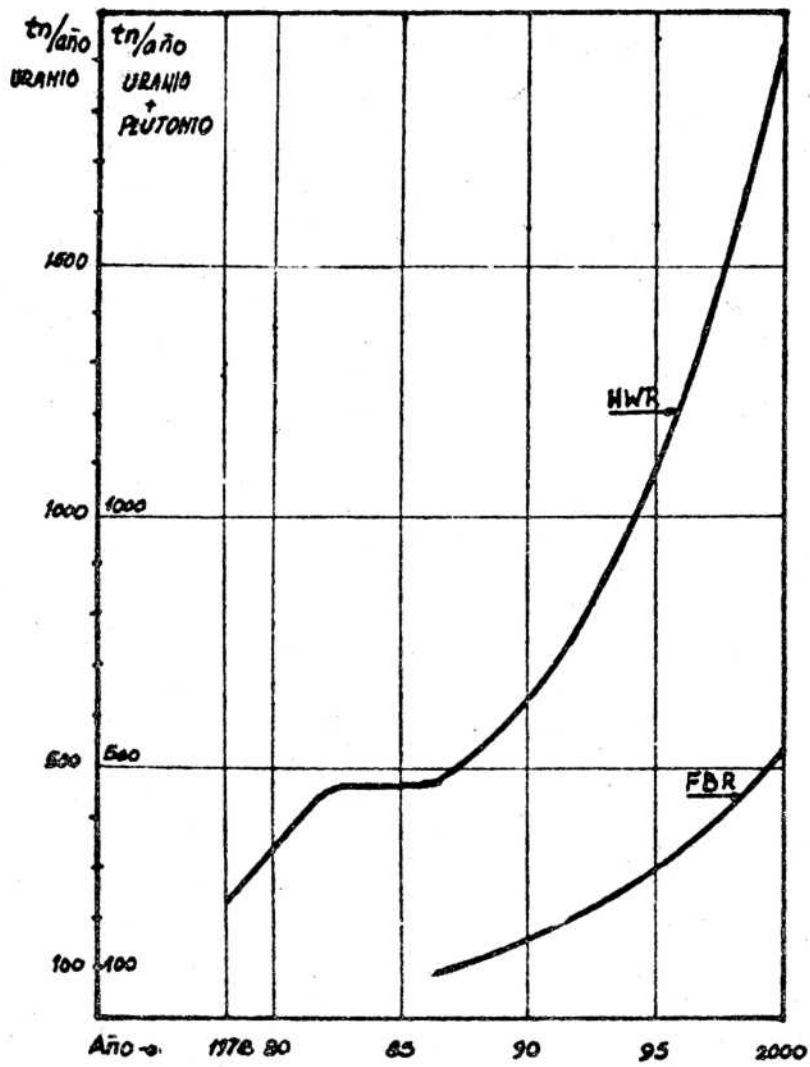


FIGURA 2.6.

REQUERIMIENTO DE AGUA PESADA PARA HWR+FBR

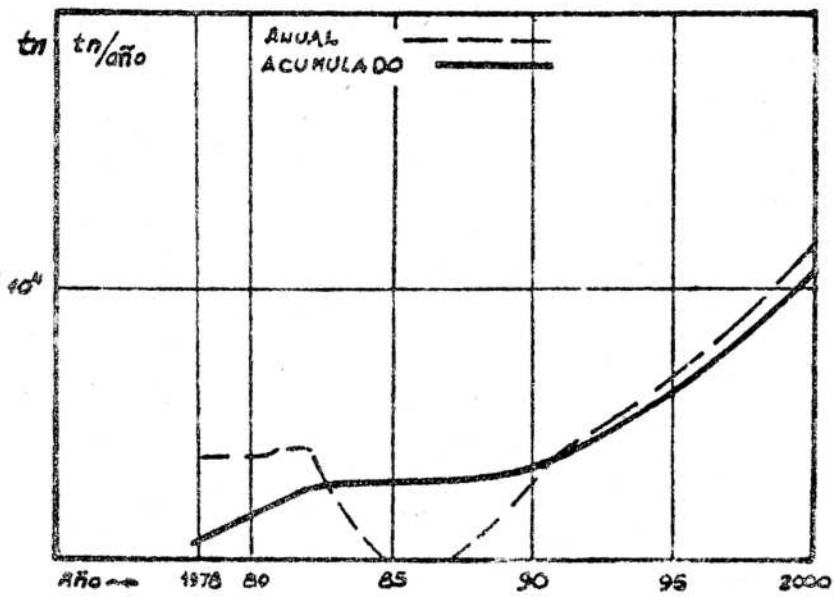
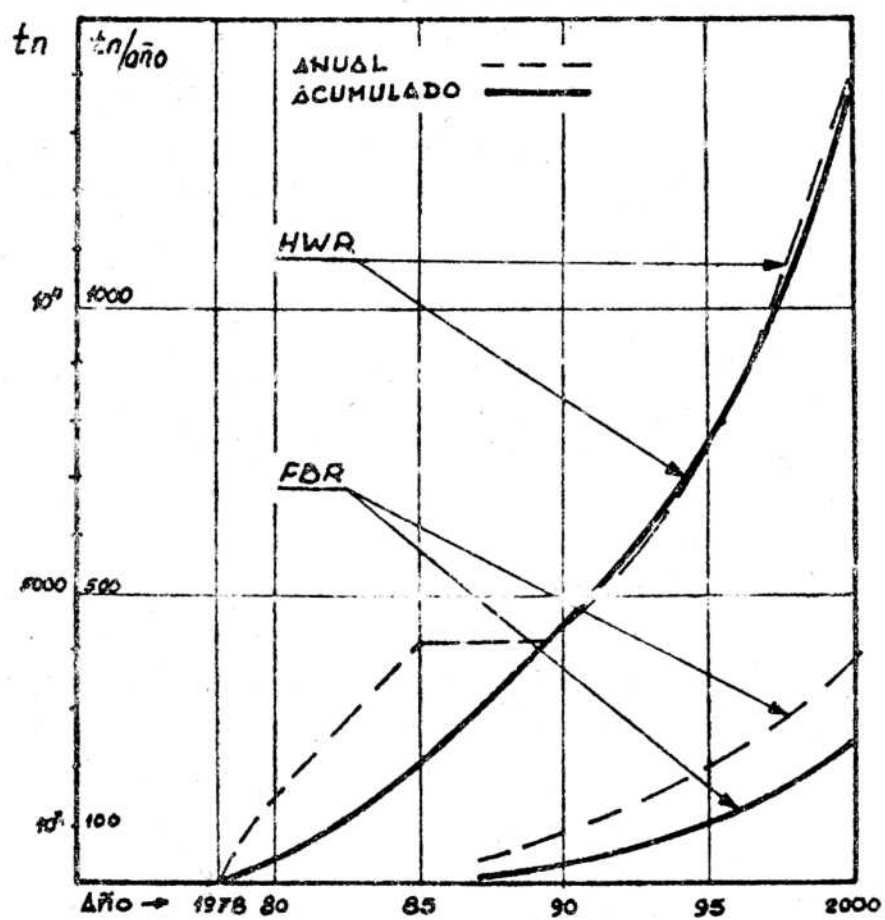


FIGURA 2.7.

- MATERIAL A REPROCESSAR

CENTRO DE INVESTIGACION	Capacidad	Inversión u\$s x 10 ⁶	Valor unitario del producto	Venta anual u\$s x 10 ⁶	Vida útil Instalación años
Centrales Nucleares	12 x 600 MW 2 x 1000 MW _e	12.000	40 mills/kWh	2.800	30
Extracción U	1000 tU ₃ O ₈ /a	150	100 u\$s/KgU	100	20
Purificación	1000 tU ₃ O ₈ /a	20	2 u\$s/KgU	2	15-25
Agua Pesada	600 t/a	200	100 u\$s/KgD2O	60	15-25
FEC	HWR FBR	100 50	100 u\$s/KgU 300 u\$s/KgM	125 30	15-25 15-25
OTRAS Materias Primas Depositos EC irradiados y Transporte		110			
Reprocesamiento	HWR FBR	220 50	50 u\$s/Kg 100 u\$s/Kg	35 5	15-25
Inversión total Ciclo		900	Implica 7,5 % inversión Centrales Nucleares		

COSTO FABRICACION*

	CANDU		ATUCHA I	
	u\$s/KgU	%	u\$s/KgU	%
VAINAS	10	16.6	35	17.5
MAT. Zry y OTROS	5	8.3	20	10
UO ₂ (conv.)	7	11.6	20	10
H ₂ , He GRAFITO, ETC.	10	16.6	30	15
ELECTRICIDAD, GAS, ETC.	3	5	10	5
PERSONAL	15	25	40	20
EQUIPOS	5	8.3	30	15
EDIFICIO	5	8.3	15	7.5
=====				
COSTO TOTAL	60	100	200	100

* Estimación

IMPLEMENTACION Y MANEJO DE LA TECNOLOGIA DE COMBUSTIBLES NUCLEARES

Considerando que la inversión en las distintas etapas que componen el ciclo de combustible es económicamente factible, resulta necesario analizar las implicancias tecnológicas de esta decisión.

El suministro de combustibles nucleares debe efectuarse en condiciones de garantía tecnológica tal que asegure la disponibilidad y no afecte la seguridad de la Central Nuclear.

Esto requiere de un conjunto de conocimientos e información (Software) y de equipos e instalaciones (Hardware) que permitan dominar, controlar o si se quiere manejar la tecnología en cuestión.

En la Figura 3.1. se muestra un listado de los factores contribuyentes al manejo de esta tecnología.

El conocimiento del diseño permite en conjunto con la verificación de performance concluir sobre desviaciones que se producen inevitablemente durante la fabricación así como mejorar y optimizar los elementos combustibles.

Las especificaciones resumen los requerimientos de diseño y posibilidades de fabricación y los ensayos de calificación permiten confiar en las soluciones de diseño y procesos adoptados.

El programa de garantía de calidad constituye la vía de asegurar el cumplimiento de los requisitos involucrados en la tecnología, lo cual implica una verificación ordenada, permanente y exhaustiva de documentación, procedimientos y estado del equipamiento utilizado.

Se menciona el equipamiento de producción como un factor preponderante en la tecnología porque es de carácter especializado, de desarrollo único y sobre todo no fácilmente obtenible. Es de destacar que la producción masiva de componentes de alta calidad requiere de procesos y equipos altamente repetitivos dentro de márgenes estrechos, lo cual no es común en la técnica convencional.

Finalmente se menciona la producción industrial como un factor tecnológico para destacar la importancia que tiene lograr un suministro en calidad, tiempo y precio en contraposición a la fabricación de algunos elementos combustibles o pequeñas series en condiciones de quasi-laboratorio.

En la Figura 3.2. se han listado una serie de elementos que constituyen la información y/o conocimientos que se requieren para cumplimentar los factores mencionados antes.

De la misma manera en la Figura 3.3. se da una lista de las instalaciones que se requieren para implementar el apoyo y asegurar la calidad del suministro en las condiciones definidas antes.

Como conclusión puede decirse que la implementación del suministro de Combustibles Nucleares requiere, sobre todo en la etapa inicial de un programa nuclear, del aporte armónico y coordinado de los conocimientos de diseño, fabricación y operación con un apoyo sustancial de investigación y desarrollo.

FIGURA 3.1.

- . DISEÑO
- . ESPECIFICACIONES
- . ENSAYOS CALIFICACION
- . PROGRAMA GARANTIA CALIDAD
- . EQUIPAMIENTO PRODUCCION
- . PRODUCCION INDUSTRIAL
- . VERIFICACION PERFORMANCE

FIGURA 3.2.

- . MANUAL DISEÑO E INFORMES COMPORTAMIENTO
- . ESPECIFICACIONES MATERIALES, COMP. Y E.C.
- . ESPECIFICACION DE ENSAYOS
- . MANUAL GARANTIA CALIDAD
- . MANUALES MANTENIMIENTO Y OPERACION
- . MANUALES DE OPERACIONES Y PROCESOS
- . MAGNITUDES A CONTROLAR Y DATOS CENTRAL

FIGURA 3.3.

- . COMPUTADORA
- . CIRCUITOS HIDRODINAMICOS Y FACILIDADES IRRADIACION
- . LABORATORIOS ESTUDIO MATERIALES
- . LABORATORIO PROCESOS (UO_2 , SOLD., ETC.)
- . LABORATORIO ESTUDIO FENOM. LIMITANT.
- . DISPOSITIVOS ENSAYOS EN PILETA
- . CELDAS CALIENTES

DISEÑO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

4.1. Bases del Diseño de Elementos Combustibles

El diseño de Elementos Combustibles parte con el diseño conceptual del núcleo del reactor donde quedan definidos parámetros neutrónicos, termohidráulicos y geométricos tales como:

- Potencia específica máxima
- Caudal y temperatura de refrigerante
- Diámetro del canal de refrigeración y de las barras combustibles

A continuación se definen los requerimientos propios de la operación del reactor, los materiales y criterios básicos del diseño.

Con la información precedente se definen y especifican ensayos de materiales en circuitos hidrodinámicos y de irradiación y se efectúan cálculos de resistencia de materiales y de comportamiento termomecánico de las barras combustibles.

El resultado de este proceso sumado a los conocimientos del comportamiento y performance de barras y elementos combustibles permite efectuar el diseño de detalle que conduce a los planos y especificaciones que son los objetivos del diseño.

4.1.1. Requerimientos de Operación

Los mismos dependen esencialmente del tipo de reactor. En particular interesa la forma de recarga de combustible y su manipuleo y el esquema de uso del combustible en el núcleo o historia de irradiación.

En los reactores de uranio enriquecido, la recarga de combustible se hace cuando se para el reactor y se cambia del orden de un tercio del núcleo, lo cual se verifica cada un año y medio o dos.

En los de uranio natural se requiere una recarga más frecuente porque la disponibilidad de material fisiónable es menor. Por ello se realiza en forma continua sin detener la marcha del reactor.

Esto determina la diferencia entre las características estructurales del ensamble de barras. En el caso de los de uranio enriquecido el conjunto de barra está montado en un sólido ensamble que permite ser apoyado en su base o pieza inferior.

Esto permite agrupar el combustible en el núcleo sin necesidad de soportes adicionales.

En el caso de los reactores de uranio natural se usan canales de refrigeración en los de recipiente de presión y tubos de presión en los HWR.

Estos canales sirven de apoyo a los elementos combustibles los cuales en virtud de la necesaria economía neutrónica tienen reducido al mínimo necesario los componentes estructurales.

en el caso de los reactores de recarga en potencia se imponen requerimientos mecánicos dimensionales y termohidráulicos adicionales a los que están sometidos los EC en el núcleo.

Fenómenos de desgaste, compresión e impacto son frecuentes en este tipo de reactores.

Se requiere respetar ciertas características dimensionales para que el combustible sea compatible con el sistema de transferencia.

Por otra parte existen exigencias nuevas al someter al combustible a corrientes cruzadas de refrigerante y a cambios de temperatura y presión.

El refrigerante impone al combustible soportar condiciones termohidráulicas (escurrimiento, pérdida de carga, arrastre, vibración), químicas (corrosión, depósito de crudo) e hidroestáticas (presión externa, ciclos de presión) severas.

La irradiación neutrónica establece dos requerimientos importantes: la distribución y cambios de potencia y el daño estructural y quemado del material fisiónable.

En lo que hace al primero de ellos debe contemplarse en el diseño, la distribución axial y radial en el combustible así como los cambios de potencia.

Desde el punto de vista del daño sobre los materiales los más importantes son:

- generación y liberación de gases de fisión
- hinchado del combustible por productos de fisión retenidos
- liberación de productos de fisión agresivos hacia la vaina
- fragilización de la vaina

Finalmente existen otros condicionamientos impuestos por la necesidad de diseñar combustible apto para soportar transientes que pudieran producirse en hipotéticos accidentes como por ejemplo el de falta total o parcial de refrigeración.

En este caso si bien no se pretende que todo el núcleo resista intacto el evento, se espera que un número elevado de elementos combustibles (usualmente un 70%) mantenga su integridad. Esto requiere que el material de vaina tenga una adecuada respuesta a la corrosión y sollicitaciones mecánicas a alta temperatura, y que el inventario de gases de fisión no provoque presiones internas inadmisibles en la vaina.

1.2. Criterios de Diseño

Existen también ciertos criterios básicos de diseño de carácter general que deben seguirse en el dimensionamiento y especificación de los parámetros de diseño de las barras combustibles.

Dos de ellos están relacionados con el aspecto de la generación y transferencia térmica. Si bien el punto de fusión del UO_2 es elevado ($2800^\circ C$) la alta densidad de potencia generada y la baja conductividad térmica del mismo hacen que la temperatura central sea normalmente muy alta. El límite está impuesto por la temperatura de fusión ya que se produce un aumento de volumen que expulsa normalmente el material fundido provocando la rotura del material de envainado.

El otro límite lo impone la temperatura máxima de trabajo del Zircaloy en agua para prevenir una corrosión acelerada del mismo. Este valor es de $350^\circ C$ aproximadamente.

Desde el punto de vista mecánico y considerando que la meta del diseño es mantener la integridad de la vaina durante todo el tiempo de permanencia en el reactor y en el almacenamiento posterior, debe considerarse la máxima deformación que se espera alcanzará la vaina.

Este valor se limita generalmente al 1 ó 1,5 % (sumando todos los efectos que provocan deformaciones plásticas) en términos de la deformación equivalente.

Finalmente, y si bien ya ha sido tratado en una clase anterior, debe tenerse en cuenta el valor máximo del flujo calórico de tal manera de tener un margen seguro respecto del valor crítico o de secado.

4.1.3. Especificaciones básicas de materiales

Si bien teóricamente existe la posibilidad de diseñar un reactor eligiendo entre varios materiales combustibles y estructurales hoy se usan en los reactores comerciales exclusivamente el dióxido de Uranio (UO_2) y el Zircaloy 2 ó 4. Además se usan algunos tipos de aceros austeníticos o aleaciones de níquel como complemento en ciertos componentes estructurales.

Esto ha conducido a normalizar las especificaciones de los materiales mencionados al menos dentro de rangos estrechos de composiciones y propiedades.

En el polvo de UO_2 existe una composición química tipo, la cual implica un contenido de impurezas de 0,9 ppm de boro equivalente en los reactores de uranio natural y 2 ppm en los de Uranio enriquecido.

En lo que hace a las propiedades físicas se contempla la fluidez, la densidad TAP y lo que es más importante el ensayo de sinterizado.

Con respecto al Zircaloy aparte de los aleantes que ya están fijados para las variantes 2 y 4 se limita el contenido de oxígeno y de impurezas especialmente el Hafnio, principal elemento que está contenido originalmente en los minerales de Zirconio.

En este caso interesa limitar el contenido de impurezas de alta sección de captura neutrónica y aquellas que pueden ser perjudiciales para la corrosión del Zircaloy en agua como los halógenos.

Los aleantes del Zr (Sn, Fe y Cr) tienen la finalidad de formar intermetálicos que finamente precipitados mejoran la resistencia a la corrosión del Zirconio.

4.1.4. Ensayos

Existen tres tipos de ensayos que se efectúan para concretar un diseño determinado. Ellos son: los de caracterización de materiales combustibles y estructurales, los de irradiación y en circuitos hidrodinámicos.

Si bien las especificaciones de materiales están básicamente establecidas como ya se ha dicho, la ruta de fabricación del polvo de UO_2 y pastillas así como de los tubos y otros semi-terminados de Zircaloy determina variaciones en sus propiedades que deben considerarse.

En lo que hace al polvo de óxido de Uranio, si bien existe la necesidad de un estudio amplio de sus propiedades para su completa caracterización, es el ensayo de sinterización el que determina la aptitud del mismo para la fabricación de pastillas.

En lo que hace a las pastillas de UO_2 se requiere una caracterización fundamentalmente microestructural que determina la estabilidad dimensional y liberación de gases y productos de fisión.

Los semiterminados de Zircaloy en especial los tubos para vainas deben ser ensayados para calificar la uniformidad de propiedades en los lotes provistos por los fabricantes.

En lo que hace a los ensayos en circuitos hidrodinámicos y de irradiación, están estrechamente vinculados con los requerimientos de operación. En este sentido estos ensayos tienen la finalidad de verificar la aptitud de un diseño para soportar las sollicitaciones termohidráulicas y las derivadas de la historia de irradiación prevista.

Entre los ensayos hidrodinámicos se encuentran los de vibración, desgaste, pérdida de carga y en algunos diseños impacto, resistencia y durabilidad.

Los de irradiación tratan de confirmar fundamentalmente que se verifican los parámetros de comportamiento previstos como gases de fisión y deformación de la vaina a potencia constante y que no existen defectos al someterse a saltos de potencia.

a) Ensayos de Polvo y Pastillas de UO_2

Los ensayos requeridos para verificar un diseño de elementos combustibles desde el punto de vista de las pastillas de UO_2 , están referidos a las propiedades reales que finalmente tendrán las pastillas una vez fabricadas.

Las siguientes magnitudes deben ser controladas para conocer los parámetros que afectan el diseño:

<u>ENSAYO</u>	<u>MAGNITUD</u>	<u>PARAMETRO QUE AFECTA</u>
Sinterización (Polvo)	Densidad	Conductividad Térmica
Resinterización	Densidad Dimensión	Conductividad Térmica Estabilidad dimensional
Análisis Químico	Relación O/U	Conductividad Térmica
Metrología	Diámetro Largo Concavidades	Tolerancias
Ceramografía Cuantitativa	Porosidad	Densificación Liberación gases
Determinación Gases Residuales	Volumen Gases Residuales	Liberación de gases

Estas magnitudes deben ser medidas y sobre todo debe conocerse el rango de variación de las mismas por lote de fabricación a fin de compararlas con los requerimientos de diseño y poder especificar finalmente los parámetros de interés.

b) Ensayos de Vainas

El diseño de las vainas involucra decisiones que van más allá de la selección de materiales.

Las propiedades de interés particular a ser definidas en relación con la performance de una barra combustible son:

- a. Colapso instantáneo bajo presión exterior
- b. Tensión de fluencia
- c. Tensión de rotura
- d. Elongación total
- e. Deformación uniforme
- f. Reducción de área y espesor a rotura
- g. Velocidad de Creep

- h) Resistencia a la fatiga
- i) Textura
- j) Orientación de hidruros

Muchas de estas propiedades son afectadas por la textura y la historia de deformación y algunas también por el contenido de hidrógeno, relación de biaxialidad de tensiones, irradiación y la temperatura. Las propiedades del material pre-irradiación o en ausencia de daño por radiación no son académicas ya que deben especificarse ciertos requerimientos pre-irradiación para garantizar una buena performance bajo irradiación.

El aspecto más importante que limita la performance mecánica de la vaina es la ductibilidad en condiciones de multiaxialidad de tensiones.

En la especificación de las propiedades de la vaina para el proveedor debe especificarse no sólo la ductibilidad que resulta de un ensayo de tracción sino que es preferible el ensayo de explosión a extremos cerrados, el cual da un resultado de ductibilidad más satisfactorio.

La definición del conjunto de propiedades mencionadas constituye la confirmación de que la vaina podrá satisfacer los requerimientos del diseño.

La Tabla siguiente resume los ensayos que se efectúan para evaluar las propiedades mecánicas de las vainas los cuales sumados al de corrosión y orientación de hidruros permiten verificar la calidad de las mismas.

En forma general puede decirse que desde el punto de vista de la ductilidad deseada el tubo no debe ser usado en condición de trabajado en frío sino al menos relevado de tensiones.

Entre 450 y 550°C se produce una fuerte reducción de la resistencia hasta el estado recocido. Por ello si sólo se desea un relevado de tensiones se requiere un control estrecho de la temperatura del tratamiento térmico(Ver Figura N° 4.4.)

ENSAYOS MECANICOS DE VAINAS

ENSAYO	Condiciones de Ensayo	Determinación
TRACCION	Temp. ambiente y a 400°C 0.3%/mín < E < 0.7%/mín	T _{0,2} ; Resistencia a la tracción Deformación total
EXPLOSION	Temperatura ambiente y 400°C Extremos cerrados gas o líquido p = cte E = cte	- Deformación circunferencial uniforme - Tensión máxima de explosión - Deformación circunferencial máxima
CREEP CON PRESION INTERNA	400°C Extremos cerrados	Deformación circunferencial uniforme

ENSAYOS COMPLEMENTARIOS

- Orientación de hidruros
- Corrosión en agua a presión y vapor
- Ultrasonido
- Tamaño de grano

c) Ensayos de Irradiación

Los ensayos de irradiación se efectúan para verificar el comportamiento de las barras combustibles. Por ese motivo y dado que en general los reactores experimentales para tal fin no aceptan en su núcleo los elementos combustibles completos, se irradian algunas barras combustibles individuales o en conjuntos especialmente preparados para la irradiación.

Generalmente, lograr potencias lineales similares a las de trabajo requiere enriquecer el material combustible lo cual aleja a las barras de ensayo de las características de diseño. Esto conduce a limitar los resultados de los ensayos de este tipo a una verificación global de comportamiento.

Las condiciones de ensayo son a potencia constante, tomando como valor de la misma la envolvente de todas las posibles historias de potencia que tendrán los elementos combustibles en el reactor.

En algunos casos se verifica también la respuesta a rampas de potencia.

d) Ensayos en circuitos hidrodinámicos

Existen esencialmente tres clases de ensayos de este tipo:

- a) los que permiten verificar la compatibilidad EC-Canal de refrigeración.
- b) los que comprueban el comportamiento hidrodinámico del EC.
- c) los que conducen a conocer la respuesta del EC a solicitaciones dinámicas.

Dentro del primer grupo se incluyen los ensayos de desgaste, ajuste EC-canal, movimiento relativo EC-canal en función del caudal.

En la serie b) deben considerarse la determinación de pérdida de carga a temperatura ambiente y a la de trabajo, mezclado de refrigerante y perfiles de velocidad a lo largo del E.C.

Los más importantes dentro de los c) son los de vibración donde se conoce la respuesta del elemento combustible a la circulación de refrigerante paralela y el efecto que la vibración resulta de tener sobre la "corrosión por fricción" y fatiga.

4.1.5. Cálculos

Además de los cálculos convencionales de resistencia de materiales, transferencia térmica y variaciones geométricas con la temperatura, un importante apoyo del diseño lo constituyen los códigos que simulan el comportamiento de las barras de combustibles.

En la Figura 4.5. se muestra una interrelación de variables involucradas en funcionamiento de una barra combustible.

La complejidad de fenómenos intervinientes requiere una correcta valoración de los modelos y condiciones de partida los cuales conducen a verificar el estado de tensiones y deformaciones de la vaina, objetivo del cálculo para asegurar la integridad de la barra combustible.

Es de hacer notar que la precisión de los datos de entrada, en particular la potencia real de operación, limita el error final de los resultados por lo cual uno de los principales usos de estos códigos es el análisis de sensibilidad ante la variación de diversos parámetros de diseño.

4.2. Diseño de Detalle

4.2.1. Diseño de Pastillas

Los parámetros geométricos de la pastilla y propiedades del material se eligen y controlan a fin de:

- a) Maximizar la cantidad de material fisiónable presente en el Elemento Combustible (relación UO_2/Zry)
- b) Minimizar los cambios volumétricos de las pastillas durante la vida del combustible.
- c) Asegurar que la liberación de gases de fisión estará dentro de límites aceptables.
- d) Asegurar que el diseño de las pastillas cumple los requerimientos impuestos por la capacidad y economía de producción.

Las propiedades de mayor influencia en el comportamiento térmico son la densidad y la relación O/U. Estas propiedades determinan la conductividad térmica del óxido y deben mantenerse dentro del rango especificado para asegurar valores aceptables de la temperatura del óxido y de la liberación de gases de fisión.

La densidad se mantiene lo más alta posible para cumplir los requerimientos a) y c).

El hinchado debido a productos de fisión (1/3 debido a productos de fisión sólidos) es compensado por la densificación inicial del combustible, por lo cual no es un factor limitante de la performance en los combustibles de U natural.

El volumen de la cavidad de los extremos de la pastilla depende del modelo de expansión térmica que se adopte.

Considerando en condiciones de trabajo a la pastilla, tendrá un núcleo interno plástico rodeada por un cilindro anular de características

elásticas. Si el volumen disponible para acomodar la expansión volumétrica del cilindro plástico interno es suficiente, la expansión radial y axial neta de la pastilla depende del comportamiento térmico del cilindro anular no-plástico.

El diseño de las concavidades de las pastillas es el resultado de aplicar este modelo y resultados de irradiación con pastillas diseñadas con este criterio.

El ancho del hombro es elegido como un compromiso de los siguientes efectos:

- a) Cuanto más pequeño es el hombro mayor es la deformación localizada (ridge) entre pastillas
- b) Cuanto mayor es el hombro mayor la deformación axial de la vaina.

El efecto positivo que el incremento del ancho del hombro tiene sobre la altura de los pliegues o deformación localizada (ridge) está probablemente asociado con la reducción del nivel de tensiones en el hombro de las pastillas.

Sin embargo, si la temperatura en el extremo interno del hombro está alrededor de 1000°C , la deformación plástica del UO_2 reducirá su capacidad de relajar las tensiones.

Debido a que la deformación axial es de menor cuidado que la formación de pliegues o deformación localizada, el extremo interno del hombro es ubicado dentro (pero no muy lejos) de la isoterma de 1000°C (Ver Figura 4.6.)

La longitud de las pastillas se elige a fin de satisfacer los siguientes factores:

- a) la necesidad de optimizar el diseño de las concavidades.
- b) economía
- c) posibilidad de fabricación.

A medida que la longitud se incrementa, se reduce el costo de fabricación ya que es necesario fabricar menor cantidad de pastillas. Pero la fabricación se vuelve más difícil y el rechazo mayor por fisurado, inhomogeneidad, etc., por lo tanto el costo es mayor.

Además cuando la longitud de la pastilla se incrementa, las concavidades extremas se hacen menos efectivas, ya que la fuerza necesaria para desplazar la región de alta temperatura central hacia los extremos causa un incremento en la expansión radial (y axial). Esto causa un incremento de la deformación de la vaina.

La experiencia de irradiación muestra que relaciones $l/d = 1,5$ son aceptables desde el punto de vista de la deformación de la vaina.

El valor mínimo lo dicta la capacidad y economía de fabricación alcanzada.

La inclinación del hombro se hace para minimizar el "cascado" de las pastillas durante el llenado y manipuleo posterior. Se ha comprobado que este chaflan reduce la deformación de la vaina en la interface entre pastillas.

La Figura 4.7. resume los parámetros geométricos de una pastilla de UO_2 .

4.2.2. Diseño de la vaina

La vaina es el contenedor del combustible y los productos de fisión. Las propiedades y características geométricas de la vaina deben ser elegidas a fin de:

- a) minimizar la absorción neutrónica (Relación UO_2/Zry)
- b) minimizar la corrosión y la absorción de hidrógeno (y deuterio)
- c) minimizar los efectos de la deformación que resulta de la interacción combustible-vaina.
- d) minimizar la resistencia a la transferencia térmica.
- f) asegurar que las propiedades estructurales sean tales que el elemento combustible soporte las sollicitaciones a que estará sometido especialmente durante las operaciones de carga y descarga.

El Zircaloy-4 es usado como material de vaina en los reactores de agua a presión, por su buena resistencia a la corrosión y absorción de hidrógeno.

Las propiedades del material y los tratamientos térmicos se especifican de tal manera que el material retenga una aceptable ductibilidad a altos niveles de irradiación.

Las dimensiones de las vainas están determinadas por el número de barras combustibles por elemento combustible y la característica de ser colapsable o autoportante a la presión de trabajo.

En el caso de vainas colapsables debe contemplarse el hecho de que el gap diametral pastilla-vaina, debe mantenerse dentro de los estrechos márgenes especificados para impedir la formación de pliegues longitudinales.

En vainas autoportantes la ovalidad y la constancia del espesor de pared son importantes para que no se produzcan colapsos locales.

La experiencia de irradiación muestra que deformaciones plásticas de hasta 1% son aceptables para condiciones de operación normal.

Los siguientes parámetros y efectos son considerados en el diseño o verificación de una vaina:

- Comportamiento al colapso instantáneo y por creep.
- Pérdida de espesor por corrosión.
- Variación de temperatura por corrosión y deposición de productos de corrosión.
- Absorción de hidrógeno (o deuterio).
- Estado metalúrgico de la vaina y nivel de tensiones.
- Tratamiento superficial de la vaina.

El análisis de estos factores se efectúa en combinación con el comportamiento termomecánico de la barra combustible.

4.2.3. Diseño de Barras Combustibles

El objetivo del diseño de la barra combustible es:

- a) Asegurar la retención de los productos de fisión con un alto grado de confiabilidad.
- b) Asegurar que la elevación de la presión de gases de fisión no desmejore la conductancia del gap y no supere la presión externa.
- c) Proveer una interface adecuada con el sistema de recambio, componentes del elemento combustible y/o canal de refrigeración.

La barra combustible debe tener un espacio libre interior suficiente para alojar los productos de fisión cumplimentando a) y b). Este espacio se deja en el extremo de la misma y es complementario del existente entre pastillas, gap diametral, dishings no consumidos y fisuras en las pastillas.

En barras combustibles cortas este espacio es muy pequeño ($\approx 5\text{mm}$); en barras combustibles largas puede llegar a ser de hasta 200 mm. En este caso se colocan elementos complementarios para impedir el colapso de la vaina en ese espacio.

En barras combustibles largas es necesario absorber las dilataciones diferenciales entre columna de pastilla-vaina.

Se usa comúnmente resortes de niconel en los extremos que a la vez sirven como protectores del espacio de gases de fisión.

A fin de prevenir o reducir los efectos de la interacción combustible-vaina se usan métodos tales como la pre-presurización de barras combustibles y el recubrimiento de la cara interna de la vaina.

Tal vez el parámetro de diseño más importante de la barra combustible es el gap pastilla-vaina.

La elección del mismo depende de:

- Límite de deformación de la vaina.
- Liberación de gases de fisión.
- Estabilidad de la vaina
- Arrastre axial (ratchetting)
- Economía (costo de combustible)

De todos ellos la deformación de la vaina es el de mayor importancia y el que en definitiva regulará el valor a adoptar.

La deformación uniforme es el resultado de la relación de tensiones debida a la presión interna-externa y a la dilatación cilíndrica de la pastilla.

La deformación plástica diametral uniforme de la vaina debida a la expansión térmica de la pastilla depende de:

- a) Potencia lineal
- b) Gap diametral
- c) Parámetros de la pastilla
- d) Resistencia de la vaina

El cálculo de la misma se efectúa en conjunto con el análisis termo-mecánico de la Barra Combustible.

4.2.4. Diseño de Separadores

Las funciones y requerimientos de diseño que debe cumplir un separador son:

- a) Mantener el espaciado requerido entre barras combustibles dentro de estrechas tolerancias.
- b) Prevenir "fretting corrosion" o desgastes entre barra combustible y separador.
- c) Permitir el deslizamiento de las barras combustibles para acomodar dilataciones preferenciales.
- d) Prevenir la formación de distorsión del flujo de refrigerante que conduzcan a secado local, corrosión, acelerado o inestabilidad.
- e) Minimizar la vibración de las barras combustibles.
- f) En algunos casos promover el mezclado de refrigerante.
- g) Resistir fuerzas durante carga y descarga de combustible.
- h) Tener la menor absorción neutrónica posible.

Esta lista de requerimientos hace al separador el componente más difícil para el diseñador y la pieza donde se guardan los mayores secretos tecnológicos.

En el caso de separadores de apoyo rígido el parámetro más crítico es el ajuste barra combustible-separador. En el caso de definir un ajuste demasiado estrecho impedirá el deslizamiento y/o provocará la torsión del elemento combustible.

En caso de que el ajuste sea demasiado holgado seguramente conducirá a un desgaste acelerado del apoyo.

Cuando se diseñan separadores de apoyo elástico la fuerza inicial de ajuste es el parámetro crítico ya que la misma debe impedir la separación de la barra combustible por efectos de la vibración, a lo largo de todo el tiempo de permanencia en el reactor.

4.2.5. Diseño del ensamble o Elemento Combustible

Considerando la diferencia sustancial entre los Elementos Combustibles de reactores diferentes se analizan a continuación las bases del diseño por separado.

a) Elemento Combustible de la Central Atucha I

A continuación se dan las características que tienen los elementos combustibles. (EC) para satisfacer los requerimientos del diseño del reactor:

CARACTERISTICA REACTOR	CARACTERISTICA EC
Recambio de EC en servicio	Vínculo EC-tapón de cierre al canal
Núcleo vertical	- Recambio columna total EC - EC suspendido
Recipiente de presión	Extensión EC propiamente dicho para atravesar volumen-tapa (cuerpos de relleno)
Uranio natural como combustible	Bajo volumen material estructural (alta relación U/M). Material estructural de baja sección de captura neutrónica
Parte de la columna inserta en el canal de refrigeración reutilizable (consecuencia recipiente de presión + recambio de servicio)	Acoplamiento exento de juego axial y posible de acoplar bajo agua
Salida radial refrigerante y reflector axial	Extensión ad-hoc por encima zona activa EC
Canal separador refrigerante-moderador	Vínculo EC-Canal

El recambio de elementos combustibles durante el funcionamiento del reactor, desde la parte superior, hace necesario que el EC esté unido al sistema de cierre o tapón del canal de refrigeración, para poder extraerlo del núcleo.

Como el núcleo es vertical, se debe extraer durante un recambio toda la columna insertada en el canal de refrigeración. El vínculo entre el EC y el tapón de cierre y entre éste y el canal de refrigeración obliga a suspender el EC del cierre, a menos que existiera un sistema de compensación de longitud que permitiera apoyar el extremo inferior del EC, lo cual afectaría la estabilidad vibratoria del conjunto por efecto de la circulación de refrigerante.

Los reactores a recipiente de presión con grandes volúmenes muertos en la zona de la calota inferior y la tapa, llevan cuerpos de relleno. Esto cuerpos de relleno deben ser atravesados por la extensión de los canales de refrigeración por donde son extraídos los EC. Por ello entre el tapón de cierre al canal y el EC hay una distancia considerable, la cual requiere ser salvada por un cuerpo intermedio o vínculo que en el caso que nos ocupa se llama "cuerpo de relleno".

El uso de uranio natural como combustible conduce a considerar con atención la economía neutrónica. Por ello debe reducirse al mínimo la cantidad de material estructural que se utiliza en el EC maximizando la relación UO_2 /material estructural. Por otra parte debe prevenirse el uso de materiales estructurales con alta sección de captura neutrónica.

Teniendo en cuenta que existen partes de la columna que se inserta en el canal de refrigeración que son reutilizables, deben existir vínculos desmontables (acoples) que permitan separarlas del EC (ya irradiado), operación que se efectúa debajo de agua, por razones obvias de seguridad radiológica.

Por razones de rendimiento neutrónico existe un reflector axial encima y debajo de la zona activa. Por ello el refrigerante deberá salir del canal arriba de la tapa del recipiente del moderador. Ello exige que el elemento combustible se prolongue por encima de la zona activa para atravesar el espesor de reflector y el del plenum de salida de refrigerante. Podría obviarse tal extensión si el cuerpo de relleno llegara hasta la zona activa, pero por razones de economía neutrónica impiden colocar un volumen considerable de material estructural en la zona de reflector.

Finalmente, la existencia de un tubo separador del refrigerante y moderador exige un vínculo entre este canal y el EC a fin de prevenir una interacción perjudicial para ambos y el centrado del EC.

b) Elemento Combustible CANDU (CN Embalse)

Objetivos del diseño

El elemento combustible está compuesto de 37 barras combustibles mantenidas en su lugar por dos grillas extremas.

El elemento combustible está diseñado para:

- proveer la refrigeración adecuada a cada barra combustible,
- soportar sin ninguna distorsión o deformación las solicitaciones mecánicas aplicadas durante las operaciones de recambio,
- mantener el desgaste (y el fretting) tanto en el elemento combustible como en el canal dentro de un nivel aceptable,
- mantener la pérdida de carga dentro de un valor aceptable.

Las grillas extremas deberán ser suficientemente resistentes como para asignar la integridad estructural del elemento combustible, pero suficientemente flexibles como para permitir expansiones axiales diferenciales entre las barras combustibles.

Las grillas tienen que ser tan finas como sea posible a fin de minimizar la absorción neutrónica así como la separación entre elementos combustibles.

Además el elemento combustible debe resistir las solicitaciones de impacto y compresión axial resultantes del arrastre hidráulico y del sistema de transferencia.

4.3. Descripción de EC de potencia

Los reactores comerciales casi sin excepción usan hoy elementos combustibles compuestos por dióxido de Uranio (UO_2) como material combustible y Zircaloy-4 como material de envainado y estructural.

Las denominadas "barras combustibles" son en realidad cápsulas de longitud variada que contienen el material fisiónable.

El material combustible está en la forma de "pastillas" sinterizadas de un diámetro que varía de 9,5 a 14 mm, según el tipo de reactor y de altura similar al diámetro.

La geometría externa de las pastillas de UO_2 varía generalmente según el diseñador en lo que hace a sus caras planas y cilíndricas.

Algunos son simplemente con caras planas, otras llevan concavidades y/o chanfles en los bordes en una o ambas caras.

El "encapsulado" se realiza con tubos de Zircaloy que llevan soldado en sus extremos tapones del mismo material.

Estas cápsulas contienen generalmente cientos de pastillas de UO_2 .

En algunos diseños se incluyen elementos internos en las barras combustibles con la finalidad de absorber dilataciones diferenciales, alojar gases de fisión, subdividir la columna de pastillas, etc.

Algunos diseños han incorporado una presurización interna en las cápsulas o barras combustibles y otros un recubrimiento de grafito. Esto tiene la finalidad de prevenir los efectos de la interacción mecánica entre pastilla y vaina.

En la parte exterior del tubo se suelen incorporar apéndices que sirven como espaciadores o patines deslizantes para apoyo entre barras combustibles o entre estas y separadores o canal de refrigeración.

Las barras combustibles se ensamblan en un manojo de cantidad variable de acuerdo al tipo de reactor. La geometría y distancia entre barras combustibles depende también del tipo de reactor y condiciones térmicas y neutrónicas de funcionamiento.

El conjunto de las barras combustibles mantienen su geometría por medio del uso de componentes estructurales tales como separadores, placas extremas y en algunos casos tubos estructurales.

Dentro de los reactores de uranio enriquecido, llamados también de núcleo abierto, las barras combustibles se ensamblan en conjuntos de geometría cuadrada. En los reactores de agua a presión (PWR) el número de barras es de 200 a 260 según se coloquen en arreglos de 15 x 15 o hasta 17 x 17.

Estos ensambles están constituidos por "canastos" formados por dos piezas extremas y 7 ó 8 separadores intermedios unido todo por medio de tubos que son a la vez el alojamiento de las barras de control.

Los EC de reactores de agua en ebullición (BWR) los arreglos son de hasta 7 x 7 BC y las barras de control son externas y en forma de placas en cruz.

La longitud de estos EC es de aproximadamente 3,6 metros. Las BC no tienen apéndice soldados a sus vainas y el apoyo entre éstas y los separadores se verifica a través de muelles elásticos fijos a los separadores. Las barras están libres de dilatar axialmente.

Entre los reactores de Uranio natural resultan de interés los del tipo de recipiente de presión (PWR) y los de tubo de presión (HWR).

En este caso los EC son similares a los PWR excepto que las barras combustibles están ensambladas en un ordenamiento circular. Esto se debe a que los EC deben entregar su energía térmica al refrigerante dentro de los canales y la geometría más conveniente de éstos es la cilíndrica.

En los reactores PHWR (Atucha) de núcleo vertical los EC son de 6m de longitud y con 37 posiciones para Barras Combustibles. Una de ellas actualmente es ocupada por un tubo estructural.

En los reactores HWR (CANDU) los canales son horizontales también de aproximadamente 6 m de longitud pero los EC están subdivididos en manojos de 37 barras de 50 cm de largo, de tal manera que un canal se completa con 12 de ellos.

4.3.1. Descripción del Elemento Combustible de la C.N. Atucha I.

Conjunto

La Fig.4.8 muestra un esquema del EC completo, el cuerpo de relleno y el cierre al canal, los cuales están vinculados por un acople. El EC propiamente dicho comienza en la parte inferior del acople al cual están unidas 3 barras de acero que atraviesan el espacio del plenum de salida de refrigerante y 6 tubos de Zircaloy 4 lo hacen en el reflector superior. A continuación hay una placa portante de la que cuelgan 30 barras combustibles, un tubo portante de las zapatas elásticas de ajuste del EC al canal y 14 separadores rígidos y uno elástico inferior. El mantenimiento de la posición y tolerancia de las barras combustibles a lo largo del elemento se logra por medio de los separadores, el último de los cuales lleva adosado un sistema de apoyo elástico para prevenir el efecto de las vibraciones inducidas por la circulación de refrigerante.

El vínculo entre las barras combustibles y los separadores se verifica por medio de patines deslizantes fijos a la vaina. Nueve barras combustibles de la corona exterior tienen un entastre en los patines deslizantes para fijar en la posición axial los separadores. El resto pueden deslizarse para permitir dilataciones diferenciales. El extremo inferior del elemento es libre por la misma razón.

El posicionado del elemento combustible en el canal se efectúa por medio de zapatas fijas a los separadores y las zapatas elásticas. A fin de mejorar la performance vibracional del EC y prevenir problemas de desgaste a partir del tercer y cuarto núcleo, los EC llevan un separador más, se agregó una zapata elástica tangencial en el último separador y se acortó el EC en 100 mm para alejar el extremo inferior de las toberas de entrada de refrigerante. El acortamiento se hizo a expensas del espacio para gases de fisión inferior (70 mm) y 80 mm del varillaje. La Fig.4.9 muestra una sección transversal del EC.

Acople

Se usa como unión del elemento combustible y el cuerpo de relleno y entre este y la pieza que lleva el cierre al canal. Cada acople consiste en dos cilindros, llamados parte superior e inferior, separados por una superficie inclinada a 15° . Cada parte del acople lleva un medio anillo fijado por tornillos, que encajan en estado acoplado en una entalla circular de cada parte del acople. (Figura 4.10)

Durante el acoplamiento ambas partes deslizan radialmente hasta coincidir exactamente en sentido axial. Lleva un seguro, que impide el desacople, consistente en un perno o pasador que está alojado en la parte superior y desliza por presión de un resorte, hacia abajo. El pasador tiene en su extremo inferior un cono de 30° que calza en un agujero cónico de la parte inferior del acople, con una excentricidad de 1 mm. Esta excentricidad radial sirve para ajustar ambas partes del acople, una contra otra. La parte cónica del acople impide el desacople, ya que quedan dos superficies a 90° (la del cono y la interfase de los dos cilindros) que además previene el juego axial.

La parte superior del acople lleva 2 zapatas deslizantes rígidas y un muelle trapezoidal de ajuste al canal. El material del acople es acero DIN 4122. La superficie inclinada a 15° de los cilindros está endurecida a 30 kg/mm^2 para reducir el desgaste.

Varillaje

La parte inferior del acople lleva un anillo fijado por 3 tornillos a 120° . A este anillo se hallan unidas 3 barras cilíndricas de acero (DIN 4550) por medio de 3 tornillos con cabeza tipo "Allen". El seguro de estos tornillos se verifica por aplastado de un labio fresado en la cara superior del anillo contra una muesca existente en la cabeza del tornillo. (Figura 4.11.)

El otro extremo de las barras va roscado en un anillo intermedio también de acero. Al mismo se hallan fijos 6 tubos con tapones en los extremos, por medio de tornillos "Allen".

Estos tubos en el otro extremo están roscados en los vástagos de 5 Barras Combustibles y del tubo estructural.

Los tubos que atraviesan el reflector son de Zry-4 y llevan dos orificios para igualar presiones interna-externa y no arrastran D_2O .

Placa portante

Además de soportar las 36 barras combustibles debe poseer la menor pérdida de carga posible.

Sobre un diámetro exterior de 100 mm la placa portante lleva:

6	agujeros de \varnothing	12,5 mm
12	" "	\varnothing 12,5 mm
6	" "	\varnothing 6 mm
6	" "	\varnothing 7 mm
12	" "	\varnothing 9,5 mm

para permitir el pasaje de refrigerante. El material es Zircaloy 4 y lleva adosadas 3 zapatas fijas para su centrado en el canal.

Tubo portante y zapatas elásticas

A fin de ajustar el elemento combustible al canal e impedir la interacción mecánica entre ambos, así como mejorar la rigidez del EC, que es muy baja por su esbeltez (l/d alta), se vincula el EC al canal por medio de zapatas elásticas. (Figura 4.12.)

Estas zapatas están constituidas por muelles de Inconel fijos a un tubo estructural que ocupa una posición de la corona exterior de barras. La fijación se verifica por medio de remaches "pop".

El EC apoya en el canal en dos zapatas fijas de cada separador y en 14 zapatas elásticas ubicadas en cada espacio inter-separador. La ubicación del EC es entonces excéntrica, alcanzando hasta 0.7 mm de excentricidad.

La tercer zapata rígida que llevan los separadores sirve para mantener centrado el EC en los estrangulamientos existentes en el sistema de carga y transferencia de los elementos combustibles.

El diámetro del canal de refrigeración es $108.2 + 0.22$ mm y el diámetro de la circunferencia que pasa sobre las zapatas fijas es $107.8 - 0.1$ mm.

La condición de diseño del sistema tubo estructural-zapata elástica es tal que al final del tiempo de permanencia debe mantener una fuerza de ajuste que impida la separación o movimiento EC-canal.

Separadores

La finalidad de este componente es la de mantener la posición de las barras combustibles a lo largo del EC permitiendo las dilataciones longitudinales diferenciales de barras combustibles si las hubiere, así como establecer un vínculo que centre el EC en el canal.

Está diseñado como para soportar solicitaciones estáticas y dinámicas provenientes de vibración, cambios de diámetro, dilataciones longitudinales y arqueado de las barras combustibles, así como la flexión del elemento combustible. (Figuras 4.13. y 4.14.)

Constituyen además, junto a 9 barras combustibles, el esquema estructural del EC.

Por las características de la ubicación de las barras combustibles en la sección transversal el separador lleva 5 tipos diferentes de celdas para alojarlas, a saber:

- 1 central
- 6 en la primer corona interna
- 12 en la segunda corona interna
- 17 en la corona externa
- 1 en la corona externa para el tubo portante

Se ha previsto en la malla del separador los correspondientes apoyos de los patines de las barras combustibles, como resaltos adecuados para satisfacer la geometría.

El espesor de las paredes de las celdas resulta del compromiso de tener la menor pérdida de carga y material absorbente neutrónico con la resistencia adecuada.

La fabricación se efectúa por electroerosión a partir de una rodaja de Zircaloy 4 que ha tenido previamente un laminado cruzado. El separador lleva 3 zapatas fijas, en su periferia, por "brazing" (soldadura de bajo punto de fisión). Estas zapatas son fabricadas por estampado de una chapa de zircaloy 4.

Barra combustible

Está constituido esencialmente por una columna o apilamiento de pastillas de dióxido de Uranio sinterizado, envainadas en un tubo de zircaloy con tapones soldados en sus extremos. Además lleva distribuidos a lo largo de la columna de pastillas 28 arandelas deformables para absorber la dilatación térmica de la misma en la primer salida en potencia, dos espacios, uno en cada extremo, para alojar gases de fisión, y algunos elementos para absorber dilatación térmica. (Fig.4.15.)

Las altas temperaturas que se establecen en el UO_2 hacen que las dilataciones térmicas sean considerables. Por otra parte el salto térmico entre la pastilla y la pared interior de la vaina es importante por cuanto está lleno con gases nobles (He al comienzo y mezcla de He, Xe y Kr luego).

Estos hechos hacen necesario definir un espacio entre pastilla-vaina adecuado como para tener la mínima deformación de la vaina por dilatación térmica del UO_2 compatible con una menor temperatura central.

En este caso el espacio diametral (diámetro interno de vaina-diámetro de pastilla) varía entre 0.13 y 0.23 mm ya que los diámetros correspondientes son 10.80 ± 0.04 y 10.62 ± 0.01 respectivamente, lo cual asegura una deformación plástica efectiva de la vaina inferior a 1% durante todo el tiempo de permanencia y una temperatura central del UO_2 inferior a $2200^\circ C$, para 100% de potencia. Durante el proceso de fisión se producen productos de fisión gaseosos que se liberan de las pastillas de UO_2 por efecto térmico, principalmente.

Estos gases se incorporan a los espacios libres dentro de la vaina, aumentando la presión interior.

Por otra parte, y a fin de disminuir las presiones circunferenciales en la vaina por diferencia de presiones exterior (refrigerante) e interior, se incorpora al fabricar la "barra combustible" una presión de 17 atm a PTN de He.

A fin de contener estos gases (de fabricación y de fisión) y no sobrepasar la presión exterior al final del tiempo de permanencia (criterio de diseño) se proveen 2 espacios en los extremos de la vaina (zona de menor temperatura) para alojarlos.

En el caso de las barras combustibles de la CNA, tienen un espacio superior de 20 cm^3 y otro inferior de 8 cm^3 .

Ambos espacios están protegidos con sendos tubos para prevenir el aplastamiento de la vaina, instantáneo o diferido, por efecto de la presión exterior.

El efecto de gradiente de temperatura radial hace necesario prever una concavidad en las caras planas de las pastillas de UO_2 . De tal manera que la elongación de la columna de pastillas se minimiza, al ser transferido el punto de contacto entre pastillas a la zona de menor temperatura radial (Figura a.)

Teniendo en cuenta además que la dilatación de la columna de pastillas es mayor que la de la vaina es necesario prevenir un alargamiento excesivo de la vaina.

Para ello se han colocado arandelas aplastables repartidas entre la columna de pastillas de tal manera que absorban la dilatación diferencial mencionada

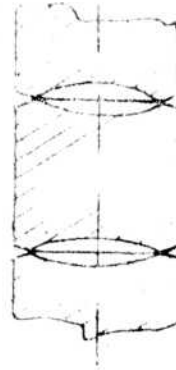


Fig. a. Diseño pastillas UO_2

A fin de prevenir rotura de las pastillas de UO_2 durante el transporte, se colocan elementos (pastillas de Al_2O_3) que compensan las tolerancias longitudinales y permiten cerrar la "barra combustible" sin juego interno.

La longitud activa es de 5.300 mm de la cual aproximadamente 50 mm corresponden a las arandelas aplastables.

4.3.2. Descripción del elemento Combustible Candu

Aproximadamente 30 pastillas de UO_2 están encapsuladas en una vaina de Zircaloy-4 de 0.4 mm de espesor (cuya cara interna lleva un recubrimiento de grafito de aproximadamente 0.01 mm de espesor) cerradas en sus extremos con tapones también de Zry 4 soldados por resistencia.

Treinta y siete barras combustibles están soldadas a dos grillas extremos para formar el elemento combustible que se muestra en la Figura 4.16.

Las barras combustibles están separadas una de otras en el plano medio del E.C. por espaciadores fijos a las vainas por "brazing".

Las barras combustibles externas llevan adosados patines que permiten el deslizamiento dentro del tubo de presión.

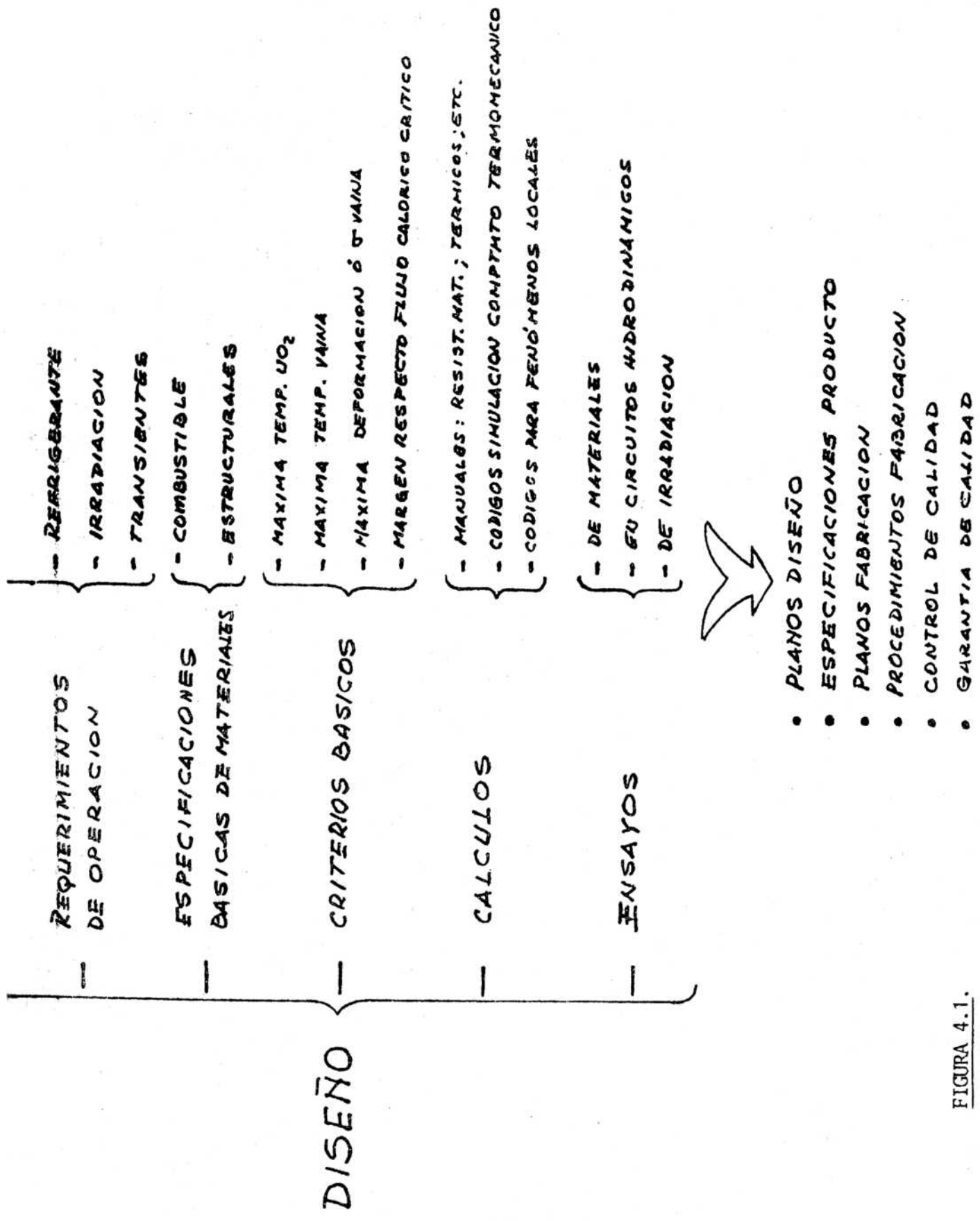


FIGURA 4.1.

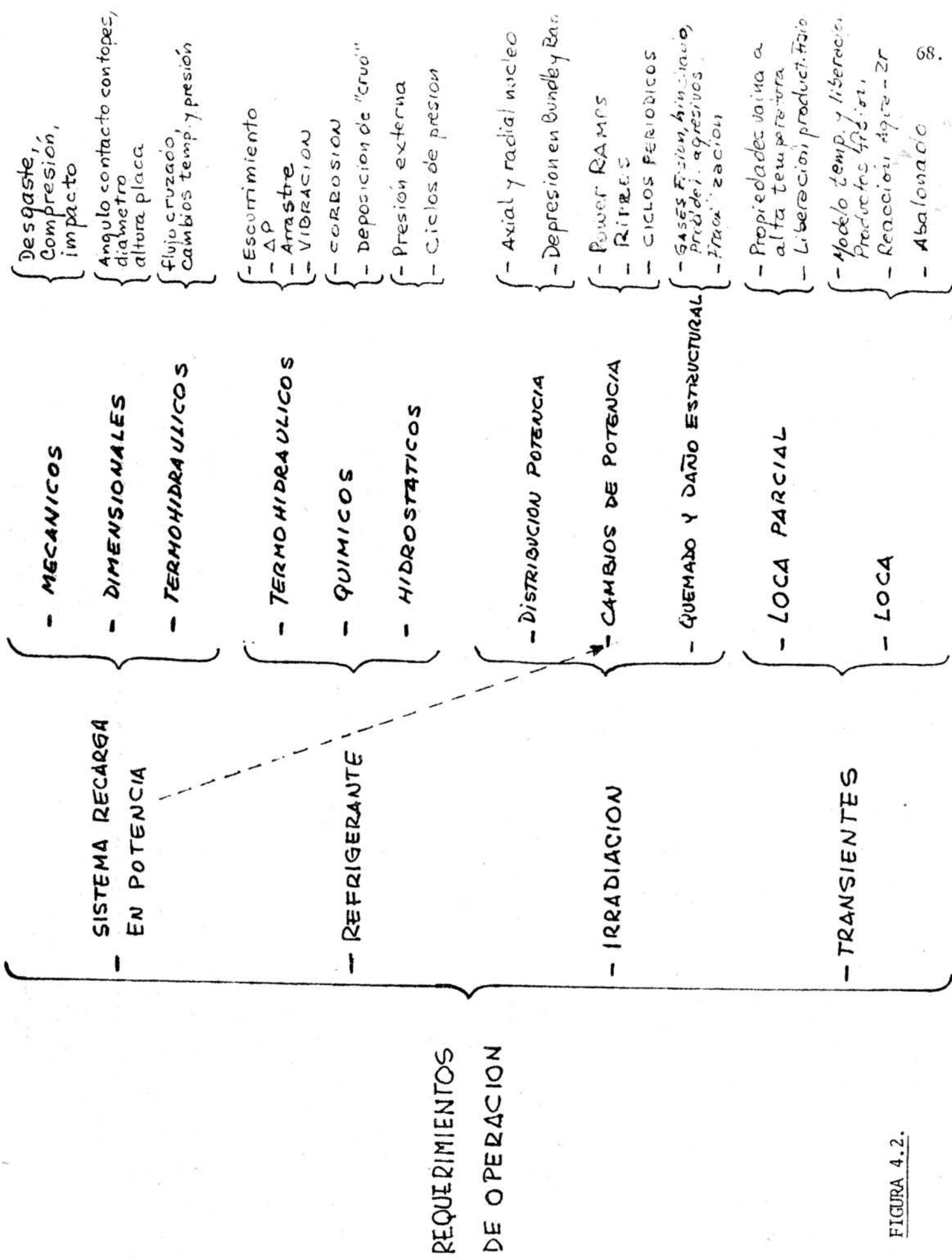


FIGURA 4.2.

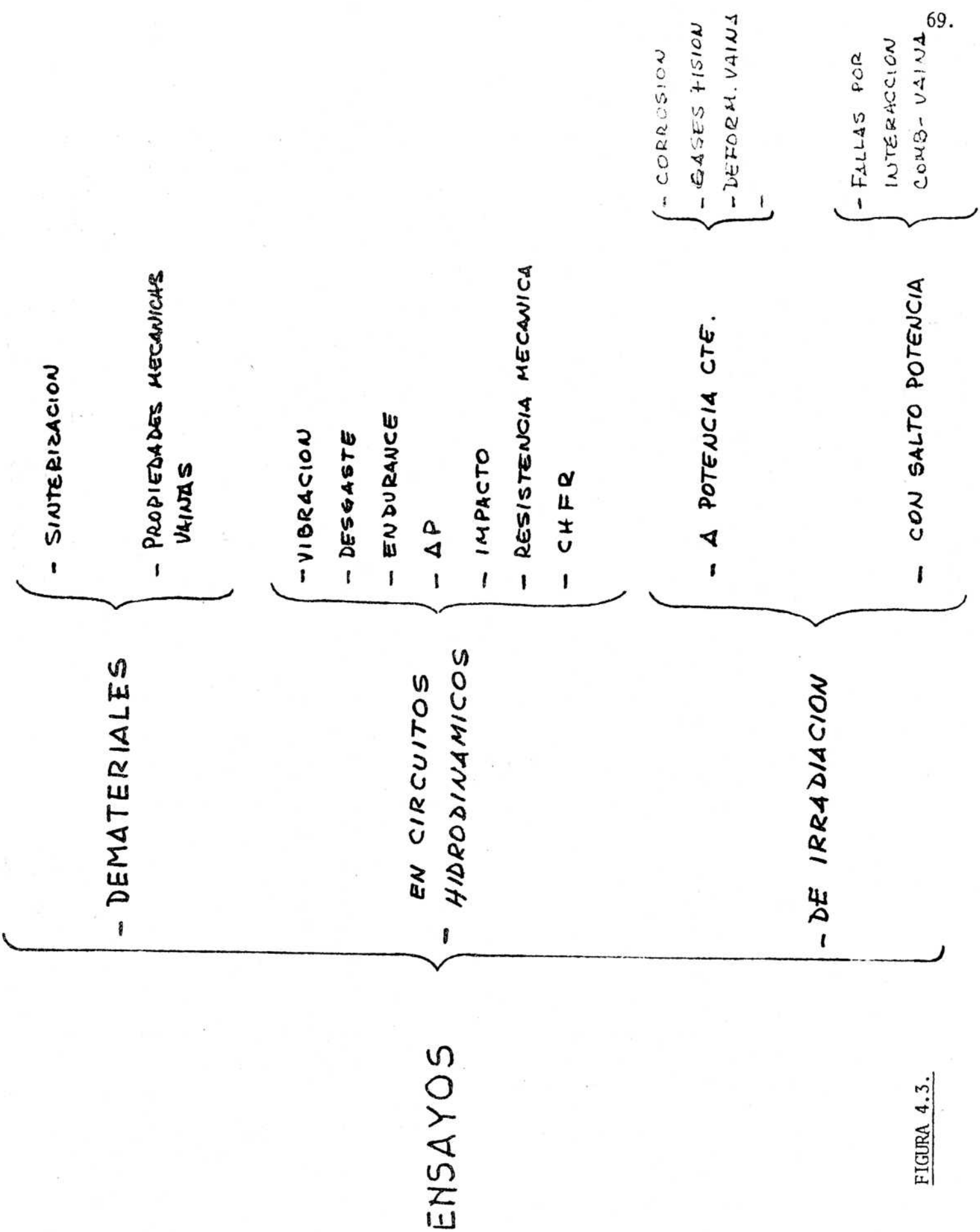


FIGURA 4.3.

FIGURA 4.4.

Mechanical Properties

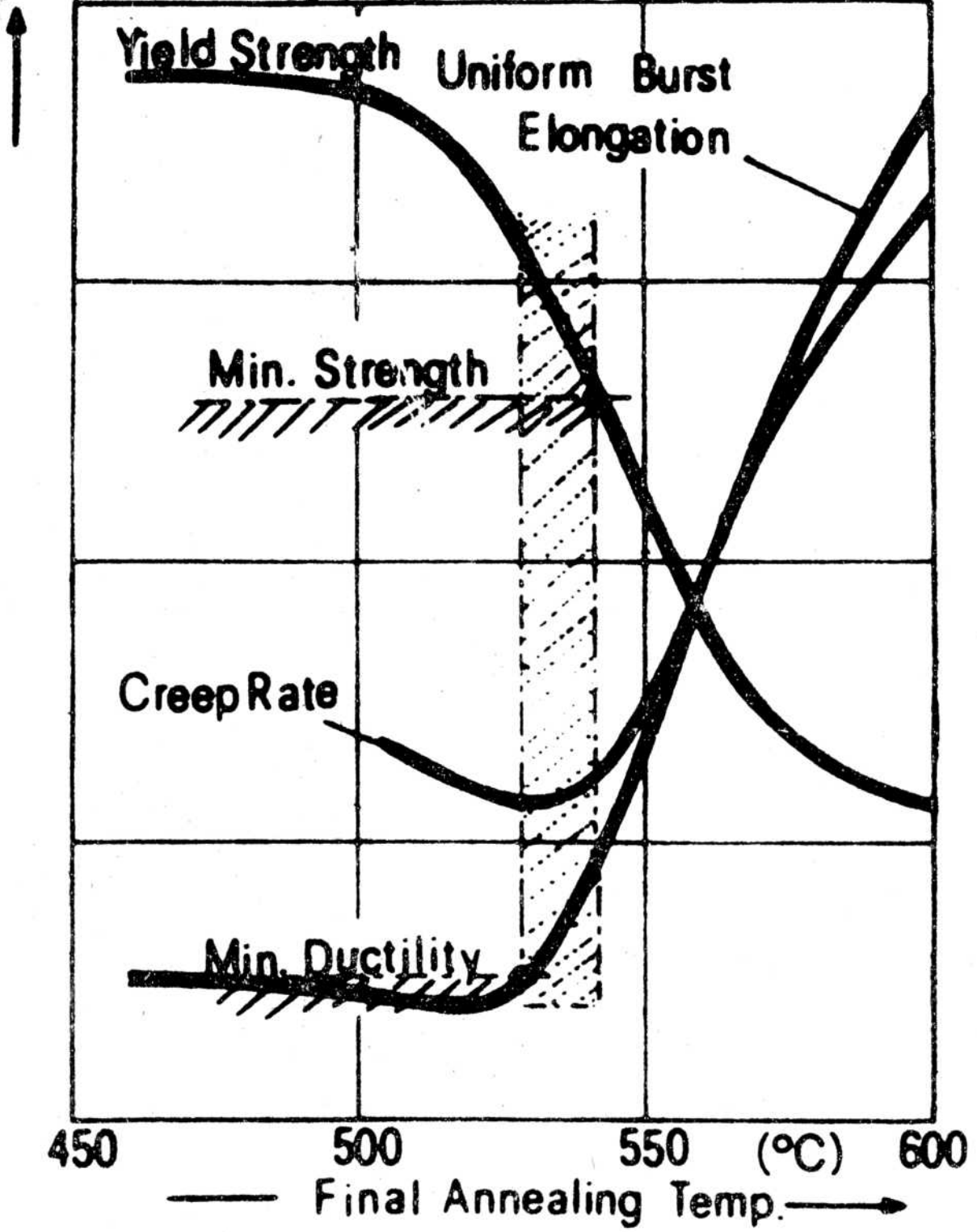
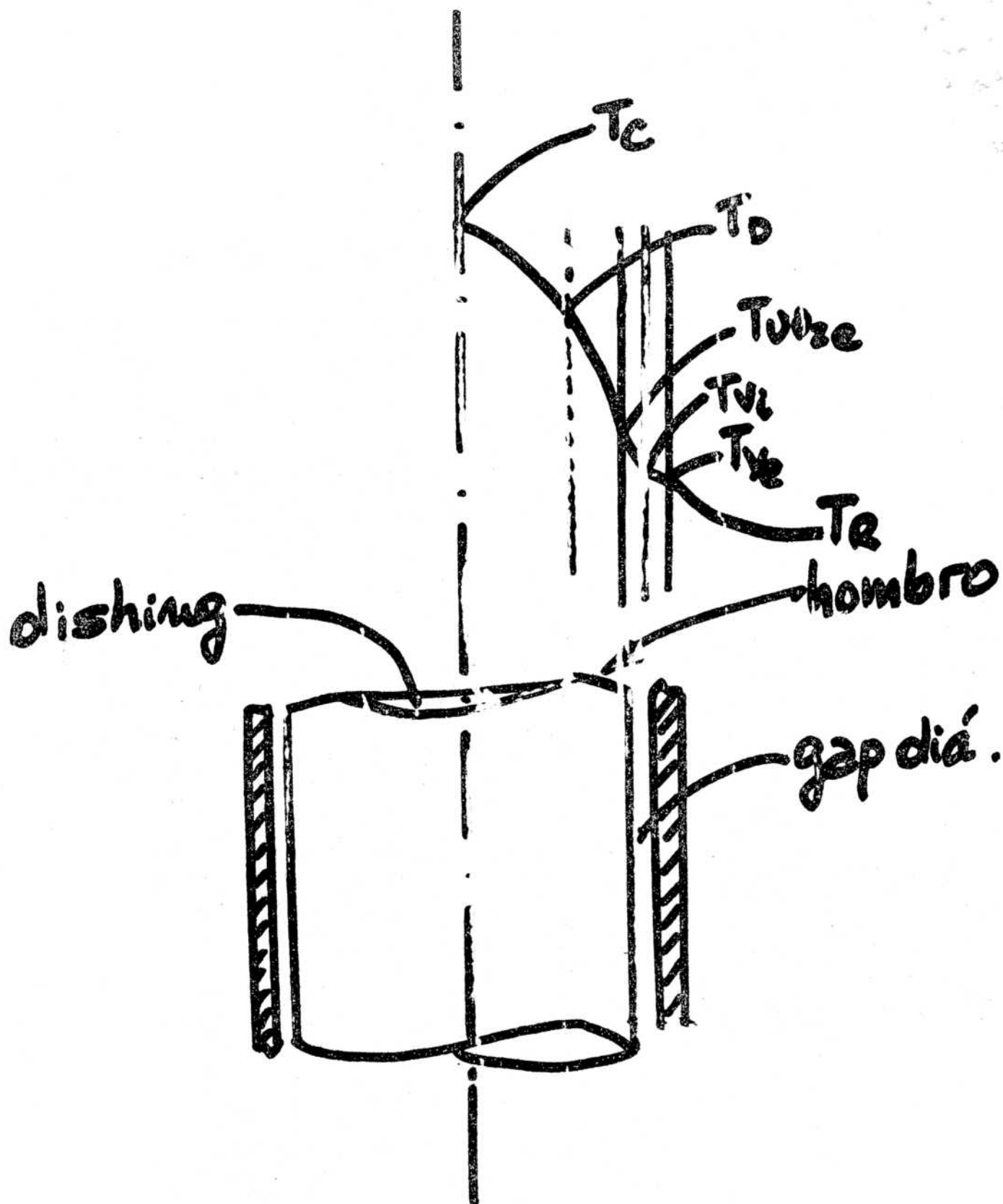


FIGURA 4.6.



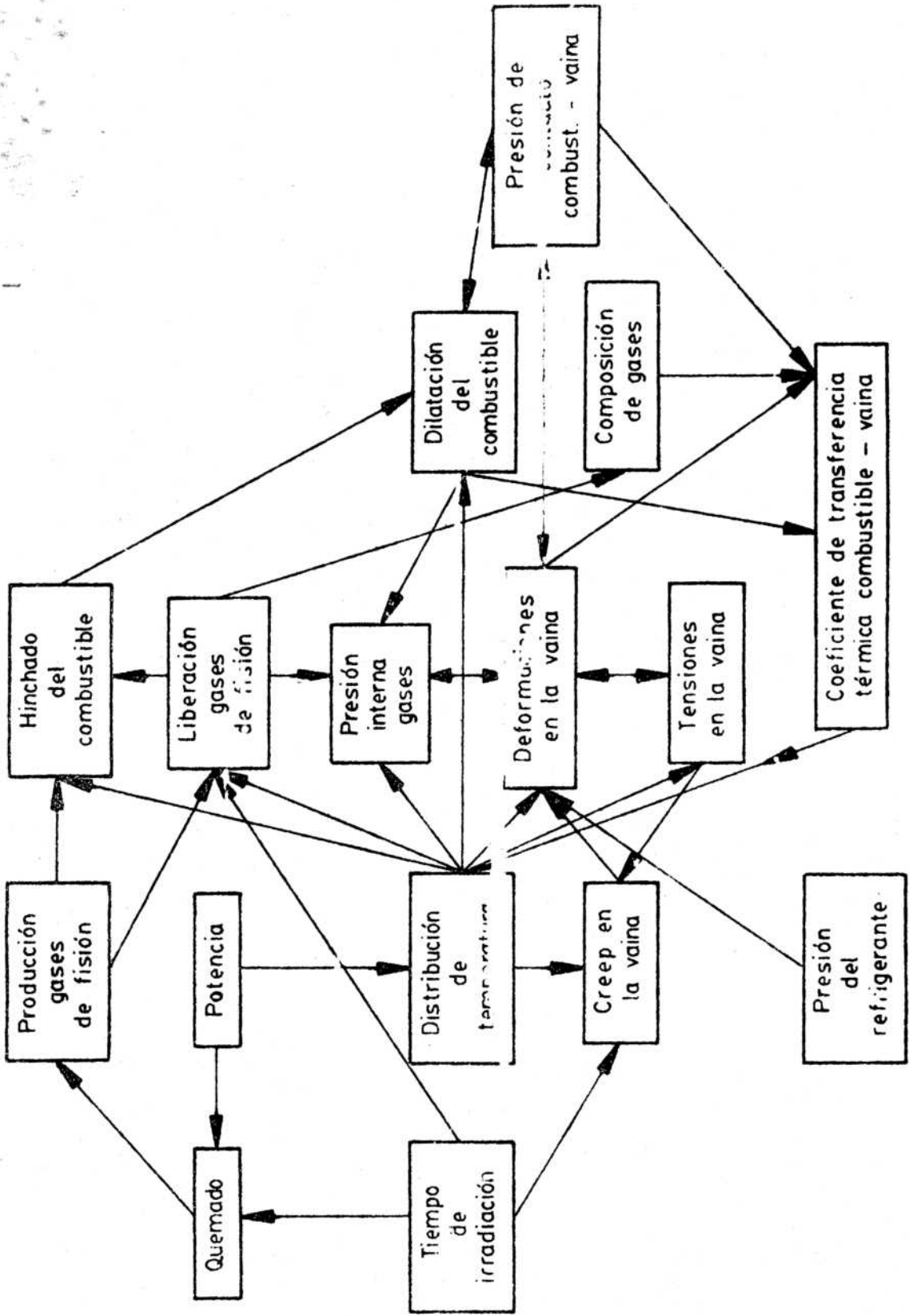
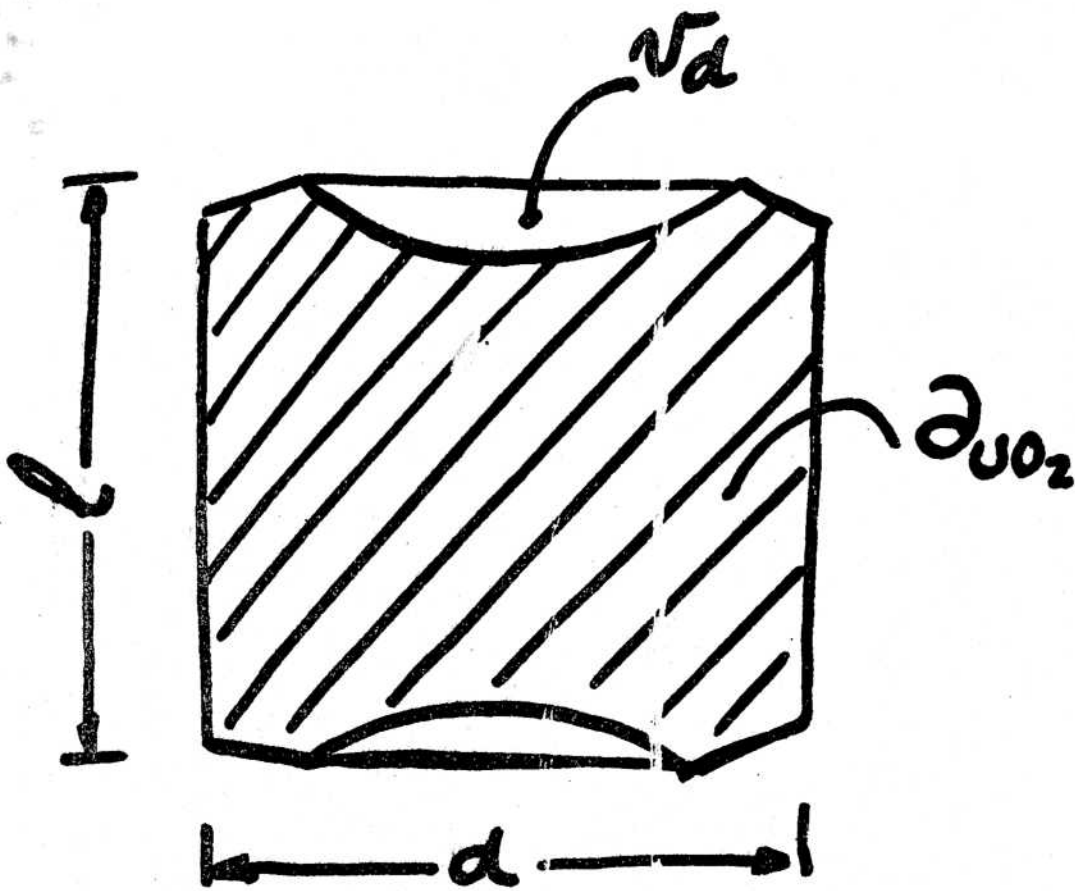


FIGURA 4.5.

FIGURA 4.7.



$$\frac{l}{d} \cong 1,1 \quad \partial_{O_2} \cong 96\% DT$$

$$2v_d \cong 0,015 \frac{\pi d^2}{4} l$$

FIGURA 4.8. E.C. ATUCHA

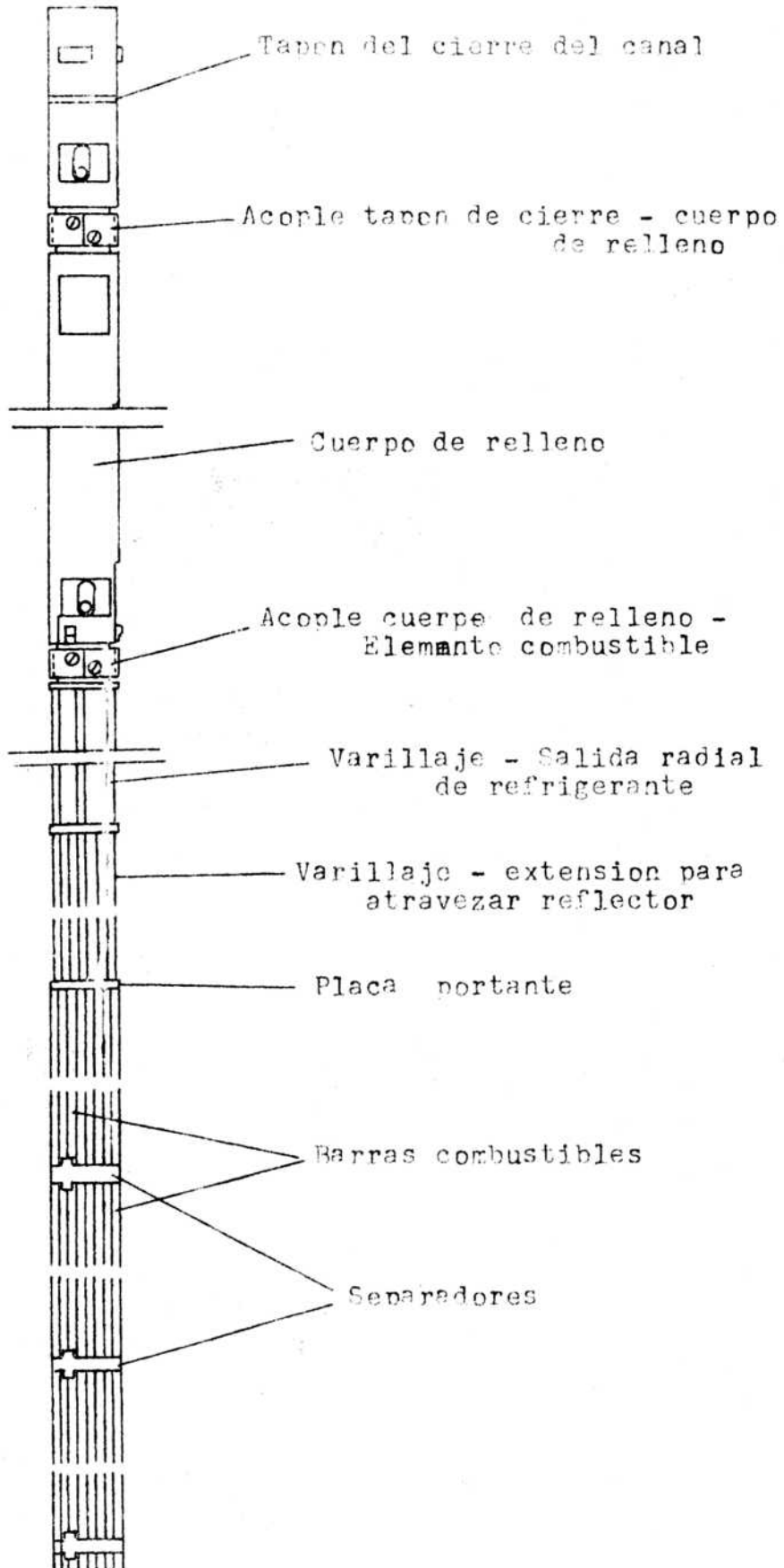


FIGURA 4.9. CORTE TRANSVERSAL DEL E.C.

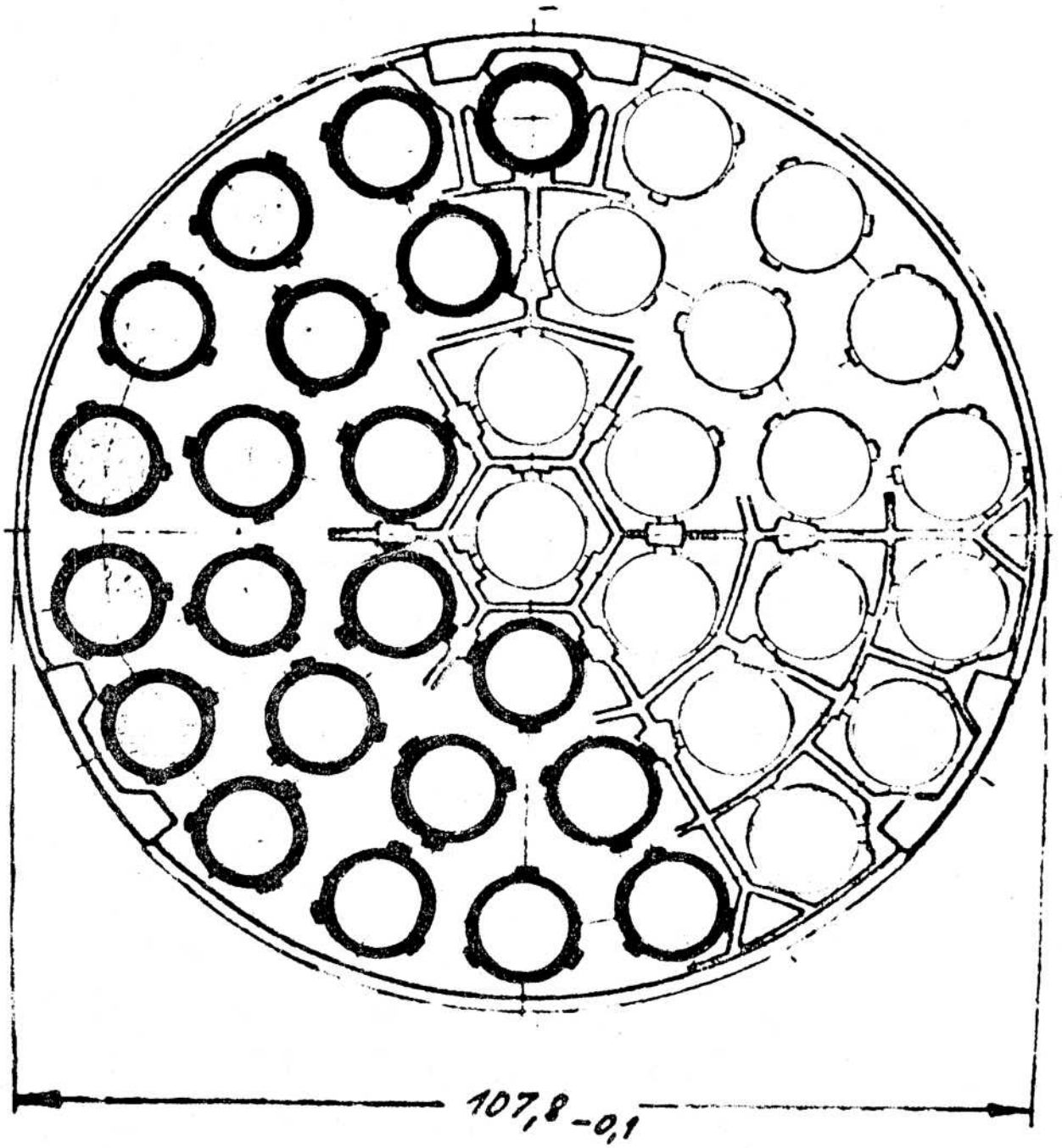


FIGURA 4.10. ACOPLÉ DEL E.C.

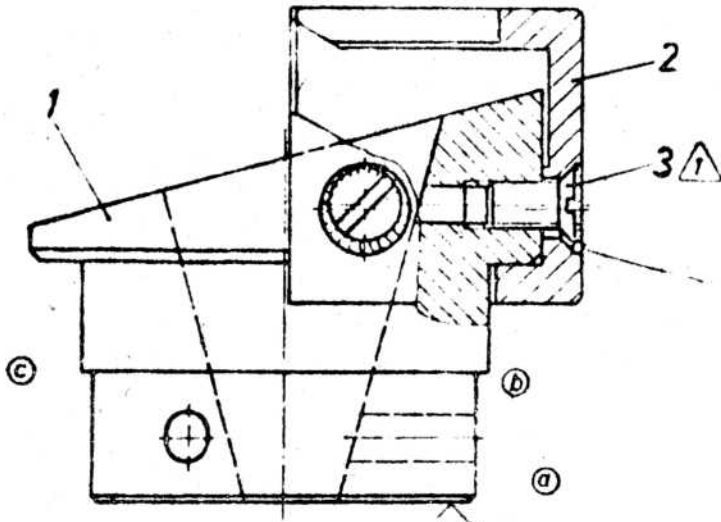
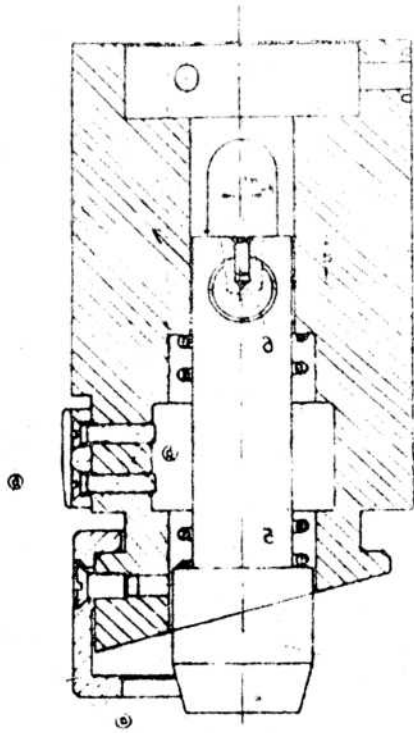


FIGURA 4.11. VARILLAJE DEL E.C.

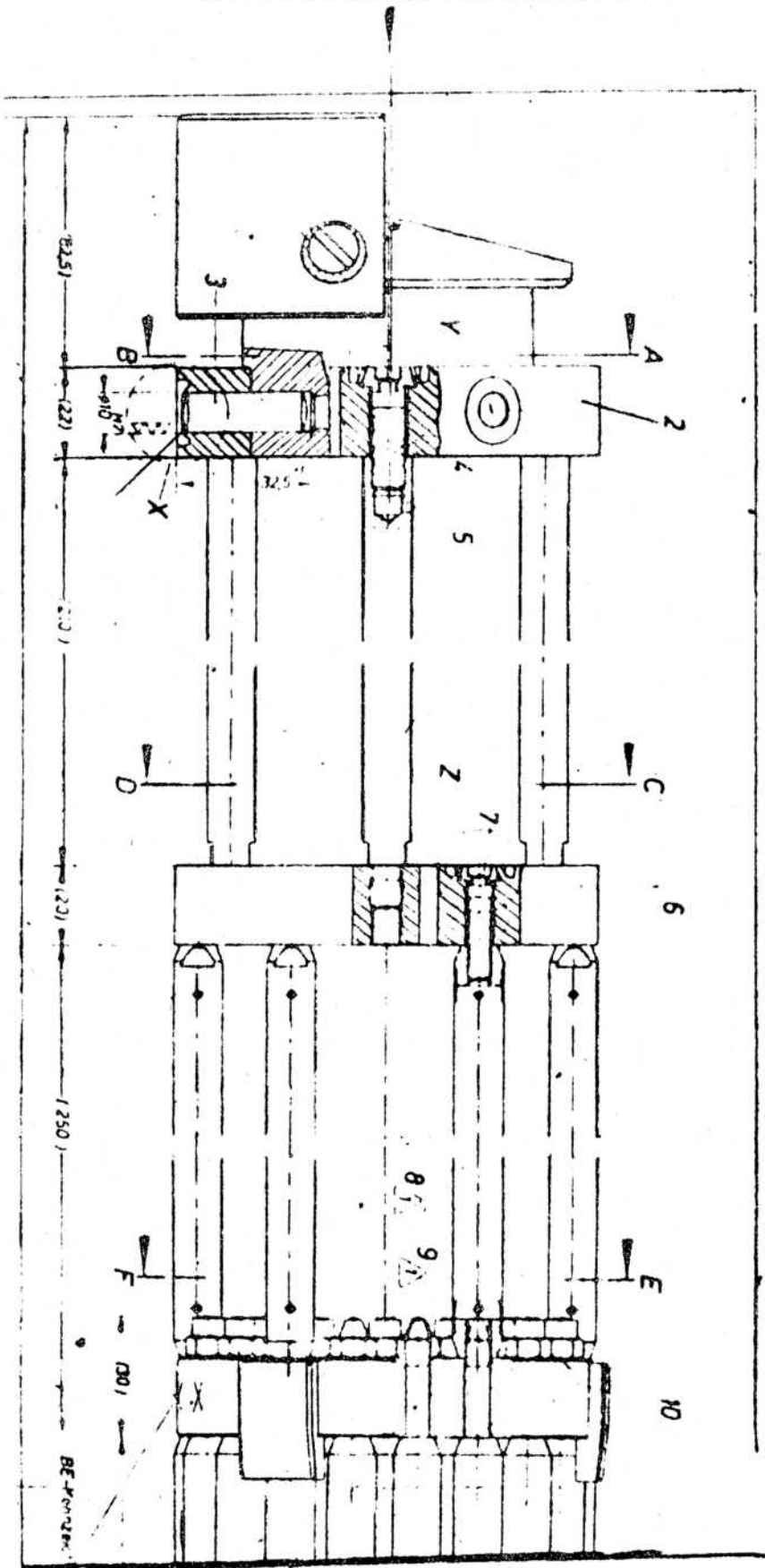


FIGURA 4.12.

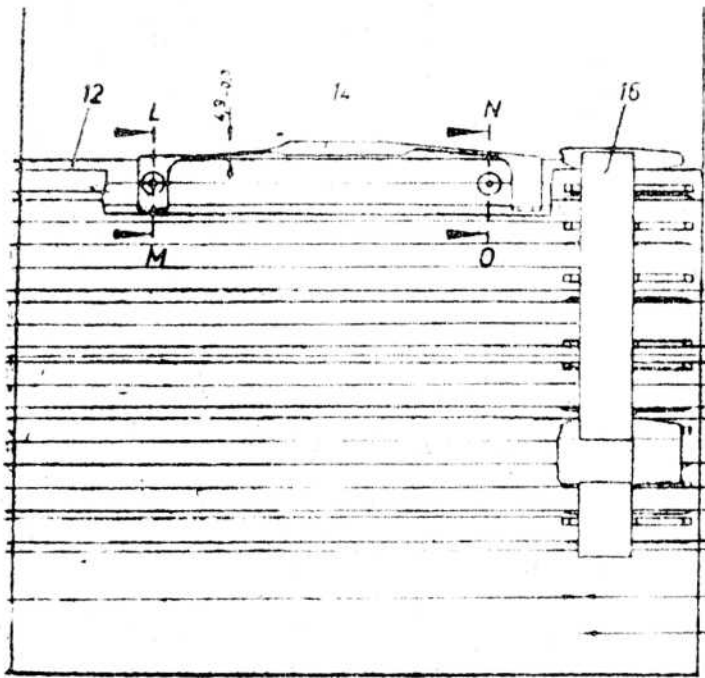


FIGURA 4.13.

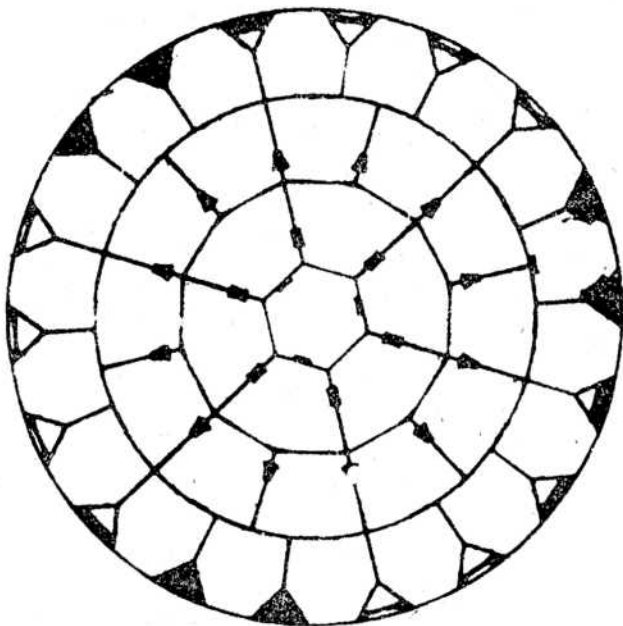


FIGURA 4.14.

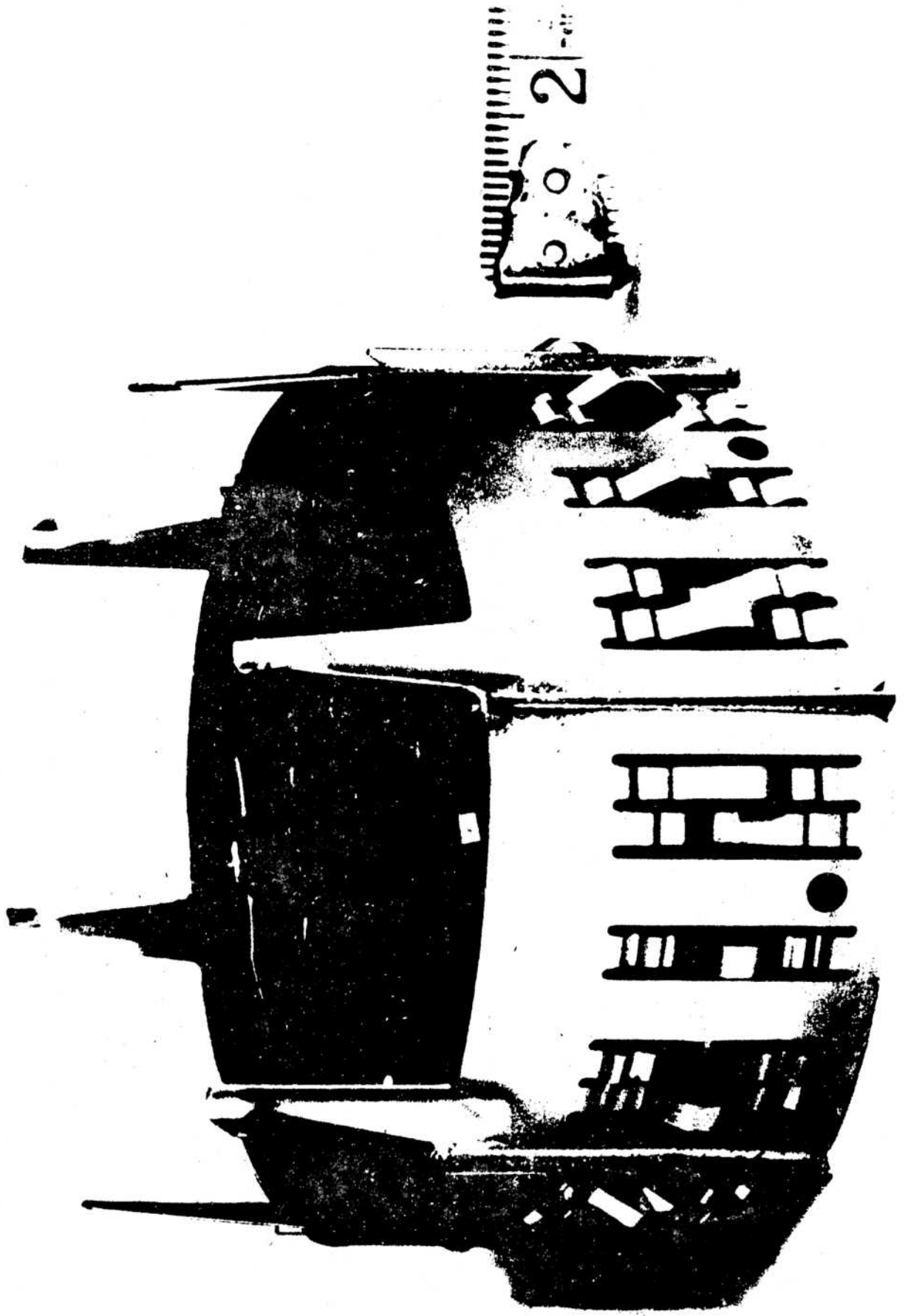


FIGURA 4.15.

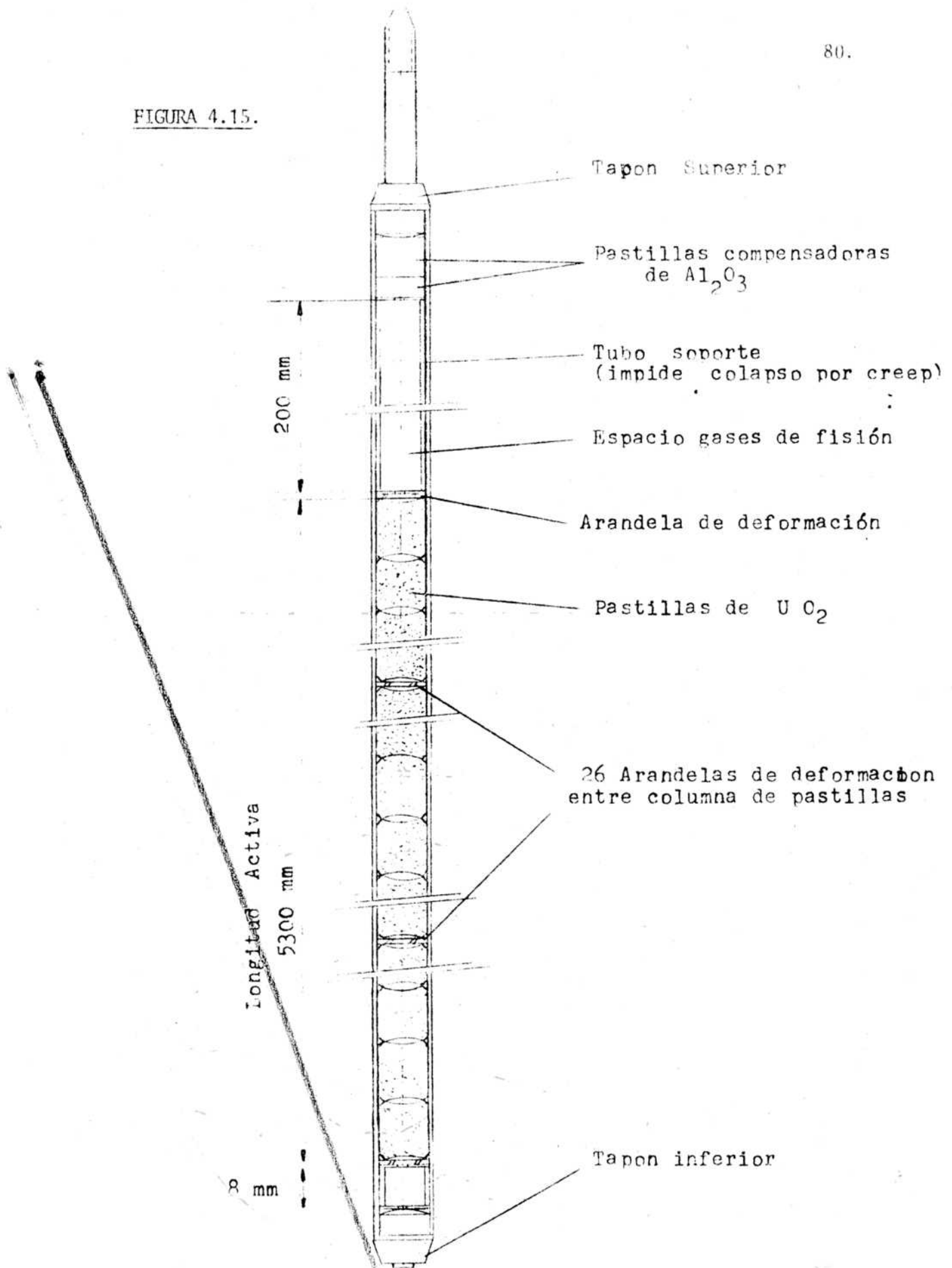
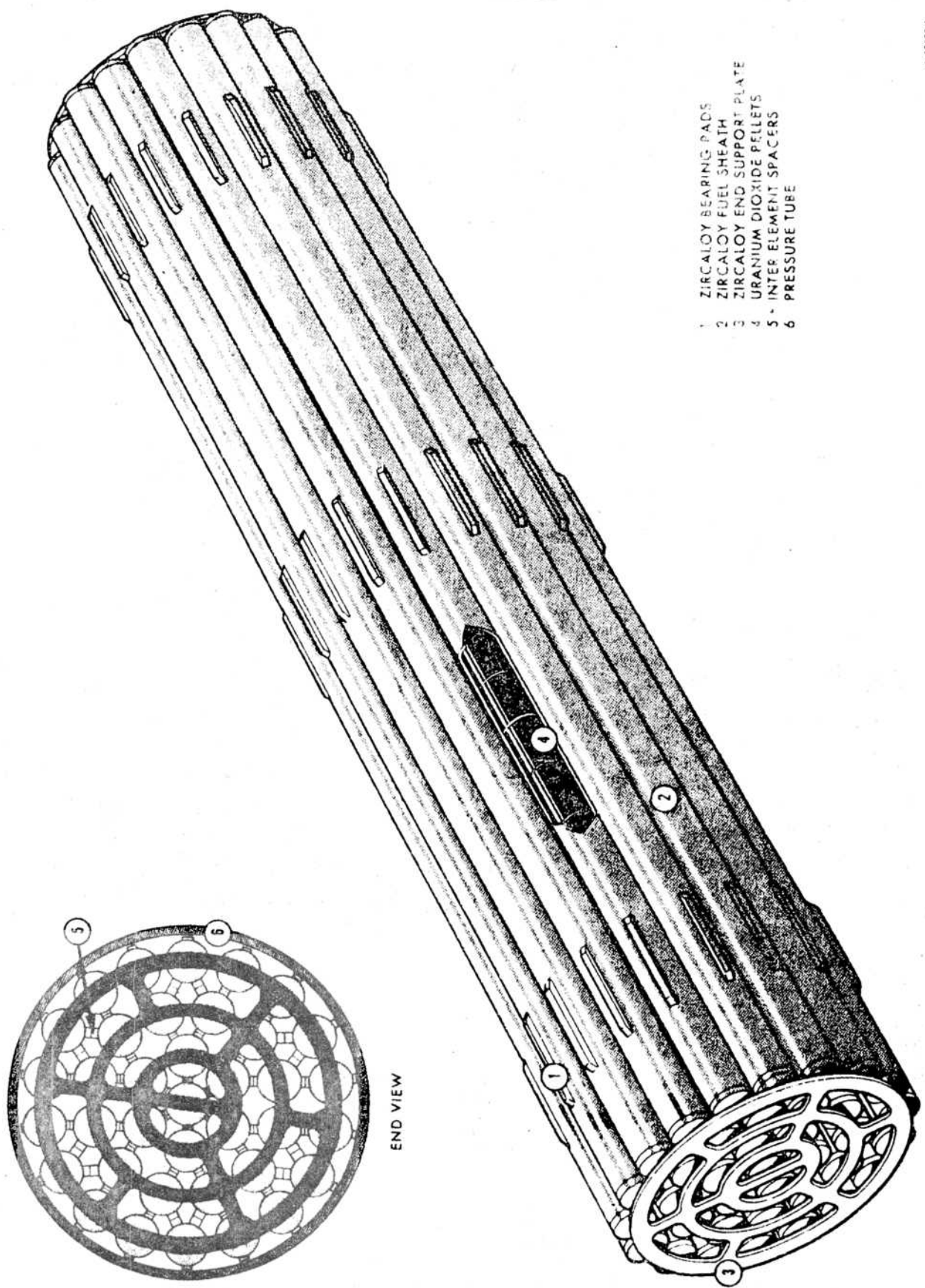


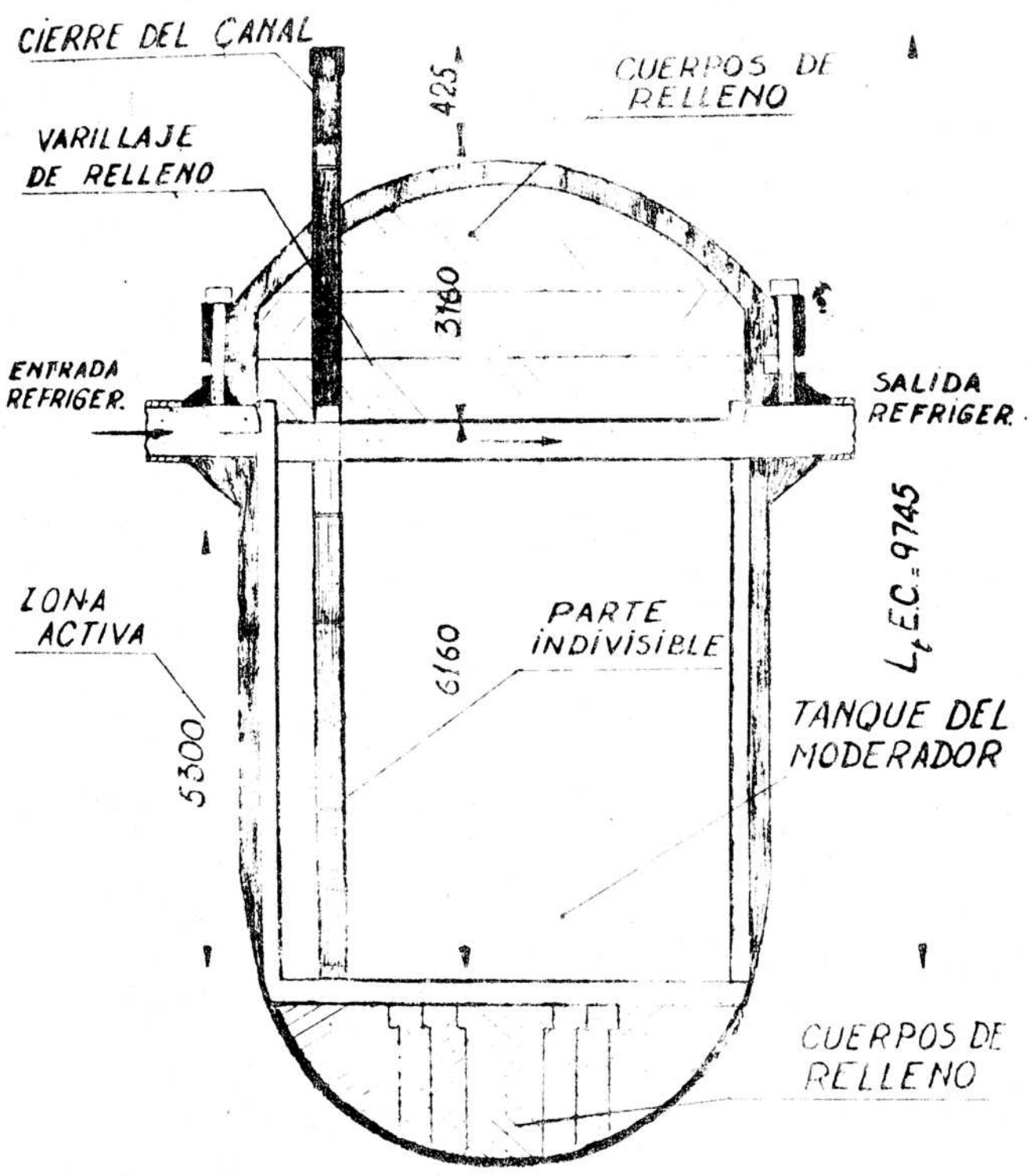
FIGURA 4.16.



- 1 ZIRCALOY BEARING PADS
- 2 ZIRCALOY FUEL SHEATH
- 3 ZIRCALOY END SUPPORT PLATE
- 4 URANIUM DIOXIDE PELLETS
- 5 INTER ELEMENT SPACERS
- 6 PRESSURE TUBE

MS-37100-1
REV. 1973

END VIEW



5. COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

No solo el diseño de elementos combustibles se basa en el conocimiento de los fenómenos que ocurren cuando opera el reactor.

Las bases para decidir el apartamiento de especificaciones (durante fabricación) así como los límites de uso del mismo (operación) dependen de ese conocimiento.

Además los criterios y análisis de seguridad también están basados en el comportamiento y performance de elementos combustibles. Por ello este tema es uno de los "nudos" de confluencia de la tecnología de combustibles nucleares. A continuación se mencionan algunos de los fenómenos de interés tecnológico que afectan a las pastillas de UO_2 , la vaina de Zircaloy, las barras y elementos combustibles.

Se pone énfasis en los observacionales antes que en los modelos físico-matemáticos que describen estos fenómenos.

5.1. Cambios estructurales y de las principales propiedades físicas.

a) Temperatura Central de UO_2 .

De interés especial para los fenómenos internos del material combustible es la influencia del quemado sobre la conductividad y transferencia térmica.

En la fase inicial de la vida de una barra combustible hay tres efectos principales:

- El "gap" pastilla vaina se achica por dilatación térmica y por la formación de fisuras térmicas. Por ello se mejora la transferencia térmica en el "gap".
- Comienza a densificarse el material combustible localmente, especialmente por crecimiento de grano en la zona de grano columnar. La disminución de porosidad conduce a un aumento de la conductividad térmica.
- Se forma un canal central que acorta el "camino o espesor" de transferencia térmica.

Todos estos efectos conducen a una disminución de la temperatura central en más de $100^\circ C$.

Los efectos de largo tiempo tienen en conjunto tendencias opuestas, las que además tienen componentes muy diferentes.

- Debido al daño por radiación de la red cristalina se reduce la conductividad térmica. Por el recocido de los defectos a temperaturas superiores a $500^\circ C$ no son observables efectos especiales.
- La conductividad térmica de óxidos combustibles es máxima para la estequiometría exacta y disminuye cuando se aparta de ella. Por eso al comienzo mejora la conductividad y luego disminuye ya que la estequiometría inicial es ligeramente superior a la exacta. Esta disminuye hacia la exacta aumentando la conductividad y luego vuelve a aumentar por la oxidación durante el proceso de quemado.
- El hinchado del material combustible mejora la transferencia térmica por la presión de contacto pastilla-vaina.

- La formación de óxidos mixtos en la matriz de combustibles está asociada con un desmejoramiento de la conductividad, lo cual no es afectado por el pequeño volumen de productos de fisión metálicos que favorecerían la conductividad térmica.
- El continuo aumento de los gases de fisión como componente del gas de llenado tiene un efecto negativo.

En resumen, seguido a una brusca caída de la temperatura central sigue una lenta subida como muestra la figura 5.1. la cual debe ser tomada como cualitativa.

b) Cambios estructurales en el UO_2 . (Ver fig. 5.2)

El estado de la pastilla recién fabricada muestra una porosidad fina y gruesa uniformemente distribuida en la sección transversal.

En el tiempo cero de irradiación y a potencia de régimen (aprox. 500 w/cm) se observa la formación de fisuras debidas a la tensión térmica por el gradiente radial.

Estas fisuras tienen su punta en el centro y se abren hacia el borde de las pastillas.

El gap se ha cerrado parcialmente por la dilatación térmica de la pastilla.

Después de un quemado muy bajo (1 MWd/Tn) aparece ya el canal central que se produce por la migración de poros y a la vez se observa la formación de una zona de crecimiento de grano columnar y un pequeño anillo o zona de granos equiaxiados.

Al bajar la potencia y con unos 10 MWd/tn aparecen ahora fisuras cuyas puntas están hacia el borde. Las mismas se deben al efecto de contracción de la pastilla. Ha disminuido la porosidad de la zona externa de la pastilla.

A la misma potencia de trabajo y ahora con unos 100 MWd/Tn de quemado se completa el cierre del gap, hay crecimiento de grano y continúa agrandándose el canal central.

Comienzan luego a cerrarse las fisuras debido al hinchado (1000 MWd/Tn) lo cual se completa a los 10.000 MWd/tn quemado máximo de los combustibles de Uranio natural.

Este tipo de fenómeno es más notable en combustibles de densidad baja 85-90% de la teórica aunque se observa también en combustibles de alta densidad (96 % DT) como muestran las figs. 5.3 y 5.4.

En la fig. 5.5. se ha representado (parte superior) la variación del radio de la zona de grano columnar en función del quemado.

5.2. Comportamiento de los productos de fisión.

Considerando su comportamiento químico en el combustible, los productos de fisión pueden ser divididos en varios grupos:

- Los gases noble Kr y Xe de baja solubilidad y tendencia a aglomerarse en burbujas.
- Los que por su alta presión de vapor tienen alta movilidad: Rh, Cs, Te, Br, I ; los cuales interesan por su reacción con la vaina.

- Los que se pueden separar como fases metálicas, formando intermetálicos con el Uranio: Ru, Rh, Pd.
- Los que de acuerdo a la disponibilidad de oxígeno se separan en fase metálica o de óxidos: Mo y Tc.
- Los que siempre se separan como óxidos: Sr y Ba.
- Las tierras raras que forman óxidos mixtos con la matriz del óxido combustible: Y, Zr y Nb.

Otro aspecto es la migración de los productos de fisión sobre la cual se pueden hacer las siguientes consideraciones:

- Los elementos con alta presión de vapor, es decir óxidos inestables, migran a las zonas frías exteriores de la pastilla.
- Al final de la irradiación, en la parte externa de la pastilla aparece un crecimiento de grano equiaxiado que contienen las fases de productos de fisión oxidados.
- Los precipitados metálicos son encontrados en la zona de gradientes de temperatura. Especialmente el Ru puede ser identificado por autorradiografía, ya que él puede dar, por enfriamiento lento, un enriquecimiento metálico en el centro.
- Los óxidos de productos de fisión, los cuales forman óxidos mixtos con la matriz del material combustible, están distribuidos uniformemente en la sección de la pastilla.

El enriquecimiento en productos de fisión en la pared interna de la vaina influye -según su compatibilidad- directamente sobre la performance tecnológica de la barra combustible.

Los fenómenos internos del material combustible tienen por el contrario una más indirecta influencia, siempre que la distribución de temperatura quede determinada con certeza.

a) Liberación de gases de fisión.

La temperatura es el parámetro dominante que controla el proceso de liberación de gases de fisión.

A bajas temperaturas los átomos pueden ser expulsados de la superficie del combustible por choque y retroceso, debido a eventos de fisión adyacentes. Este efecto es importante cuando se considera la liberación de nucleidos de vida corta, pero es despreciable para el caso de gases estables.

La secuencia del fenómeno de liberación de gases de fisión puede resumirse como sigue:

- i) los gases difunden (atómicamente o en burbujas) a través del grano. El tamaño y distribución de burbujas está controlada por resolución inducida por irradiación.
- ii) los átomos alcanzan el borde de grano y precipitan en burbujas que crecen hasta interconectarse.
- iii) Adicionalmente las burbujas y los bordes de granos migran absorbiendo gas de los granos.

- iv) subsecuentemente se forman tuneles en los bordes de grano y el gas migra a las fisuras y al plenum en las barras combustibles.
- v) Después de períodos a alta potencia el gas es liberado en las paradas del reactor, a causa de que se forman fisuras por contracción térmica que interceptan los tuneles o burbujas de gas.

Los modelos que se usan para describir este fenómeno tienen en cuenta:

- difusión de gas
- crecimiento de grano equiaxiado
- movimiento de borde de grano
- tamaño de la burbuja
- migración de burbujas a borde de grano
- formación de túneles

El efecto relativo de los distintos parámetros intervinientes resulta de interés para conocer su influencia en las especificaciones del combustible.

En las figuras 5.6, 5.7, 5.8, se muestra la dependencia del fenómeno con la potencia y el quemado y el efecto relativo del quemado y el tamaño de grano.

En forma muy aproximada puede decirse que una variación de potencia de 480 a 550 w/cm modifica la liberación de 3 al 10%.

De la misma manera y considerando que el tamaño usual de los granos obtenidos en fabricación es aproximadamente de 10 μm un aumento de este tamaño inicial a 50 μm reduciría la liberación en un 1% para una potencia lineal de 500 w/cm y quemados de 8000 $\frac{\text{MWD}}{\text{Tn}}$.

b) Liberación de productos de fisión volátiles.

Como se ha mencionado antes se incluyen en esta categoría a los elementos de alta tensión de vapor: Rb, Cs, Te, Br, I.

Estos elementos forman óxidos inestables que migran a las zonas frías de la pastilla.

La importancia tecnológica de estos elementos radica en que constituyen la fuente de radioactividad más importante a detectar cuando fallan los elementos combustibles y además porque el Iodo (y probablemente el Cs y Cd) son agentes sensibilizantes del fenómeno de corrosión bajo tensiones en el Zircaloy).

Una aproximación muy simple (pero razonable) es suponer que la fracción de PFV (Productos de fisión volátiles) es igual a la de gases de fisión (Xe, Kr).

El comportamiento de los productos de fisión volátiles puede resumirse como sigue:

- Las barras combustibles que operan a bajas potencias ($q < 250$ w/cm) no muestran liberación de PFV al gap.
- La migración axial y radial se produce a altas potencias y no se ha observado presencia de PFV en el plenum de gases de fisión.
- La liberación de PFV ocurre cuando la temperatura en el combustible excede la de crecimiento de grano.

- Los elementos observados en el gap han sido: Cs, I, Te, Cd, Ba, Pd, Ag, Sn.

El mecanismo que opera sería el siguiente:

- A bajas temperaturas los PFV no se redistribuyen.
- A potencia constante y altas temperaturas o para lentos cambios de temperatura los PFV migran a la periferia del UO_2 y quedan allí.
- Para bajos quemados y luego de cambios de temperatura los PFV migran a la periferia del UO_2 y quedan allí. Esto ocurre aún con cambios bruscos de temperatura.
- Para cambios bruscos de temperatura y quemados altos los PFV son liberados y se depositan en la cara interna de la vaina.
- La fracción liberada es similar a la de gases de fisión.

La figura 5.9. resumen lo expuesto anteriormente.

5.3. Cambio de propiedades mecánicas de la vaina.

Las aleaciones de Zirconio son afectadas de dos maneras:

- Daño por irradiación.
- Formación de hidruros por absorción de Hidrógeno.

El primero de ellos, que se verifica entre 300 y 350°C conduce a:

- Elevación del límite de proporcionalidad (resistencia mecánica).
- Disminución de la deformación a rotura (ductilidad).

El segundo de ellos también conduce a fragilización. El hidrógeno (o deuterio) proviene de la reacción H_2O/Zr ó D_2O/Zr , o de la radiólisis de agua. El efecto sobre las propiedades mecánicas de la precipitación de hidruros depende de su orientación y la textura del material.

Las figuras 5.10, 5.11 y 5.12 muestran el efecto de la irradiación sobre las propiedades mencionadas, el creep y la elongación de vainas debida a crecimiento bajo irradiación.

Estos fenómenos mencionados aquí en forma somera son tratados con profundidad en otra materia.

5.4. Interacción Combustible Vaina (PCI)

Cuando el HO_2 se expande térmicamente la interacción con la vaina se manifiesta por el incremento de la longitud y el diámetro de la vaina y la formación de resaltos circunferenciales en las interfaces pastillas-pastillas (ver Fig. 5.13)

Deformación Axial

Dado que inicialmente no hay contacto pastilla-vaina y que la columna de pastillas está libre de expandirse axialmente la deformación axial de la vaina depende de la fricción pastilla-vaina cuanto entran en contacto. Para

el caso de barras combustibles con vainas autoportantes (Atucha) y aún para los colapsables (CANDU) este es el caso.

La Fig. 5.14 muestra una confirmación de este hecho.

Se ha representado la expansión de la vaina y la pastilla según lo calculado y lo que resulta de mediciones experimentales.

Se observa que a partir de aproximadamente 350 w/cm de potencia la curva experimental cambia de pendiente y sigue la de expansión de UO_2 .

Numerosas experiencias han demostrado que en barras combustibles con vainas autoportantes y "gaps" de aproximadamente 1 a 1,5% del diámetro el contacto comienza alrededor de los 350 w/cm.

El hecho que al reducir la potencia no se reproduzca el camino inicial significa que ha quedado una deformación plástica en la vaina.

La magnitud de la deformación axial dependerá de:

- potencia lineal
- gap diametral inicial
- longitud de pellet, forma y densidad
- resistencia de la vaina.

Deformación diametral

Existen dos casos: la deformación uniforme debida a la dilatación cilíndrica de la pastilla de UO_2 y la deformación localizada debida a los resaltes que se producen en los espacios entre pastillas.

La deformación diametral uniforme permanente de la vaina dependerá de:

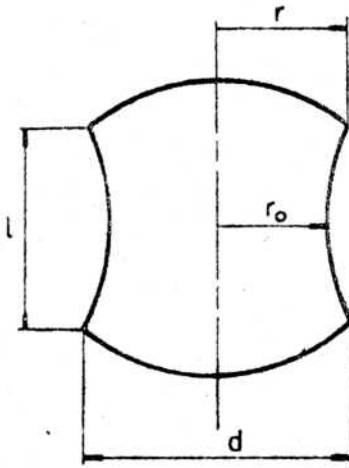
- potencia térmica
- gap
- parámetros de la pastilla
- resistencia de la vaina

La fig. 5.15 muestra la expansión de la vaina en función del gap para un rango de potencia de 500 a 650 w/cm.

Experiencias posteriores no muestran diferencias de la deformación uniforme para distintos gaps a quemado variable. Esto sugiere que las pastillas se acomodan dentro de la vaina llenando el gap lo cual no conduce necesariamente a deformación adicional ya que el espacio libre interno absorbe parte de la deformación diametral.

Un aumento de la resistencia de la vaina influirá disminuyendo la deformación final por el mayor rango elástico y porque conducirá a un mayor creep del UO_2 ,

La deformación localizada entre pastillas se deben a la forma de reloj de arena que toma la pastilla (cilindro elástico finito en un gradiente de temperatura radial)



$$\frac{r}{r_o} = f\left(q', \frac{l}{d}\right)$$

La altura de los resaltos aumenta con potencia y la longitud de la pastilla

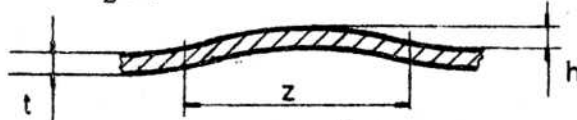
$$h = r - r_o$$

La altura h observada en experiencias y combustibles en servicio es en promedio de 0,05 mm, y se han observado de hasta 0,2 mm.

La fig. 5.16 muestra una relación entre altura diametral de estos resaltos ($2h$) y la potencia térmica.

La fig. 5.17 muestra un modelo de pastilla tal cual se supone se encontraría a una potencia elevada si estuviera libre de dilatar.

El perfil del pliegue que se forma en la vaina se puede representar por la expresión $E_z = 2,77 \frac{h t}{z^2}$. las variables están definidas en la figura siguiente



Para este caso y si definimos $E_\theta = \frac{h}{r}$ y los siguientes valores:

$$q = 600 \text{ w/cm}$$

$$h = 0.03 \text{ mm}$$

$$d_{BC} = 12 \text{ mm}$$

$$t = 0.7 \text{ mm}$$

E_θ resulta aprox. 0,5 %.

Se puede llegar a demostrar que en este caso las E_z son iguales a E_θ por cuanto la relación de biaxialidad es cercana a 1 y no 2:1 como el caso de un tubo con presión interior y exterior.

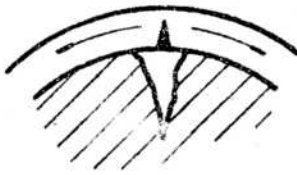
Tensiones localizadas

Tanto las fisuras radiales como el espacio entre pastillas conduce a tensiones localizadas cuando se aumenta la potencia una vez que hay contacto (sobre todo después de cierto tiempo) entre pastilla-vaina.

Estas tensiones pueden provocar deformación local de la vaina (straining) o lo que ha sido más observado en la aparición de fallas por un mecanismo de corrosión bajo tensiones (Fig. 5.18).

Este fenómeno ocurre por la presencia de Iodo (y Cs a veces) que es un agente sensibilizante de la característica del Zircaloy de ser susceptible a este tipo de fallas.

El Iodo reduce la tensión necesaria para la propagación de una fisura, lo cual ocurre en las zonas con fisuras en las pastillas



propagación fisura en presencia de Iodo y una tensión mínima.

La apertura de las fisuras en el UO_2 al elevarse la potencia y la existencia de Iodo suficiente (después de cierto quemado) provoca la propagación de la fisura en las vainas.

Con respecto a la pastilla la parte del núcleo central plástico es cambiante y ejercerá una fuerza de expansión sobre el anillo externo elástico que abrirá o cerrará las fisuras.

Existen varias correlaciones para determinar la deformación en la vaina, una de ellas es la de Gittus (5)

$$\frac{E_{\max}}{\bar{E}} = \frac{2 \mu \pi}{N n}$$

donde n coeficiente de endurecimiento por deformación

N número de fisuras

μ coeficiente de rozamiento

En la inestabilidad $E_{\max} = n$ y la máxima deformación tolerada axial será:

$$\bar{E}_i = \frac{N n^2}{2 \mu \pi}$$

para $n = 0,03$; $N = 10$; $\mu = 0,5$ el valor de $E_i = 0,3 \%$.

Todas las deformaciones localizadas deben sumarse a las uniformes para verificar el criterio de deformación máxima que se recuerda es de 1 a 1,5 %.

Conductividad del espacio pastilla-vaina

Un efecto que puede considerarse como parte de la interacción pastilla-vaina es la transferencia térmica a través de la interface.

De acuerdo a lo explicado antes existen diversos estados en que se encuentran las pastillas dentro de la vaina.

Dichos estados van desde "gap" mayores que 80μ y con la pastilla centrada en la vaina pasando por estados intermedios de gaps entre 0 y 80μ y pastillas excéntricas hasta gaps nulos con presión de contacto elevada (Fig.5.19)

Debido a que la transferencia térmica a través de un espacio de gas y el contacto sólido-sólido es muy diferente, se han estudiado extensivamente teórica y experimentalmente este fenómeno hasta llegarse a ecuaciones que contienen parámetros semi-empíricos que contemplan los casos intermedios mencionados antes.

Un análisis de los modelos que se emplean en los cálculos escapa al alcance de este curso. Sin embargo se menciona aquí por la importancia que tiene en los cálculos y estimaciones de la distribución de temperatura e interacción combustible-vaina.

5.5. Interacción entre Barras Combustibles y componentes del ensamble

a) Tipos de interacciones:

- Vibración inducida por el flujo de refrigerante que conduce a movimiento relativo barra combustible-separador.
- Movimiento relativo diferencial entre distintas barras combustibles y separador como consecuencia de frecuentes cambios de potencia.
- Crecimiento axial diferencial de las barras combustibles.
- Arqueo de barras y elementos combustibles debido a gradientes de flujo neutrónico.
- Arqueado de barras combustibles debido a interacción con el separador.
- Interacción termohidráulica entre barras combustibles y separador con el resultado de puntos calientes.
- Acumulación de productos de corrosión en los separadores.
- Interacción química y metalúrgica entre las barras combustibles y los separadores en operación normal o en caso de transientes.

De todos los fenómenos mencionados el primero y sus consecuencias es el de mayor importancia y por lo tanto el que se describe a continuación

b) Vibración inducida por el flujo de refrigerante

Todas las barras combustibles vibran por efecto de la circulación del refrigerante en los reactores refrigerados a agua.

El modo de vibración de interés es el lateral, o sea el que se produce en una varilla o membrana sostenida en sus extremos.

La fuerza de excitación se atribuye a fuerzas variables aleatoriamente (random) con el tiempo resultantes de la turbulencia en el fluido.

Las fuerzas de amortiguación de la vibración inducida son las inerciales y de recuperación elásticas.

En régimen de una sola fase (agua a presión) las fuerzas de excitación se deben a remolinos locales a ambos lados o que rodean la barra combustible.

El caso de dos fases (agua en ebullición) la causa es más compleja y aún no muy bien explicada.

En relación con la performance de los elementos combustibles el parámetro de interés es la amplitud de la vibración.

Esta depende de muchos factores pero los de mayor interés son:

- rigidez de la barra combustible, el número y tipo de soportes (separadores)

- la velocidad del fluido.

La amplitud crece con la velocidad del fluido según $v^{(1,5 \text{ a } 2)}$ para el primer modo de vibración. Para dos fases en más compleja la relación y se encuentran picos para títulos de vapor de 10 a 20 %.

En la mayoría de los elementos combustibles la amplitud máxima (pico a pico) es pequeña, usualmente menor que 0,025 mm. La frecuencia propia está en el rango de 50 a 150 Hz. para las barras combustibles.

En la fig. 5.20 se muestra un registro de un osciloscopio donde se observa que la amplitud varía al azar tanto respecto al plano como con el tiempo.

Tanto la promoción del mezclado de refrigerante como perturbaciones a la entrada de los canales de refrigeración son fuentes de excitación del fenómeno y deben estudiarse para el diseño o modificaciones en tolerancias del combustible.

El elemento combustible también es susceptible de vibrar y sus efectos son de importancia en tanto que pueden afectar a partes permanentes del reactor como son los canales de refrigeración. La frecuencia de vibración está en el rango de 2,5 a 20 Hz. y es de importancia determinar el caudal máximo por encima del cual el elemento combustible comienza a separarse o tener movimiento relativo respecto al canal.

c) Corrosión por fricción

Uno de los efectos más importantes de la vibración de barras y elementos combustibles es la corrosión por fricción de las partes de Zircaloy en contacto.

El fenómeno comprende alguno o todos los factores siguientes:

- corrosión acelerada por remoción continua de la capa de óxido.
- soldadura y rotura de asperezas de las partes en contacto
- fatiga de las asperezas
- corrosión acelerada por efecto de la elevación local de temperatura debida a la fricción.

Es posible diseñar el contacto para tener un desgaste controlado que llega a un valor asintótico con el tiempo. Sin embargo es deseable lograr un diseño que no lleve a desgaste.

En el caso de usar apoyos elásticos entre barras combustibles y separadores el desgaste es ínfimo o casi nulo. Para ello es imprescindible conocer las fuerzas que actúan sobre el muelle, la relajación del material del muelle.

En este caso y debido a que el Zircaloy no tiene buenas propiedades elásticas bajo irradiación y a la temperatura de trabajo se usan aleaciones de Niquel tales como Inconel 718, Nimonic PE16 que tienen un tratamiento térmico denominado "solution treatment" y un envejecimiento posterior.

d) Fatiga

La flexión alternada a la que está sometida la Barra combustible debida a

La vibración puede dar lugar a fallas por fatiga de la vaina.

El límite de fatiga dado por O'Donnell y Langer para zircaloy es de ± 180 N/mm² y poco influye el trabajado en frío y la irradiación.

No hay datos de tensiones alternadas en servicio pero los que resultan de ensayos de loop indican que están entre 20 a 30 N/mm² lo cual da un margen importante respecto del límite anterior.

Sin embargo este margen es necesario por cuanto los estudios de O'Donnell van hasta 10^7 ciclos desde donde no hay un límite claro mientras que las barras combustibles llegan hasta 10^{10} ciclos. En la barra combustible hay interacción pastilla vaina con deformaciones (y tensiones) localizadas que reducen el número de ciclos a falla en un orden de magnitud.

Otros defectos en las vainas tales como, ovalidad, excentricidad o defecto de fabricación pueden reducir localmente el número de ciclos a falla requeridos.

Por ello este efecto se suma al descrito anteriormente para tratar de limitar la amplitud de vibración de las barras combustibles en servicio.

Bibliografía

- (1) Kumeser et al. Fuel Rod Behaviour KFK. Karlsruhe, 1972.
- (2) G. Aas Mechanical Interaction between fuel and Cladding. Nuclear Engineering and Design 21 (1972) pag. 237.
- (3) M.J.F. Nottey et al. The longitudinal and diametral Expansions of. UO₂. AECL 2143, 1969.
- (4) A. Marajosky, R. Olezza, J.A. Casario, A. Degrande Publicaciones internas del departamento de Combustibles Nucleares, CNEA.
- (5) J.H. Gittus Theoretical Analysis of some forces, Stresses and Strain produced in Cladding by Chacked pellets. TRG Report 1547(S) 1967.

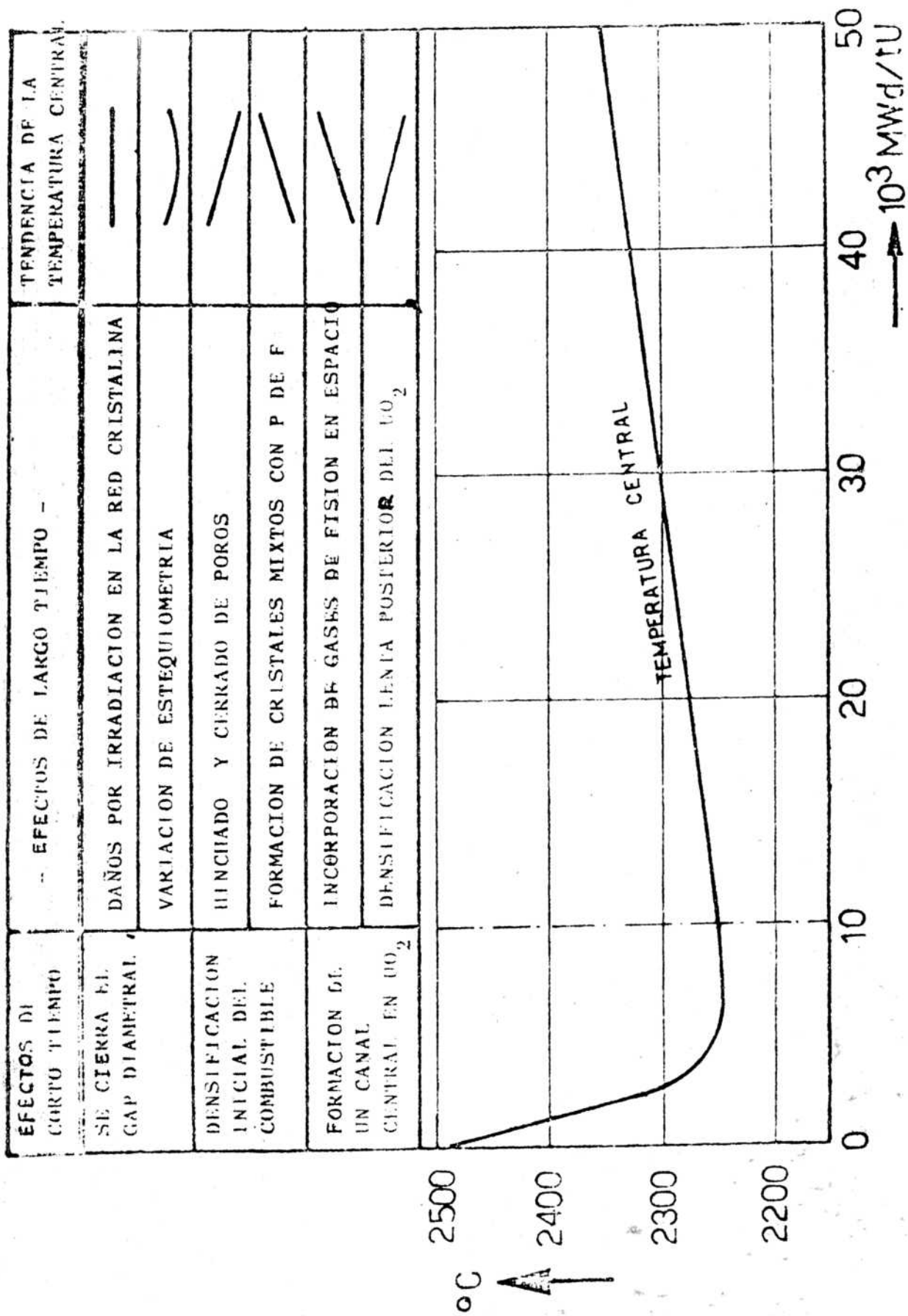


FIG. 5.1

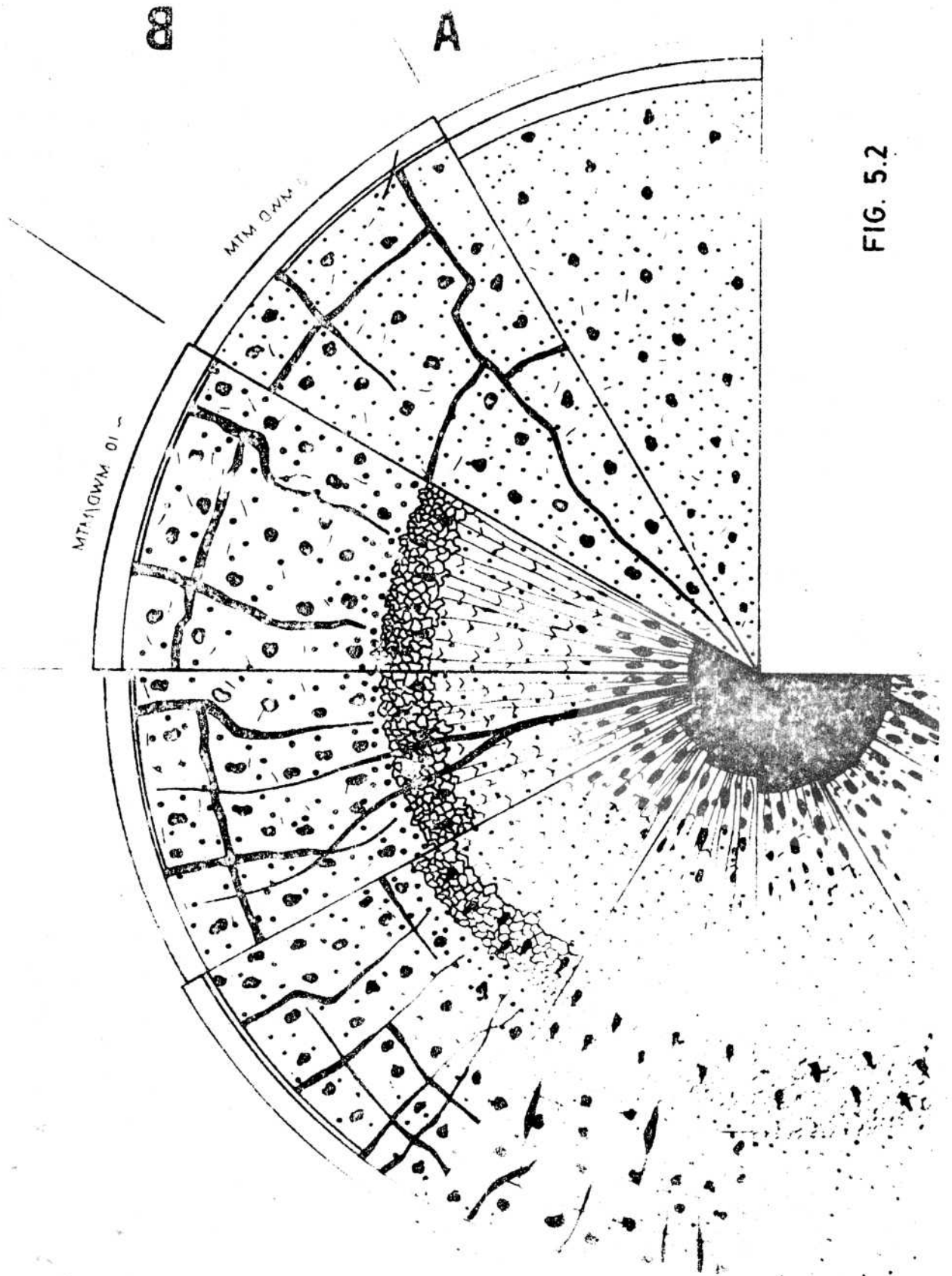


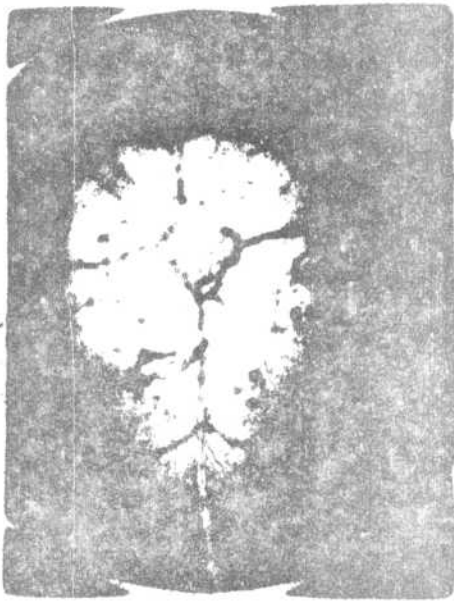
FIG. 5.2



INTRA. TEMPERATURE = 1500 C

10 10 W

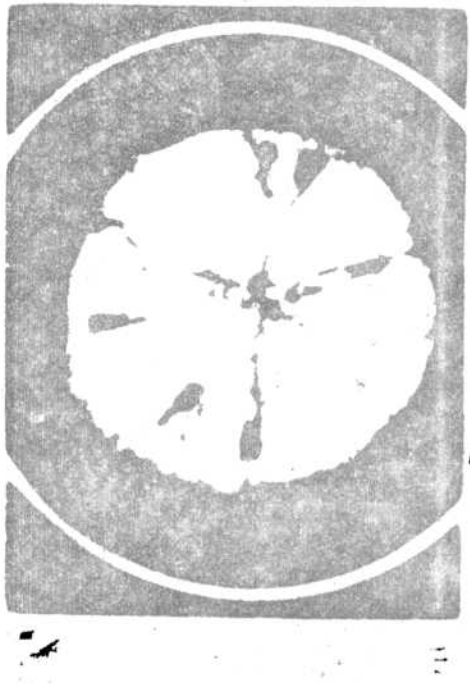
15A



INTRA. TEMPERATURE 1500 1500 C

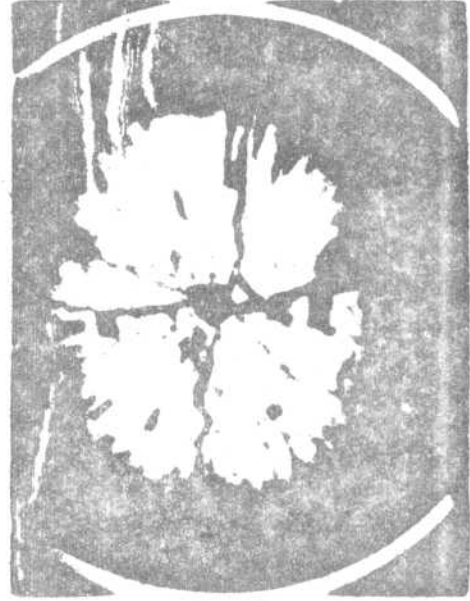
10 10 W

R52A1



INTRA. TEMPERATURE = 200 C

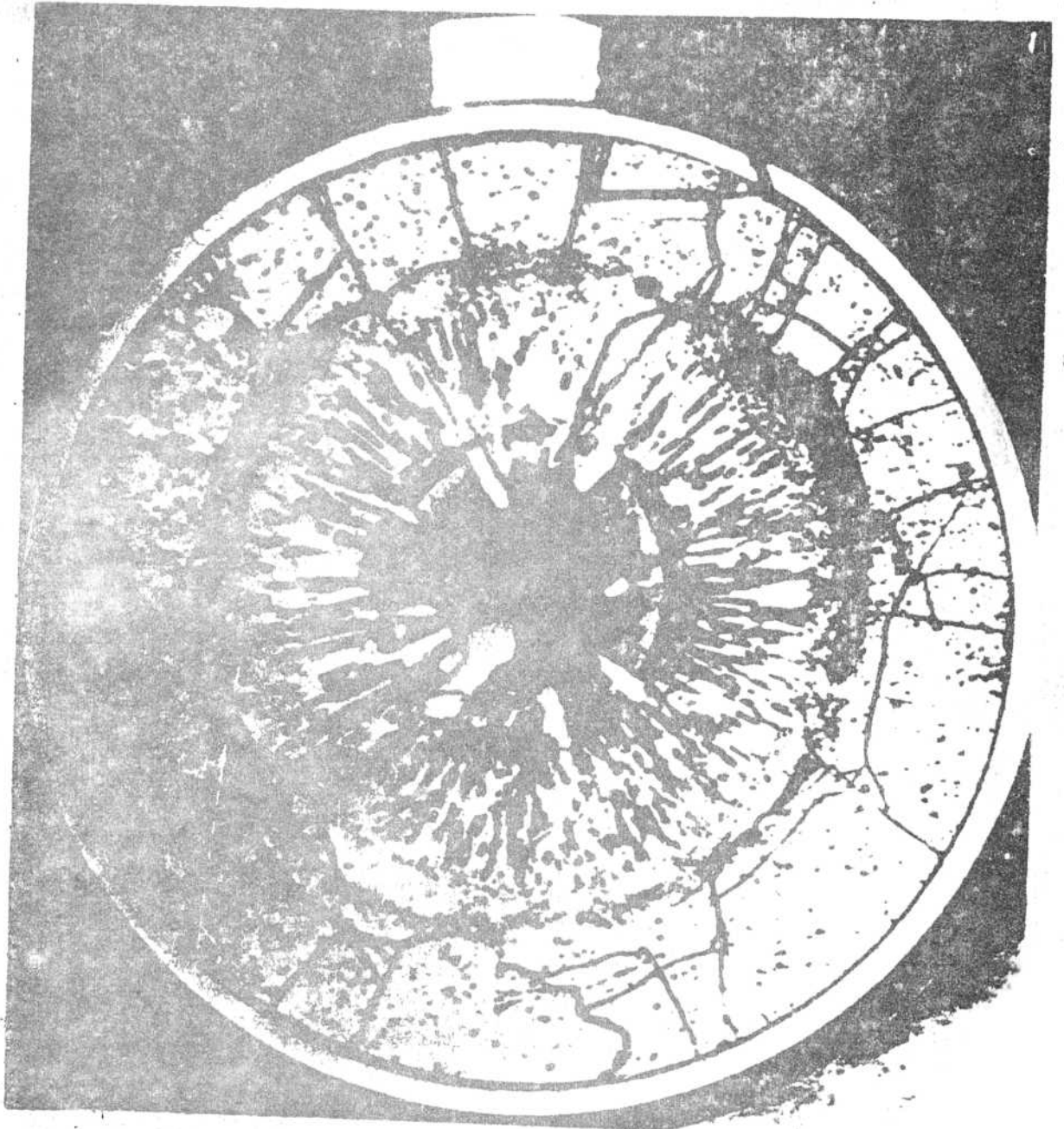
15A



INTRA. TEMPERATURE = 200 C

FIG. 5.3

R52A1



Cross Section of Element and Centre Melting in UO₂

FIG. 5.4

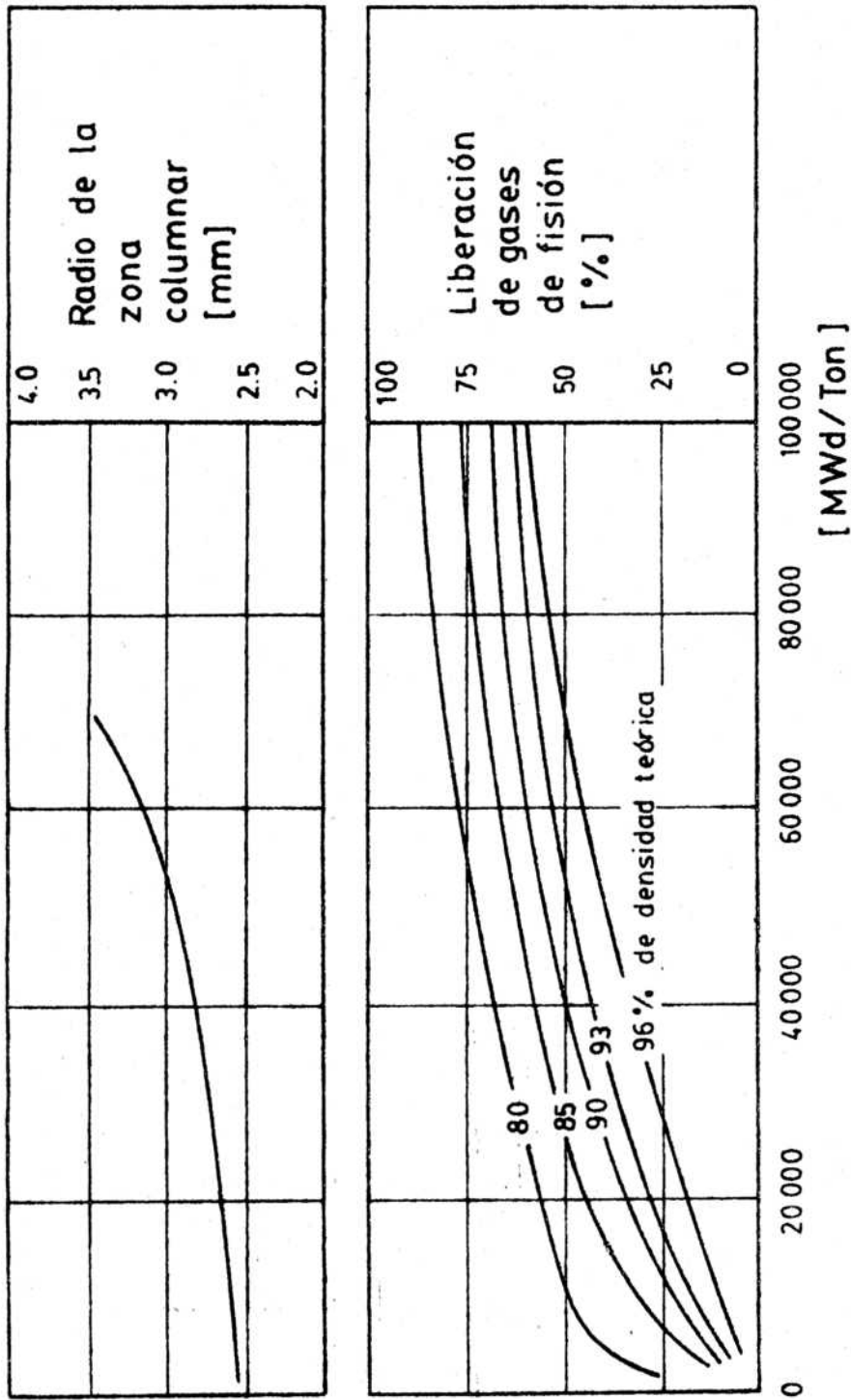
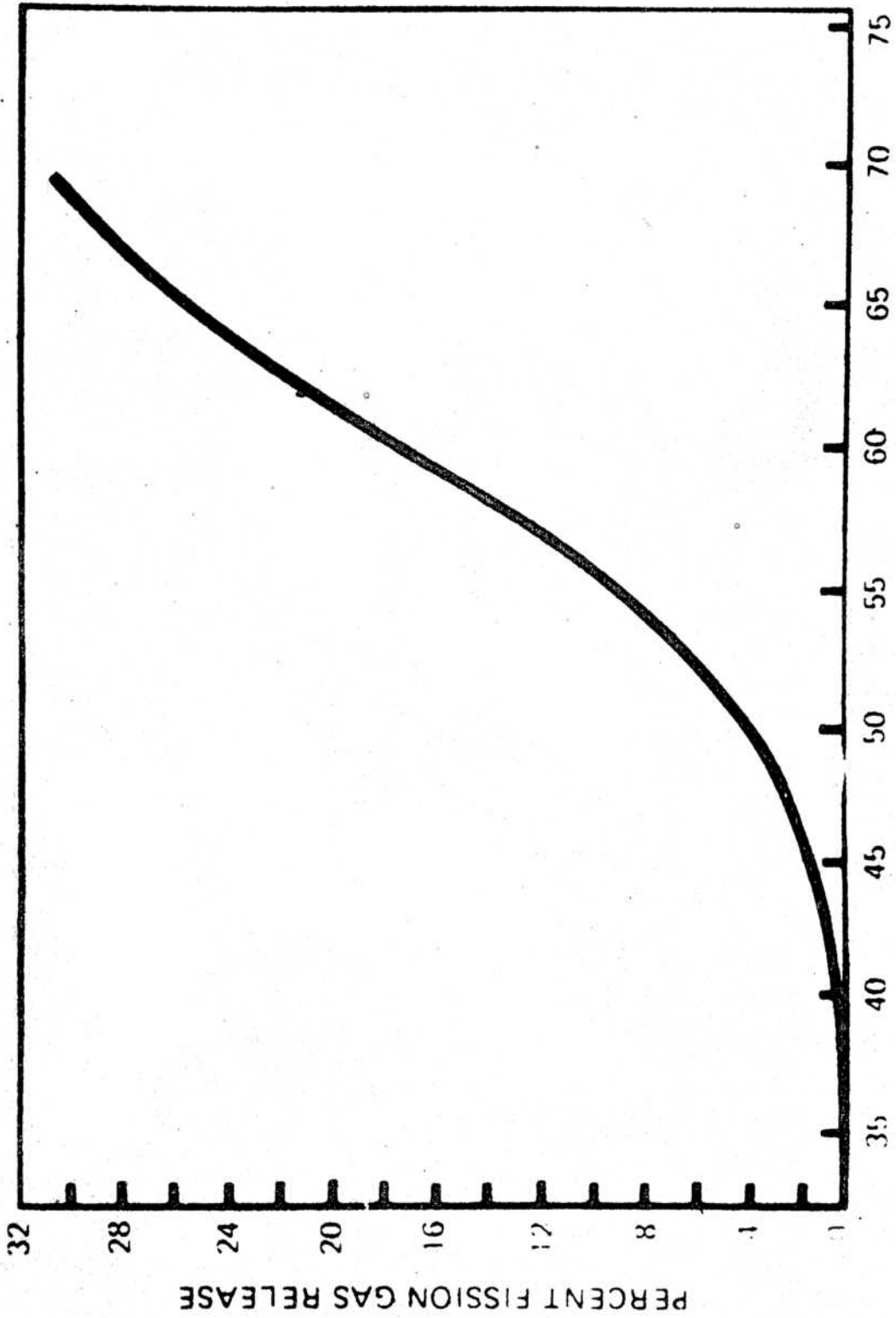


FIG. 5.5.

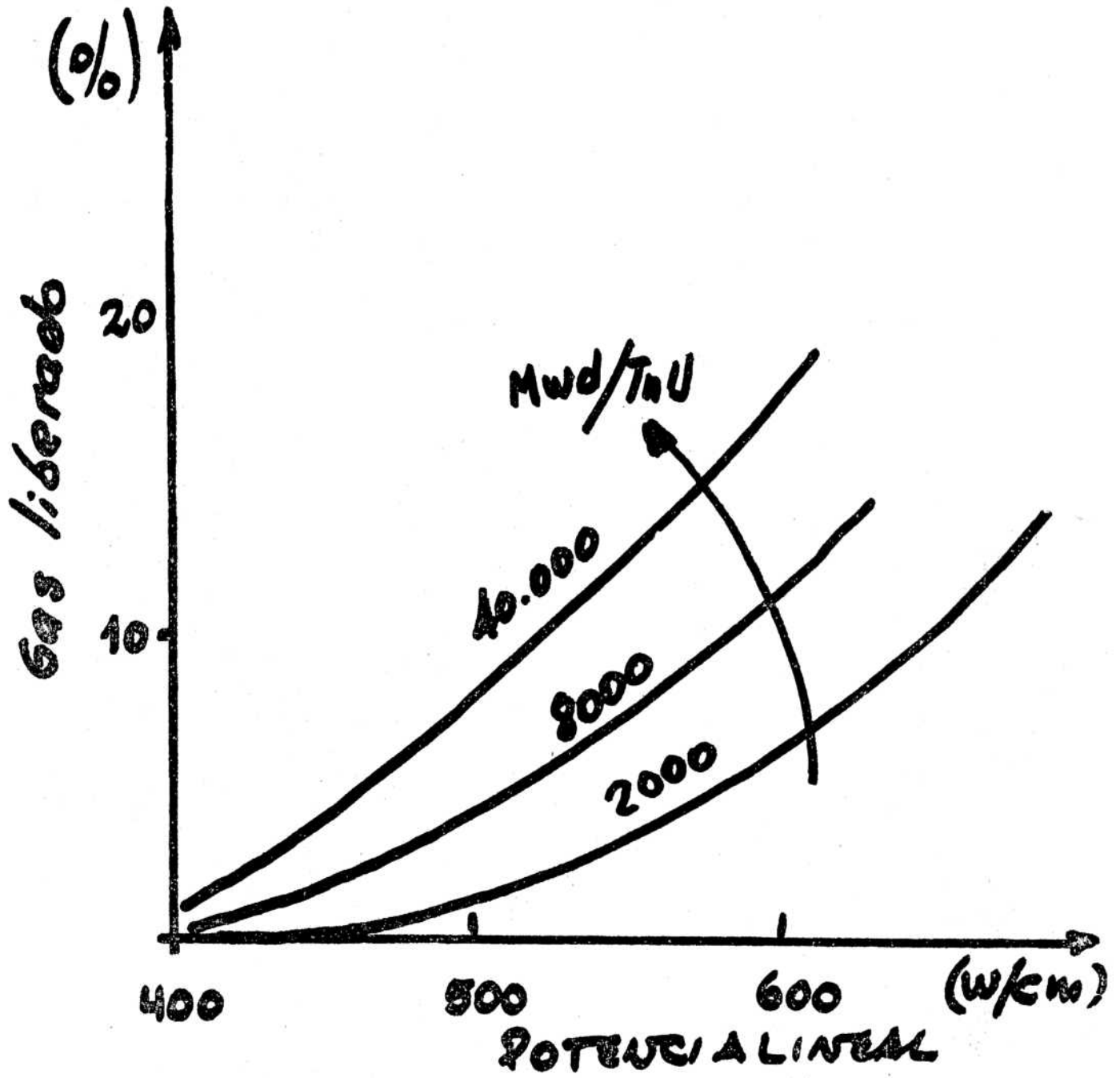


OUTER ELEMENT LINEAR RATING (kw/m)

Percent Fission Gas Release versus (LO) Power Rating

FIG. 5.6

FIG. 5.7



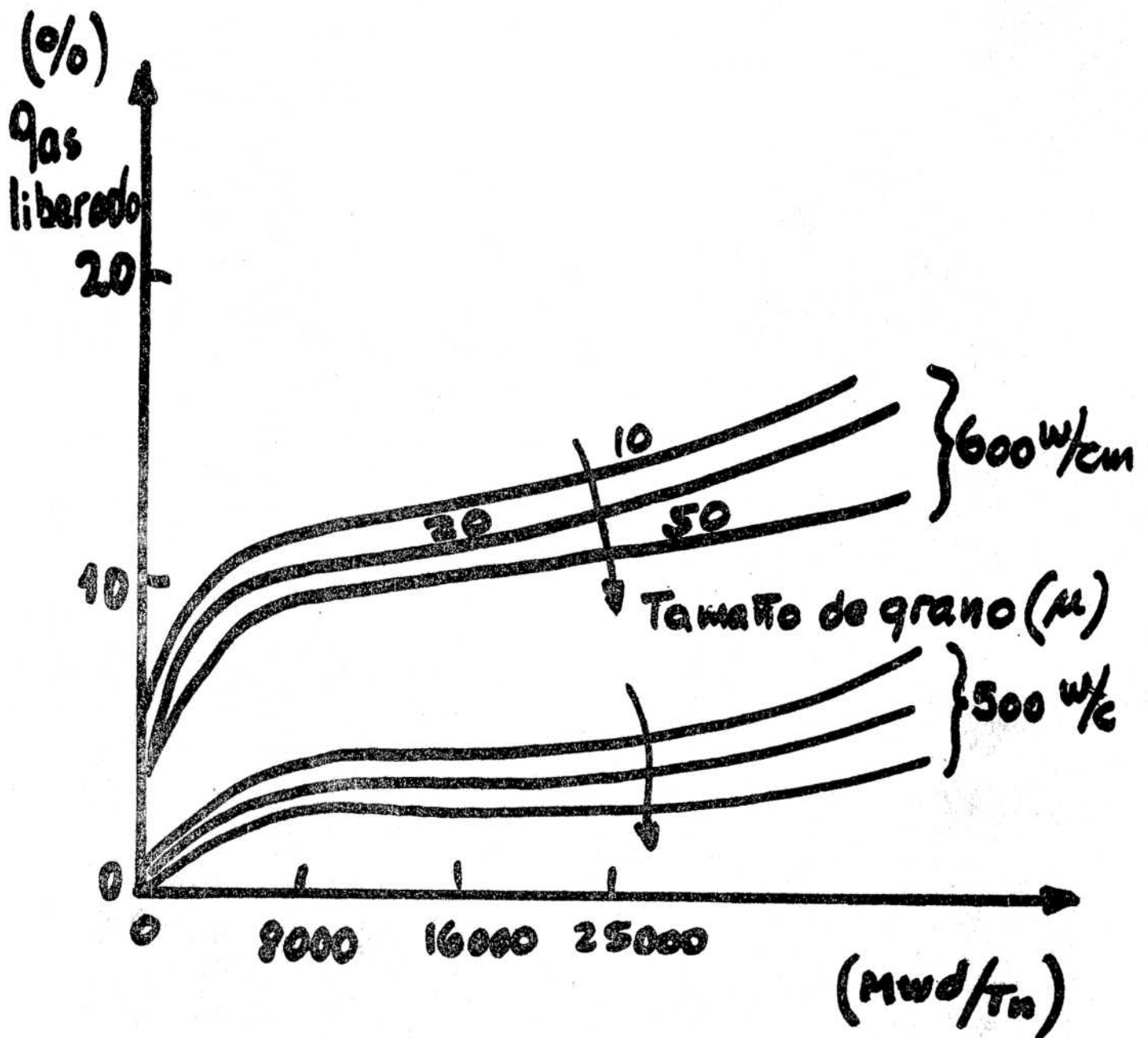


FIG. 5.8

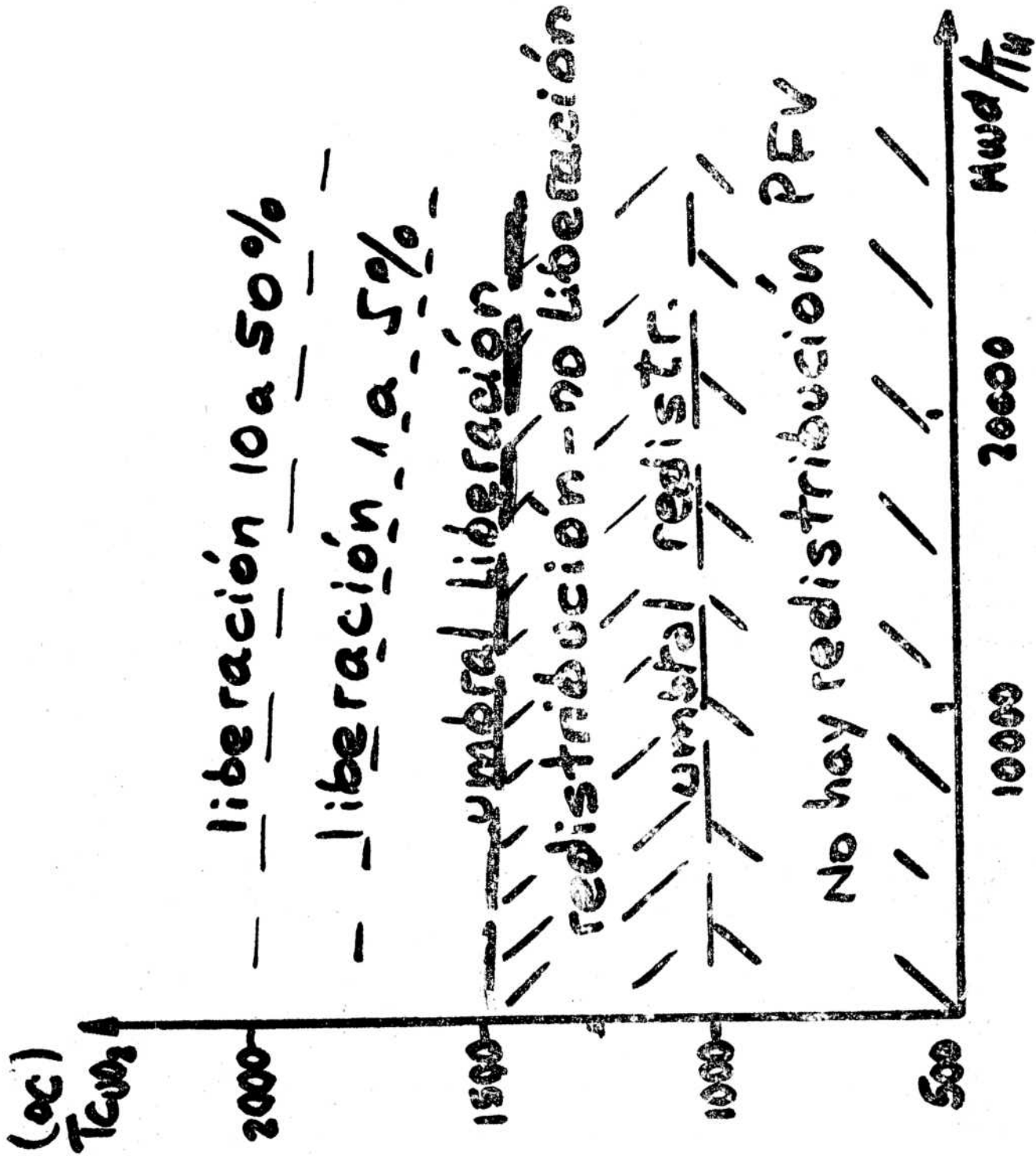


FIG. 5.9

Influence of Cold Work as represented by the Axial Ultimate Tensile Strength on Circumferential Elongation in the Closed End Burst Test

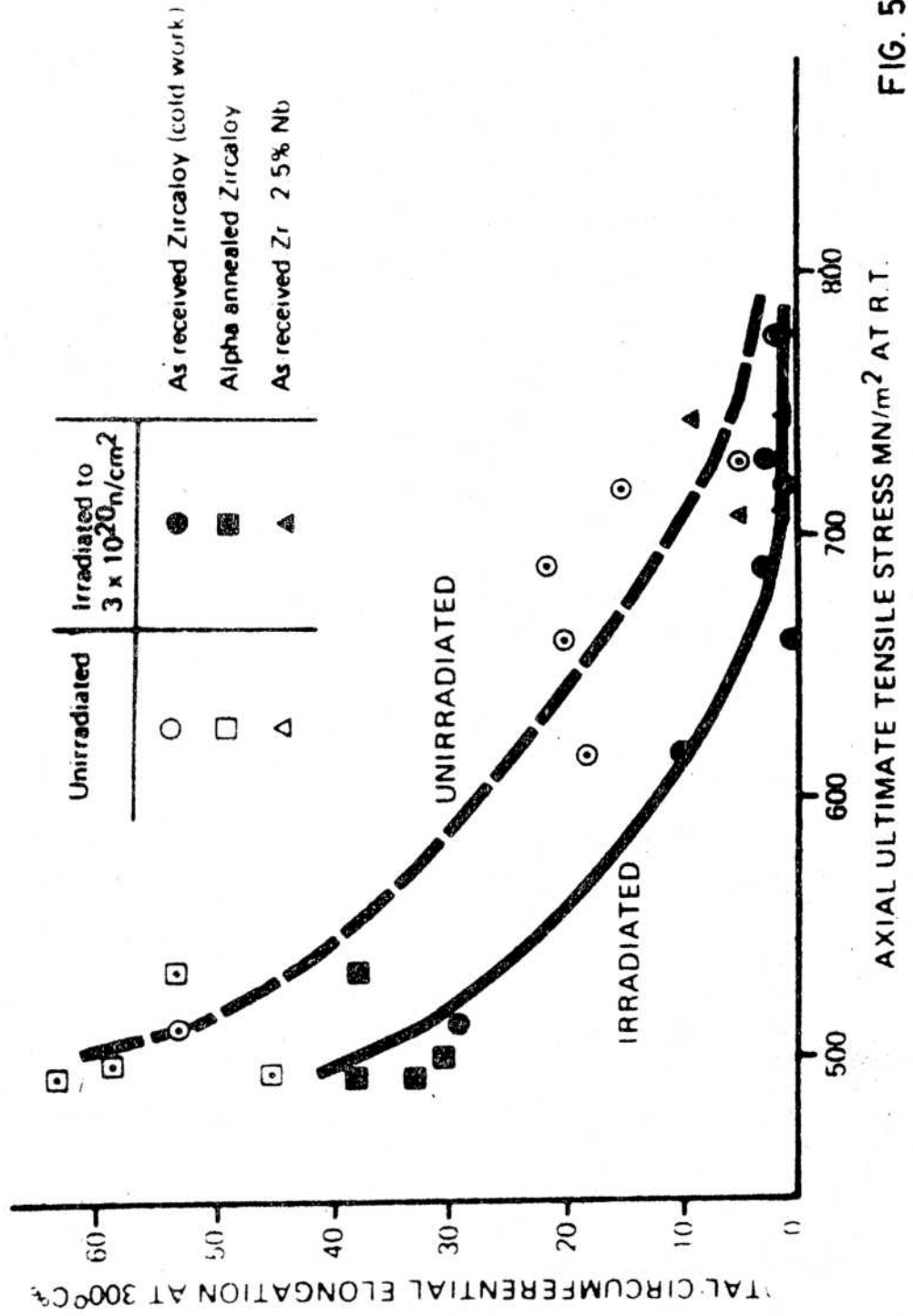
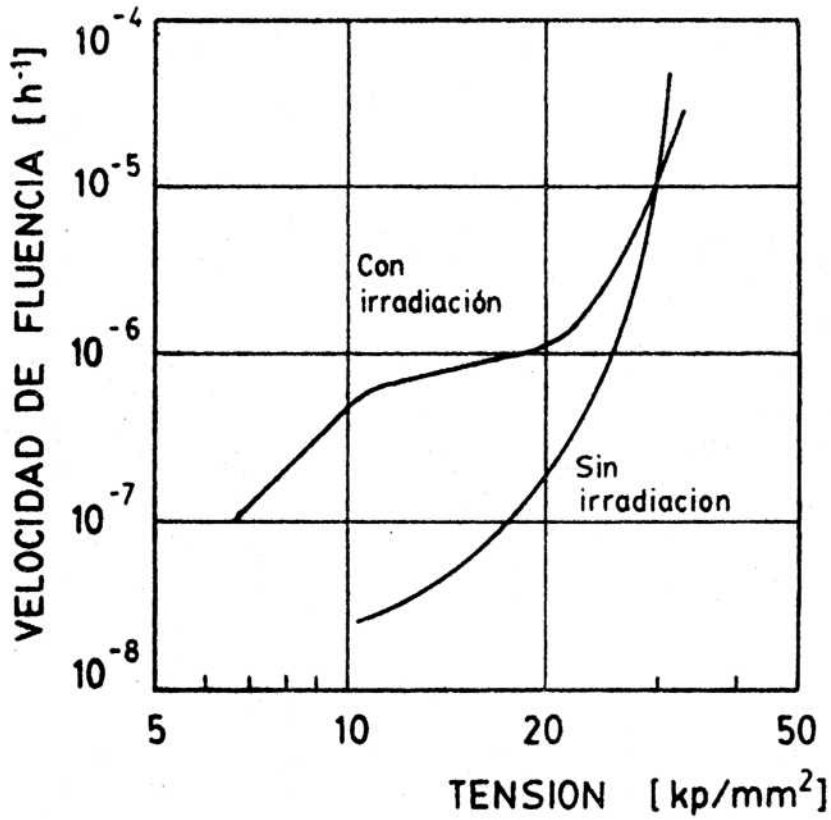


FIG. 5.10



Influencia de la irradiación neutrónica sobre la velocidad de fluencia (creep) de Zy a 300 °C.
 Zy: 16 % de deformación en frío, recocido 72 hrs. a 300 °C
 Neutrones; energía > 1 MeV; flujo 10¹³ n/cm² seg.

FIG. 5.11

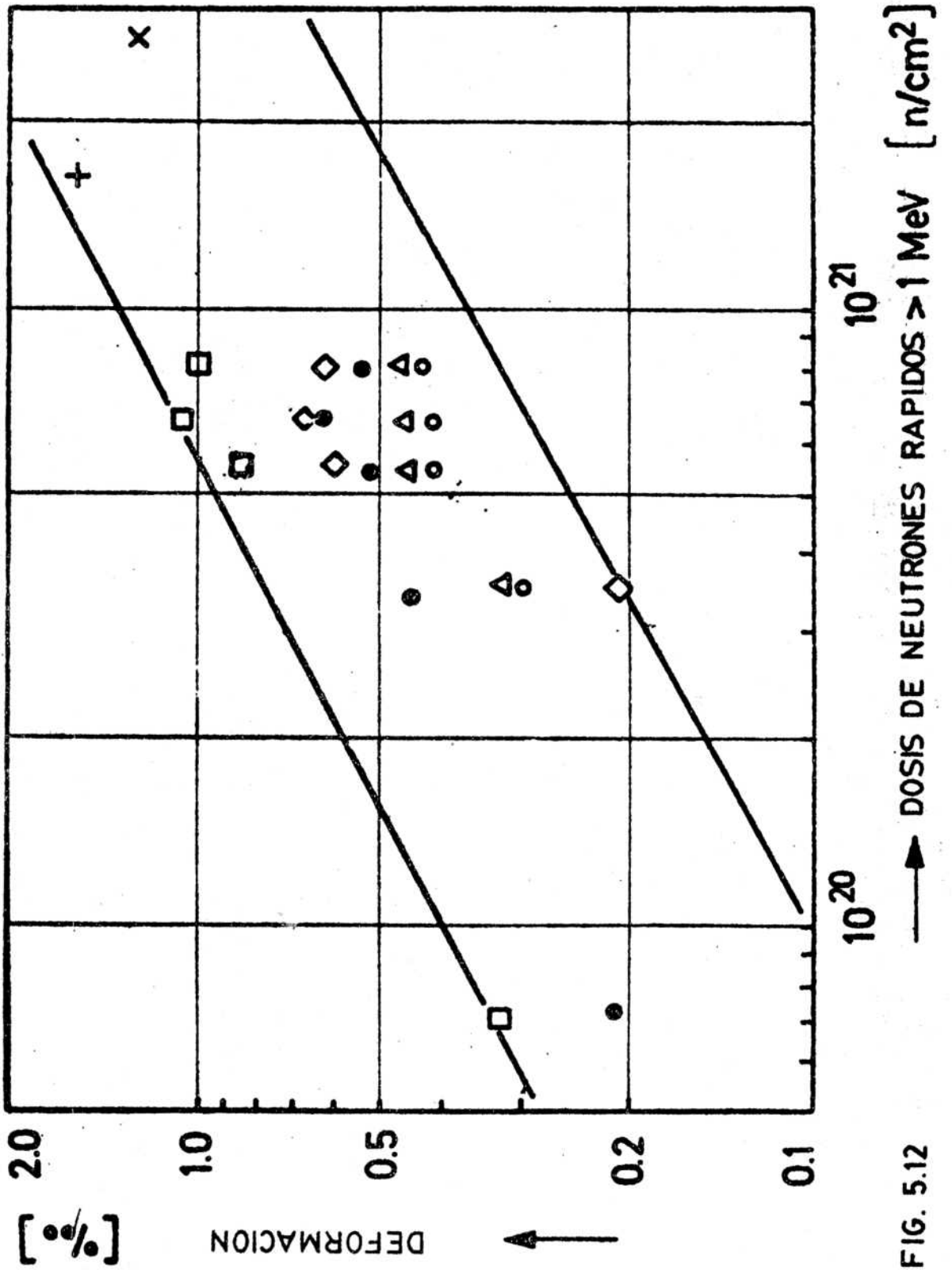


FIG. 5.12

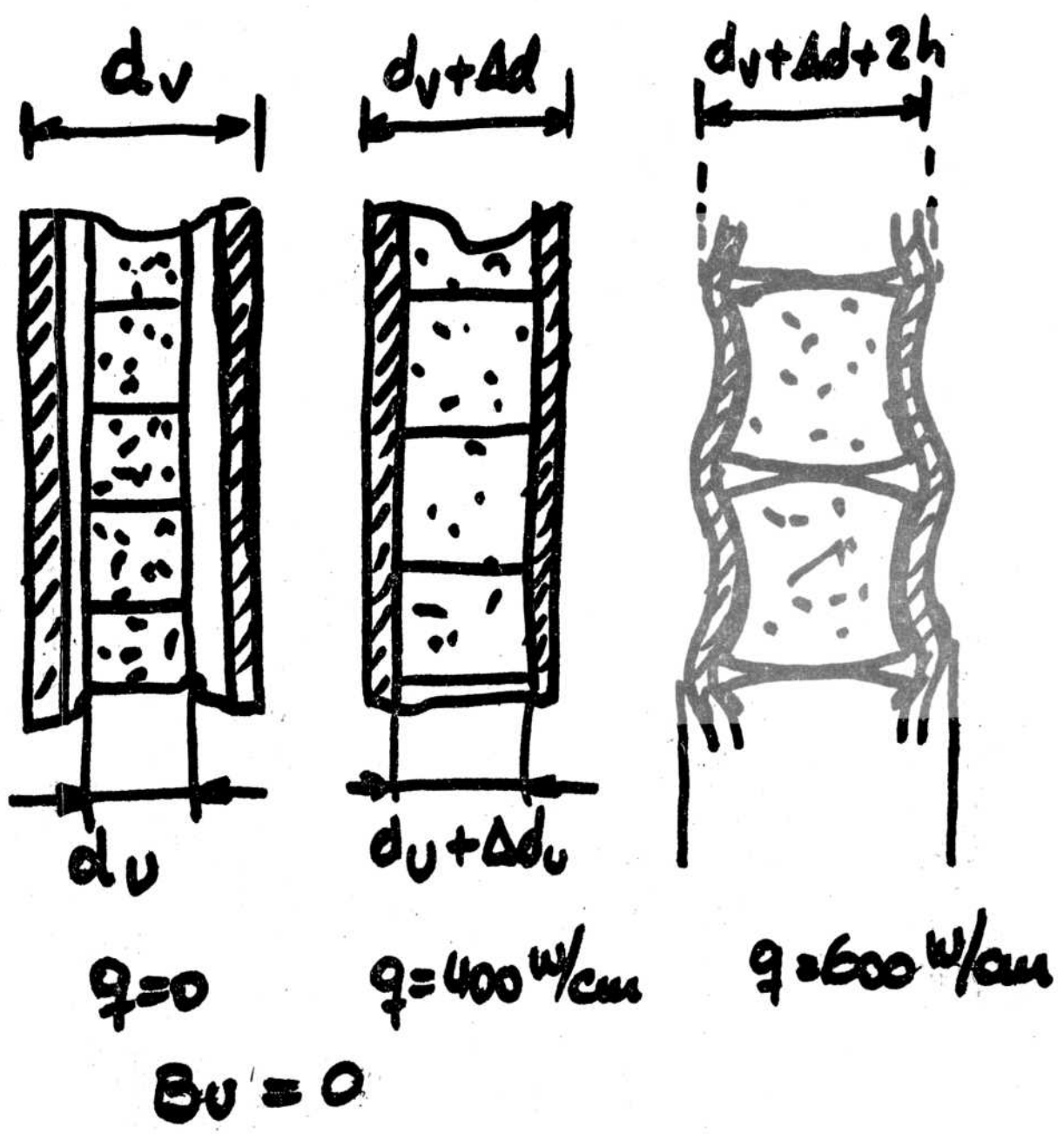


FIG. 5.13

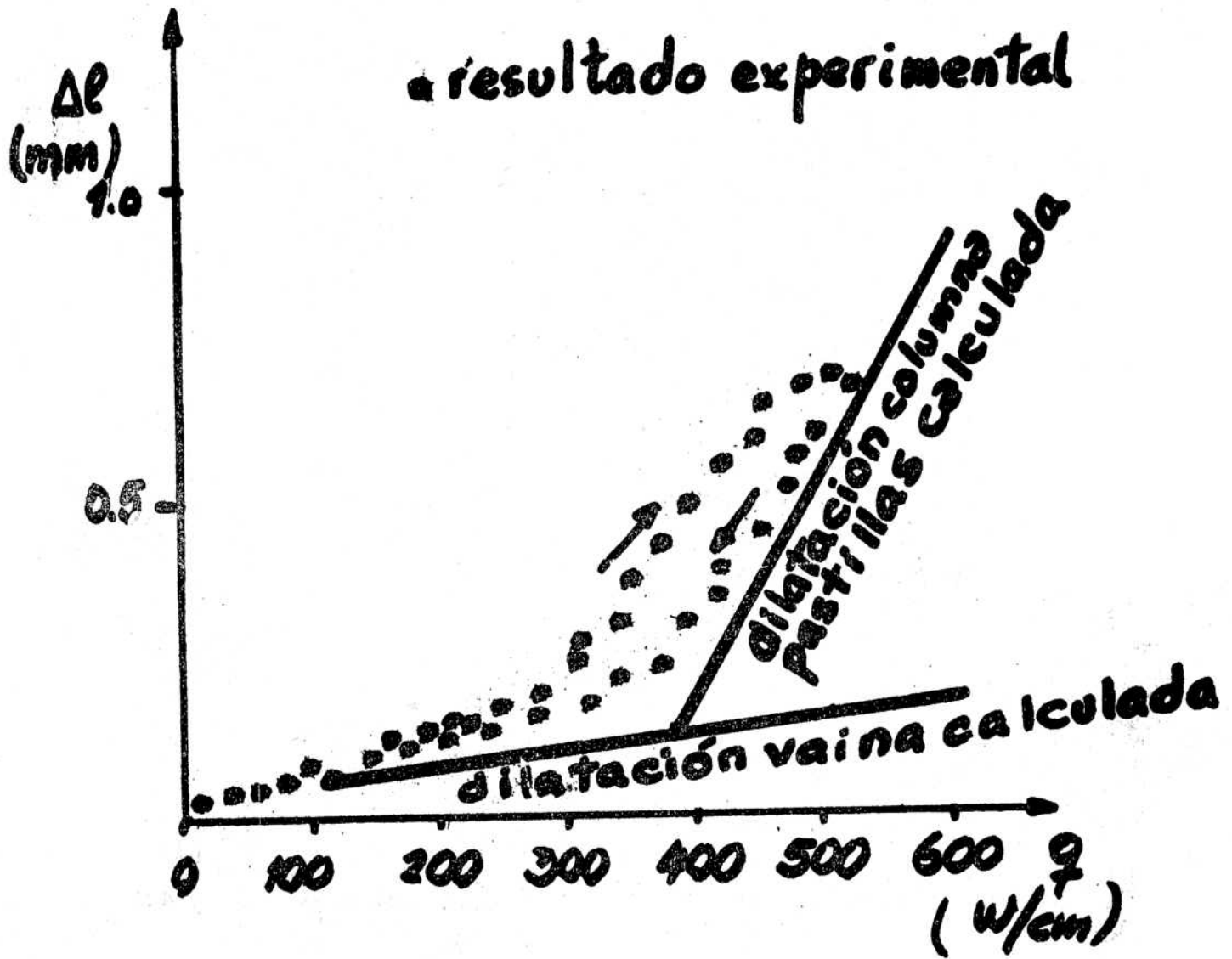


FIG. 5.14

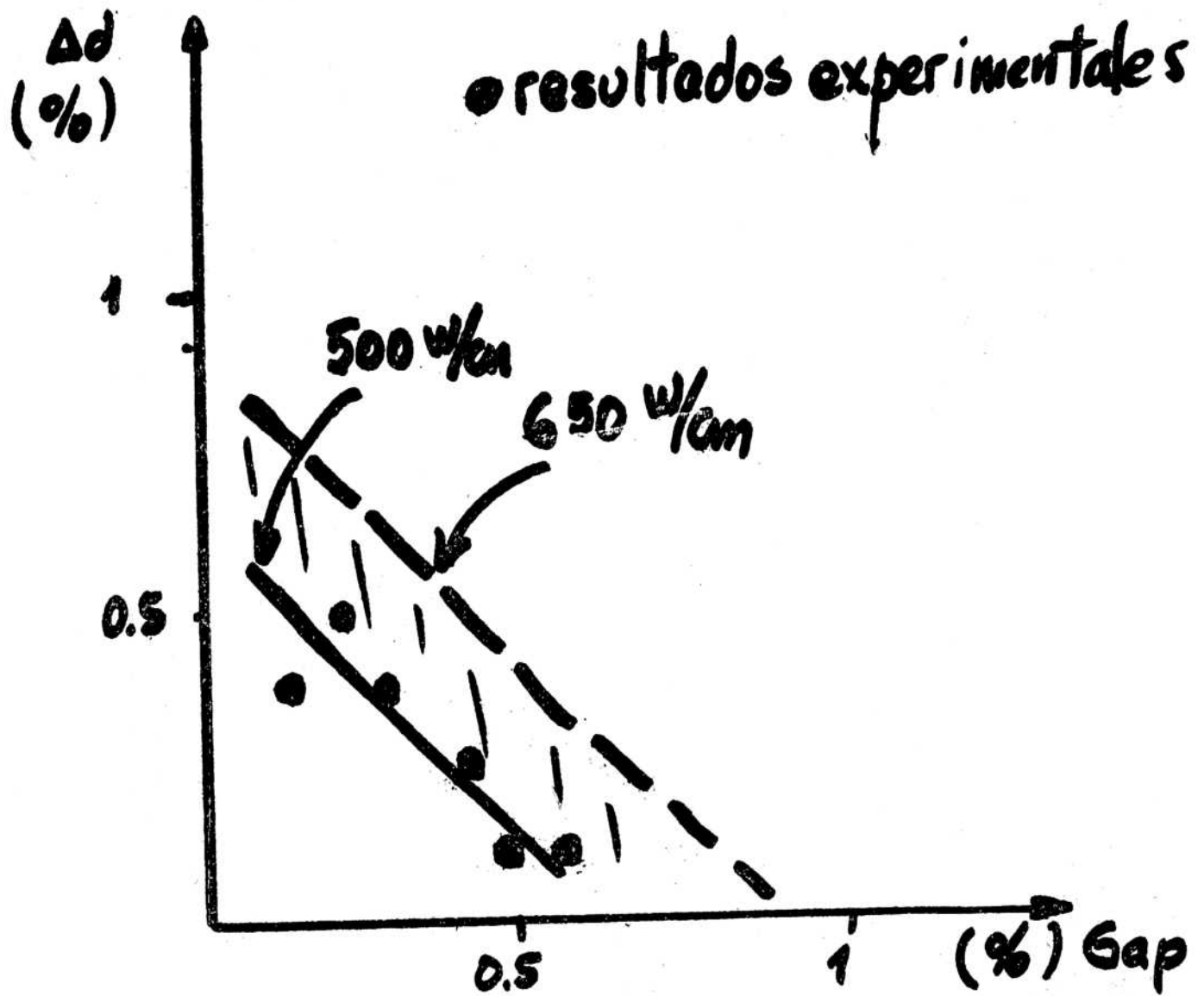


FIG. 5.15

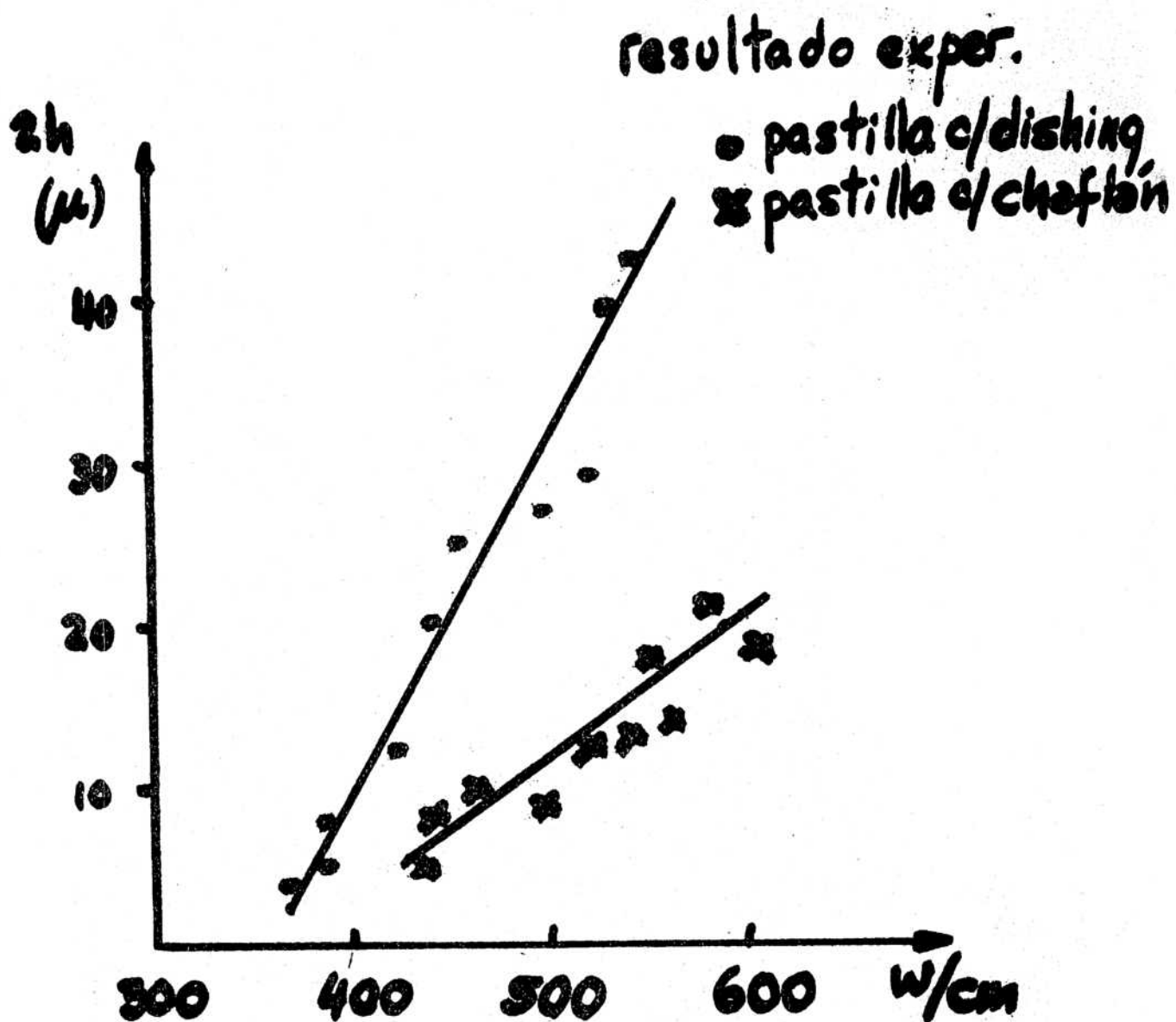


FIG. 5.16

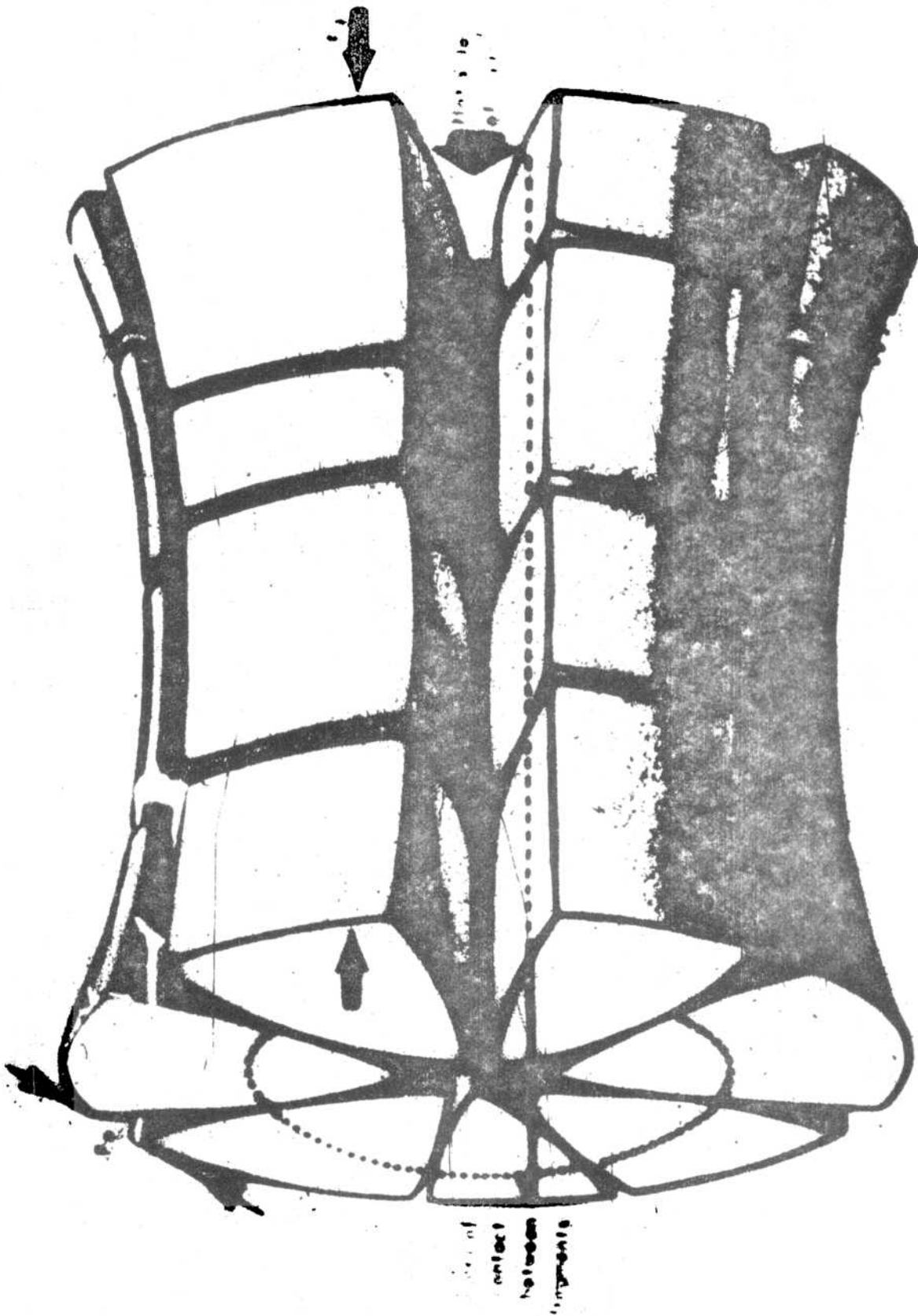
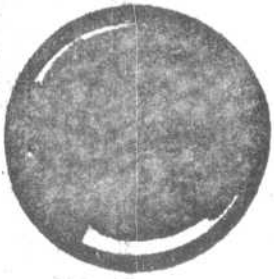


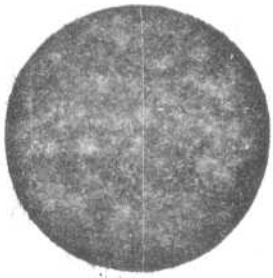
FIG. 5.17



FIG. 5.18



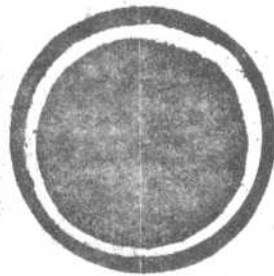
↑
 Pastilla
 • fisurada
 • $gap > 0$
 • $gap < 80\mu$
 contacto
 parcial



↑
 Pastilla
 • fisurada
 • $gap = 0$
 • $P_c = x$



↑
 Pastilla
 • Excentrica
 • $gap > 80\mu$



↑
 Pastilla
 • centrada
 • $gap > 80\mu$

FIG. 5.19

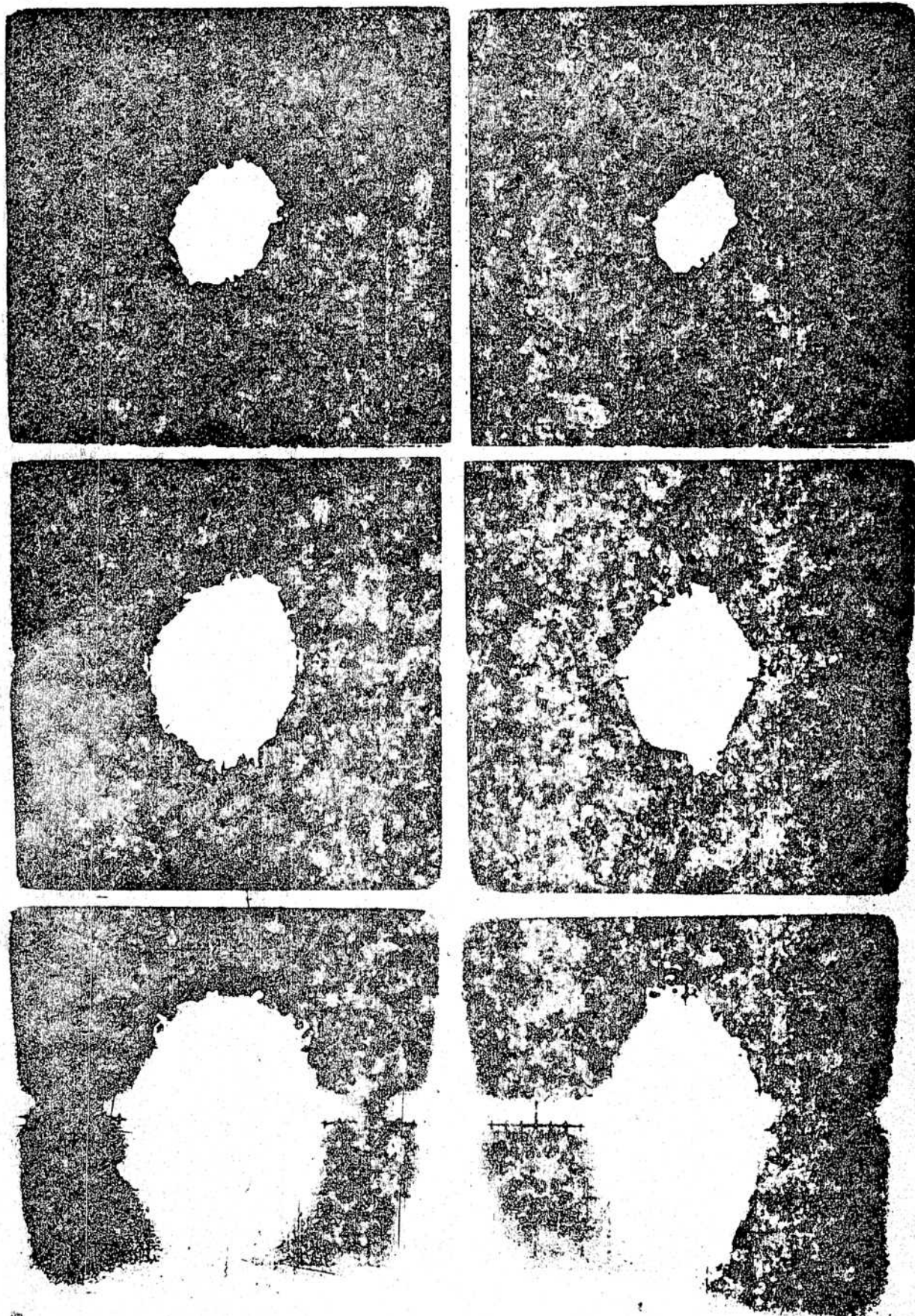


Fig.5.20 : Figuras obtenidas en un osciloscopio de la vibración transversal de barras combustibles por efecto del flujo de refrigerante.

6. PERFORMANCE DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

6.1. Fundamento

Existen dos razones por las cuales debe conocerse la performance real de los elementos combustibles:

- a) La verificación de la meta del diseño tanto por parte del diseñador de los E.C. como del operador de la central.
- b) El control continuo de la calidad del suministro y el costo de recarga tanto por el fabricante como por la central.

Desde el punto de vista del diseñador del combustible y la central el objetivo a alcanzar es:

- (a) Verificar los parámetros garantizados
- (b) Seguimiento de la aparición de elementos defectuosos.
- (c) Control de los parámetros nucleares termohidráulicos y de química del agua establecidos.

En relación con el costo y calidad de fabricación todas las organizaciones que suministran combustible tienen un programa de cooperación con las centrales para un seguimiento de la performance de los elementos combustibles.

Los principales objetivos en estos acuerdos son:

- (a) Proveer una correlación entre los datos de operación y los de laboratorio (pre irradiación)
- (b) Proveer datos estadísticos de buena calidad sobre la performance del combustible para permitir identificar mecanismos de fallas debidos a modos de operación no frecuentes o anormales.
- (c) Demostrar la confiabilidad y seguridad de diseños optimizados.

Se pueden identificar las siguientes fases que se requieren en la evaluación de performance:

- (a) Caracterización pre-irradiación de los elementos combustibles.
- (b) Seguimiento de la operación
- (c) Exámenes en pileta de la central.
- (d) Exámenes post irradiación en celdas calientes.
- (e) Correlación de observaciones con el diseño y predicciones.

La fig. 6.1 muestra una relación de las etapas, conocimientos y ensayos a realizar hasta llegar a la Evaluación de Performance.

Los datos para análisis de performance pueden clasificarse en las siguientes áreas:

- Actividad del circuito primario
- Química del agua
- Datos neutrónicos y termohidráulicos
- Registro de operación del sistema de transferencia.

- Observaciones post irradiación

Considerando que es importante para la operación del reactor tener un tiempo suficiente para retirar los combustibles defectuosos sin alterar sensiblemente ese esquema de recambio, es de interés conocer también la performance de elementos combustibles defectuosos.

La curva de la fig.6.2 muestra la relación entre el tiempo que puede permanecer un EC defectuoso en el reactor antes que deba ser retirado por el nivel de liberación de productos de fisión y el flujo calórico.

Actividades del Circuito primario:

El valor real de la actividad presente en el circuito primario está limitado por las autoridades de Seguridad Nuclear.

Este valor en reactores Candu se fija en 700 a 1000 Ci.

Aparte de las implicancias radiológicas este valor tiene un efecto sobre la performance global del núcleo.

En efecto, los elementos combustibles defectuosos deben ser descargados cuando se alcanza el valor límite mencionado.

En la práctica tan pronto como se detecta una elevación en la actividad del refrigerante por medio del sistema de detección de actividad del sistema primario el sistema de "localización de canal fallado" comienza a funcionar a fin de ubicar el canal donde está el combustible defectuoso.

Siguiendo a los requerimientos de operación y la experiencia de gestión del núcleo se puede determinar el tiempo para recambiar un canal con combustible fallado.

El momento en el que el combustible defectuoso se retira del canal es siempre previo a tener que parar la central por haberse superado el límite de actividad. Esto es cierto siempre que no ocurran fallas masivas de combustibles que afecten a un número grande de canales tal que es imposible el recambio de todos ellos, en un lapso suficiente.

No sólo el yodo-131 es usado como un indicador de la presencia de combustible defectuoso. A fin de conocer la naturaleza y/o el tamaño de la falla se mide también el Xe-133 y Kr-88.

Dado que el I-131 es retenido en el sistema de purificación del circuito primario, Xe-135 es registrado como una indicación de los radioyodos presentes.

La sensibilidad del sistema de neutrones retardados que está basado en la emisión de neutrones retardados por el I-137 y Br-87 también permite sacar conclusiones sobre la severidad de la falla de combustible si se analiza el nivel presente.

Debe registrarse también la operación del sistema de purificación y el nivel de I-131 a la salida del mismo y el rendimiento o eficiencia del sistema junto con los valores de Xe-135.

Química del refrigerante:

A los efectos de la performance de los elementos combustibles es necesario conocer

el nivel de oxígeno presente.

El valor de oxígeno libre debe estar siempre debajo de 0,05 ppm. Esto puede ser fácilmente alcanzado si se mantiene una sobrepresión de hidrógeno de algunos ppm.

La presencia de oxígeno en el circuito primario incrementa la liberación de productos de corrosión. Esto a causa de la rotura de la película de magnetita en los aceros.

La fuente de oxígeno es la descomposición de D_2O en O_2 e H_2 por radiolisis y equilibrio químico a la temperatura de operación. La presencia de hidrógeno desplaza el equilibrio en dirección de D_2O .

Un valor típico de 0,5 ppm de H_2 disuelto en el refrigerante es corriente en reactores CANDU.

Por otra lado el H es un agente potencial de fragilización del zircaloy si bien la absorción desde el refrigerante es generalmente baja.

El transporte de productos de corrosión y depósito de "crud" se controla por el pD. El rango de variación se fija entre 10 y 11. A este nivel la solubilidad de los productos de corrosión, principalmente Fe_2O_3 , tiene un mínimo para la temperatura de operación. Así la deposición de "crud" será muy baja en la zona del núcleo.

Por lo expuesto es importante registrar las concentraciones de H_2 , O_2 , pD, Cu^{++} y Fe^{++} para evaluación de performance.

Datos neutrónicos y Termohidráulicos

Para el análisis de defectos se requiere la historia de potencia del elemento combustible y quemado.

También resulta de importancia conocer algunos eventos tales como recambio de combustible o movimientos de barras de control vecinos al canal donde se encuentra el o los elementos combustibles objeto de la evaluación.

También debe conocerse eventos anormales tales como períodos largos de residencia del elemento combustible fuera del reactor entre dos irradiaciones.

Tanto los datos de caudal como la potencia térmica y temperaturas son útiles también para la evaluación.

Otros datos

Debe registrarse la operación del sistema de transferencia incluido eventos anormales sobre todo aquellos que pueden mantener elementos combustibles por algún tiempo en el centro del núcleo, después de haber alcanzado un quemado importante a potencias bajas.

A continuación se resumen los parámetros a considerar:

Parámetros a registrar para análisis de Performance

- Actividad de I-131; Xe-133; Kr-88, Kr 88/Xe-133; Xe-135.
- Registro de operación del sistema de purificación del circuito primario.
- Registro del sistema de localización de elementos combustibles fallados (Neutrones retardados).
- pD, concentración de Oxígeno, Hidrógeno, Cu^{++} , Fe^{++} y otros elementos pesados.
- historia de quemado y potencia de los elementos combustibles.
- Registro de Operaciones de recambio.

Parámetros a calcular para el análisis de performance

- Potencia lineal máxima
- Potencia térmica del canal
- Máxima temperatura de vaina y q (w/cm²)
- Tiempo desde inserción o recambio hasta detección del elemento fallado.

Datos adicionales para un análisis comprensivo de Performance

- Número total de elementos descargados y cuantos fallados.
- Descripción de las fallas.
- Resultados de γ -scanning de algunos elementos combustibles.

6.2. Factores que limitan la vida de los elementos combustibles.

Existen una serie de fenómenos que pueden limitar la vida del combustible en el reactor y que determinan lo que se denomina quemado tecnológico.

Los mismos son esquematizados en la tabla siguiente:

C A U S A	E F E C T O
- Corrosión	- Pérdida de espesor de pared de vaina - Hidruración - Incremento de la temperatura superficial
- Daño por radiación - Textura adversa - Contenido de H	- Fragilización de la vaina
- Expansión térmica e hinchado de UO_2 - Presión de gases de fisión - Formación de pliegues - Ciclado de potencia	- Sobredeformación en la vaina
- Contaminación del H_2O	- Hidruración Interna - Corrosión por fluor
- Inestabilidad hidrodinámica	- corrosión por fricción - fatiga - daño mecánico
- Depósito de productos de corrosión (especialmente Fe_3O_4)	- Sobrecalentamiento local - Arqueado de las barras - Burbujas estables
- Ataque productos de fisión	- Corrosión - Corrosión por tensiones o bajo tensiones
- Defectos de fabricación en vainas, tapones, soldaduras, separadores.	- Evolución de defecto a falla secundaria por hidruración. - Agrandamiento defecto por parámetros de operación

(tabla continúa)

-
- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Variación de parámetros de operación: cambios locales de q, picos de flujo por asimetría o proximidad barras de control. | <ul style="list-style-type: none"> - Fallas por interacción mecánica combustible vaina. |
|---|--|
-

De todos los fenómenos mencionados el tipo de fallas aparecidas han sido encuadradas dentro de la siguiente lista:

- Primera época de los Reactores LWR (hasta 1970)
 - Elección inadecuada de características de la vaina
 - Control insuficiente de fabricación
 - Deposición de "crud"
 - Contaminación con fluoruro
 - Hidruración interna
 - Desgaste por "fretting"

Esta serie de fallas llevó el nivel de las mismas a un valor de 0,1 % respecto del total de barras irradiadas.

- Segunda etapa LWR (hasta 1975)
 - Hidruración interna
 - Interacción combustible vaina
 - Densificación UO_2 y colapso de la vaina

El nivel de fallas se elevó hasta 0,2 % especialmente por efecto de densificación y colapso.

En reactores Candu el nivel de fallas incluyendo todos los reactores de Canadá y el extranjero es hasta 1978 de 0,27 % respecto al número total de elementos combustibles irradiados.

Sin embargo, si se toma la performance de los reactores de potencia de Canadá (Pickering y Bruce) este valor es de 0.05%.

La principal causa de fallas ha sido el de interacción combustible vaina.

Las Tablas de las figuras 6.3, 6.4 y 6.5 resumen la experiencia de reactores KWI y Candu en relación con el nivel de fallas de elementos combustibles.

Se mencionan a continuación las medidas correctivas que se adoptaron para solucionar las fallas mencionadas.

Hidruración interna:

- Mejora del terminado superficial de la cara interna de la vaina.
- Desgasado de pastillas y vainas al vacío.
- Incluir en el control de calidad la determinación de gases residuales.
- Uso de "Getters" (absorbedores) en el plenum de la barra combustible.
- Reemplazo de barras combustibles.

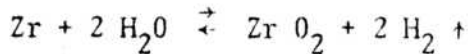
Interacción mecánica combustible Vaina

- Nuevo diseño de pastillas (Chaflán y relación L/D)

- Reducción del coeficiente de fricción pastilla vaina (capa grafito en pastillas y cara interna vaina).
- Retrasar la interacción (prepresurización y aumento resistencia al creep de la vaina)
- Operación del reactor restringiendo parámetros que afectan las PCI.

6.3. Comportamiento de los EC en un LOCA

La Reacción H_2O -Zr y Zr-Vapor es:



La falta de refrigerante (LOCA) produce:

- (1) Un aumento de la T° del combustible y por consiguiente una liberación incrementada de PFG (Productos de fisión gaseosos)
- (2) Un aumento de la T° de la vaina y por consiguiente una reacción acelerada de Zr con agua y vapor.

Esta reacción es exotérmica y provoca un aumento mayor de T° en la vaina.

- (3) Un aumento de la oxidación de la vaina y una fragilización de la misma por el oxígeno que difunde en ella.

Sistema ternario $Zr O_2 + O_2$ en α Zr + β Zr con algo de O_2 estabilizado

Afecta la resistencia mecánica y la ductilidad de la vaina.

- (4) Se forma H_2 que a su vez puede llegar o constituir un problema cuando su concentración llega a mezcla explosiva
- (5) El estado de tensiones de la vaina pasa de ser compresivo (presión de refrigerante > que presión interna barra) a un estado tracción $P_i > P_{refrig}$.
- (6) La respuesta de la vaina al choque térmico producido por el "mojado brusco" al actuar el "ECCS" (Sistema de Refrigeración de Emergencia)

Los parámetros controlantes son:

- (a) Presión interna
- (b) " " externa
- (c) Velocidad de calentamiento

los cuales determinan el grado de deformación de la vaina sobrecalentada hasta que la presión interna es liberada por rotura o recomienza el enfriamiento por el ECCS ($\Delta t_i \sim 2$ a 30 seg) (Ver fig. 6.6)

$$\Delta t_R = \frac{T_R(\sigma)}{R} \quad \Delta t_R \text{ debe compararse con } \Delta t_i$$

Δt_i : tiempo de entrada del "ECCS"

Δt_R : tiempo a rotura.

Los factores contribuyentes son:

- Irradiación previa del combustible *
- No uniformidad del espesor de pared de vaina
- Velocidad de deformación (ó $\frac{dT}{dt}$)
- Transformaciones alotrópicas en la vaina
- Grado de fragmentación del combustible antes y durante el LOCA *
- Grado de reubicación de pellets durante rotura *
- Oxidación e hidruración de vaina *
- Gradiente azimutal de T° en la BC.

* no se pueden simular bien fuera del reactor

Naturaleza de las fallas

- Hinchado antes de la rotura restringido al área de penetración
- Ancho rango de bloqueado del canal de refrigeración.
- Un grado de azar en la posición de la ruptura de máxima deformación
- La expansión máxima ocurre dentro de los 10 cm del plano axial medio.
- Los separadores tienden a reducir la posición aleatoria axial de rotura y a incrementar bloqueo del canal.
- Temperatura umbral de hinchado de la vaina $\sim 700^\circ\text{C}$
- La exposición de la vaina al vapor a 1100°C por 8 minutos resulta en un comportamiento frágil a 500°C y menor.

CRITERIOS DE DISEÑO

El criterio americano es que:

- (1) La T° máxima no debe exeder 1200°C
- (2) La oxidación total calculada no debe exeder 0.17 veces (17 %) el espesor de la vaina inicial.

La energía para rotura en la vaina se esquematiza en la fig. 6.7

El criterio "PAWEL"

- (1) La cantidad de β Zr - remanente
- (2) La Conc de O_2 dentro del β -Zr
- (3) La presencia o no de incursiones de α Zry.

El promedio de concentración de O_2 en la fase β debe ser menor que 0.7 % y menor que 95% respecto a saturación.

Criterio alternativo canadiense.

La concentración de Oxígeno debe ser menor que 0.7 % sobre por lo menos la mitad del espesor de la vaina.

De acuerdo a lo expuesto es necesario limitar en el diseño de los elementos combustibles la máxima expansión de las vainas para impedir su rotura y permitir la entrada de refrigerante.

Para ello es necesario conocer:

- Las propiedades mecánicas de los tubos de Zircaloy a alta temperatura.
- El efecto de la concentración de oxígeno sobre la fragilización de la vaina con la temperatura.
- La velocidad de calentamiento de la vaina en un LOCA particular del reactor en estudio.
- La máxima deformación de los tubos (o abalonado) a la temperatura crítica.

Bibliografía

- (1) R.O. Cirimello Surveillance of Candu Fuel Performance.
(no publicado).
- (2) H. Hiemer Fuel Experience in KWU. (IAEA Interregional
training - Course on Nuclear Power Project
and Implementation, Karlsruhe, Alemania,
Set-Nov 1976.
- (3) G.R. Fanjoy et al. Canadian Nuclear Fuel Operating Experience.
Paper to the ANS/CNA, Topical Meeting, Toron-
to, Canadá, Apr. 1975.
- (4) F.D. Judge BWR General Electric Fuel Performance update.
European Nuclear Conference. Ap. 1975.
- (5) E. Cirimello et al. Evaluación de Performance de Elementos Combusti-
bles Atucha. Primer Núcleo .
Presentado en Energía Nuclear y aplicaciones en
Latinoamerica, Mejico , Set. 1975.
- (6) J. Boulton Fuel Cladding oxidation and Embrittlement
Internal Report WNRE-231 (1974).
- (7) A.L. Bement Nuclear Reactor Safety .
Course (1972) (USA)

IRRADIATION SURVEILLANCE

- INCORE INSTRUMENT
- ONLINE COMPUTER
- COOLANT ACTIVITY

OFF LINE
CALCULATIONS

- POWER DISTRIBUTION
- LINEAL RATING
- CENTRAL T
- STRAINS

SPENT FUEL BAY OBSERVATIONS

- VISUAL OBS.
- γ - SCANNING
- DIMENSIONAL CHANGES

POST IRRADIATION
OVERALL
CONDITION

PERFORMANCE
EVALUATION

HOT CELL
(IF NEEDED)

- SIMULATION CODES
- LABORATORY TESTS
- PHENOMENON KNOW LEDGES
- COMMON SENSE
- PREIRRADIATION DATA

FIG. 6.1

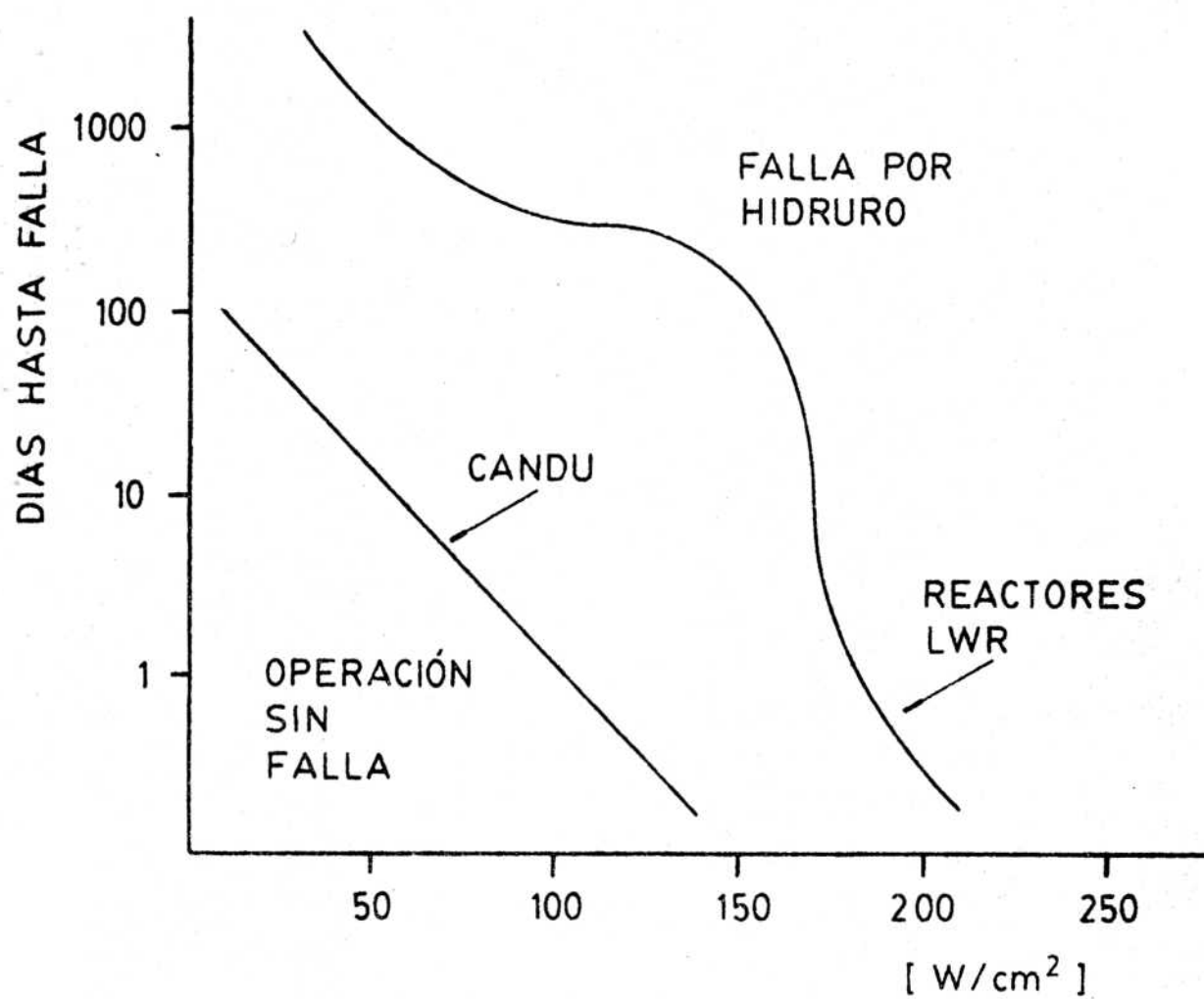


FIG. 6.2

Irradiation Data for PWR Fuel Assemblies (KWU reactor)

Reactor (Location/ Start-Up Year)	Fuel Assemblies	Fuel Rods	Maximum Burnup (MWD/MTU)	Remarks
MEMR (Karlsruhe/1965)	1,338 (405/933)	49,506	13,000	First Core: Welding and endcap defects Reloads: No defective rod (< 0.1 %)
KWO (Obrigsheim)	400 (125/275)	72,000	46,000	First Core: Hydride defects < 0.2 % Reloads: No systematic defects, rate < 0.05%
KKS (Stade/1972)	365 (160/205)	74,825	36,000	First Core: Fretting (debris), hydride defects < 0.06 % Reloads: No systematic defects, rate < 0.02. %
CNA-Atucha (Atucha/1973)	700 (257/443)	25,200	6,000	No systematic defects, rate < 0.02 %
KCB (Borssele/1973)	202 (121/81)	41,410	25,000	First Core: Friction (inadequate hold- down force) rate < 0.15 % Reload: No defective rod
KWB (Biblis/1974)	93	45,548	15,000	No systematic defects, rate < 0.02 %

FIG. 6.3

Irradiation Data for BWR Fuel Assemblies (KWU Reactors)

Reactor (Location/ Start-Up Year)	Number of Irradiated Fuel Assemblies (First Core/ Reloads)	Fuel Rods	Maximum Burnup (MWD/MTU)	Remarks
VAK (Kahl/1961)	199 (9 /105)	7,164	34,000	No systematic defects, rate
KRB (Gundremmingen/ 1966)	820 (411/409)	29,520	35,000	First Core: Fretting, Hydride and PCI-defects rate $\approx 1\%$. Reloads : 1 to 5 - Hydride and PCI defect ($< 0.5\%$) 6/7 - no defects.
KWL (Lingen/1968)	568 (296/272)	20,448	30,000	First Core: Hydride defects, rate $\approx 1\%$ Reloads: 1 - Hydride and end cap defects $\approx 9\%$ 2 to 5 no defects
KKW (Würgassen/1972)	510 (444/54,12 [†])	25,158	10,000	No systematic defects, rate $< 0.01\%$

[†] 8 by 8 assemblies

FIG. 6.4

CANJU Fuel Performance (March 1976)

Station	Irradiated	Discharged	Defective	% Defective
NPD	3,688	2,580	11	0.30
DOUGLAS POINT	13,079	9,447	85	0.65
Before Jan. 1, 1972	7,169	3,537	66	0.92
After Jan. 1, 1972	9,642	5,910	19	0.20
PICKERING G.S.				
Unit 1	19,818	15,138	99	0.50
Before Nov. 1, 1972	6,938	2,268	91	1.31
After Nov. 1, 1972	17,680	12,880	8	0.05
Unit 2	18,384	13,704	1	<0.01
Unit 3	13,314	8,634	6	0.05
Unit 4	10,914	6,234	4	0.04
PICKERING G.S. TOTAL	62,430	43,710	110	0.18
KANUPP	4,603	2,315	30	0.65
RAPP	5,480 (estimated)	1,800 (estimated)	5	0.09
GENTILLY - 1	3,313	293	12	0.36
TOTALS	92,693	60,145	253	0.27

FIG. 6.5

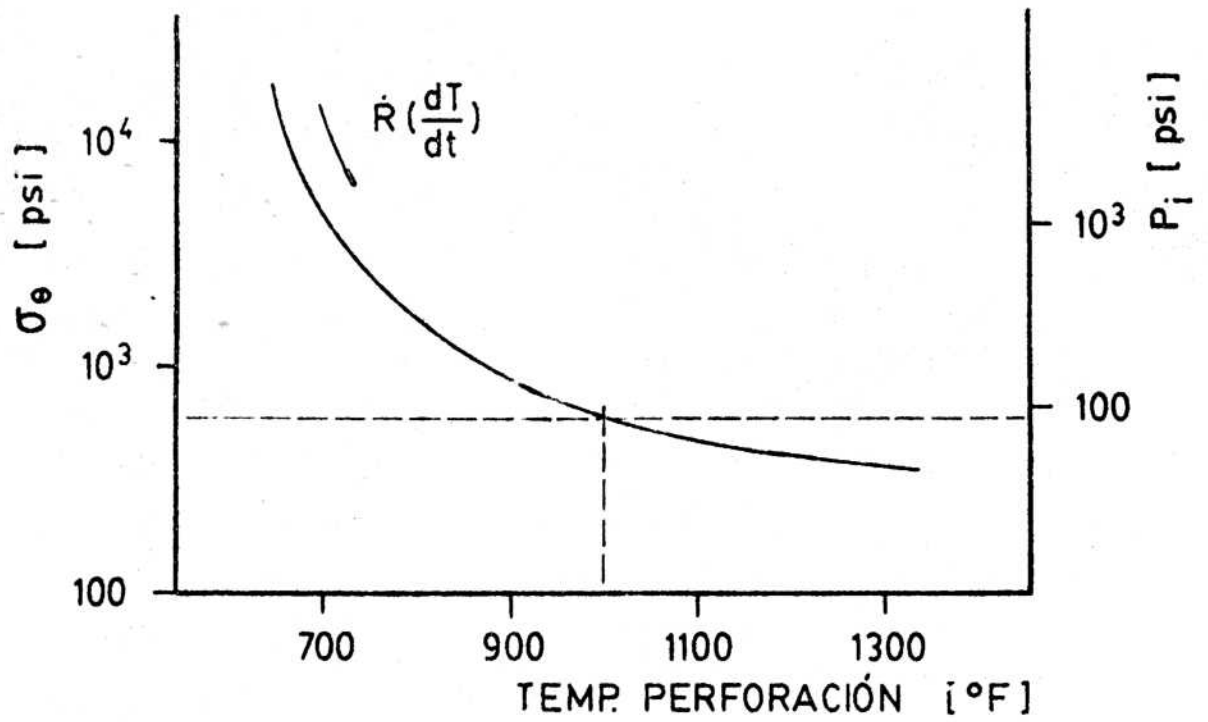


FIG. 6.6

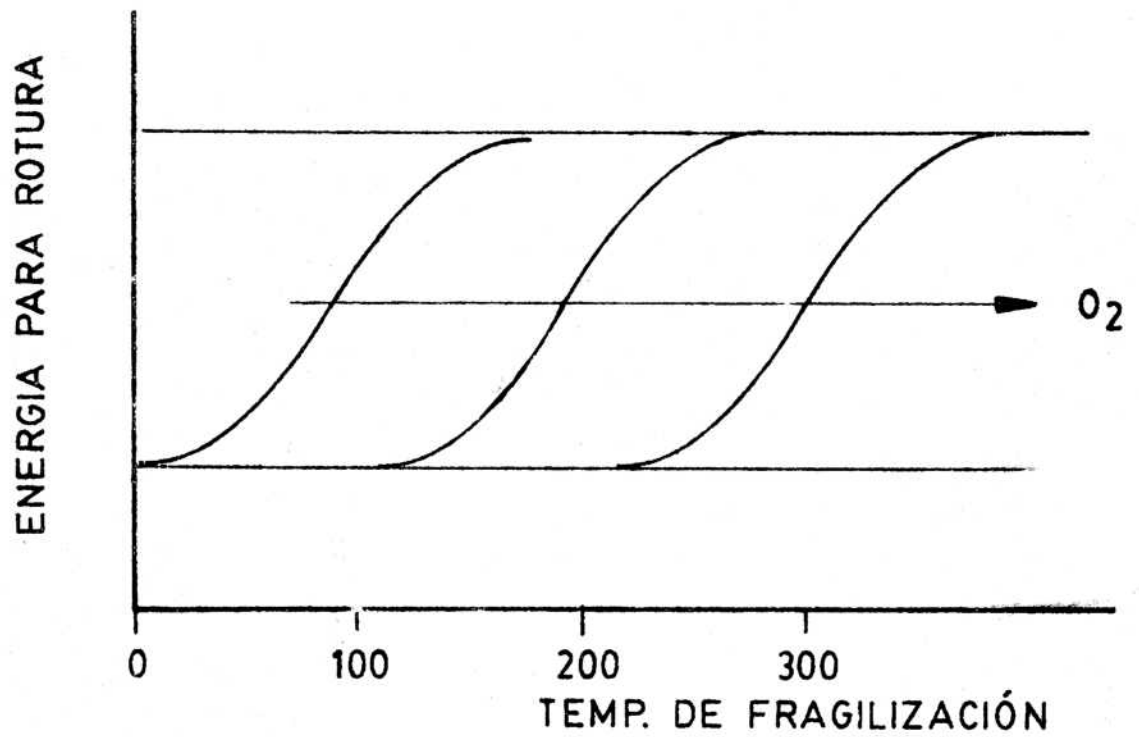


FIG 6.7

7. PROCESOS DE FABRICACION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES

Se trata en este punto en forma particular un aspecto sobresaliente de la tecnología de combustibles nucleares el cual es la Producción de Elementos Combustibles.

El término Producción abarca un amplio rango de acciones que han sido ya analizados en el punto 3 de estas notas. Sin embargo es necesario destacar una vez más que las soluciones para un suministro en calidad, tiempo y precio requieren un enfoque de estricto cumplimiento de normas, procedimientos, know how y la calificación permanente de insumos, productos, personal, procesos y equipos.

El aspecto de la calidad será analizado en el Punto 8 de estas notas y lo que aquí se mencione es para mantener la coherencia en descripciones y análisis de procesos.

Se hace primero una descripción y comentarios generales sobre la fabricación de los elementos combustibles para la Central Atucha I y luego para el tipo CANDU. A continuación se hace un análisis de los principales procesos de fabricación involucrados y una mención de la forma de controlar los parámetros de interés para el Diseño y la Performance los cuales no siempre se hayan especificados.

Una afirmación de carácter general mencionado en el punto 3 de estas notas y que es necesario reiterar aquí se refiere a los equipos de producción.

Teniendo en cuenta que los procesos involucrados en la fabricación de elementos combustibles son especiales (al menos alguno de ellos) la experiencia de fabricación con equipos a tal fin reside en los fabricantes de elementos combustibles de países donde esta tecnología ha sido desarrollada. Existen muy pocos fabricantes de equipos en el mundo que exhiban esta experiencia y en general los equipos especiales están diseñados o modificados por los fabricantes de combustible. Esto exige efectuar contratos con los fabricantes de combustible en la mayor parte de los casos. La vía alternativa implica el desarrollo de equipos desde la etapa prototipo hasta lograr una unidad de producción la cual tenga la confiabilidad requerida sobre todo con la repetibilidad esperada durante Producción. Esta vía es larga y no siempre lleva a resultados satisfactorios, no obstante en la situación actual de la transferencia de tecnología sensitiva muchos países han adoptado esta vía resignando costos frente a la autoprovisión e incorporando una mayor componente de mano de obra frente a la de utilizar equipos automatizados.

La tabla siguiente resume datos de interés para comparar algunas características de fabricación diferenciales entre EC Atucha I y CANDU

	Atucha I (350 Mw)	CANDU (600 MWe)
Nº de BC/año (aprox)	16.000	200.000
Nº de soldadura de tapones/año	32.000	400.000
Nº de soldadura por día (220 día)	145	1.818
Nº de pastillas UO ₂ por año	^{año} 7.200.000	6.000.000

7.1. Descripción de la fabricación de elementos combustibles

7.1.1. EC Atucha I

En las figuras 7.1 a 7.3 se ha esquematizado el flow sheet de fabricación

por componentes de los elementos combustibles para la central Nuclear Atucha I.

En todos los casos se han obviado procesos de limpieza, decapado o pulido electroquímico los cuales se mencionan en el texto.

No se han incluido los puntos de control de calidad si bien en el texto se menciona cuando se hacen mediciones, separación de testigos o controles importantes.

Los ensayos de recepción de materiales de Zircaloy o Aceros son en todos los casos similares, y consisten en la verificación de los certificados de calidad del fabricante de los semiterminados y el control de alguna de las propiedades y dimensiones así como ausencia de defectos. En algunos casos y a fin de no duplicar ensayos innecesarios que realiza el fabricante la verificación de calidad se hace con inspectores en la fábrica del proveedor.

En el caso del polvo de UO_2 también tiene ensayos normalizados para su aceptación, sin embargo cuando cumple con las condiciones de pureza química el ensayo de aceptación final es el de sinterización en el mismo horno de producción.

En la fabricación de Elementos Combustibles se realizan ensayos estadísticos (muestreo representativo de un lote de piezas) o sobre el 100 % de semiterminados, insumos, piezas intermedias o productos terminados. A fin de determinar el rechazo de los mismos se aplica un criterio de carácter universal. Cuando se trata de ensayos estadísticos se repiten los ensayos fallidos sobre un número mayor de piezas y de resultar nuevamente negativos se rechaza el lote completo. En los ensayos 100% se rechaza la pieza, semiterminado o unidad de insumo fallida.

La fabricación de componentes estructurales tales como arandelas, zapatas, tapones, etc. es factible de realizarla por medio de contratistas tal como se efectúa en la industria automotriz con la provisión de autopartes. Sin embargo los requerimientos de limpieza (no contaminación con elementos pesados), los estrictos requisitos dimensionales y el estrecho margen en tolerancias dentro de un lote de partes podría recomendar la integración de estas etapas a la línea de producción de los elementos combustibles.

La experiencia recogida en CNEA por el proyecto Planta Piloto-Fabricación EC Atucha en este sentido recomendará finalmente la línea a seguir.

Barras Combustibles

La figura 7.1 esquematiza las etapas de fabricación de las barras combustibles.

Los materiales de partida son el polvo de UO_2 , tubos de Zircaloy-4 (dos diámetros diferentes para vaina y tubos soporte para estacio de gases de fisión), barra de Zircaloy 4 para tapones, alambre de Zry 4 para patines fleje de Zry 4 para arandelas y discos y pastillas de alúmina para compensación.

La fabricación de pastillas comprende el prensado, sinterizado y rectificado de las mismas, siendo posteriormente almacenadas para su uso. Antes de ser cargadas a la barra combustible se las somete a un proceso de degasado (especialmente humedad) en estufas al vacío y bajas temperaturas $100^\circ C$.

Una vez recepcionados los tubos de Zry-4 para vaina son sometidos a un proceso de pulido electroquímico. Este proceso prepara la superficie del tubo para la soldadura de patines y especialmente elimina la característica del terminado por abrasión que traen de fábrica. Esto mejora la rugosidad superficial lo cual es importante para la corrosión y transferencia térmica.

La operación de fresado de los patines se requiere para preparar un perfil adecuado para la soldadura. El chaflán de los bordes del patin se efectúa por maquinado posterior a la soldadura en un torno de precisión. En esta operación se prepara también las vainas con patines que llevan una escotadura (ranura) para fijar 9 barras combustibles externas a los separadores.

Los tapones son maquinados desde barras de Zry-4 y luego se le hace un acunado para dejar un dentado en la parte plana del cono superior. Este dentado que se repite en la placa portante impide el giro de las barras combustibles una vez que están fijadas en su posición. Esto se hace para que no se salgan de sus apoyos en los separadores a lo largo de todo el elemento combustible.

Además el tapón lleva una operación de fusión de la parte plana del vástago interno. Esto se efectúa a fin de sellar la posible porosidad fina que normalmente traen las barras de Zry lo cual ha dado dificultades en servicio al permitir difundir gases de fisión a través de las mismas.

A las vainas preparadas con patines (ya maquinados) y con los extremos preparados para soldar se le suelda el primer tapón que lleva un agujero longitudinal.

Luego se carga la columna interna formada por tubos de soporte, arandelas, discos, pastillas de UO_2 y tantas pastillas de alumina como sea necesario para compensar la longitud relativa respecto del tubo. Se coloca y suelda el segundo tapón.

Por el agujero dejado en el tapón inferior se le introduce Helio puro a una presión de aproximadamente 17 atm. se coloca un "clavo" de zircaloy y se sella con una soldadura TIG.

Una vez concluida esta operación la barra combustible es sometida a un ensayo de pérdida de helio, a radiografía de todas las soldaduras y control de dimensional.

Durante la soldadura se toman testigos para ensayos de corrosión y explosión así como metalografías.

Separadores

Existen dos realizaciones de separadores fijos, esquematizados en la Fig. 7.2. y un tipo de separador elástico.

La diferencia entre las realizaciones de los separadores fijos reside en que el último separador lleva una zapata elástica en su contorno y cuatro zapatas fijas, mientras que los otros 14 separadores tienen 3 zapatas fijas a 120° .

La fabricación de los separadores fijos implica más de doce operaciones diferentes de las cuales las más destacables son la soldadura por brazing de las zapatas fijas, la electroerosión de las mallas huecas y el rectificado de los asientos de las barras combustibles.

El material de partida es una rodaja de Zry-4 que ha sido laminada en forma cruzada a fin de tener las mismas propiedades en todas las direcciones.

El material para las zapatas elásticas es un acero con alto contenido de níquel para tener una buena respuesta a la relajación de tensiones, propiedad que no posee el Zircaloy a la temperatura de trabajo y bajo irradiación.

El separador elástico inferior o adicional está conformado a partir de fleje de Inconel 718 y luego armado en una "mascara" y soldado por "brazing", a continuación se le hace un plaqueado con níquel para asegurar su buena respuesta a la corrosión.

Placa portante y tuercas seguro:

La fabricación de las mismas se describe en la fig. 7.2 con los comentarios indicados.

Tubo soporte y zapatas elásticas axiales:

El tubo soporte está destinado a portar las zapatas elásticas axiales, en cada espacio entre separadores.

Tiene un tapón superior idéntico al de las barras combustibles y no tiene tapón inferior, esto permite que el espacio interior esté lleno de agua pesada.

La fig. 7.2 esquematiza los pasos de fabricación.

Su espesor es de 1,2 mm y no lleva patines de apoyo con los separadores.

Las zapatas elásticas están hechas de un acero de alto contenido de Níquel.

Montaje del elemento combustible:

El ensamble del elemento combustible se efectúa en un banco donde se colocan en soportes apropiados los separadores y la placa portante, todos en su posición axial correspondiente.

Las barras combustibles son "enhebradas" a través de los separadores empezando por el centro. Al llegar justo antes de la posición que deben ocupar en el separador se giran y se hacen deslizar dentro de los apoyos hasta que haga tope el tapón con la placa, se colocan las tuercas y se aplastan los seguros.

Las barras externas (9 de ellas) que llevan escotadura se giran en su posición del mismo modo que un ajuste "bayoneta".

Finalmente se introduce el tubo estructural y se le colocan las zapatas elásticas, estas se fijan con remaches "pop" en perforaciones efectuadas in situ.

La fig. 7.2 muestra el elemento armado (sin varillaje)

Fabricación y montaje del varillaje

Como se ha descripto en el punto 4 el elemento combustible se completa con un varillaje y acople que tiene la finalidad de atravesar el reflector axial

y la salida de refrigerante y además acoplar el elemento combustible al cuerpo de relleno o extensión que permite colgarlo de los cierres de la tapa del recipiente de presión.

La fig. 7.3 muestra las piezas componentes y pasos de fabricación.

El montaje sobre el elemento combustible se hace a partir de las piezas intermedias (ver fig. 7.2) sobre ellas se enroscan seis cápsulas de Zry4. Sobre ellas se coloca el acople con las tres barras de acero y el anillo intermedio ya montados y se fijan a las seis cápsulas por medio de tornillos "Allen".

7.1.2. EC CANDU

En la fig. 7.4 se ha esquematizado las etapas de fabricación del combustible tipo CANDU.

La fabricación de pastillas de UO_2 se efectúa esencialmente de la misma forma que la descrita para los elementos combustibles Atucha.

Existe una alternativa al proceso descrito que implica el uso de polvo sin terizable pero no de compactación directa. Dicho polvo debe ser prensado en briquetas a presiones de 550 a 850 Kg/cm². Estas se rompen y se muelen pasándose finalmente por tamices. Este proceso incrementa la densidad global (bulk density) del polvo y mejora su fluidez.

La fabricación de espaciadores y patines se hace a partir de fleje de Zircaloy-4 el cual se controla en espesor ancho y planitud así como la ausencia de defectos superficiales. Las propiedades mecánicas y composición química son verificadas en el certificado de calidad del fabricante.

El fleje es cortado en trozos y son desengrasados decapados, lavados, erosionados con vapor, enjuagados y secados. Los trozos son ahora cargados en el equipo de metalización al vacío donde se deposita una capa de aprox. 0,015 mm de Berilio metálico. Luego se estampan los patines y espaciadores de los cuales se requieren diferentes medidas. (fig. 7.5 a 7.7)

Los taponos se fabrican a partir de barra de Zircaloy-4 la cual es inspeccionada por ultrasonido para detectar sobre todo defectos longitudinales de muy escaso diámetro (0,0025 mm) y fisuras superficiales. El maquinado se efectúa en tornos automáticos convencionales. Luego se hace un desengrasado, decapado, enjuague y secado e inmediatamente se usan en la soldadura. En caso de que deban almacenarse, sólo se hace el desengrasado.

Las grillas extremas son obtenidas por estampado a partir de fleje de zircaloy, el cual es inspeccionado igual que el usado para patines y espaciadores.

Se efectúa el estampado rebabado y maquinadas para llevarlas al diámetro exterior exacto. Se hace luego una inspección visual y dimensional y a continuación un desengrasado, decapado, enjuague y secado.

Se debe además estampar luego la identificación del elemento combustible y del fabricante. (fig. 7.8 y 7.9)

La fabricación de las barras combustibles comienza con la recepción de los tubos de Zircaloy-4. La recepción es similar a la descrita para los elementos combustibles de Atucha.

La medición de diámetro permite separar los tubos en grupos, los cuales serán apareados con lotes de pastillas de UO_2 con diámetros estadísticamente compatibles. Esto es necesario a fin de satisfacer los requerimientos de diseño y performance del espacio pastilla-vaina.

Los espaciadores y patines se puntean sobre la vaina por medio de una soldadura por resistencia hecha por descarga de condensadores. (fig 7.10) Este procedimiento es suficientemente delicado como para no provocar daño metalúrgico sobre la vaina y a la vez permite manipular la vaina con los patines durante toda la operación posterior hasta que se efectúa el "Brazing"

Esta última operación se hace en una cámara al vacío calentada por medio de un horno de inducción de alta frecuencia. La temperatura es de aproximadamente $1050^{\circ}C$ por un tiempo muy corto (aprox. 60 segundos). (fig. 7.11)

Luego de las inspecciones correspondientes las vainas son llevadas a longitud, desengrasadas, lavadas y secadas.

Se hace a continuación el recubrimiento con grafito de la cara interna de la vaina la cual se aplica por colado de una solución coloidal secado y posterior horneado a temperatura de aprox. $250^{\circ}C$.

Se prepara los extremos para la soldadura, se cargan las pastillas combustibles en bandejas donde se ha colocado una longitud de UO_2 de acuerdo a lo especificado, lo cual requiere a veces el uso de pastillas de menor longitud, se sueldan luego ambos tapones por medio del método de soldadura por resistencia a fuerza magnética. Durante la soldadura del segundo tapón se deja una atmósfera de Helio, Argón y Aire dentro de la barra combustible, para poder luego detectar pérdidas por espectrometría de Helio (fig. 7.12)

La barra combustible es luego maquinada en sus extremos en una máquina de precisión de herramienta móvil. Esto permite mantener la barra fija e impedir la rotura de pastillas durante el maquinado. (fig. 7.13)

A continuación se ensambla el Elemento Combustible operación que se lleva a cabo en un dispositivo especial el cual es parte de una máquina de soldadura por resistencia que fija las grillas a los extremos de los tapones dejando así armado un conjunto de 37 barras combustibles. (fig 7.14 y 7.15)

7.2 Procesos de interés particular en la fabricación de elementos combustibles.

7.2.1. Obtención de Pastillas de UO_2

El UO_2 es un óxido cerámico que puede alcanzar un alto grado de no estequiometría ($UO_{2,25}$) permanece monofásico en los valores usuales, por lo que no se producen cambios dimensionales bruscos por cambios de fase, aún a las temperaturas de trabajo en el reactor (350 a $2200^{\circ}C$).

Debido a su alto punto de fusión ($2800^{\circ}C$) y su evaporación no congruente, la fabricación de las pastillas combustibles se realiza por técnicas pulvimetalúrgicas, las que incluyen:

- acondicionamiento de polvo
- Prensado
- Presinterizado

- sinterizado
- rectificado

La utilización de polvo de compactación directa y matrices autolubrificantes permite la eliminación de las etapas 1 y 3.

El compactado de polvos depende de factores tales como tamaño y distribución del tamaño de partículas, área específica, densidad aparente, fluidez, los cuales están relacionados entre sí en forma compleja. En general, un pequeño tamaño de partícula está asociado a una superficie específica grande y a la vez baja densidad aparente y fluidez. Esta última está estrechamente relacionada con la morfología de las partículas la cual define a la vez la superficie específica.

Los factores mencionados junto a factores externos como el tipo de lubricante, diseño de la matriz y presión de compactado definen las características de las pastillas en verde.

Dos aspectos de interés para analizar aquí son las consecuencias de la fluidez y la adición de lubricantes.

En la fabricación industrial se requiere un llenado rápido y parejo de las matrices de compactado lo cual exige una fluidez determinada (o también una morfología determinada). Si el polvo de partida no tiene estas características debe efectuarse la etapa de acondicionamiento que implica un precompactado, rotura de briquetas, molienda y separación con tamices. Existe hoy la posibilidad de obtener polvo de compactación directa lo cual evita la etapa anterior.

De la misma manera debido a la naturaleza refractaria del UO_2 es necesario usar lubricantes con el objeto de lograr una buena distribución de presiones, mejorar el empaquetamiento de partículas, facilitar la extracción de la pastilla de la matriz y reducir el desgaste de la misma. Este agregado exige su eliminación posterior en una operación de pre-sinterizado. Esta operación se puede obviar si se usa una matriz autolubricada con una cantidad menor de aditivo que luego se elimina directamente en la primera fase del sinterizado.

El sinterizado está controlado por un mecanismo de difusión que tiene como fuerza impulsora la reducción del área específica total. Se distinguen tres etapas: formación y crecimiento del cuello entre partículas, reducción de la porosidad y crecimiento del grano. En estas etapas influyen la atmósfera, la estequiometría así como el tiempo y temperatura de sinterizado.

Para lograr densidades superiores al 90% se requieren en los métodos usuales, temperaturas superiores a los 1600°C para el caso de UO_2 estequiométrico, sin embargo se citan ejemplos de densidades similares obtenidas con temperaturas de 1100 a 1300°C con UO_2 hiperestequiométrico (2,10 o más). Esto es atribuido a que la velocidad de difusión es mayor en el óxido hiperestequiométrico.

Otra propiedad que influye en la densidad es el área específica. Polvos con tamaño de partícula menor que $1,5 \mu$ y área específica (BET) mayor que $2,5 \text{ m}^2/\text{g}$ darán altas densidades

Todo lo expuesto se cumple de manera general ya que la "sinterabilidad" depende en gran medida de la historia de fabricación del polvo.

La conversión a polvo de UO_2 consiste en una precipitación (ADU-diuranato de amonio o AUC Uranil carbonato de amonio), calcinación-reducción (puede ser desdoblada en calcinación y luego reducción) y finalmente una pasivación.

Durante la precipitación se determina fundamentalmente la morfología de las partículas, importante para la fluidez del polvo y la distribución de tamaño de las mismas, ya que determina el grado de compacidad y parcialmente la distribución de porosidad de las pastillas.

En la calcinación-reducción se fija la reactividad del polvo.

La temperatura de reducción fija el área específica donde a menor temperatura (500 a 600°C) se obtienen mayores áreas específicas y por lo tanto polvos más reactivos. A mayores temperaturas se tiene un polvo preterizado y por ello menos reactivo.

Con estas propiedades los polvos tenderían a oxidarse rápidamente con lo cual se tendría problemas en la etapa de prensado y sinterizado. Por ello se efectúa una pasivación que se realiza en atmósfera de CO_2 y Nitrógeno con vapor de agua, a bajas temperaturas (100°C) con lo cual se logra una oxidación controlada.

Finalmente debe considerarse el rectificado, operación mecánica que se efectúa después del sinterizado y donde se fija el diámetro y principalmente las tolerancias entre pastillas. Estas quedan reducidas al orden de 0,01 mm. mientras que de sinterizado salen con tolerancias de 0,1 mm. Este orden de magnitud de diferencia es de importancia como fue analizado en el punto 4 de estas notas.

Asimismo debe considerarse en esta operación la rugosidad final de la pastilla la cual es de importancia para la transferencia térmica y la interacción pastilla-vaina. La misma está relacionada con la calidad de la piedra de la rectificadora sin centros utilizada.

En los puntos 4 y 5 se han expuesto los requerimientos de diseño y comportamiento de las pastillas de UO_2 .

En base a lo expuesto ahora respecto al proceso de fabricación, puede relacionarse aquellos requerimientos con los aspectos de proceso para definir la densidad (más alta posible) la rugosidad (importa en transferencia térmica) y tolerancia (ambas definidas en el rectificado final), forma y dimensiones (dishing, hombro, chaflan) porosidad (más baja porosidad fina posible) tamaño de grano (mayor posible para reducir liberación a productos de fisión).

En las figuras 7.16 a 7.19 se muestran fotos de equipos utilizados en la fabricación de pastillas de UO_2 , y las mismas al final del proceso.

7.2.2. Procesos de soldadura de Zircaloy-4

El coeficiente de expansión térmica relativamente bajo del zircaloy

($5,84 \times 10^{-6}$ cm/cm/°C a 20 °C) permite soldarlo con poca distorsión y bajas tensiones residuales. Además la alta resistividad eléctrica lo hizo fácilmente adaptable al proceso de soldadura por resistencia.

Entre los metales y aleaciones que pueden ser soldados el zirconio y zircalloys están clasificados dentro del grupo de los llamados reactivos (junto con el titanio, berilio y hafnio) debido a su alta reactividad química con el oxígeno y nitrógeno. A la temperatura de soldadura estos materiales son altamente reactivos con el aire y se fragilizan por pequeñas cantidades de nitrógeno, hidrógeno y oxígeno. Estas impurezas aumentan la dureza de los mismo, disminuyendo la ductilidad y provocando, además, una pérdida de la resistencia a la corrosión. Por ello la pileta fundida, así como la zona térmicamente afectada (HAZ) deben ser protegidos por una atmósfera inerte, soldarse en vacío o emplear unos pocos milisegundos en realizar la soldadura para evitar la absorción de estas impurezas. Este requisito lo reúnen: el proceso TIG, soldadura por resistencia (y presión) y por haz electrónico. Por otro lado la producción regular de elementos combustibles requiere que se fabrique un gran número de soldaduras idénticas. Esto significa que una vez que se establezcan los parámetros adecuados de soldadura para una junta particular, éstos sean reproducibles, o sea un proceso lo más automático posible.

7.2.3. Breve descripción de tres procesos empleados en la soldadura de tapones.

Soldadura por resistencia (y presión)

La soldadura por resistencia incorpora un grupo de procesos en los cuales el calor de soldadura está generado por la resistencia al flujo de la corriente eléctrica a través de las partes a ser soldadas. Un par de electrodos conducen la corriente a través de las partes a ser soldadas, las cuales están sujetas para proveer un buen contacto eléctrico y además están sometidas a presión de modo tal de contener el metal fundido producido en la unión o ejercer una acción de forja. Las principales variables de este proceso son: corriente de soldadura, tiempo de soldadura, fuerza de electrodo y características del mismo. Todos los procesos de soldadura por resistencia (punto, proyección, costura, chispa, a tope con recalado) han sido empleados exitosamente para soldar zirconio y zircalloys.

Entre las técnicas de soldadura por resistencia una variante que ha tenido gran éxito, es el llamado soldadura por resistencia por presión mediante fuerza magnética. Este proceso ha sido desarrollado a partir de 1958 en USA y Canadá y se ha empleado para soldar los tapones terminales de las vainas de los elementos combustibles, desde 1966 en Canadá y en la KWU se comenzó a desarrollar desde aproximadamente 1967 con resultados satisfactorios.

Los patines deslizantes de las vainas de los elementos combustibles Atucha, se sueldan con el proceso de soldadura por resistencia (proyección) al aire, (fig-7.20).

La diferencia fundamental entre una máquina de soldadura por resistencia convencional y una por fuerza magnética es la forma de aplicar la fuerza

de soldadura. Una máquina convencional utiliza un sistema neumático, hidráulico o mecánico para proveer la fuerza de soldadura; mientras que el método por presión mediante fuerza magnética utiliza un electroimán acoplado al electrodo móvil para proveer la fuerza de soldadura. De esta forma, la fuerza de soldadura está perfectamente sincronizada con el flujo de la corriente y es proporcional a la magnitud de la misma, resultando así que la generación de calor y la presión están perfectamente sincronizadas; de ahí la ventaja frente a un proceso de resistencia convencional. El proceso se lleva a cabo en sólo 0,01-0,02 segundos. La soldadura de tapones realizadas por este método requiere el uso de menor cantidad de material que el que se necesitaría para soldar los mismos con proceso TIG. Además el proceso de soldadura por resistencia deja las propiedades termomecánicas sin afectar de los tubos prácticamente hasta la zona de unión. En este proceso de soldadura de tapones se produce una especie de recalca-do en el interior y exterior de los tubos. A pesar de los costos involucrados en el maquinado posterior de los mismos para quitar este material, el proceso resulta económicamente más ventajoso en producción que los procesos TIG y haz electrónico.

Una desventaja que se encontró en este método es que al comienzo de su empleo para partes de elementos combustibles no se habían desarrollado métodos no destructivos para la inspección de las soldaduras. Las técnicas de rayos X normalmente usadas para detectar porosidades en las soldaduras por fusión no eran capaces de detectar las pequeñas discontinuidades que a veces se producían. Los métodos ultrasónicos normales eran muy difíciles de aplicar, debido al tamaño de los defectos y a la geometría de las juntas. El control de calidad se efectúa entonces mediante una combinación de muestreo destructivo (metalografías, ensayos de presión interna, etc.) y el control de los parámetros inherentes al proceso de soldadura.

Por otro lado, debido a que las soldaduras por resistencia se realizan en un período de tiempo muy breve y que además existe un contacto íntimo entre el electrodo y las piezas a soldar, y entre éstas entre si; no es necesario en muchos casos usar atmósferas inertes. No obstante, en el caso necesario de emplearse una atmósfera inerte, la presencia de impurezas en los gases no tiene la misma influencia que en una soldadura TIG (debido a la rapidez del proceso y a la rápida velocidad de enfriamiento del mismo). La absorción de gas se produce sólo en la superficie, con una profundidad de penetración muy pequeña. Por ello no hay inconvenientes en realizar soldaduras resistentes a la corrosión. En este último aspecto y en el anteriormente mencionado de no modificar las propiedades mecánicas, los resultados son decididamente superiores a las soldaduras TIG.

Por Haz Electronico

La soldadura por haz electrónico se logra mediante un flujo de electrones que conforman un haz delgado proveyendo una fuente de calor tridimensional. Este haz produce un intenso calentamiento localizado a través de la acción combinada de billones de electrones. Cada electrón penetra una pequeña distancia convirtiendo su energía cinética en forma de calor. Se logran en forma rutinaria potencias concentradas del orden de 10^2 KW/mm², también se pueden lograr potencias 10 MW/mm². Estas densidades de potencias tan elevadas causan prácticamente la vaporización casi instantánea de los metales. Esto produce una especie de cavidad en forma de túnel en la pieza a soldar

(esta cavidad permanece abierta por la presión asociada con la volatilización del material). Como resultado del movimiento relativo entre el haz y la pieza, la tensión superficial y la gravedad actúan de forma tal que el metal fundido fluye dentro de la cavidad. De tal modo que el proceso de soldadura por haz electrónico puede ser visualizado como resultado del movimiento de la cavidad creada por el haz que se mueve a lo largo de toda la sección a ser soldada. El proceso involucra cuatro parámetros básicos: voltaje de aceleración del haz, focalización del mismo, velocidad de soldadura y corriente del haz.

Una ventaja importante de este proceso es la posibilidad de realizar soldaduras muy angostas y de gran penetración. El haz puede ser enfocado en la zona a soldar en áreas circulares tan pequeñas como 0.1 mm de diámetro. En el caso de las fuentes de calentamiento convencionales de la soldadura por arco sólo se funde una zona superficial y la mayor penetración aumenta por la conducción de calor en todas las direcciones a partir de la zona superficial fundida, de tal modo que el ancho de la zona fundida es del orden de su penetración. En el caso de soldadura por haz electrónico la relación profundidad/ancho es mayor que 10/1 y se pueden lograr relaciones 30/1. La combinación tamaño del haz pequeño, zona de soldadura angosta y profunda restringen el ancho de la zona de fusión y zona térmicamente afectada a unas pocas centésimas de milímetro, dando origen, por ejemplo, a mínimos cambios metalúrgicos en el material base por ejemplo cuando se suelda un patín a una vaina.

Debido a lo anteriormente señalado el proceso de soldadura por haz electrónico resulta muy ventajoso para la soldadura de ciertas partes de elementos combustibles respecto del proceso TIG y por resistencia.

La soldadura por haz electrónico se realiza generalmente en alto vacío: presiones de 0,13 a 133 mPa (10^{-6} - 10^{-3} torr), pero el proceso se puede adaptar a un vacío menor: presiones de 0,13 a 13 Pa (10^{-3} - 10^{-1} torr.) y aún a presión normal; pero en estos casos la penetración y la relación profundidad/ancho se reduce a medida que la presión aumenta.

Las desventajas de la soldadura por haz electrónico son los altos costos de instalación y equipos comparados con los de soldadura por resistencia y TIG, debido a la adaptación y requerimientos que deben tener esos equipos para la fabricación de elementos combustibles en producción.

Soldadura por arco con electrodo de Tungsteno bajo gas inerte (TIG)

Basicamente este proceso consiste en mantener un arco entre un electrodo de tungsteno no consumible y la pieza a soldar. El arco se debe mantener inmerso en una atmósfera inerte constituida por helio o argón y cuya finalidad es proteger al metal fundido y la zona térmicamente afectada de la contaminación atmosférica (Fig. 7.21)

Para la soldadura de tapones terminales de las vainas de elementos combustibles se ha empleado en forma preponderante el proceso TIG, debido a que el conocimiento de sus parámetros en zircaloy se remonta a más de veinte años. Tiene la ventaja de emplear un menor capital de instalación respecto de los otros dos procesos, pero tiene un grado de automatización menor.

Ciertas desventajas frente a los otros dos procesos ya han sido señaladas en párrafos anteriores. Una desventaja importante es que la resistencia mecánica de las soldaduras obtenidas resulta inferior a la obtenida mediante el proceso por haz electrónico o resistencia, este es uno de los factores por el cual está siendo reemplazada.

7.2.4. Estructuras metalúrgicas en las soldaduras de Zircaloy

El zirconio puro tiene dos modificaciones alotrópicas; el zirconio α con una estructura cristalina hcp y el zirconio β con una estructura bcc.- La fase α es estable hasta aproximadamente 862°C y la fase β desde 862°C hasta el punto de fusión. En el zircaloy la fase α no puede disolver los elementos de aleación completamente, sino que una fase secundaria χ ocupa aproximadamente un 5 % del volúmen. La fase β en cambio disuelve todos los elementos. Hasta 790°C la estructura consiste en α , entre 820°C y 950°C en $\alpha + \beta$ y por arriba de 950°C en β . Estas temperaturas pueden ser influenciadas moderadamente por las velocidades de enfriamiento y calentamiento.

La transformación β a α en los zircaloys está bien documentada. Enfriando desde el campo β (por arriba de 975°C) a velocidades moderadas (templado en aceite o enfriado en horno) estas aleaciones transforman para dar una estructura widmanstätten. En este caso la estructura se caracteriza por grandes grano β y dentro de estos granos β se transforma en placas de α con los elementos de aleación precipitados entre las placas. Hay dos morfologías posibles de estas placas α : estructura de entretejido (basketweave) y estructura de placas paralelas (parallel plate). El primer tipo está formado por pequeñas placas orientadas más o menos al azar y que parecerían que se intersecarían. El segundo tipo consiste de regiones de largas placas paralelas. En general es preferible la estructura basketweave por ofrecer mejores propiedades mecánicas ya que un agregado de placas orientadas paralelas se comportaría como estructura de grano basto. La estructura de placas paralelas puede ser evitada mediante un control del contenido de impurezas del zircaloy, las cuales actúan como núcleos de transformación de las placas α .

Dependiendo de la velocidad de enfriamiento se pueden obtener estructuras de tipo más fino.

En el caso de una soldadura, cuando se calienta localmente hasta la temperatura de fusión, en la zona de fusión se tendrá un líquido de una sola fase. En las regiones más frías que la zona del metal fundido, el sólido puede estar en fase β , mezcla de $\alpha + \beta$ y de una sola fase α . Cuando el calentamiento cesa y comienza la solidificación ésta va a estar producida por un crecimiento progresivo de granos β de sólido en dirección de la solidificación. A medida que el enfriamiento progresa, ocurrirán transformaciones de fase tanto en la zona fundida como en la zona térmicamente afectada; estas transformaciones estarán relacionadas con los cambios de temperatura sufridos y a las velocidades de enfriamiento experimentadas por esas zonas. El cambio metalúrgico mayor ocurrirá en la zona de fusión y en la zona térmicamente afectada que estuvo por encima de la temperatura de transformación β .

De acuerdo a lo mencionado anteriormente se pueden obtener una variedad

de estructuras dependiendo de la velocidad de enfriamiento experimentada por una dada zona y que serán inherentes al proceso de soldadura empleado. Esta variedad de estructuras podrá extenderse desde una estructura β totalmente transformada a una estructura recristalizada. El proceso de soldadura por resistencia se caracteriza por una velocidad de enfriamiento muy alta. Estas velocidades, en el caso de un proceso de soldadura por resistencia (por punto), están calculadas en el orden de 10^3 °C/seg, por lo cual la estructura que se obtiene será de tipo widmanstätten muy fino o de tipo martensítico como se ha mencionado en la literatura para tan altas velocidades de enfriamiento.

En el caso de soldadura de tapones de vainas de elementos combustibles por el proceso TIG, donde la velocidad de enfriamiento es baja, se produce una estructura Widmanstätten y la zona HAZ se extiende hasta una longitud considerable en la vaina.

En el caso de soldadura de tapones mediante el proceso de resistencia por presión mediante fuerza magnética la máxima temperatura que se alcanza está por debajo del punto de fusión. Debido a la breve entrada de calor, junto con un rápido enfriamiento y deformación se encuentra una HAZ muy estrecha y el metal soldado exhibe una estructura de grano muy fino forjado en caliente.

Resulta importante destacar las propiedades mecánicas del zircaloy en soldaduras realizadas mediante los tres procesos distintos: por haz electrónico, por resistencia (flash) y por TIG. Para ello se han realizado ensayos de tracción, flexión, fatiga y creep a 300°C. Se encuentra que la estructura que se obtiene en la soldadura realizada por haz electrónico abarca desde una estructura tipo martensítico hasta una estructura widmanstätten muy fina. En cambio en el proceso TIG (debido a que el calor absorbido en este proceso es mucho mayor resultando en una velocidad de enfriamiento más lenta) se encuentra que en el material fundido la estructura es widmanstätten y que en parte de la zona térmicamente afectada (que es muy ancha) se llega a producir un proceso de recuperación y/o recristalización. Otra observación que hacen es que, para especies provenientes de material trabajado en frío en ensayos de tracción (a temperatura ambiente y a 300°C) la fractura se produce en la HAZ o en el metal fundido (en los tres procesos). En cambio en probetas provenientes de material recocido (inclusive en la soldadura por TIG) la zona de soldadura que ha sufrido un proceso de transformación puede exhibir mayor resistencia que el material base.

7.3. Proceso de soldadura por "Brazing"

Este proceso utiliza el aporte de la aleación eutéctica 95 % Zr y 5 % Berilio que funde entre 970 a 990 °C. (El Zr- funde a 1830 °C).

El método consiste en la difusión del eutéctico en los metales base dando lugar a una unión muy resistente.

Para ello es necesario colocar el aporte, posicionar las piezas a unir y calentar las mismas a una temperatura generalmente unos 100 °C superior a la temperatura de fusión del eutéctico.

El aporte del material se realiza colocando directamente la aleación eutéctica en forma de alambre, pasta, virutas, hojuelas o bien como en el caso de los elementos Candu donde se deposita Berilio metálico que luego forma in situ la aleación eutéctica.

En el caso de colocar la aleación debe preverse una geometría adecuada para alojar el aporte antes de fundir por ejemplo, agujeros para alambre, cuñas para pasta, o bien hojuelas muy delgadas entre las piezas a unir.

Cuando se deposita Berilio metálico se lo hace al vacío en cámaras de metalizado donde se colocan un gran número de piezas que se recubren con una capa de 0.015 a 0.020 mm de berilio metálico de alta pureza.

La fijación de las piezas a unir antes del calentamiento para la operación de brazing es importante por cuanto en general determina las tolerancias y posiciones angulares cuando las hubiere. El método más empleado (se usa en los elementos combustibles Atucha y CANDU) es el punteado por resistencia de las piezas a unir.

En el caso de Atucha se hace directamente sobre las piezas con un equipo de soldadura por puntos mientras que en el caso de los patines y espaciadores CANDU se usan pequeñas proyecciones que se funden localmente sobre la vaina cuando se le aplica una descarga de condensadores.

El uso de hornos convencionales para calentamiento en la operación de brazing no es conveniente por cuanto un ciclo largo de calentamiento y tiempos largos de enfriamiento conduce a excesivo crecimiento de grano y reducen la resistencia a la corrosión.

Por ello se utiliza el calentamiento por inducción dentro de una cámara de cuarzo que es refrigerada luego del ciclo de calentamiento con gas helio

El sistema empleado para el caso de apéndices soldados a vainas en el caso Candu, incluye suceptores de cobre que hacen las veces de concentradores para el calentamiento uniforme de una serie grande de tubos colocados en una o varias coronas concéntricas (fig-7.11)

En este caso el ciclo de calentamiento es de aproximadamente de 40 a 60 segundos, y la zona afectada unos 40 mm., en una operación se sueldan más de

100 patines lo cual insume unos 20 minutos entre caga, evacuado, calentamiento, enfriamiento y descarga.

Estructura metalúrgica.

A la temperatura de trabajo (100° mayor que la temperatura de fusión del eutectico) la composición de la aleación se estabiliza sobre el lado rico en Zirconio del punto eutectico. Por ello una estructura típica observada despues del brazing consiste en la aleación eutectica conteniendo exceso de Zr en la forma de granos alfa.

La zona afectada por el calor de los metales base exhiben una estructura tipo Widmanstätten recocida.

Para el caso de ciclos de brazing donde la temperatura llega a 1050°C en 45 seg, permanezca en esta temperatura 20 seg. y se enfríe a 15 °C/seg. provoca que la zona adyacente de la vaina llegue hasta la fase beta y que luego al enfriarse se observe la estructura Witmanstätten mencionada.

Si la temperatura en el brazing es más elevada se disuelve mas Zr en la fase líquida y la aleación penetra mucho en el área adyacente, lo cual debe ser limitado a menos del 10 % del espesor de la vaina que es de 0,4 mm.

El control de la calidad de este proceso se efectúa comenzando con la verificación dimensional de las piezas a unir ya que un ajuste apropiado de ambas es vital para una buena unión. La cantidad del aporte se controla por peso, volumen y espesor del depósito cuando corresponde. Un exámen visual con lupa después del brazing permite detectar zonas con brazing incompleto, erosión, exceso de penetración y contaminación fuera del área de unión.

Se hacen ensayos destructivos sobre testigos. Usualmente metalografía, ensayo de corte y fatiga y corrosión en autoclave.

BIBLIOGRAFIA

- (1) I. Dymment et al. Informes Internos del Depto. de combustibles Nucleares (1970-1974) (no publicados).
- (2) J. Celora et al. Influencia de la etapas de producción de polvo de UO_2 sobre su estructura y calidad de pastillas resultantes. (en vias de publicación) Presentado en Conf. Internacional de Cerámica, Inglaterra, 1979.
- (3) A.M. Olmedo Informe interno CNEA. Proyecto FECCA DSR 01/79 (no publicado).
- (4) A. Schueler Magnetic force Welding for Nuclear cladding Welding Journal Aug. 1968 p. 638.
- (5) K.T. Bates Brazing of Zry in nuclear Fuel. AECL 2813, 1966.
- (6) IAEA 158 Facilities and Technology needed for nuclear fuel manufacture. Symposium. Grenoble, Francia, Set. 1972.
- (7) R.A. Holt et al. The Role of Zirconium alloy metallurgy in the fabrication of Candu Fuel. AECL. 5107.

DIAGRAMA DE FLUJO
FABRICACION B.C. ATUCHA I

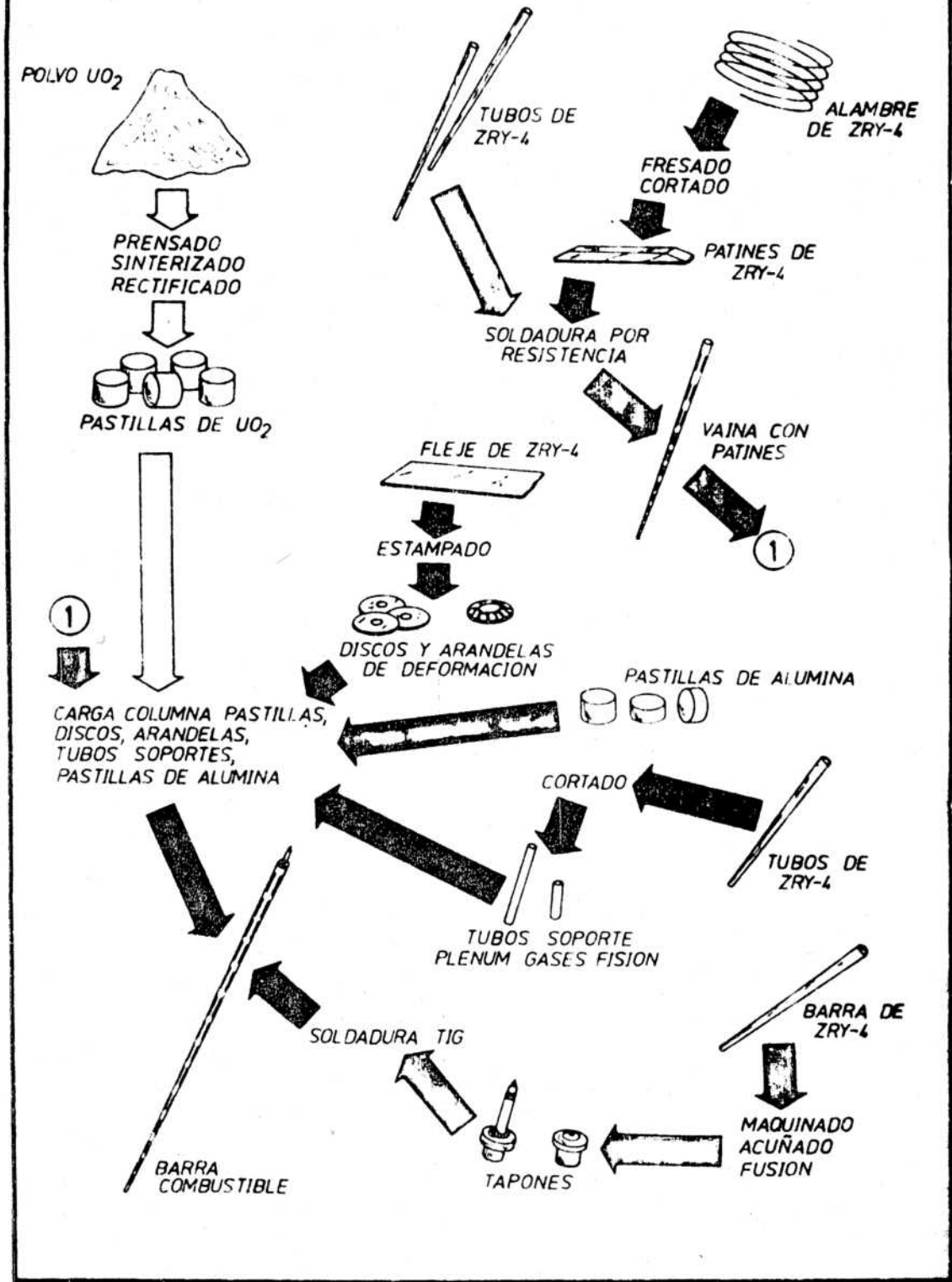


Fig.7.1

ESQUEMA DE FABRICACION DE BARRAS COMBUSTIBLES ATUCHA I.

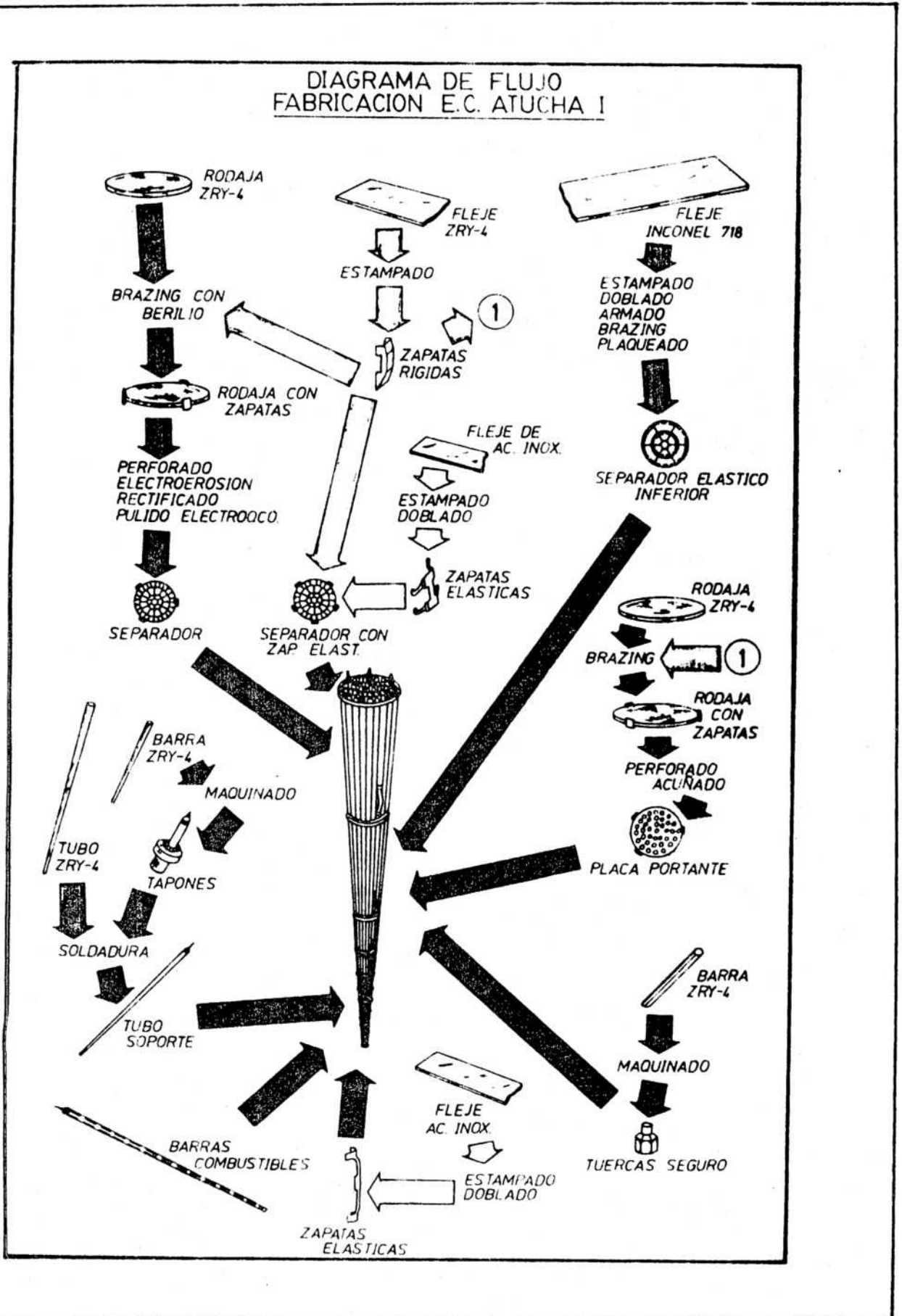


Fig.7.2: ESQUEMA DE FABRICACION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES ATUCHA I

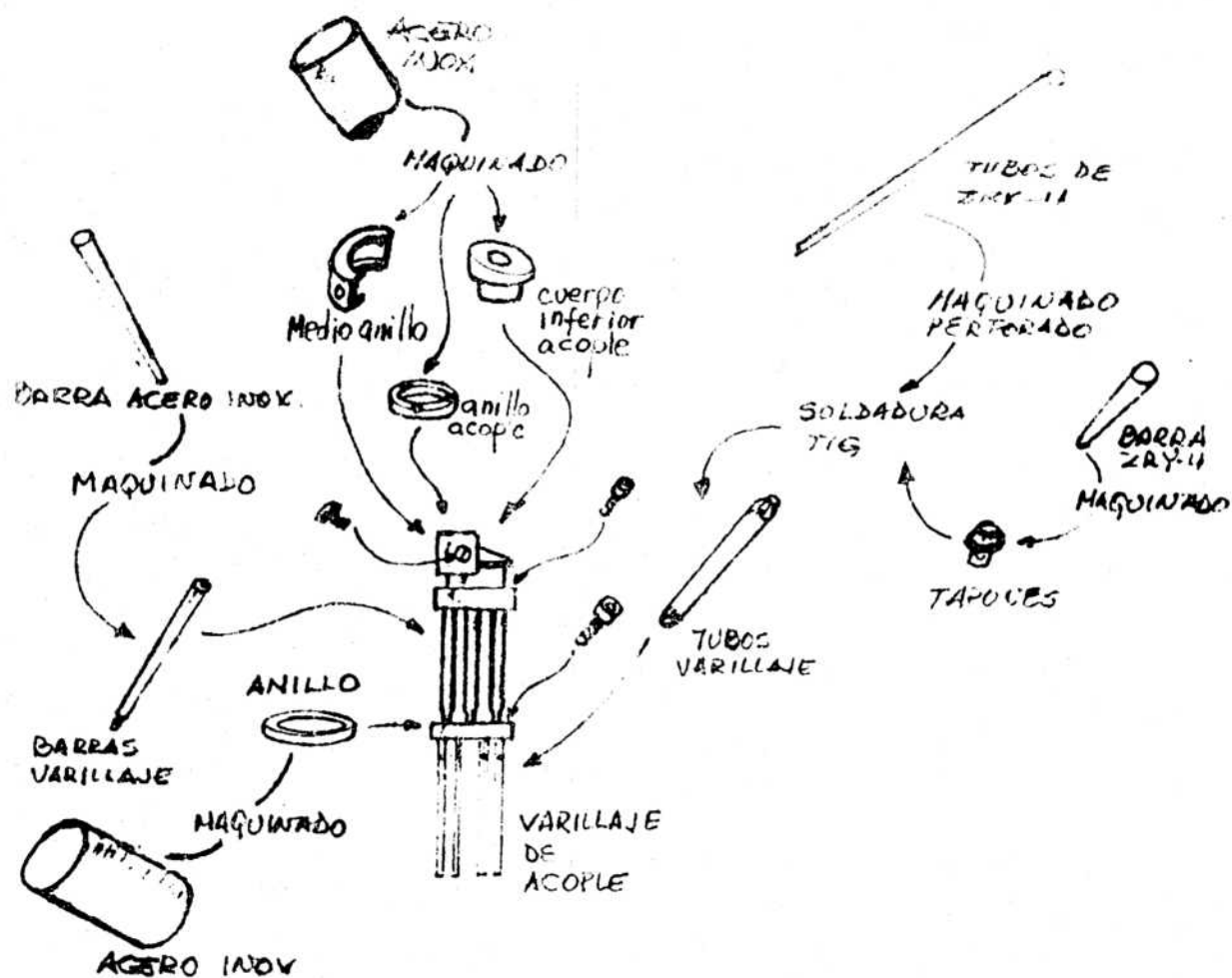


Fig.7.3: FABRICACION DE VARILLAJE Y MONTAJE.

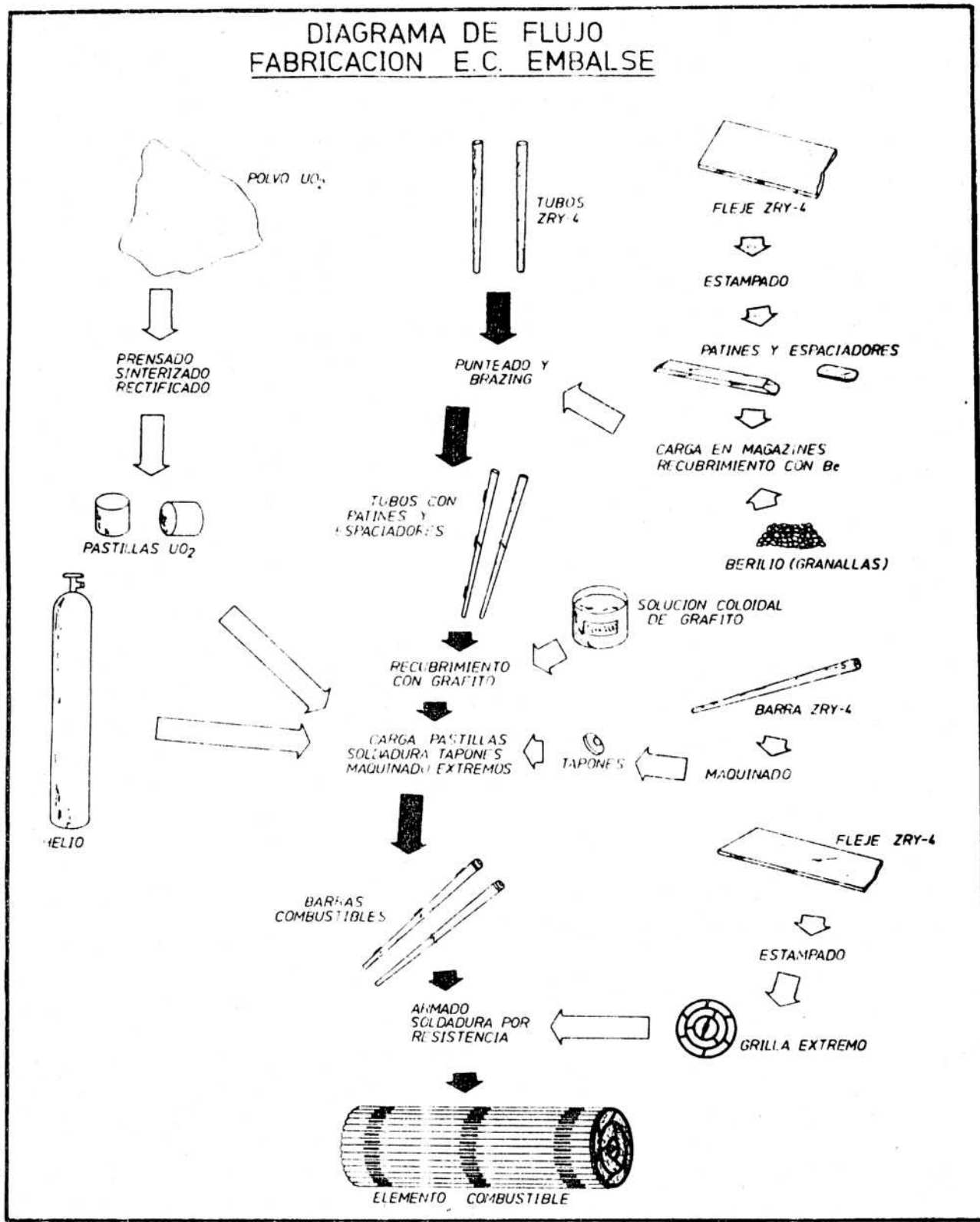


Fig. 7.4: ESQUEMA DE FABRICACION DE ELEMENTOS COMBUSTIBLES TIPO CANDU.

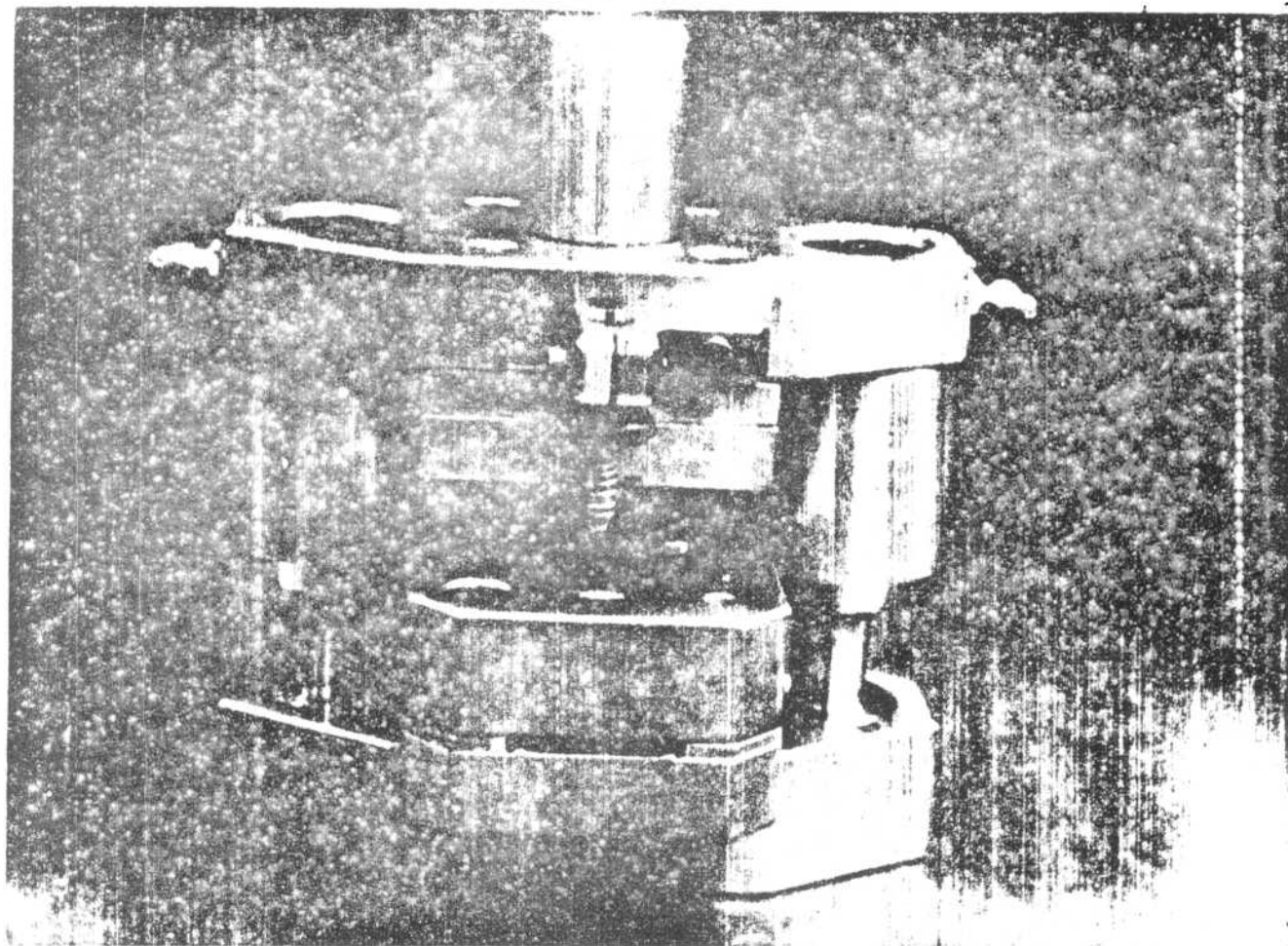


Fig.7.5:MATRIZ PARA ESTAMPADO DE ESPACIADORES DE B.C. TIPO CANDU.

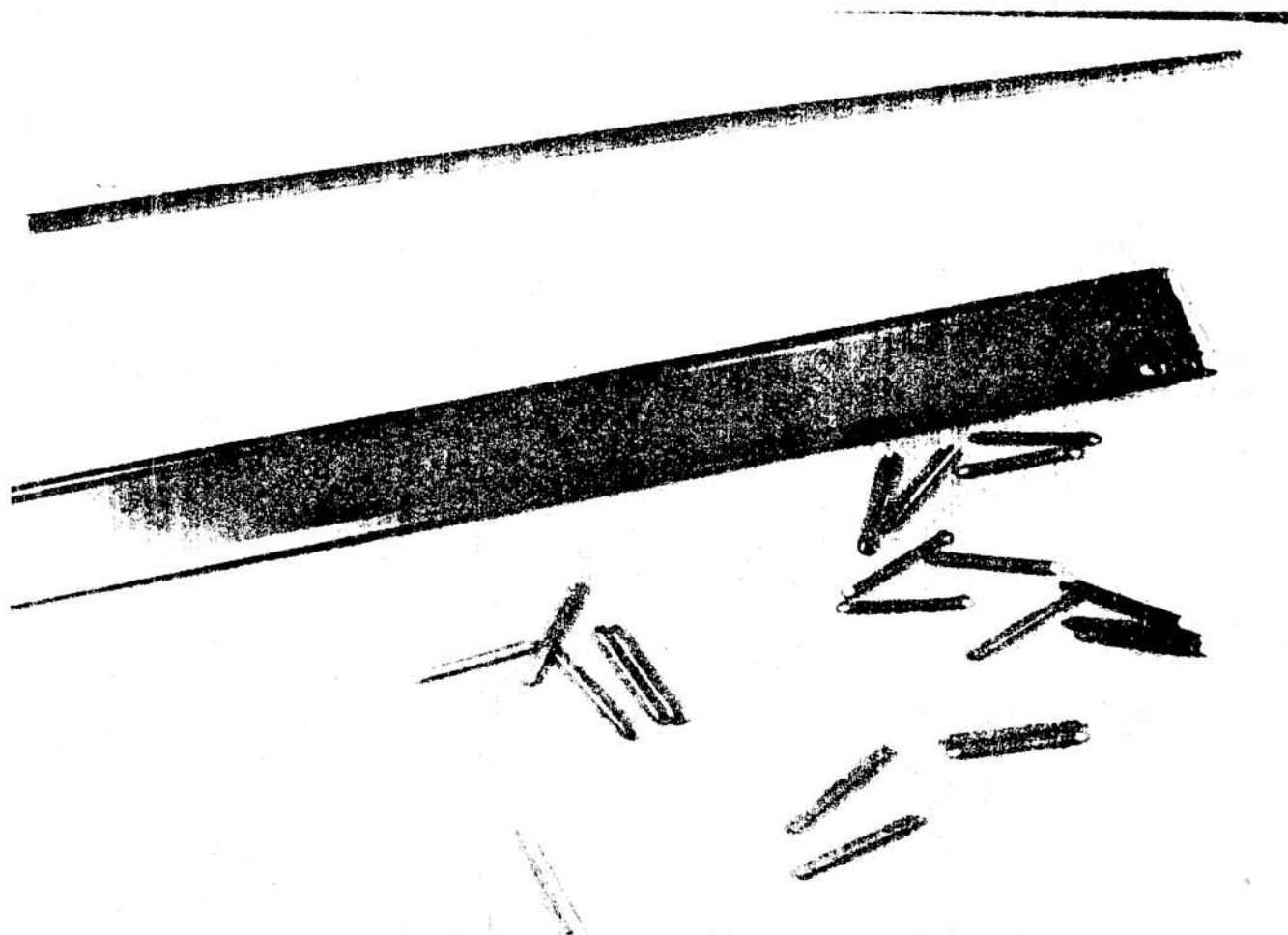


Fig.7.6:FLEJE DE Zry-4 y ESPACIADORES ESTAMPADOS.

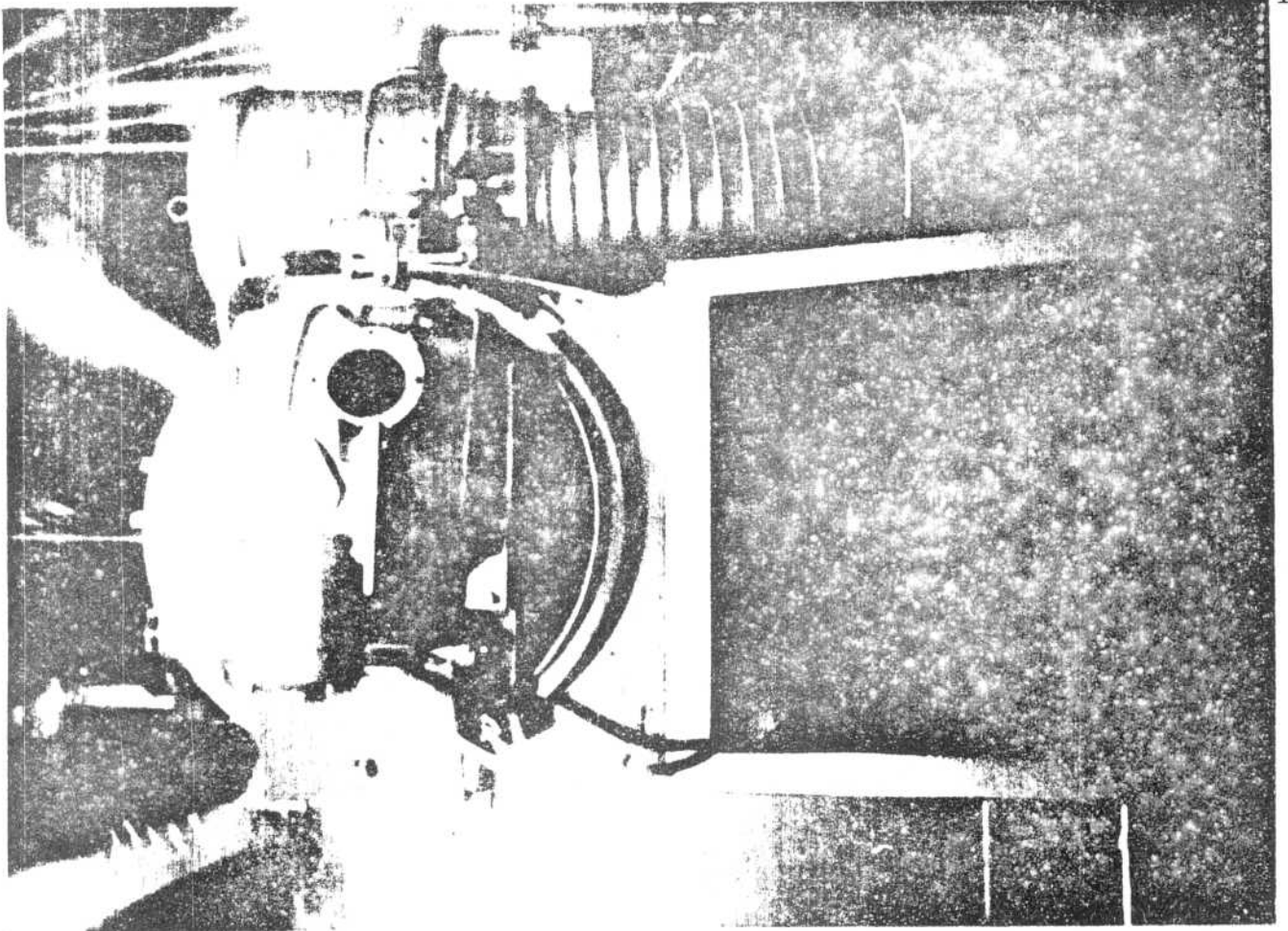


Fig.7.7: METALIZADORA AL VACIO PARA PATINES Y ESPACIADORES.

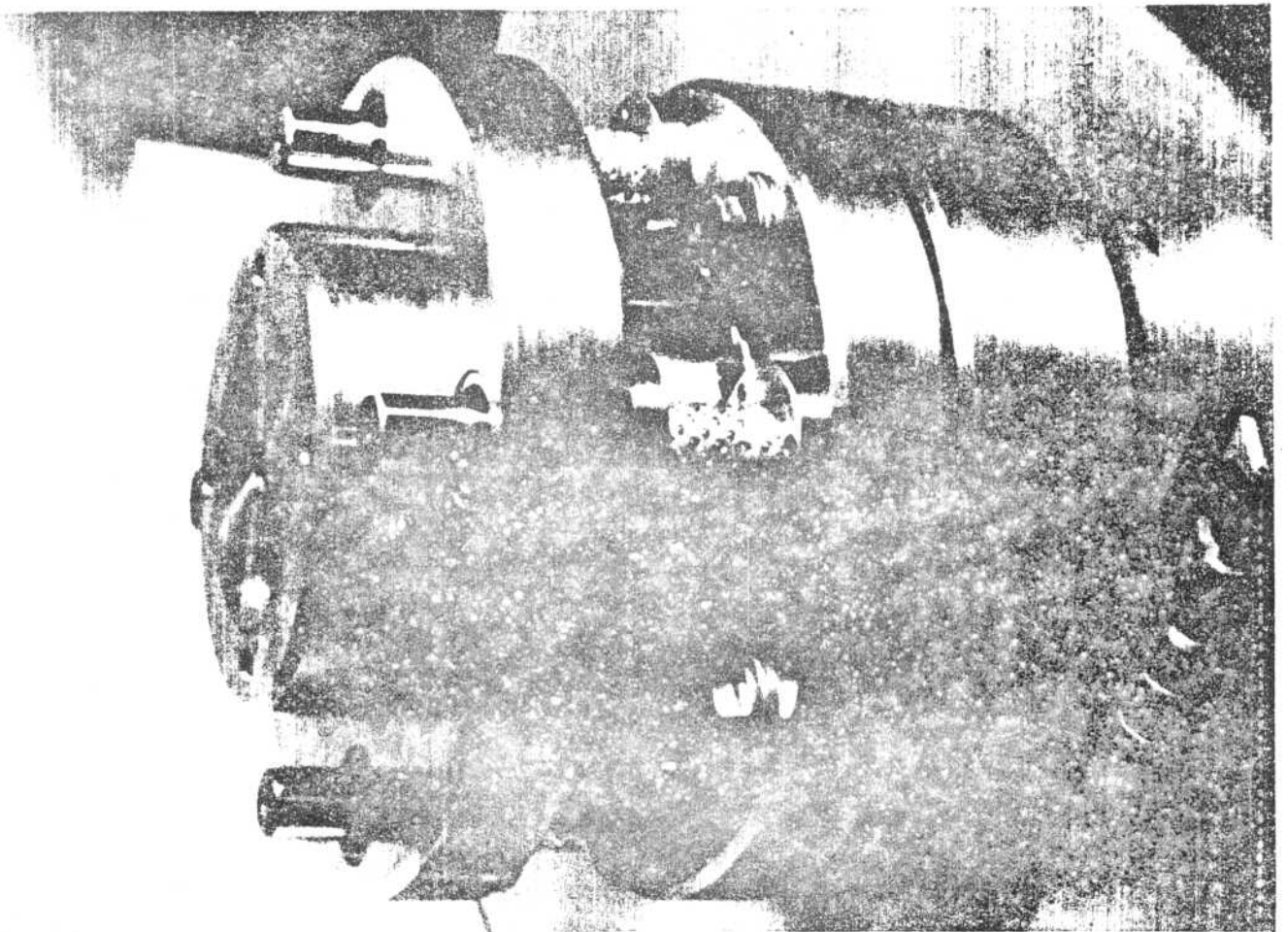


Fig.7.8: MATRIZ PARA ESTAMPADO DE GRILLAS PARA E.C. TIPO CANDU.

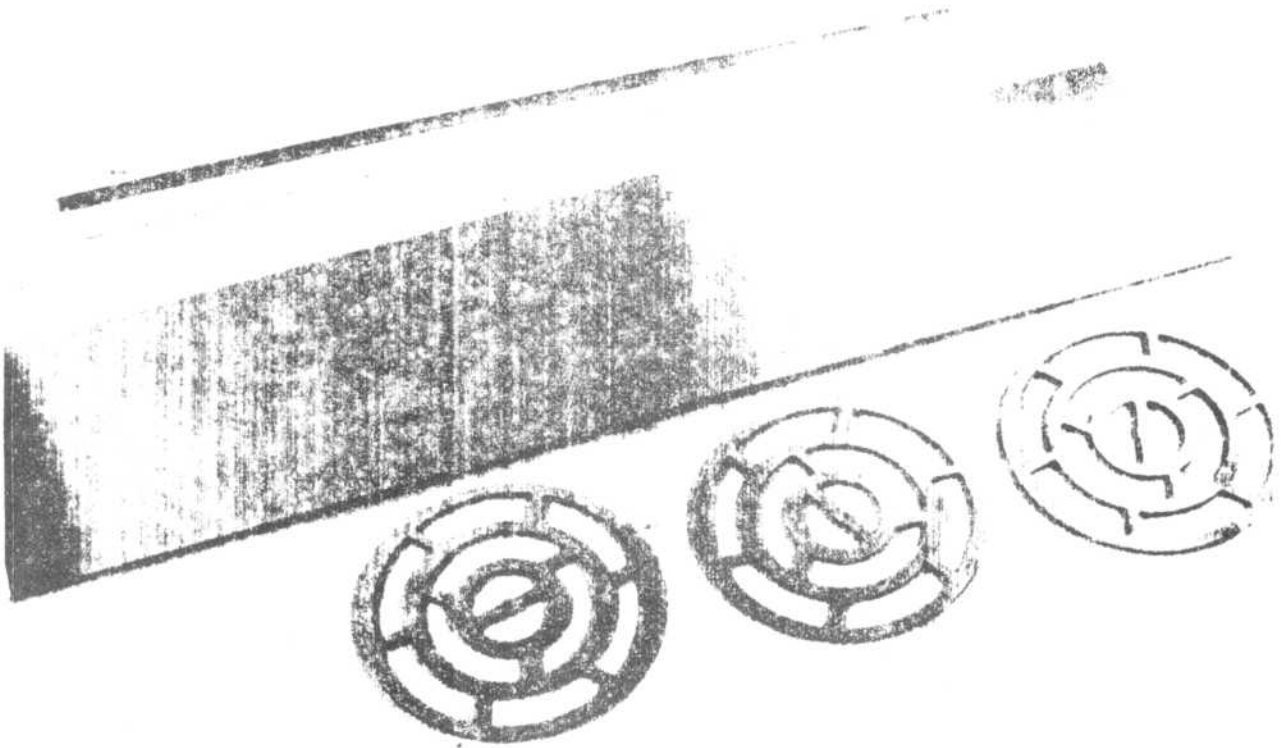


Fig.7.9: FLEJE DE Zry-4 Y GRILLAS ESTAMPADAS.

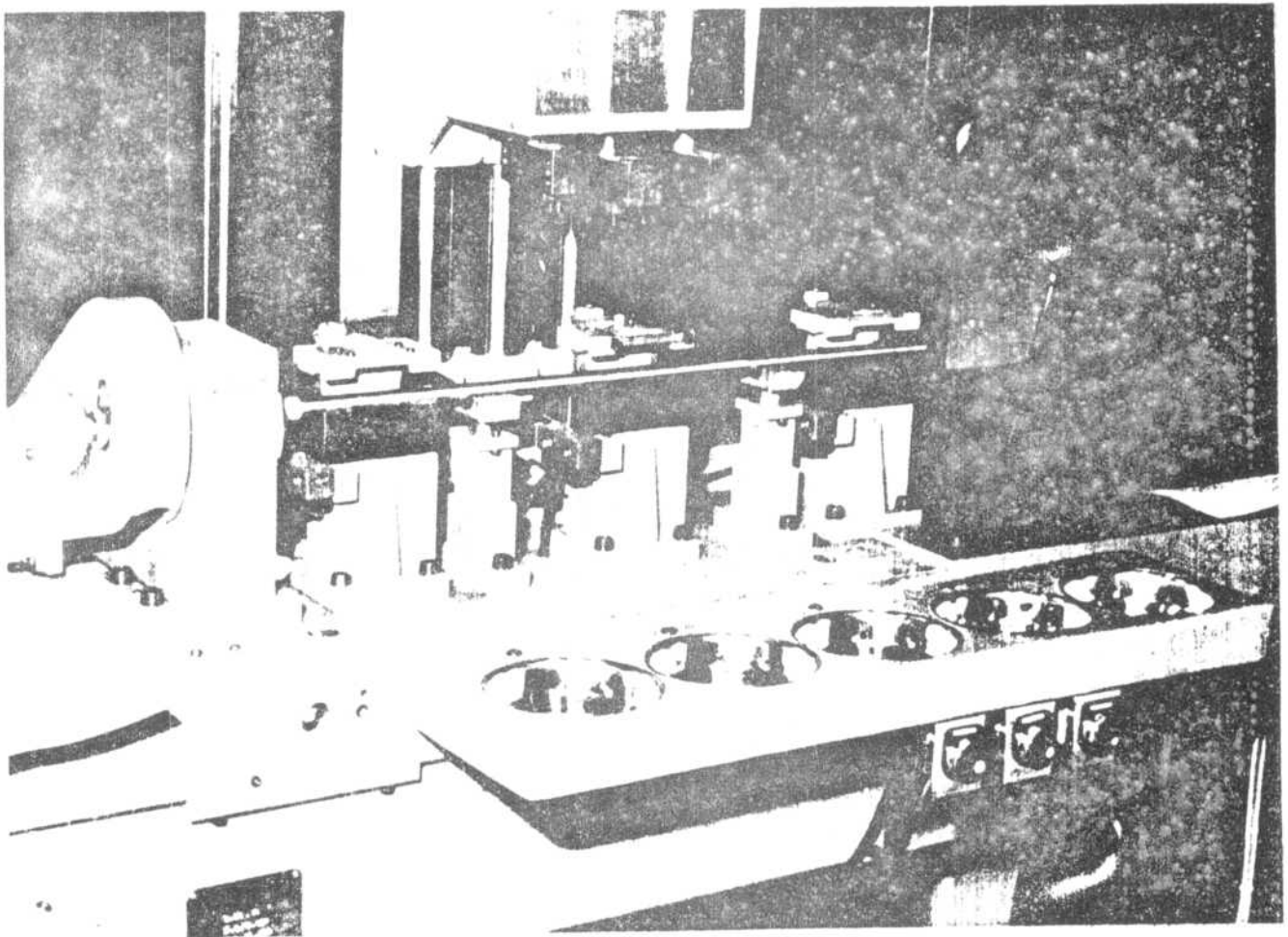


Fig.7.10: EQUIPO DE SOLDADURA POR DESCARGA CAPACITIVA DE PATINES Y ESPACIADORES

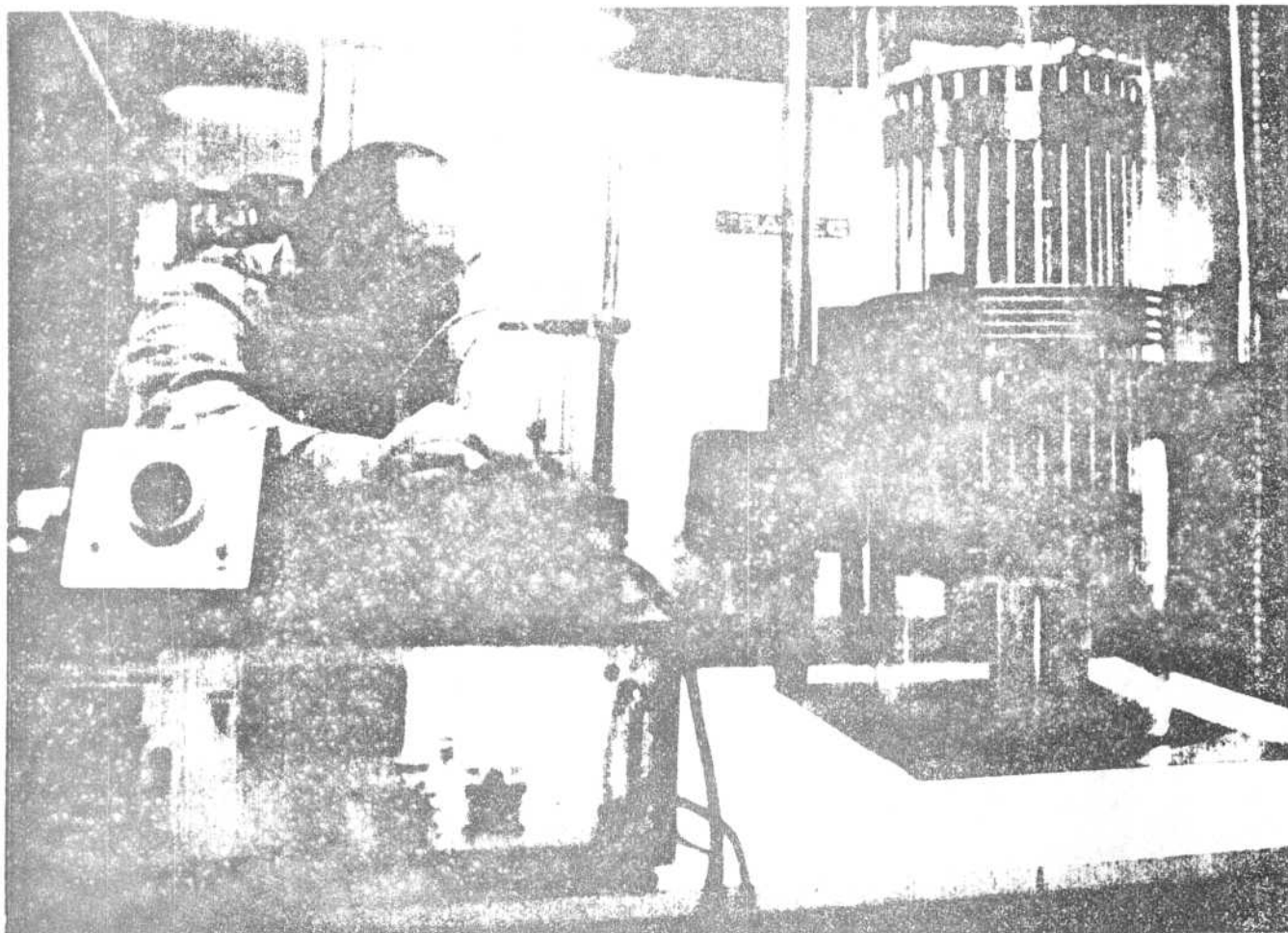


Fig.7.11:OPERACION DE SOLDADURA POR BRAZING DE PATINES DE B.C. TIPO CANDU.

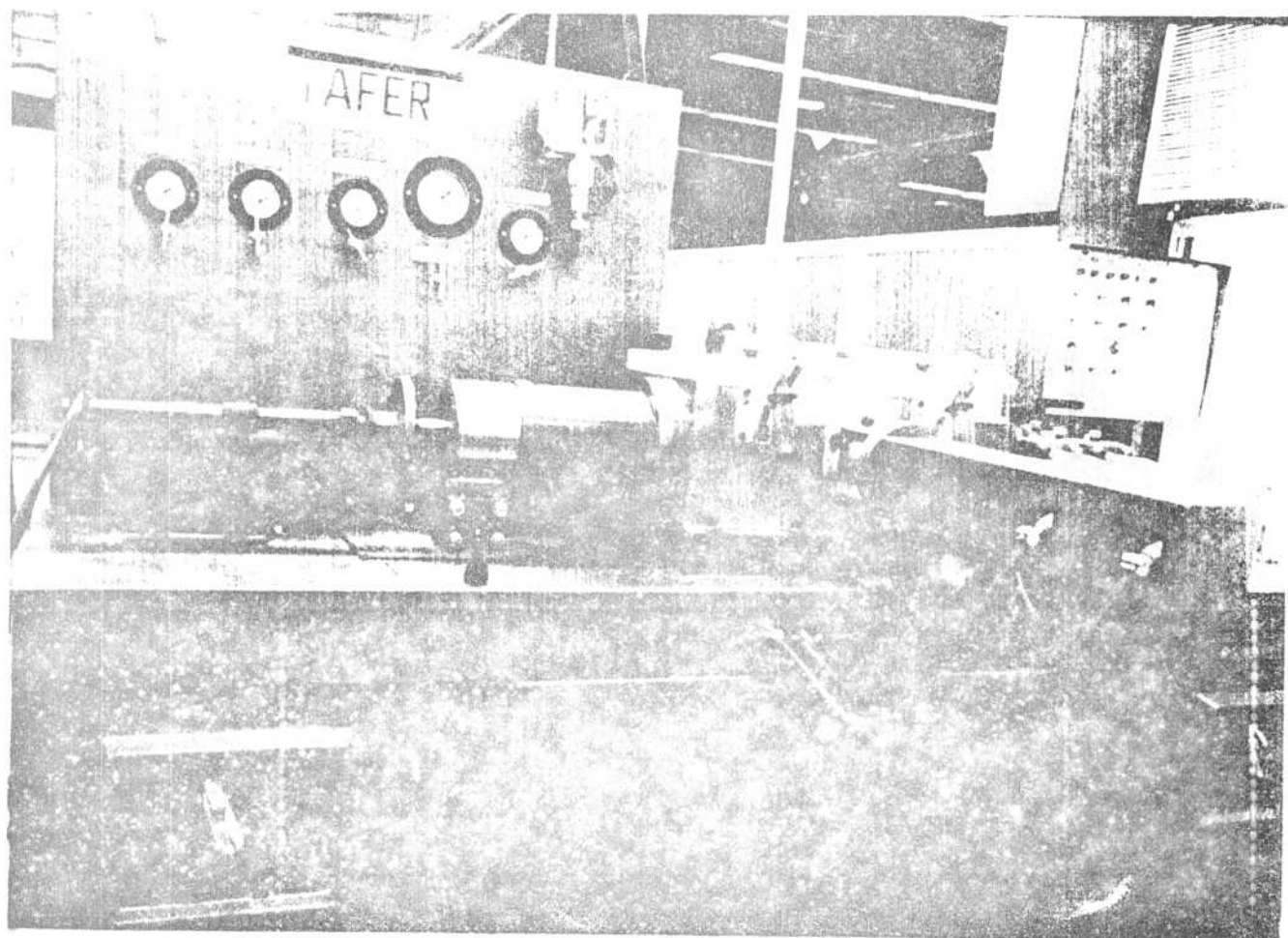


Fig.7.12:EQUIPO DE SOLDADURA POR RESISTENCIA DE TAPONES (DE LABORATORIO)

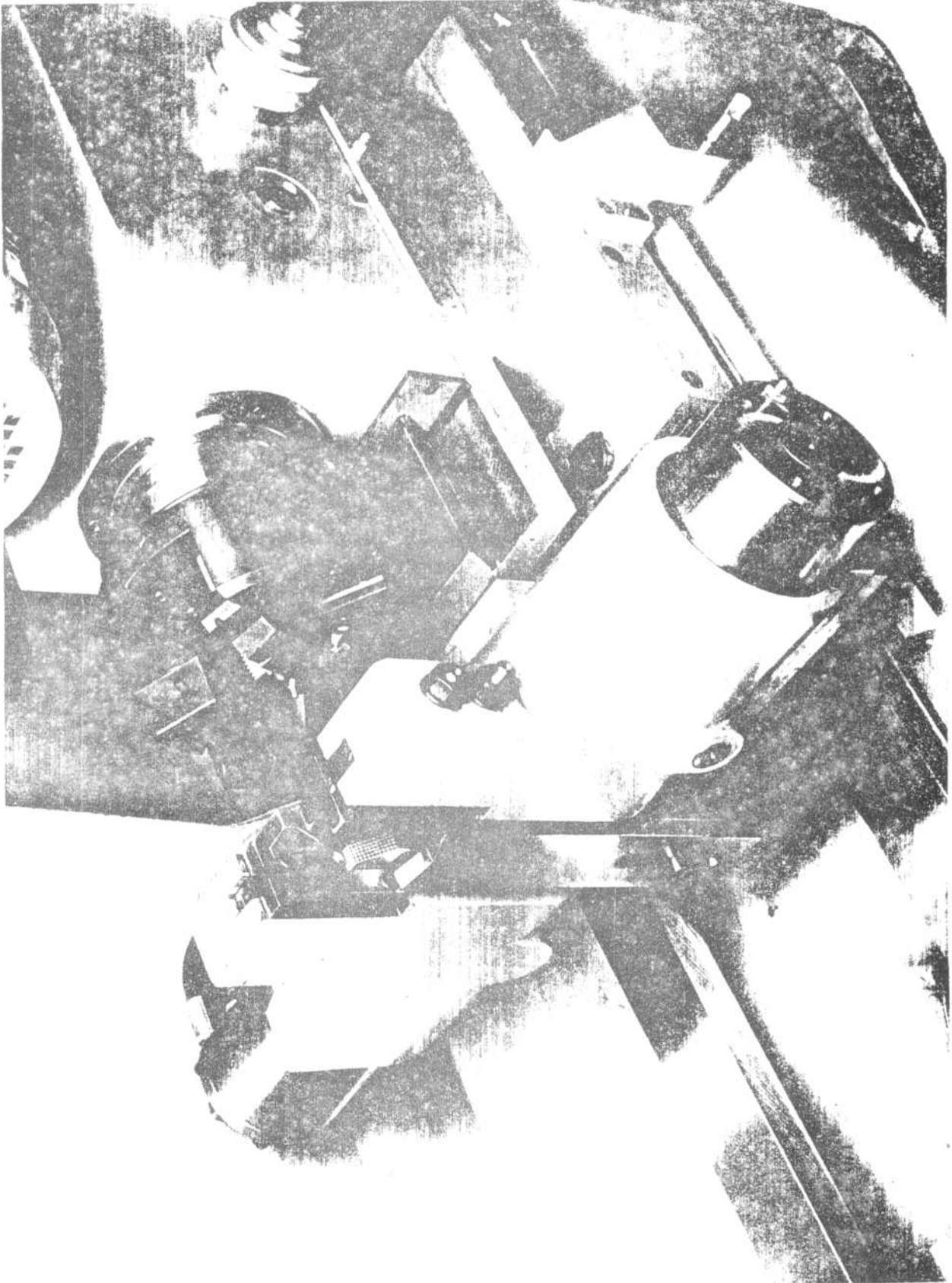


Fig.7.13: EQUIPO PARA EL MAQUINADO DE EXTREMOS DE B.C TIPO CANDU.

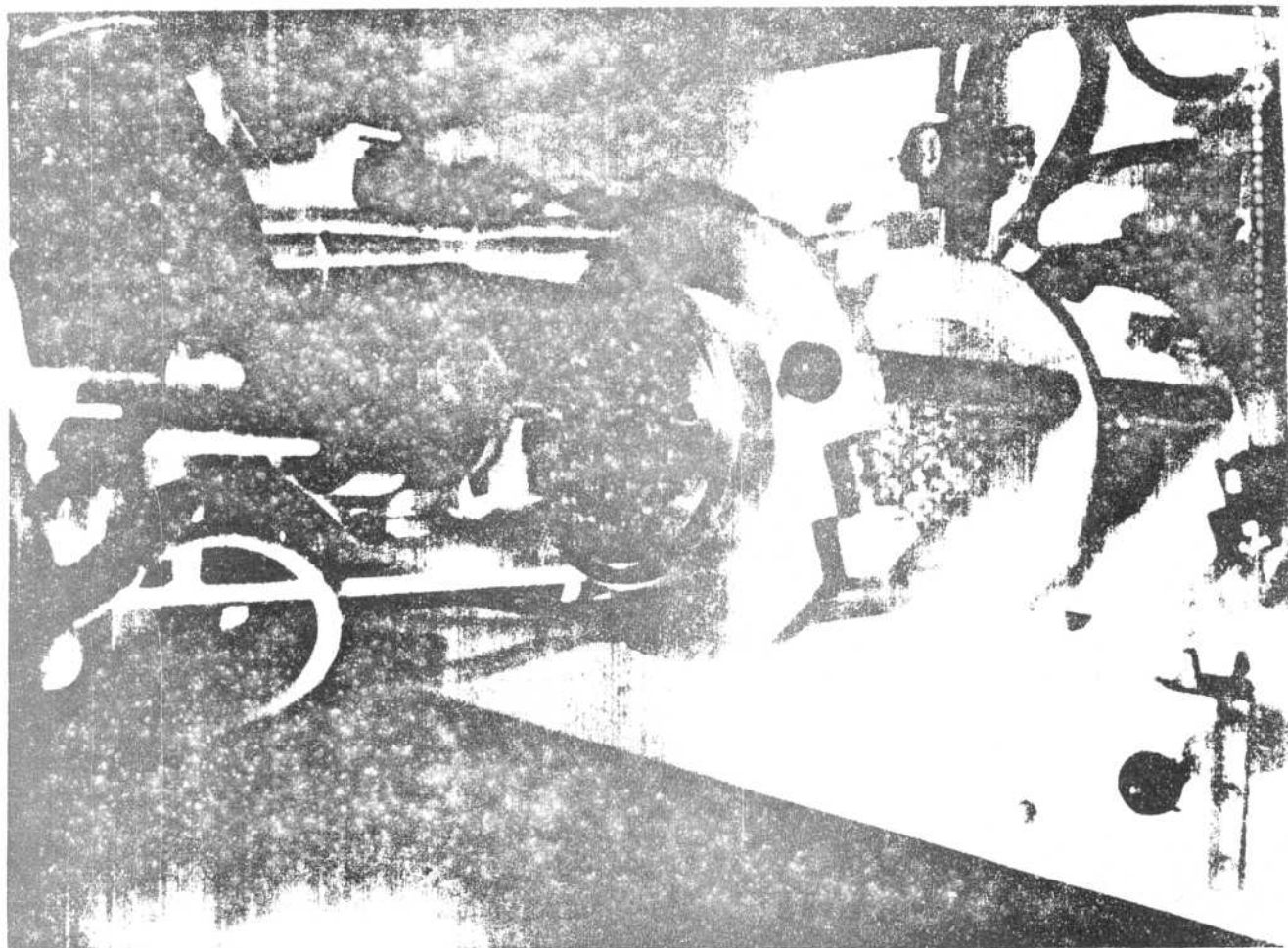


Fig.7.14:DISPOSITIVO DE ENSAMBLE Y SOLDADURA DE GRILLAS TIPO CANDU.

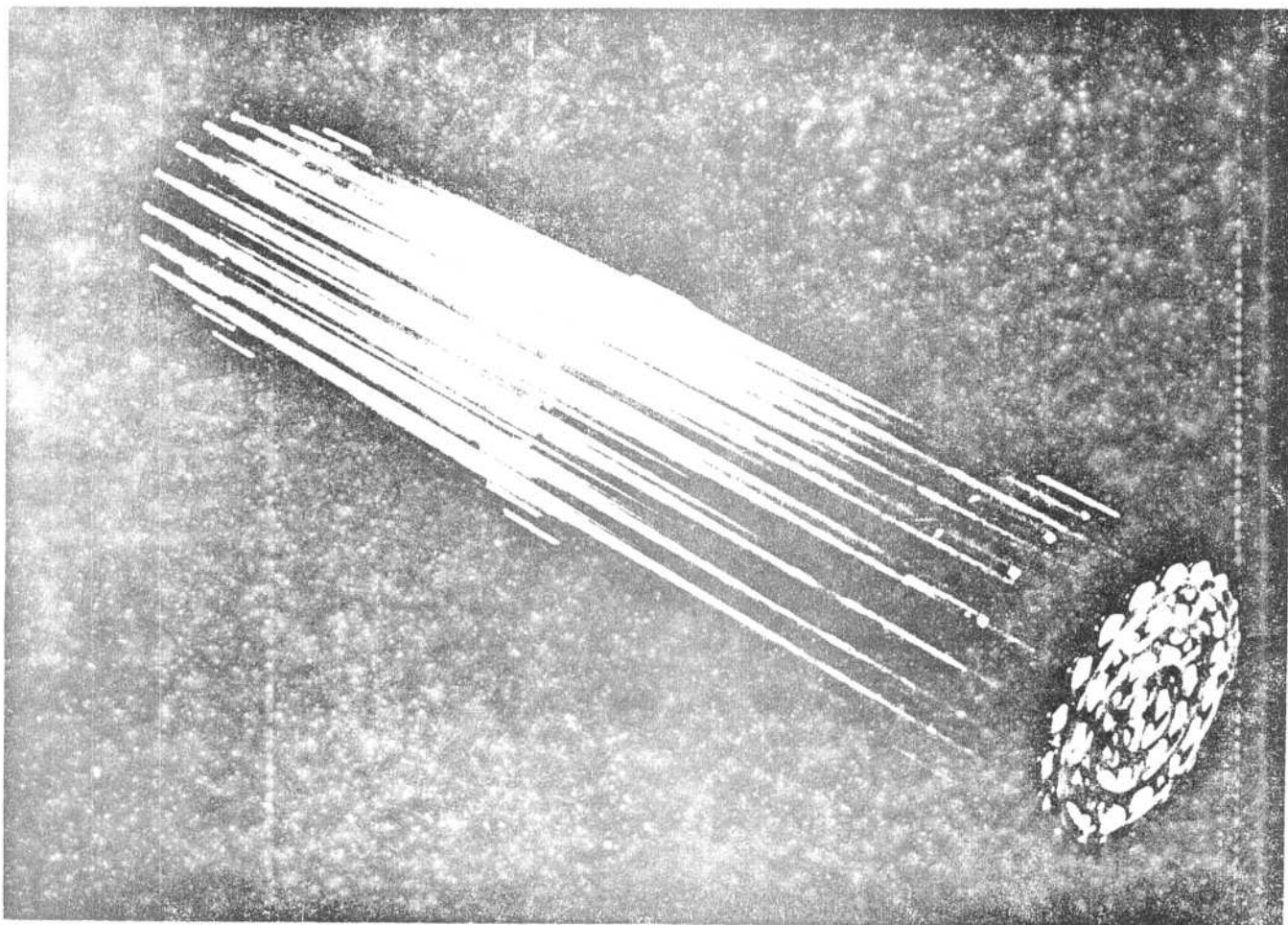


Fig.7.15: E.C. TIPO CANDU

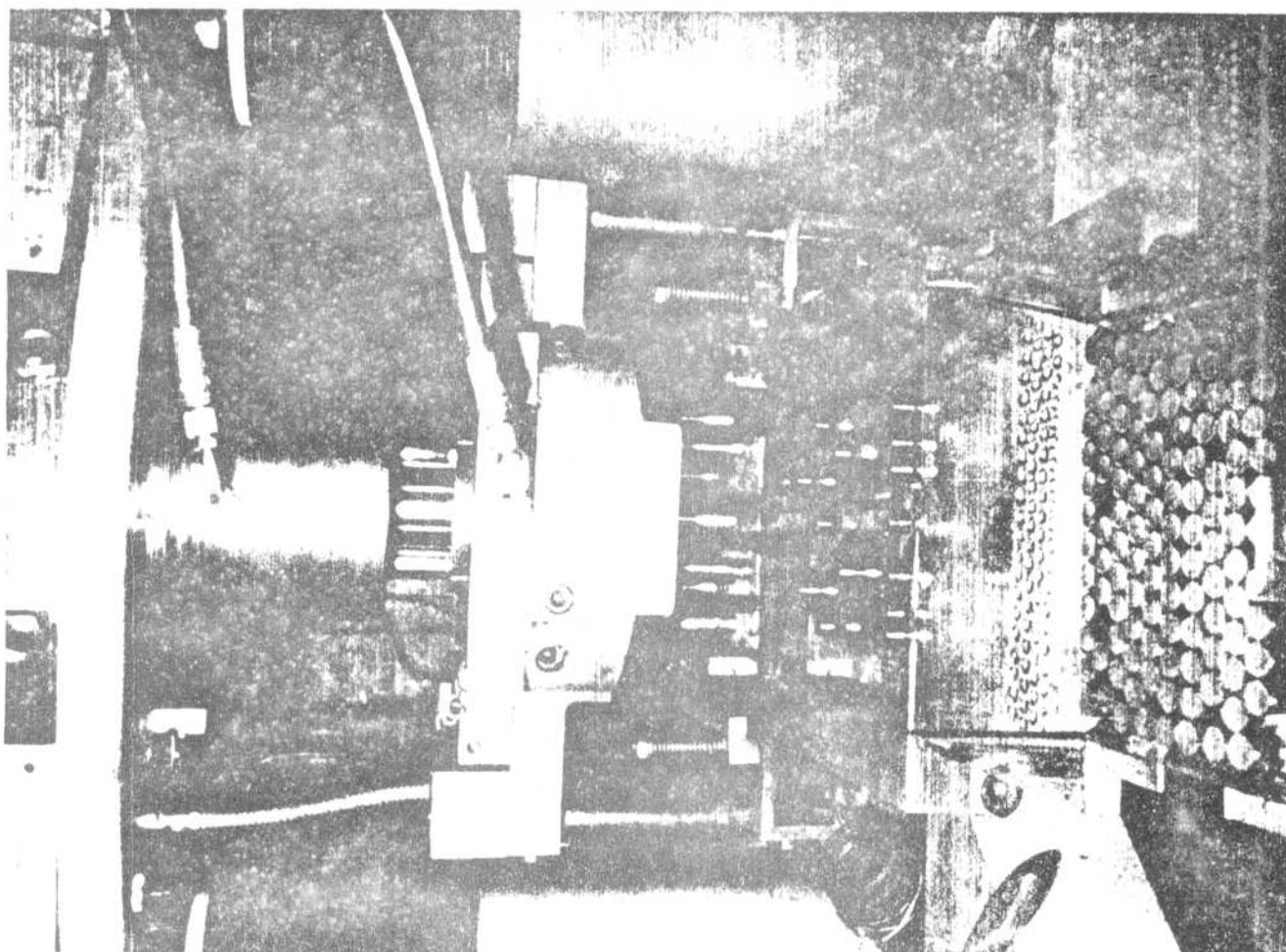


Fig.7.16: **PRENSADO DE PASTILLAS DE UO_2 CON MATRIZ MULTIPLE**

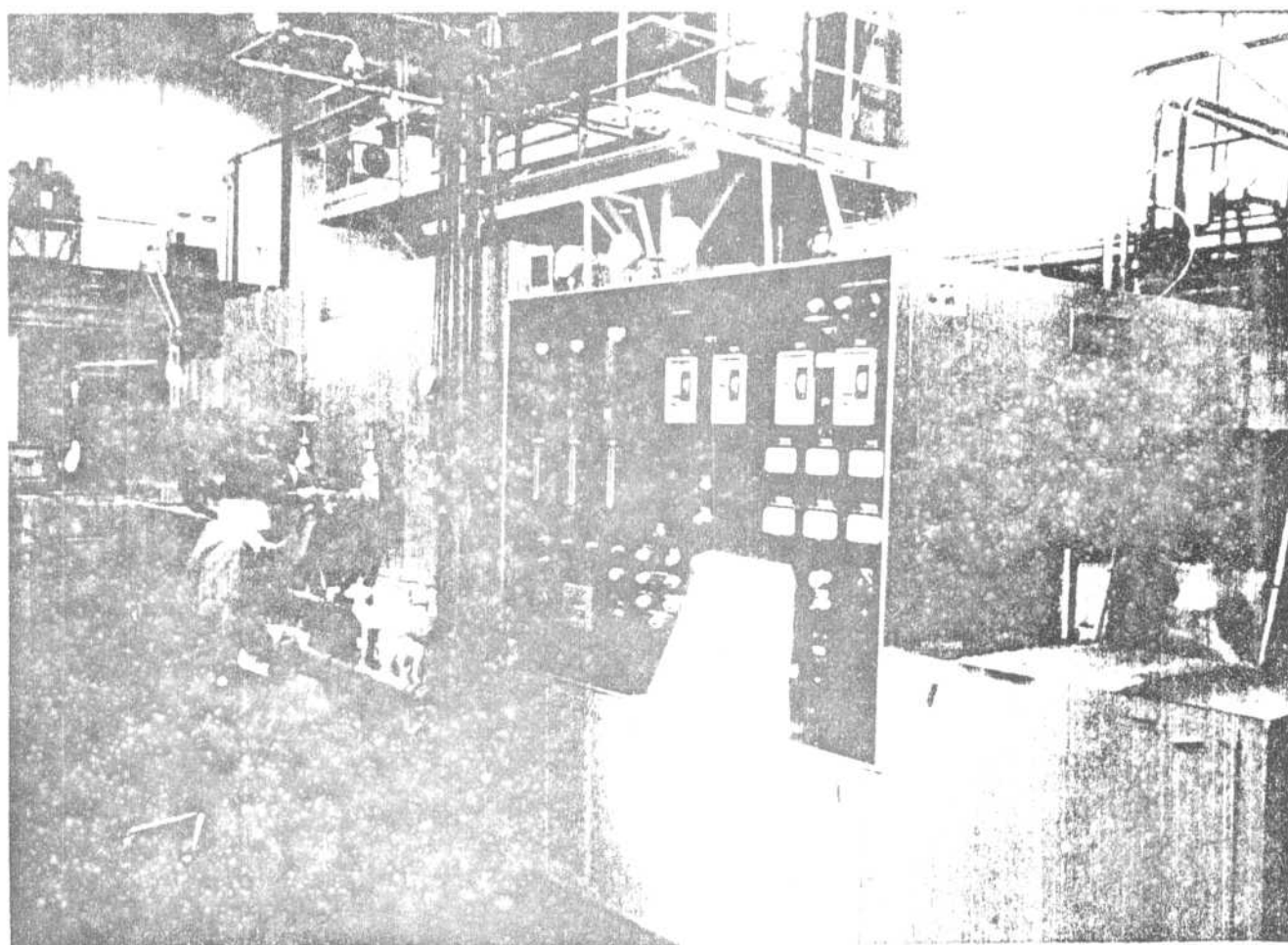


Fig.7.17: **HORNO DE SINTERIZADO DE PASTILLAS DE UO_2**

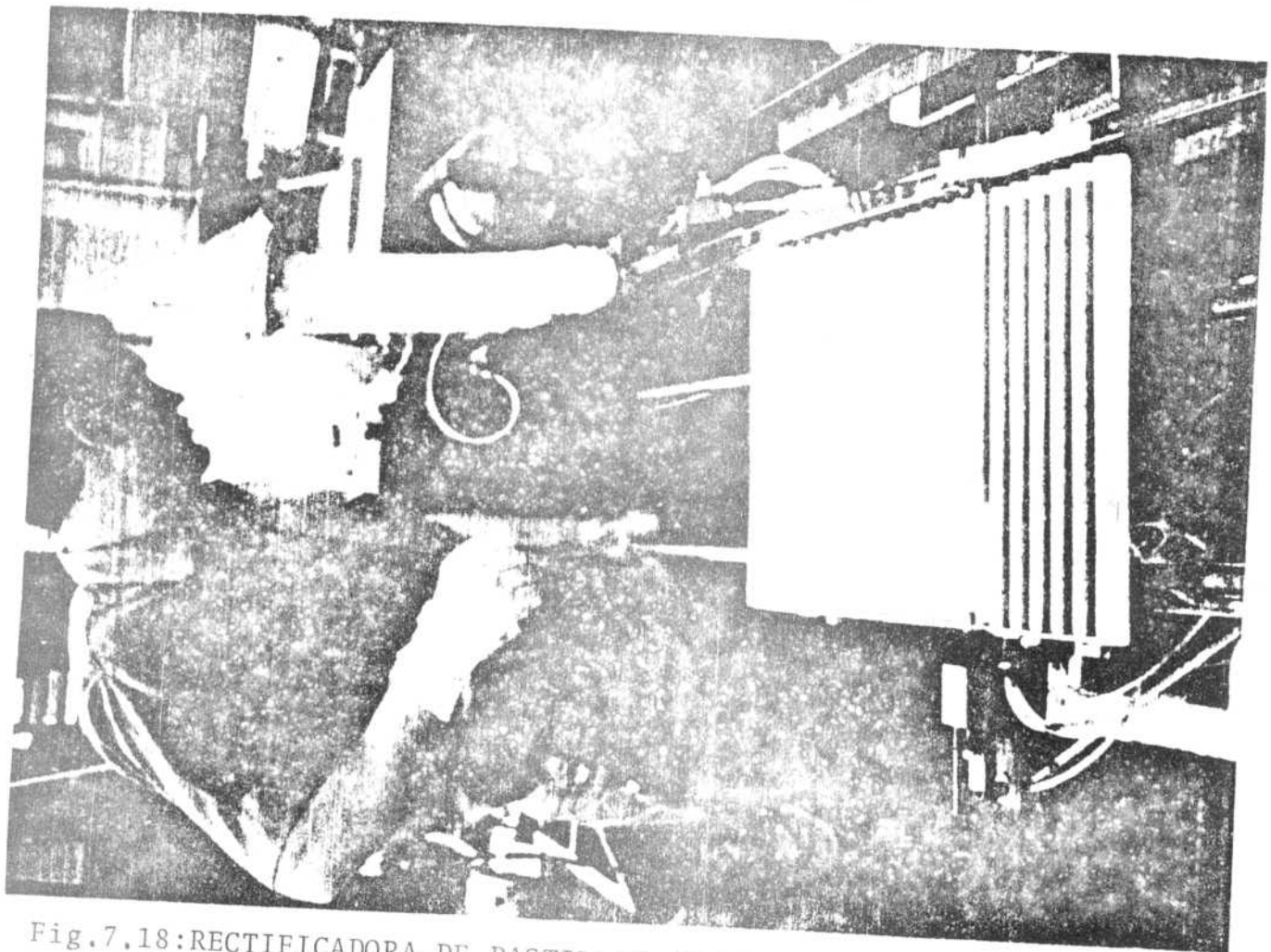


Fig.7.18:RECTIFICADORA DE PASTILLAS DE UO_2

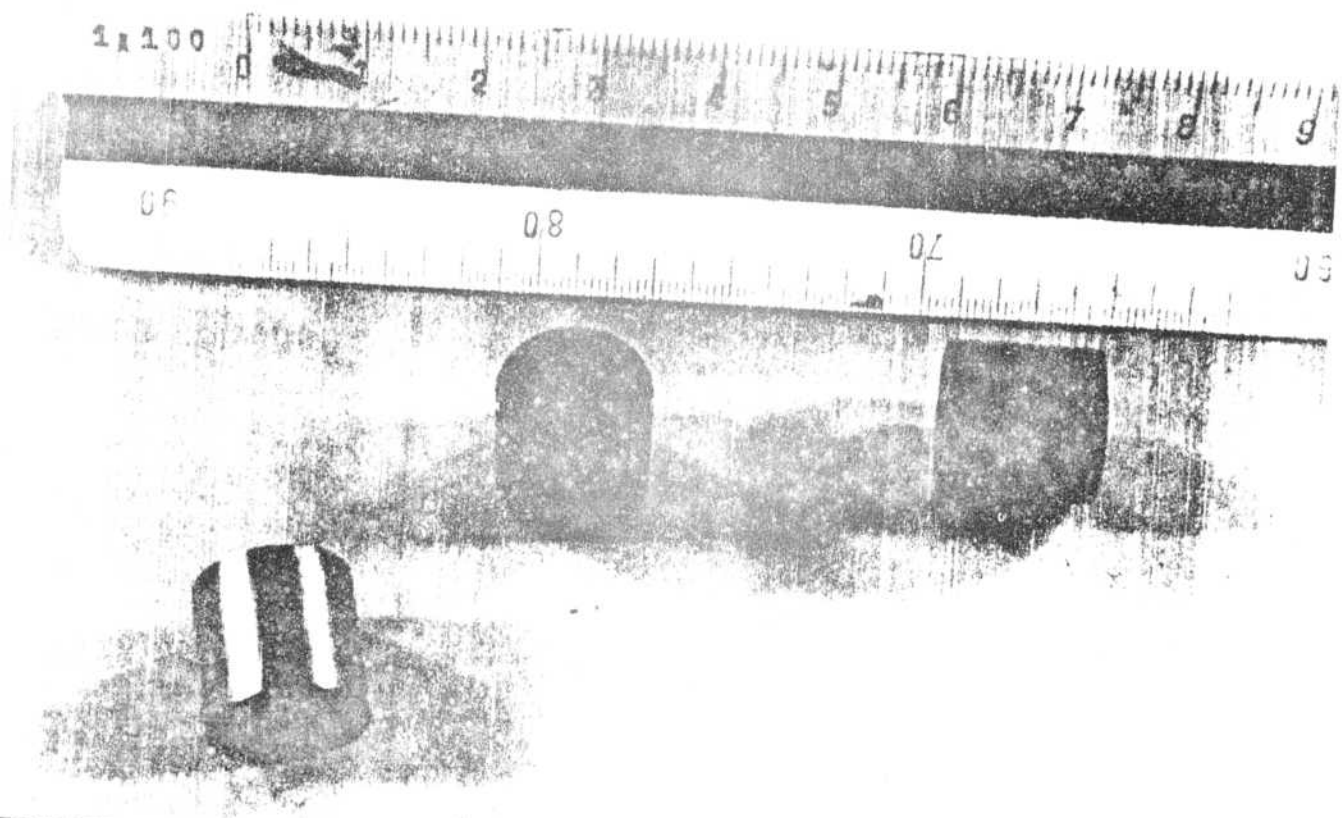


Fig.7.19: PASTILLAS DE UO_2

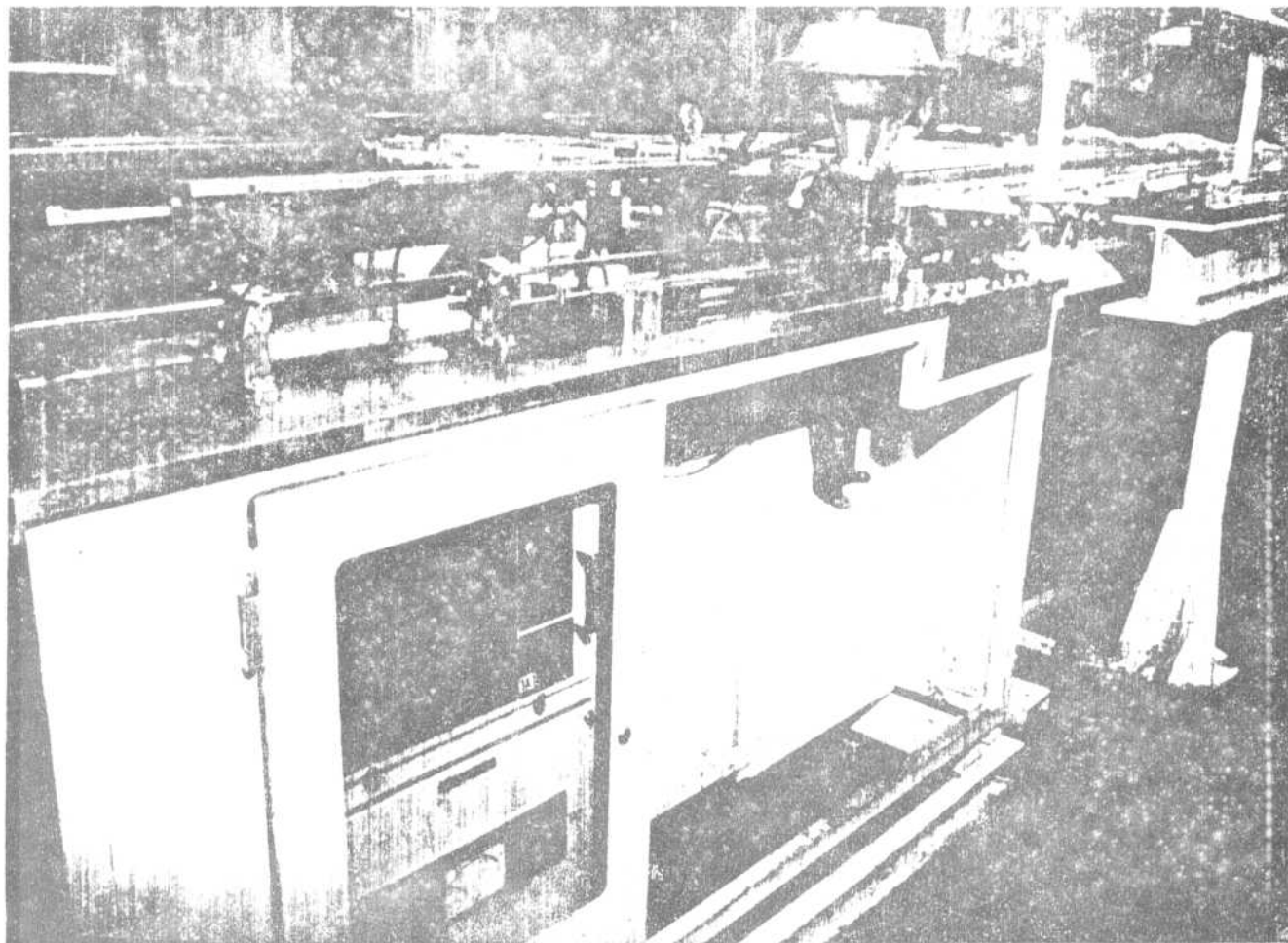


Fig.7.20: EQUIPO DE SOLDADURA DE RESISTENCIA DE PATINES DE B.C. ATUCHA I

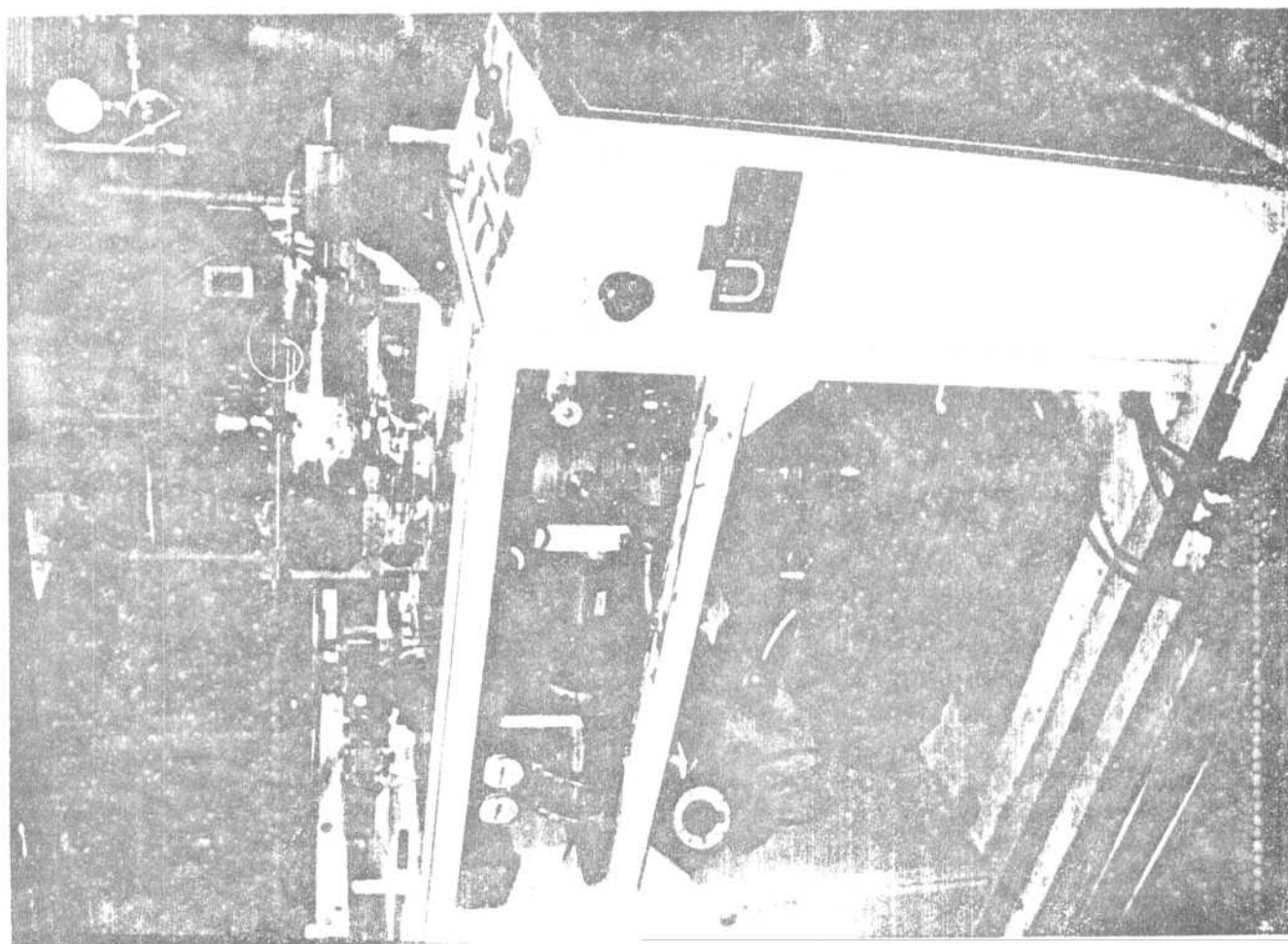


Fig.7.21: EQUIPO DE SOLDADURA TIG DE TAPONES DE B.C. ATUCHA I.

8. GARANTIA DE CALIDAD

8.1. Métodos y Sistemas

El plan de garantía de calidad para el combustible nuclear involucra tanto al diseñador y fabricante como a la operación del mismo.

En forma general un plan de garantía de calidad consiste por un lado en la verificación del cumplimiento de todos los procedimientos y pasos requeridos para concretar un producto y utilizarlo de acuerdo a lo previsto, por otro lado implica la realización de un procedimiento de control de calidad que determinado por el diseñador debe ser cumplido por el fabricante y sujeto a la auditoría del usuario.

El sistema así organizado permite asegurar una razonable confianza en la calidad del combustible, lo cual es requerido no solo para garantizar la disponibilidad sino por razones de seguridad considerando que el combustible es la fuente principal de productos radiactivos.

La fig. 8.1 (ref.(3)) muestra un esquema del objetivo de un Plan de Garantía de calidad donde se indican las etapas en el proceso de suministro de combustible y la participación de las tres organizaciones principales en el mencionado plan:

- Usuario (Central Nuclear)
- Ingeniería de Combustible
- Fabricante

Los sistemas o métodos empleados para la implementación y aplicación de un plan de Garantía de Calidad en Combustibles Nucleares ha seguido líneas diferentes en EEUU (y Europa) y en Canadá.

La razón principal es que los países que han elegido la línea de Uranio enriquecido han seguido la filosofía de EEUU donde el Plan de Garantía de Calidad ha sido impuesto por la Nuclear Regulatory Commission (NRC) en base al Código de Reglas Federales (CFR-Code of Federal Regulations). De ellas el Apéndice B a las 10 CFR 50 "Quality Plant and fuel Processing Plants" emitida en 1970, se ha convertido en la "Constitución" básica de la Garantía de Calidad en EEUU y los países que siguen esas reglas.

La fig. 8.2. da un listado de los 18 puntos que la integran y recientes normas tales como la ANSI standard N45.2. donde se desarrollan normas para implementar cada uno de los 18 puntos mencionados.

En el caso de Canadá el sistema de Garantía ha evolucionado desde otra "optica" y es el segundo objetivo que tiene el plan de garantía de calidad (el primero era garantizar la seguridad por razones de salud pública) que es alcanzar el nivel de performance establecido en el diseño, con lo cual quedaría automáticamente cumplido el de seguridad.

Esto llevó a la CSA (Canadian Standard Association) a emitir los CSA Z-299, serie, que establece cuatro niveles que son:

CSA Z 299.1. Requiere un Programa de Garantía de Calidad que implica la documentación con controles visibles desde la recepción de un contrato hasta el suministro del producto de todas las actividades incluidas las de diseño y gestión (management).

CSA Z 299.2 Requiere un Programa de control de calidad que implica demostrar que tanto la inspección y la fabricación están controladas desde la recepción del contrato hasta el suministro del producto incluido los proveedores.

La CSA Z 299.3 Es una Programa de Verificación de calidad donde se espera que las inspecciones estén planificadas y exista un control elemental en compras y procesos especiales.

La CSA Z 299.4 es un Programa de inspección lo cual implica una inspección del producto antes de ser despachado .

La forma de determinar el nivel de calidad que debe aplicarse ha dado lugar a métodos empíricos como el de la fig. 8.3.

En el caso del Combustible nuclear, no obstante queda determinado que se aplica el nivel 1 (CSA Z 299.1) si se cumplen las condiciones siguientes:

- El EC es un nuevo diseño
- El EC es para primera carga
- El fabricante produce el diseño de detalle por primera vez.
- Se garantiza el quemado o la operación de la planta.

Si ninguno de esos requisitos es de aplicación se puede recurrir al nivel 2 (CSA Z 299.2).

Los métodos y sistemas mencionados no son efectivos de por si ya que se requiere una efectiva disposición del sistema productivo a producir las evidencias y registros requeridos así como seguir los pasos necesarios para desviaciones de diseño y rechazos.

En otras palabras la implementación efectiva de una Plan de Garantía de Calidad depende del conocimiento (nivel y conciencia técnica) de los distintos sectores involucrados así como la aplicación consistente de procedimientos, ensayos y análisis de resultados de control de calidad.

8.2. Ensayos de Calidad especiales en la fabricación de EC.

Existen ensayos críticos de calidad los cuales determinan en gran medida que los EC finalmente cumplan con los requerimientos de diseño.

Teniendo en cuenta la brevedad de este curso no se menciona la totalidad de los mismos sino aquellos más relevantes y de carácter especial.

8.2.1. Metalografía Cuantitativa.

Como se ha descripto en los puntos 4., 5., 6. y 7. de este curso en los últimos tiempos ha crecido el interés y la necesidad del control del tamaño y distribución de porosidad en pastillas de UO_2 por sus efectos en la densificación (y creep), aunque la densidad alcanzada sea la especificada.

El método se basa en determinar la fracción de porosidad que puede evolucionar ($< 5 \mu m$) por el análisis cuantitativo de imágenes fotográficas ampliadas de ceramografías.

Las etapas son: preparación de la muestra a analizar, las medidas microscópicas y los cálculos estereológicos.

La medición final se hace en base a fotos ampliadas donde un operador recorre con un palpador el diámetro de los poros observados y un aparato especial (ejm. Kontron MOP-3) determina el área de cada poro y la clasifica en un número de rangos prefijados.

El aparato da directamente el número fraccional de cuentas por clase o sea la función de distribución en función del área.

La aplicación de este método se ha extendido de la etapa de desarrollo a la de producción con la introducción de equipos de contaje automáticos.

8.2.2. Ultrasonido de Vainas de Zry.

Se utiliza este método para detección de defectos y para medición de espesor de pared.

En el caso de defectos se hace una inspección sobre el 100 % y la calibración de la sensibilidad y nivel de rechazo se hace contra patrones de defectos de la parte interna y externa de la vaina.

La forma, longitud y profundidad de los defectos son especificados por el cliente.

El nivel de rechazo se puede fijar al valor de la señal del defecto standard aunque a veces se pide que sea al 75 % o aún 50 % de ese valor de amplitud.

Se efectúa la determinación simultánea de defectos transversales y longitudinales. El tamaño es de aproximadamente 1 mm en longitud y profundidad igual a 10 % del espesor de pared.

La ubicación de los cabezales de ultrasonido se hace a 90° para el caso de los longitudinales y a 180° con una inclinación respecto del eje del tubo para los transversales (ver fig. 8.4)

La medición del espesor de pared se hace con un cabezal y detector denominado VIDIGAUGE que recibe simultáneamente la señal de ambas superficies de la vaina (interna-externa) y compara la diferencia de tiempo de respuesta.

Todo el conjunto de cabezales está sumergido en una cuba de agua la cual hace de medio de acople entre el detector y la pieza a medir.

El límite práctico de medición de este método es del orden de 0.025 mm,

mientras que el 10 % de espesor de pared especificado está entre 0.04 a 0.07 mm.

8.2.3. Ensayo de Pérdida de He

Un método universalmente utilizado en el control de estanqueidad de las barras combustibles es el denominado de pérdida de Helio.

El mismo consiste en detectar posibles fugas de He contenido en las barras combustibles colocando las mismas en un tubo al que se le hace vacío. Se mide la presencia de He por medio de un espectrómetro de masas.

La sensibilidad del método es de aproximadamente 10^{-9} cm³/seg.

Las pérdidas pueden en principio producirse por defectos en la vaina, soldadura de tapones y el método descrito ha demostrado ser altamente confiable.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Seminario Regional sobre Calidad en la tecnología de Combustibles Nucleares.
Buenos Aires, Nov.1979. Proceedings a ser Publicado).
- (2) Nuclear fuel Quality Assurance.
Seminario, Oslo, May 1976. Proceedings Series IAEA.
- (3) Quality Assurance and Control in the Manufacturing of Metal Clad UO_2 Reactor Fuel.
IAEA Technical Series N°173.
- (4) J. Celora et al. Aplicaciones de la metalografía Cuantitativa
al Control de Calidad de pastillas de UO_2 .
Seminario Regional Ref. 1
- (5) B. Larson The manufacture of Cladding Tube.
IAEA -158 Proc. Simpos. Grenoble.Set. 1972 p.219

Fig. 8.1. : Objetivos del Plan de Garantía de Calidad

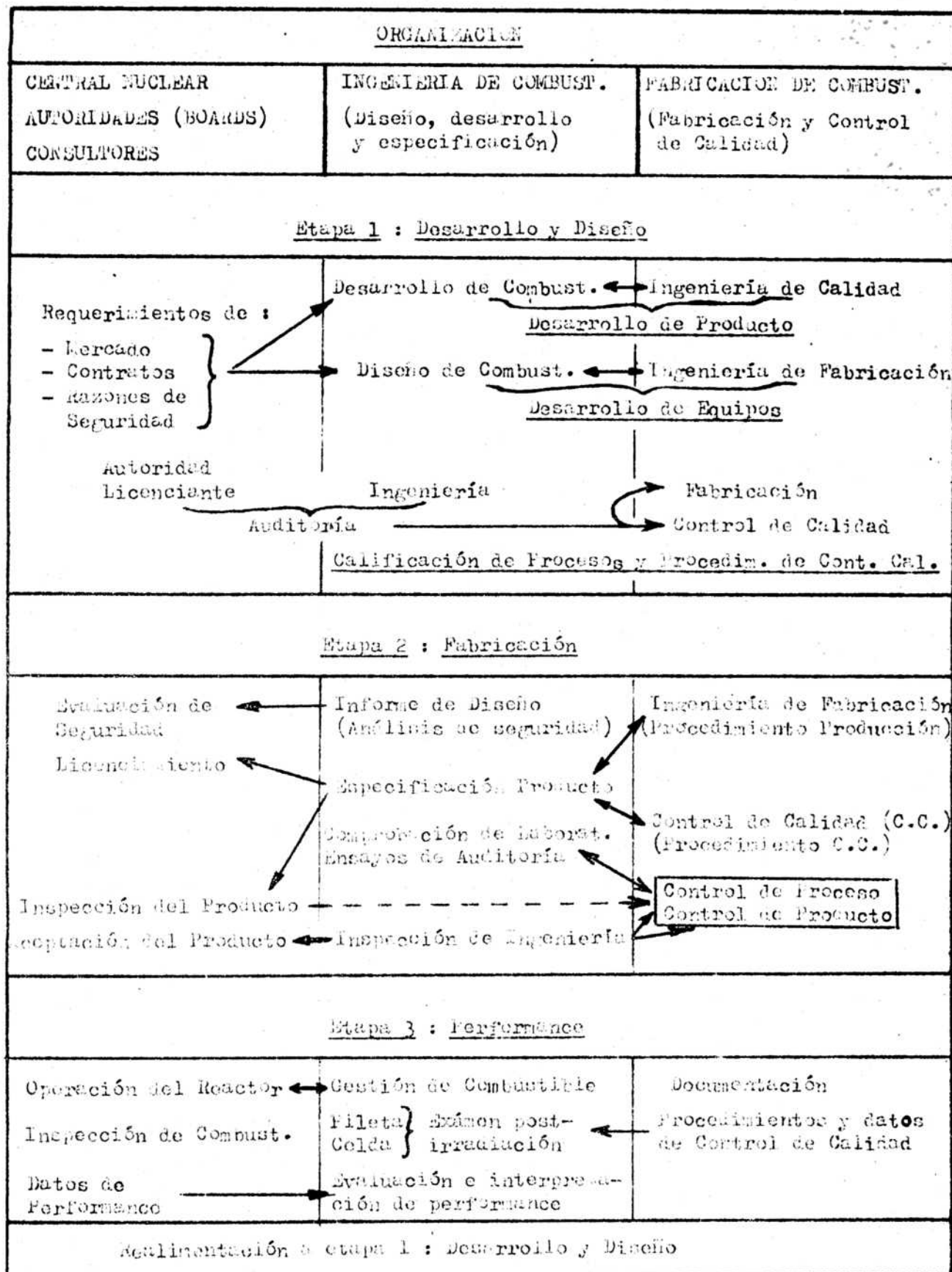


Fig. 8.2. Apéndice B 10 CFR 50

1. Organización
2. Programa de Garantía de Calidad
3. Control de Diseño.
4. Control de documentos de Compras
5. Planos, Procedimientos e instrucciones
6. Control de documentos
7. Control del material comprado, Equipos y servicios.
8. Identificación y control de materiales partes y componentes.
9. Control de Procesos especiales
10. Inspección
11. Control de Ensayos
12. Control de mediciones y Equipos de ensayos.
13. Manipuleo, Almacenamiento y despacho.
14. Estado de Inspección, Ensayos y Operación.
15. Materiales, partes o componentes rechazados
16. Acciones Correctivas
17. Registros de Garantía de Calidad
18. Auditoría.

- a) Design Process Complexity (DPC)
0. Design effort is minimal and simple.
 1. Design effort is significant but simple.
 2. Design effort is significant and presents some complexity.
 3. Design effort is extensive or complex.
 4. Design effort is extensive and complex.
- (b) Design Maturity (DM)
0. Proven design available.
 1. Combination of proven design elements for same application.
 2. Modification of proven design for a different application.
 3. Redesign of existing item for a different application.
 4. New design from first principles of a complex item.
- (c) Item or Service Characteristics (IC)
0. Item or service has no tight or interrelated characteristics.
 1. Item or service has only a few tight or interrelated characteristics.
 2. Item or service has a few tight and interrelated characteristics.
 3. Item or service has a significant number of tight and interrelated characteristics.
 4. Item or service has a large number of tight and interrelated characteristics.
- (d) Manufacturing Complexity (MC)
0. Few simple processes^a required.
 1. Significant number of simple processes required.
 2. Few complex processes required.
 3. Significant number of complex processes required.
 4. Large number of complex processes required.
- (3) Safety (S)
0. No risk to the health and safety of operating personnel.
 1. Results in limited risk to the health and safety of operating personnel.
 2. Results in significant risk to the health and safety of operating personnel.
 3. Results in undue risk to the health and safety of operating personnel and/or limited risk to the public.
 4. Results in undue risk to the health and safety of operating personnel and to the public.
- (f) Economics (E)
0. Results in negligible inconvenience and/or cost.
 1. Downgrades the service of a facility to a limited extent and results in limited cost.
 2. Significantly downgrades the service of a facility and results in significant cost.
 3. Seriously downgrades the service of a facility and results in serious cost.
 4. Results in total loss of service of a facility and extreme cost.

Selection Formula

Select the applicable value from 0 to 4 for each of the above factors and sum all values.
Read the suggested Z-299 Quality Program Standard requirement from the following table^{aa}:

Quality Program Standard Selection

Value Range	Quality Program Standard
18 - 24	CSA Z-299.1
13 - 17	Z-299.2
8 - 12	Z-299.3
4 - 7	Z-299.4
0 - 3	

* processes: manufacturing, inspection, testing, assembly, construction or any other activity.
** This table can be adjusted to suit the industry concerned.

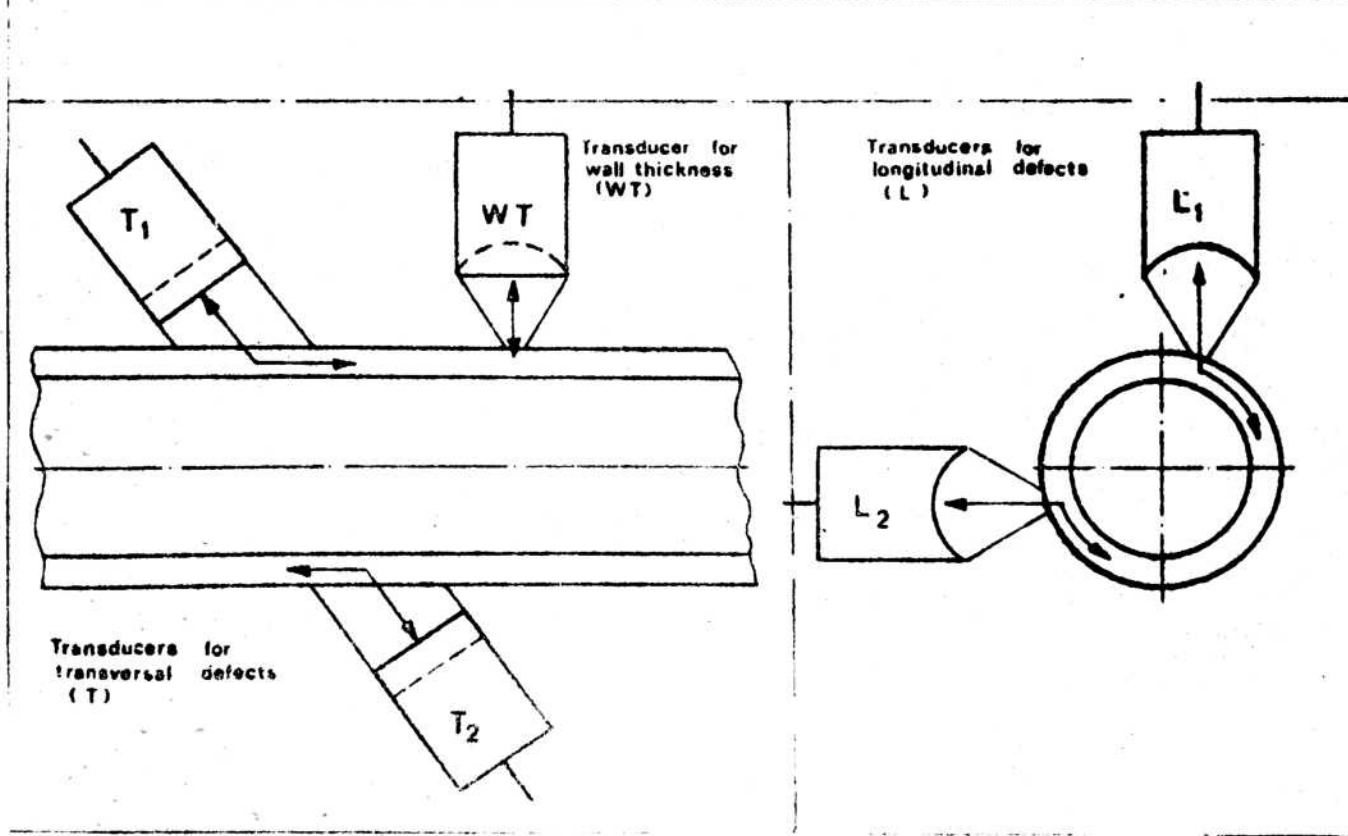
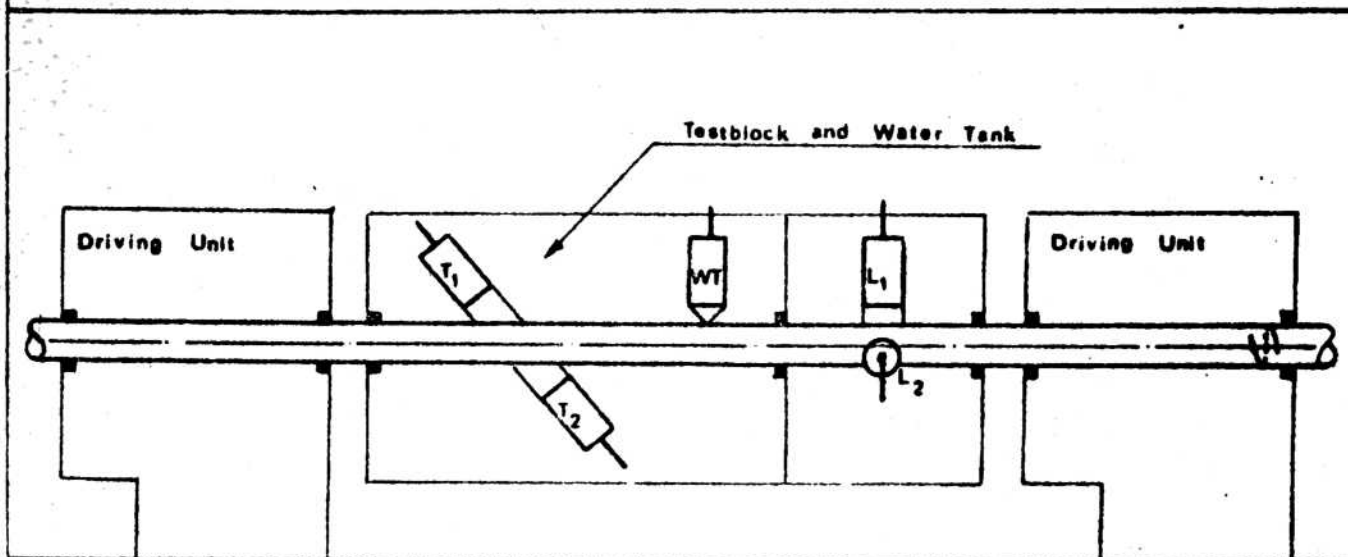
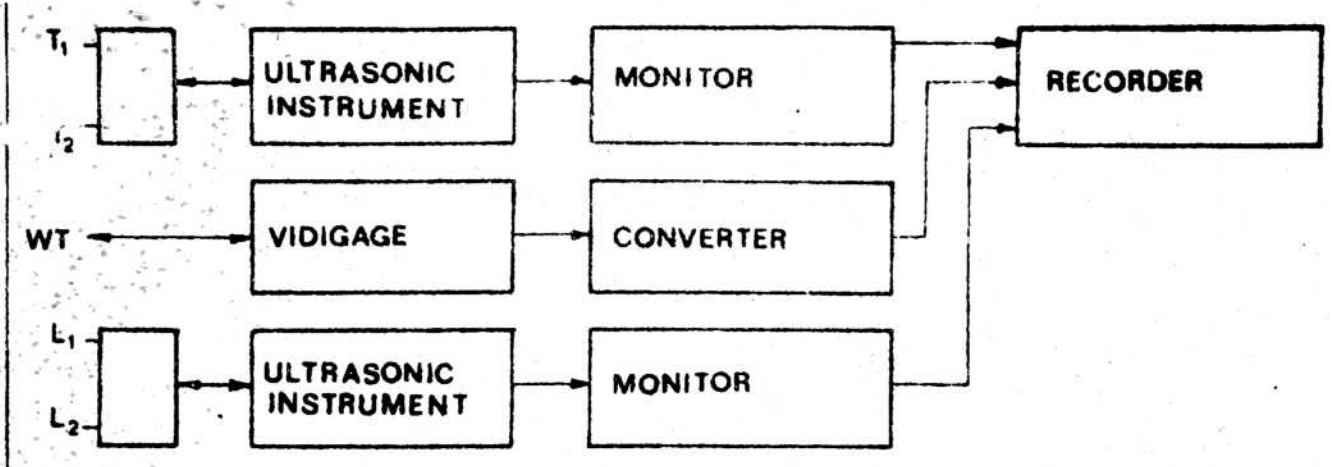


FIG. 8.4