21
2 ej

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"DISEÑO PRELIMINAR DE UN SIMULADOR TERMOHIDRAULICO DE UN REACTOR NUCLEAR"

TESIS

GUADALUPE CISNEROS RAMIREZ

INGENIERO QUIMICO

1985

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado según el tema:

PRESIDENTE	PROF:	LUIS CABRERA MOSQUEDA
VOCAL	"	JAIME NORIEGA BERNECHEA
SECRETARIO	"	HUMBERTO ARRIOLA SANTAMARIA
1er. SUPLENTE	"	MANUEL VAZQUEZ ISLAS
2do. SUPLENTE	"	MA. LUISA GALICIA PINEDA.

Sitio donde se desarrolló el tema: FACULTAD DE QUIMICA DEPARTAMENTO DE QUIMICA NUCLEAR.

Nombre completo y firma del sustentante : CISNEROS RAMIREZ GUADALUPE
Cisneros Ramirez Gpe.

Nombre completo y firma del asesor del tema: HUMBERTO ARRIOLA SANTAMARIA.

EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

TEMARIO

INTRODUCCION.

CAPITULO I DISCUSION DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA.

CAPITULO II DISEÑO TERMOHIDRAULICO.

CAPITULO III DISEÑO DEL EQUIPO PRELIMINAR RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCION

La energía eléctrica puede considerarse de vital importancia para el desarrollo de un país.

En México la principal fuente energética para la generación de electricidad es la de los hidrocarburos.

Dado que los hidrocarburos son fuentes energéticas no renovables y que se obtienen a un ritmo mucho menor con respecto al ritmo de consumo, se hace imperativo el desarrollo de nuevas fuentes energéticas en gran escala.

El área nuclear, la única fuente probada para resolver el problema, ofrece la posibilidad de obtener altas densidades de energía.

Las inquietudes del personal docente de la Facultad de Química se orientan hacia una mejor educación en el área experimental en donde resulta imposible contar con un reactor nuclear para orientar las investigaciones, se hace necesario crear modelos que permitan la simulación de fenómenos que ocurren en los reactores nucleares.

En este trabajo se desarrolla el diseño en una fase preliminar de un modelo termohidráulico de un reactor nuclear y se diseña y construye la instrumentación requerida para su control.

CAPITULO I

"DISCUSION DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA"

1.1 LA ENERGIA ELECTRICA EN MEXICO. ---------- 3

1.2 FUENTES ENERGETICAS. ---------- 4

1.3 REACTORES NUCLEARES. ----------14

1.4 REACTORES DE POTENCIA.----------23

1.5 INTERACCION RADIACION - MATERIA.----------28

CAPITULO 1

La crisis energética derivada de los problemas de abastecimiento del petróleo, ha sido grave en muchos países en los últimos años, amenazando en convertirse en un problema mundial en las últimas décadas, cuando el hidrocarburo se agote. Esta situación ha obligado a la búsqueda de nuevas fuentes de energía.

En nuestro país la capacidad instalada de plantas generadoras de energía eléctrica, se encuentra distribuida en la siguiente forma:

Capacidad	año 1982	1983	2000 (probable).
Instalada (MW)	18390	19,000	53,000
Tipo de Planta	%	%	%
Hidrocarburos	61.7	61.4	42
Hidroeléctrica	35.6	34.4	27
Carbón	1.6	3.1	18
Geotérmica	1.1	1.1	3
Nuclear	0.0	0.0	10

El análisis de estos datos indica que la industria eléctrica mexicana tiene al petróleo como principal fuente energética y la energía nuclear como una fuente alternativa potencial de generación.

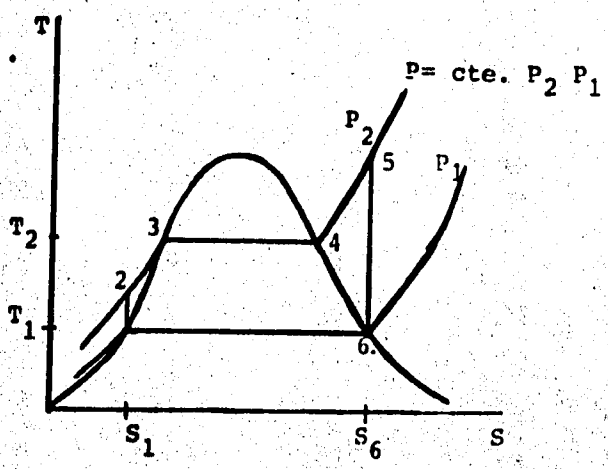
Las plantas de generación eléctrica operan sobre un ciclo de vapor, en el cuál cierto "calor generado" es utilizado para producir vapor a alta temperatura. Este vapor se expande contra las aletas de una turbina, convirtiendose, en esta forma, la energía térmica del vapor en trabajo mecánico manifestado al girar la flecha de la turbina. Esta flecha está conectada a un generador eléctrico en el cuál se convierte la energía mecánica de la turbina en energía eléctrica que puede ser distribuida a la red eléctrica. El vapor de baja presión que sale de la turbina será condensado y bombeado hacia el sistema generador de calor para completarse el ciclo (fig. I).

Las fuentes energéticas empleadas para generar calor pueden-ser de varios tipos:

- Carbón
- Geotermia
- Nuclear
- Petróleo
- Solar

Carbón.

El carbón es una roca combustible , constituida por más del 50% en peso y más del 70% en volúmen de materiales carbonosos, que se forma de la compactación y endurecimiento de las plantas vege-



1-2 Bombeo.

2-3 Calentamiento

3-4 Vaporización

4-5 Sobre calentamiento

5-6 Expansión

6-1 Condensación.

Fig. I <u>Ciclo Rankine</u>.

tales. Este proceso se conoce con el nombre de "Carbonización Interna".

El carbón se puede clasificar de la manera siguiente:

- Carbón Siderúrgico (o coquizable); se emplea en la metalurgia de metales, en la fabricación de carburo de calcio y derivados; carburundum, grafito.....

- Carbones térmicos (o de vapor); son quemados para obtener calor destinado a la producción de vapor para la generación de energía eléctrica en las plantas termoeléctricas.

Geotérmia.

La tierra es un gigantesco depósito de energía. El núcleo de la tierra se encuentra formado por rocas fundidas, o magma, y su intenso calor se transfiere hacia la superficie a través de las distintas capas terrestres, manifestandose en forma de volcanes géiseres y aguas termales.

Las fuentes geotérmicas se clasifican en dos grupos:

- Fuente de vapor dominante; en donde el fluido que se extrae es vapor saturado o sobrecalentado con temperaturas de 250°C y presiones de 30-35 bars.

- Fuentes de líquido dominante; el fluido que se extrae es agua, o una mezcla de vapor - agua. El fluido extraído se clasifica en:

  - fluídos con alta entalpia; H $\geqslant$ 200 cal/g.
  - fluídos con baja entalpia; H $<$ 200 cal/g.

Al iniciarse la utilización de las fuentes geotérmicas las capacidades de las plantas generadoras que se construyeron en algunos países fueron:

E.E.U.	12.5 MW (vía prueba en 1960).
Japón	22 MW en 1966 y13 MW en 1967.
México	3.5 en 1959 y 75 MW en 1973.
Nueva Zelandia	26 MW en 1954 .

Nuclear

La utilización de la energía nuclear para la generación de energía eléctrica se puede lograr mediante dos procesos:

- El proceso de fisión; consiste en la producción de calor a partir de la división de núcleos atómicos pesados.

- El proceso de fusión; consiste en la unión de dos núcleos atómicos ligeros de alta energía. Los núcleos atómicos

de hidrógeno, deuterio y tritio son empleados en este tipo de reacción nuclear para producir calor y neutrones.

En Alto Lucero Veracruz se tienen, en construcción, dos unidades nucleoeléctricas con una capacidad total de 1308 MW. La construcción se inició en el año de 1975.

Petróleo.

El petróleo es la fuente natural más abundante de hidrocarburos saturados empleados como combustibles. A continuación se indican los hidrocarburos de mayor uso y en donde se emplean:

- Gasolina; vehículos automotores
- Gas natural; industria y uso doméstico.
- Diesel; ferrocarriles, industrias y otros transportes.
- Combustoleo; industria.
- Gas L. P.; Doméstico y en menor proporción en la industria.
- Kerosina; doméstico.
- Turbosina; aviación.

En la producción de energía eléctrica se emplean el gas natural, combustoleo y diesel. En 1980 el consumo de estos hidrocarburos fué:

Combustoleo 8653×10^6 L.

Diesel	1181×10^6 L
Gas Natural	3354×10^6 m^3.

Solar

A la emisión electromagnética proveniente del disco solar se le denomina radiación solar. Las aplicaciones de la radiación solar se relacionan con la producción de calor para uso doméstico o industrial y con calor que se transforma en energía eléctrica.

Una planta de generación requiere de un sistema de conversión para transformar la energía solar colectada y concentrada en electricidad. El sistema de conversión debe incluir los siguientes dispositivos o medios:

- Transformación de la energía solar a energía calorífica.
- La conversión de energía calorífica a electricidad.
- Eliminación del calor no utilizado.
- Sistema de almacenamiento que suministre la energía necesaria cuando no se tenga la energía solar disponible.

En el desierto del Sur de California (E.U.A) se tiene un proyecto de una central eléctrica con una capacidad de 162 MW.

Otras fuentes de generación eléctrica, independientes del esquema mostrado anteriormente, son:

- Eólica
- Hidráulica.

Eólica

Se emplea la energía de movimiento del viento para la generación de energía eléctrica.

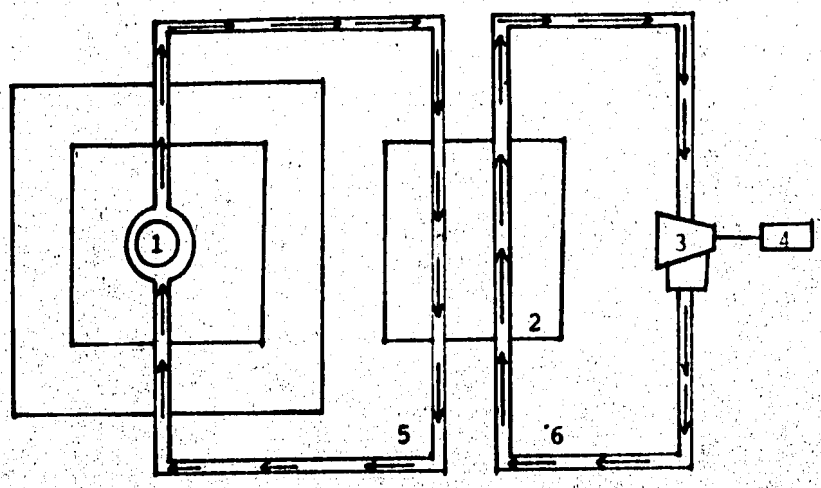
Los aerogeneradores se clasifican en función de su capacidad en:

Pequeños	0 - 9 KW
Intermedios	10 - 99 KW
Grandes	100 -3000 KW

Hidráulica

Parte de la energía potencial que existe, en cualquier cantidad de agua que se encuentre a una altitud mayor que el nivel del mar es transformada a energía eléctrica por medio de una planta hidroeléctrica.

En la figura II se representa un sistema de generación eléctrica. La fuente de calor (1) suministra energía para calentar un fluido (5) que a su vez cede cierto calor y evapora agua (6) para alimentar una turbina (3) la energía mecánica de la turbina se trans



1.- Fuente de calor
2.- Cambiador de calor
3.- Turbina - Condensador
4.- Generador eléctrico
5.- Refrigerante Primario
6.- Refrigerante Secundario

Fig. II Diagrama de un Sistema de Generación Eléctrica.

forma en energía eléctrica en el generador (4).

Cuando la fuente de calor es carbón, hidrocarburos o vapor de origen geotérmico, el cambiador de calor (2) no se utiliza, si no que el vapor generado pasa directamente a la turbina. Es decir el vapor generado es el fluido (6).

Cuando la fuente de calor sea energía nuclear o solar, todas las partes mostradas en la figura tienen participación.

En la tabla (I) se muestran las reservas probadas hasta 1983 de hidrocarburos en México.

Se tienen como reservas de Uranio 14,000 ton. de las cuáles 10,600 ton. corresponden a Uranio con posibilidades de ser extraído.

Teniendo en mente:

- Los altos costos de los hidrocarburos.
- La disponibilidad finita de los combustibles fósiles.
- La falta de combustibles fósiles en muchos países.
- Los problemas ambientales asociados con dichos combustibles.
- Las limitaciones de las fuentes energéticas renovables.

La probabilidad de éxito para el empleo de la energía nuclear debe ser considerada como positiva.

Tabla I Reservas Probadas* de Hidrocarburos
1983 (millones de Barriles).

Ubicación	Petróleo crudo	Líquidos del gas	Gas seco equivalente a crudo	Hidrocarburos líquidos totales
Zona Norte	400	258	1715	2373
Zona Centro	1294	187	713	2194
Zona Sur	891	72	238	1201
Zona Sureste	7672	2062	4950	14684
Zona Marina	28734	3285	2448	34467
Chicotepec	10920	1321	5340	17581
Total	49911	7185	15404	72500

* Las reservas probadas son aquellas reservas descubiertas que puedan ser recuperadas con la tecnología existente.

Reactores Nucleares.

Un reactor nuclear o "Pila Atómica" es un aparato en donde se produce la fisión del combustible nuclear, inducida por neutrones, obteniendose calor (tabla II) productos de fisión (tabla III) y 2.5 neutrones que son capaces de ocasionar una reacción en cadena automantenida por sí misma (criticidad).

Para que una reacción en cadena sea automantenida, se requiere que el combustible se combine o se envuelva adecuadamente con un moderador. Los neutrones, de 2 MeV, producidos en la fisión, son frenados mediante choques elásticos hasta energías de 0.0253eV (velocidad de 2200m/seg). Al disminuir la velocidad del neutrón aumenta la sección eficaz de fisión. (tabla IV).

La reacción nuclear y por lo tanto, la generación de calor, es controlada a un determinado valor mediante la introducción de barras de control cuya función es absorber neutrones. Si las barras se introducen, un poco más, aumenta la cantidad absorbida de neutrones, disminuyendo los neutrónes capaces de producir fisión.

Clasificación.

Los reactores nucleares se clasifican tanto por la especificación de sus objetivos, como por los materiales estructurales que lo constituyen.

En la tabla V se presentan algunas formas de clasificación de los reactores nucleares.

Tabla II

Energía Liberada por Fisión

	Ec (MeV)	Total	
Fragmentos de fisión:			
• Ligeros.	102		
• Pesados.	65	167	
2.5 neutrones.	2c/u	5	
Radiación γ proveniente de productos de fisión.		5	
Energía liberada espontáneamente.			177
Partículas β.		6	
Radiación γ.		5	
Neutrinos.		11	
			22
Total		199	

Factores de Conversión

1 Mev = 1×10^6 eV

1 eV = 1.6×10^{-12} Erg

1 Joule = 10^7 Erg.

Elemento	dosis de irradiación 10^{13} n/cm^2. UO_2 (Uranio Natural)	dosis de irradiación 10^{14} n/cm^2. 3.6% U - 235 (Uranio Enriquecido)
	Concentración en ppm Durante 100 días.	
Zr	108	4200
Xe	73	2850
Mo	70	2740
Ce	64	2490
Cs	64	2490
Nd	62	2410
Ru	47	1830
Sr	41	1580
Ba	24	940
La	22	980
Tc	22	830
Y	17	660
Pr	16	610
Kr	13.5	520
Rb	13.5	520
Pm	10	390
Te	9.5	360
Sm	9.0	330
Rh	7.1	280
Nb	5.7	—
Pd	4.7	180
I	3.6	140
Se	1.5	60
Total	708.1	27,290

Tabla III Concentración de los productos de fisión durante la reacción nuclear.

Tabla IV

Sección Eficáz de Fisión de U-235

Energía del neutrón (eV)	σ_f (barns).
0.001	1000
0.05	385
0.10	245
0.15	190
0.20	175
0.25	175
0.30	180
0.35	150
$2X10^3$	7
$5X10^3$	4.1
10^4	3.2
$2X10^4$	2.6
$5X10^4$	2.0
10^5	1.6
$2X10^5$	1.4
$5X10^5$	1.2
$2X10^6$	1.2
$5X10^6$	1.2

Tabla V

Clasificación de los Reactores Nucleares

USO	Investigación, Producción de energía Producción de Plutonio.	
Energía de los Neutrones que provocan la fisión.	Rápidos :	$En° > 0.1$ Mev.
	Intermedios :	$1 eV \leq En° \leq 10^5$ eV.
	Lentos :	$En° < 1$ eV.
Naturaleza del combustible.	Natural :	concentración 0.7%.
	Enriquecido :	concentración 10 %.
Arreglos entre moderador-combustible.	Homogéneo (mezclados). Heterogéneos (separados).	
Construcción.	Vasija Cerrada. Piscina.	
Materiales que constituyen el reactor.	moderador de grafito, refrigeración por aire envainado de aluminio, pantalla de protección de concreto, barras de control de carburo de boro.	
Potencia.	MW eléctricos generados.	

Las partes o elementos que constituyen un reactor son agrupadas en la Tabla VI , así como las características físicas requeridas.

Los materiales con los cuales puede estar constituido un reactor nuclear se muestran en la Tabla VII.

Una clasificación de los reactores de potencia se tiene en la Tabla VIII.

Tabla VI.

Partes de los reactores nucleares

Elemento	Característica
Moderador	Nucleo atómico de masa mínima (S.E.C.)* mínima.
Reflector (Reactores Térmicos).	Nucleo átomico de masa mínima. (S.E.C.) mínima.
Control	(S.E.C.) máxima. Punto de fusión superior a la temperatura de trabajo.
Refrigerante	Capacidad calorífica y conductividad térmica altas. (S.E.C.) mínima.
Blindaje (rayos γ)	Densidad elevada. (S.E.C.) mínima.
Blindaje (n_0)	(S.E.C.) máxima.
Materiales estructurales.	Propiedades mecánicas y térmicas necesarias. (S.E.C.) mínima.
Vainas	Propiedades térmicas y corrosión necesarias. (S.E.C.) mínima.

* (S.E.C.) = Sección eficáz de captura.

ento del eactor	Materiales	Función
stible nuclear.	U-235, U-233 Pu-239	Sostener la Reacción de Fisión.
ente del combus nuclear.	U-238, Al, Sr Fe.	Absorber neutrones en exceso, Constituir una sup. de transmisión de calor.
ador.	C, H_2O, D_2O, Be	Reducir la En°
nto de control.	Cd, B, Hf.	Controlar el flujo de n°
gerante.	Aire;He; H_2,O_2,N_2 H_2O,D_2O,Na,Bi	Retirar calor.
ntos cturales	Al,Zr,Fe,Mg.	Constituyen las armazones, depósitos, soportes para - combustible, vainas.....
la de ción.	H_2O, cemento.	Proteger al personal.

III __ Materiales de construcción para reactores nucleares.

Tabla VIII

Clasificación de los Reactores de Potencia.

Tipo de Reactor	Combustible Nuclear	Moderador	Refrigerante
Agua bajo Presión (P W R)	Uranio Natural	D_2O	D_2O , H_2O
Agua bajo Presión	Uranio Natural	Grafito	H_2O
Agua bajo Presión	Uranio enriquecido	H_2O	H_2O
Agua en Ebullición (B W R)	Uranio Natural	D_2O	D_2O
Agua en Ebullición	Uranio enriquecido	H_2O	H_2O
Grafito, Sodio	Uranio enriquecido	Grafito	Sodio
Homogéneo	Uranio Natural	D_2O	D_2O
Homogéneo (Solución en Suspensión)	Uranio enriquecido	H_2O	H_2O
Homogéneo	Plutonio	Ninguno	Metal Líquido.
Reactores rápidos de cría. (FBR)	Plutonio	Ninguno	Sodio.

El peligro en un reactor nuclear se encuentra en su contenido de residuos radiactivos, unido a la posibilidad que puedan escapar al exterior del sistema de contención. La desintegración de los productos de fisión radiactivos almacenados en las barras del combustible, genera un calor residual (de aproximadamente 200 MW inmediatamente después de un paro y que va disminuyendo en forma gradual) que determina la posibilidad de una avería grave en la mayor parte de las situaciones de accidente.

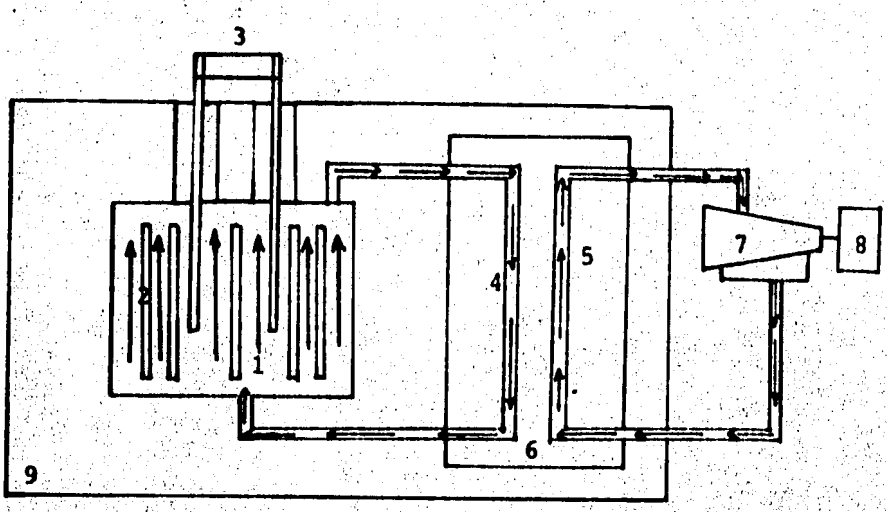
La función del equipo de seguridad es evitar el sobrecalentamiento del núcleo después de cualquier funcionamiento anómalo.

Reactores de Potencia.

La función de los reactores de potencia consiste básicamente en generar calor que será destinado a la producción de energía eléctrica (Fig. III).

Una planta nucleoeléctrica se forma de cuatro componentes:

- Reactor nuclear; suministra la energía calorífica de fisión
- Un refrigerante primario; circula a través del reactor para extraer el calor generado.
- Un cambiador de calor o generador de vapor; utiliza el refrigerante primario caliente para convertir el refrigerante secundario (agua) en vapor.



1.- Núcleo
2.- Combustible
3.- Barras de control
4.- Refrigerante primario
5.- Refrigerante secundario
6.- Cambiador de calor
7.- Turbina - condensador
8.- Generador eléctrico
9.- Contenedor

Diagrama de una Planta Nucleoeléctrica

Figura III

- Sistema de generación de energía eléctrica.

Un reactor de potencia esta diseñado para operar en condiciones severas de:

- Presión. (1000-2200 psia)
- Temperatura. (550-600 °F).
- Radiación: 10^{19} n^o /cm^2seg.

Las propiedades físicas y químicas de los fluidos que se utilicen como refrigerantes, deben satisfacer las condiciones siguientes:

- No ser corrosivo para el elemento combustible.
- No presentar impurezas de gran sección eficáz de captura.
- Tener Sección eficáz de captura reducida.
- Buenas propiedades térmicas:
  - Conductividad térmica alta.
  - Capacidad calorífica alta.
- Alta temperatura de ebullición y temperatura de fusión baja.
- Ser estable al calor y a la radiación.

En la tabla IX se muestran algunos refrigerantes y sus propiedades térmicas.

Tabla IX

Propiedades Físicas de Refrigerantes

	Cp(BTU/lb°F)	k_c(Btu/h °Fft)
Helio.	1.248 (32-1200°F)	0.1305 (32-1200°F)
Bióxido de carbono.	0.25 (32- 600°F)	0.016 (32- 600°F)
Agua.	1.85 (490-690°F)	0.308 (490-690°F)
Sodio Líquido.	3.09 (212-1492°F)	3.91 (392-1492°F)

Las capacidades de operación de algunos tipos de reactores se muestran en la Tabla X . Estos reactores se encuentran actualmente en operación.

Los reactores BWR se caracterizan por el hecho de que el agua como refrigerante, se transforma en vapor dentro del núcleo y pueden ser de dos tipos:

- El vapor generado pasa directamente a la turbina (BWR de ciclo directo).
- El vapor generado se emplea para producir vapor en un cambiador de calor. (BWR de ciclo indirecto).

Los PWR generalmente son de ciclo indirecto.

		(MWe)
Reactor de agua pesada a presión	(PHWR)	52 - 335
Reactor de agua en ebullición	(BWR)	51 - 440
Reactor a alta temperatura enfriado con gas	(HTGR)	13 - 330
Reactor de agua bajo presión	(PWR)	242 - 564
Reactor enfriado con gas	(GCR)	150 - 480
Reactor de cría de neutrones rápidos.	(FBR)	17 - 250

Tabla X Reactores de potencia en operación.

Interacción Radiación-Materia.

Para estudiar los efectos sobre la materia, las radiaciones se dividen en 2 grupos:

- Partículas ligeras; rayos X, β, γ .
- Partículas pesadas; neutrones, fragmentos de fisión, iones acelerados, protones, partículas α .

La materia se clasifica en:

- Gases.
- Líquidos.
- Sólidos:
  - Metales, cristales iónicos, cristales de Van der Walls, cristales covalentes.

Un sólido es una distribución ordenada de átomos, moléculas o iones que se unen por fuerzas cuya naturaleza depende de los enlaces químicos.

Para estudiar las distribuciones se define la "celda elemental" que es la menor unidad del cristal que cuando se repite sucesivamente en las 3 direcciones espaciales da origen al cristal.

Cuando la celda elemental se repite en forma perfecta da origen

na estructura cristalina ideal. Sí en la red cristalina, faltase un áto o molécula en un punto definido, se ocasiona un "hueco" como de- to del cristal. Sí un átomo ó molécula ocupa una posición normal te vacía en la red cristalina, se tiene un átomo ó molécula "inters cial" como defecto del cristal.

Los daños por radiación se definen como cualquier cambio en propiedades físicas de un material como resultado de la exposi-- n a la radiación.

La interacción de las radiaciones nucleares con la materia se ifiesta, en ésta última, como un aumento de energía interna. En ción de la energía interna transferida se puede presentar una "ex ación" (aumento de los movimientos vibracionales de uno o varios ctrones) o una "ionización" (extracción de uno o varios electro-).

En los sólidos una irradiación puede ocasionar los defectos si entes:

- En la red cristalina se producen "huecos" al chocar fragmen tos de fisión o neutrones de gran energía con los átomos de la red.

- Los átomos que se desplazan de su posición de equilibrio en la red se mantendrán en una posición "intersticial" corres- pondiente a un equilibrio inestable.

- Algunos átomos de impurezas pueden introducirse en la red y cambiar de forma apreciable ciertas propiedades físicas del sólido. Estas impurezas pueden proceder de fragmentos de fisión o de la captura de un neutrón, por un núcleo que haya producido, por reacción nuclear, un núcleo de especie atómica diferente.

- El paso de partículas cargadas por una red puede provocar roturas de enlaces químicos y formación de radicales libres, coloración, luminiscencia.....

  En los metales los efectos de la ionización desaparecen con rapidéz, traduciendose en una elevación de la temperatura.

- Cuando un átomo desplazado vuelve a su posición estable se disipa su energía cinética en forma de calor.

Un neutrón rápido producirá átomos de retroceso con una energía de 100KeV, en puntos aislados a lo largo de su recorrido. Los átomos de retroceso disipan parte de su energía en ionizar y otra parte en colisiones, y producirán a su vez átomos de retroceso secundarios con energía pequeña y continuar produciendo átomos de retroceso terciarios.

La radiación γ interacciona con la materia provocando los efectos: fotoeléctrico, compton y producción de pares.

Para elementos con número átomico menor que 27 predomina:

Efecto fotoeléctrico	$E_\gamma \leq 0.1$ MeV
Efecto compton	$0.1 < E_\gamma \leq 10$MeV
Producción de pares	$E_\gamma > 1.02$ MeV.

Para elementos con número átomico mayor que 82 se tiene:

Efecto fotoeléctrico	$E_\gamma < 0.5$MeV
Efecto compton	1 MeV$< E_\gamma \leq 4$MeV
Producción de pares	$E_\gamma > 1.02$ MeV.

En estos efectos se produce, ya sea la expulsión de un elec-
ón o la formación de pares que atraviezan el medio provocando da-
s por excitación electrónica e ionización.

En forma general la radiación γ provocará muy poco daño a com-
estos iónicos pero ocasionará daños considerables a compuestos no
icos o compuestos coovalentes.

Los productos de fisión son generados como iones que se encuen
n contenidos por la matríz del combustible en el reactor nuclear.
sto que la matríz del combustible es de naturaleza iónica, los
s por iones de fisión no serían causados por ionización, pero
por desplazamiento o dislocaciones de los átomos de la matriz -

or colisiones con los átomos de fisión neutralizados.

La radiación β consiste en electrones emitidos por el núcleo y caciona los mismos daños producidos por la radiación γ .

Los protones, deuterones y partículas α ocasionan los mismos años, al chocar con la materia, que los neutrones rápidos.

El análisis de los daños ocasionados por la radiación a los materiales se efectúa mediante el estudio esfuerzo-deformación antes después de la irradiación (Tabla XI).

Al analizar los datos correspondientes a las propiedades mecánicas del acero reportado en la tabla XI se tiene que al irradiar la muestra los esfuerzos aumentan mientras que la elongación porcentual disminuye al mantener constante el flujo de la irradiación y al variar la temperatura los esfuerzos tienden a disminuir mientras que las deformaciones a aumentar. Este comportamiento puede considerarse como general para todos los aceros reportados en la literatura (referencia 3).

En la tabla XII se muestra el comportamiento de algunos metales ante la radiación de neutrones.

Neutrones Rápidos ($10^{18}/cm^2$)	Temp. (°F) de Irradiación	Esfuerzo en la fluencia (10^3PSi)	Esfuerzo a la tensión (10^3PSi)	Elongación %
0	–	40	75	25
20	175	92	98	6
20	560	76	102	9
20	680	61	90	12
20	760	56	84	14
60	700	82	105	6
60	780	59	81	13
100	175	109	116	4

XI Propiedades mecánicas de acero irradiado.

Metal	Esfuerzo en la fluencia	Esfuerzo Última	Elongación a Ruptura	Dureza	Temperatura	Flujo irradiación nt= neutrones térmicos nf= neutrónes rápidos.
Aluminio: alta pureza	100	60%	-67%	–	50°C	$2x10^{20}$nt/cm^2;$5X10^{19}$nf/cm^2
medio duro	10	6%	0	–	50°C	$2X10^{20}$nt/cm^2;$5X10^{19}$nf/cm^2
Aleaciones:						
tipo 6150	290%	150%	–	–	70°C	10^{20}nf/cm^2
tipo A545	6%	6%	–	–	70°C	10^{20}nf/cm^2
tipo 5250 y 61ST6	50-100% (ambos)	50-100% (ambos)	–	–	70°C	10^{20}nf/cm^2
Berilio	despreciable	despreciable	despreciable	–	30°C	$3X10^{20}$nf/cm^2
cobre	–	–	–	41-47 DPH	60°C	$2.0X10^{18}$nf/cm^2
Cu-1% Mn	–	–	–	13.7 DPH	30°C	$1.4X10^{18}$nf/cm^2
Cu-5.8% Mn	–	–	–	16.8 DPH	30°C	$1.4X10^{18}$nf/cm^2
Cu-17.4%Mn	–	–	–	11.6 DPH	30°C	$1.4X10^{18}$nf/cm^2
Cu-1.35%Zn	–	–	–	26-60 RF	30°C	$1.5X10^{18}$nf/cm^2
Cu-34% Zn	–	–	–	64-71 RF	30°C	$1.5X10^{18}$nf/cm^2
Cu-34% Zn	–	–	–	100-101RF	30°C	$1.5X10^{18}$nf/cm^2
Molibdeno	100,000-$1.4X10^5$psi	–	–	35 num.Brinell	80°C	10^{20}nf/cm^2
Nickel	–	$4.4X10^4$-$1.6X10^5$ (Kg/cm^2)	47-26%	43-96 RB	30°C	10^{20}nf/cm^2
Zirconio	$1.7X10^4$-$2.4X10^4$ Kg/cm^2	–	despreciable	10 DPH	260°C	$2X10^{20}$nf/cm^2
Zr-2.5%Nb	45%	33%	-10%	–	300°C	$1X10^{20}$nf/cm^2
Zircaloy-2	28%	28%	-44%	–	280°C	$2.7X10^{20}$nf/cm^2

CAPITULO II

"DISEÑO TERMOHIDRAULICO"

1.1 DISEÑO TERMOHIDRAULICO ---------- 36

1.2 TRANSFERENCIA DE CALOR ---------- 39

1.3 ANALISIS DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN COMBUSTIBLE CILINDRICO ---------- 42

1.4 PATRONES DE FLUJO DEL REFRIGERANTE ---------- 46

1.5 ANALISIS DEL MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR- EN UN COMBUSTIBLE ESFERICO ---------- 48

1.6 EJEMPLO DE ANALISIS TERMICO EN UN COMBUSTIBLE- CILINDRICO ---------- 51

CAPITULO II

En el diseño termohidráulico del reactor se especifican:

- Dimensiones del núcleo.
- Area de transferencia de calor.
- Calidad del vapor producido.
- Flujo de recirculación.
- La distribución de temperaturas a través del núcleo.
- La distribución interna del flujo de refrigerante.

Al diseñar el núcleo de un reactor se debe considerar como limitaciones fundamentales:

- La temperatura de diseño de los elementos (tablas XIII y XIV).
- Suministrar el enfriamiento suficiente para la extracción del calor generado.
- El combustible no debe sufrir daños ni fallas prematuras.

El daño en el combustible se define como las perforaciones en el encamisado, que permitan la liberación de los productos de fisión, ocasionadas por:

- Sobrecalentamiento del encamisado.
- Fracturas provocadas por la expansión del dióxido de uranio.

La mayor parte del calor generado, aproximadamente 90%, se deposi sobre el combustible y se transporta por conducción a través de:

- Las capas del combustible.
- El gas en la interfase del combustible y el encamisado.
- La superficie del encamisado.

De la superficie del encamisado el calor se transporta mediante convec ión forzada a la interfase del refrigerante. El refrigerante gana lor sensible y/o calor latente.

Tabla XIII

Propiedades físicas de combustibles nucleares.

	Uranio	UO_2	Th	ThO_2	Plutonio
atura ón (°F)	2070	4980	3180	5970	1183
atura lición).	6904	—	5480-7640	—	5840
tividad mica /h ft°F)	19.08 (200-1400°F)	1.67 (200-3200°F)	23.9 (200-1200°F)	3.2 (200-2400°F)	— —
dad ica Btu/lbm°F)	0.0367 (200-1200°F)	0.059 (0-2200°F)	0.02835 (100- 400°F)	0.058 (0-1400°F)	— —

Propiedades físicas de materiales para encamizado.

	Kc(BTU/fth °F)	Cp(BTU/Ibm°F)	Temperatura de fusión (°F).
Berilio	128(77°F) 82.2(200°F)	0.506(261°F)	2330
Magnesio	97(200°F) 91(570°F)	—	1205
Aluminio	132(68°F) 131(750°F)	0. 23(212°F) 0.245(572°F)	1040
Zirconio	12.1(120°F) 10.6(750°F)	0.074(260°F) 0.082(800°F)	3370
Zircaloy 2 y 4 (1.2-1.7% Sn 0.07-0.2% Fe 0.05-015% Cr 0.03-0.06% Ni)	menor que 10	—	3310
347 acero Inox. (17-19% Cr 9-12% Ni 2% max. Mn 1% max. Si 0.08% max. C).	9.4 (200°F) 12.4 (930°F)	0.12 (32-212)	2550-2650

Es conveniente puntualizar que arriba de cierta magnitud de calor transferido se forma en la superficie del encamisado una película de refrigerante evaporado, que provoca un decremento en la transferencia de calor y un incremento en la temperatura en la superficie del encamisado. Este flujo de calor se conoce como flujo crítico de calor (CHF). La razón de flujo crítico de calor (CHFR) es la razón entre el (CHF) en un punto de la superficie de transferencia de calor en el combustible y el flujo de calor correspondiente en ese punto. La razón mínima de flujo crítico de calor (MCHFR) es el valor mínimo del CHFR que existe en el núcleo. Si la razón mínima de flujo crítico de calor permanece arriba de 1.0 no ocurre ningún daño en el combustible como resultado de un enfriamiento inadecuado.

Como en la practica, el máximo nivel de potencia de un reactor está determinado principalmente por la cantidad de calor que puede ser extraido, el diseño de un reactor depende de los mecanismos de la transferencia de calor.

Las relaciones que rigen la transferencia de calor son:

- Ley de Fourier (conducción).

$$q = \frac{dQ}{dO} = kA \frac{dT}{dx} \text{ ó } \frac{dq}{dA} = k \frac{dT}{dx}$$

Es una ecuación general y se aplica tanto para casos en estado estable como para inestable.

- En 1701, Newton define la transferencia de calor de una superficie sólida a un fluido por la relación:

$$q_c = hm\ A\ (Tw-Tf).$$

q, q_c = Calor transferido por unidad de tiempo.

k = Conductividad térmica.

h_m = Coeficiente de transferencia de calor.

A = Area de transferencia.

Tw = Temperatura de la pared.

T_f = Temperatura del fluido.

X = Posición de referencia.

Las variables que intervienen en la transferencia de calor son agrupadas para formar las relaciones adimensionales:

Número de Nusselt = $\frac{hD}{k}$ = Nu.

Número de Reynolds = $\frac{Dv\rho}{\mu}$ = Re.

Número de Péclet = $Re \cdot Pr = \frac{Dv\rho Cp}{k}$ = Pe

Número de Prandtl = $\frac{Cp\mu}{k}$ = Pr

D = Diámetro del tubo.

V = Velocidad del fluido.

ρ = Densidad del fluido.

μ = Viscosidad del fluido.

Cp= Capacidad calorífica.

Para evaluar los coeficientes de transferencia de calor, para fluidos refrigerantes dentro de tuberías, se recurre a la ecuación de Dittus-Boelter:

$$Nu = 0.023\ Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

para :

$$Re \geqslant 10{,}000$$

$$Pr\ (0.7-120)$$

para gases: $Pr \cong 0.75$ $T > 2000°F$

$$h = 0.02\ \frac{k}{D}\ Re^{0.8}$$

para agua:

$$h = 170\ (1 + 10^{-2}T - 10^{-5}T^2)\ \frac{V^{0.8}}{D^{0.2}}$$

V = Velocidad (ft/seg). (fluido).

D = Diámetro tubería (in).

T = Temperatura (°F).

para metales líquidos:

$$Nu = 7+0.025\ Pe^{0.8}$$

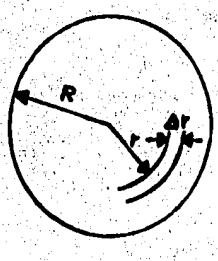
El análisis del mecanismo de la transferencia de calor para un combustible cilíndrico se desarrolla a continuación.

Se debe considerar:

- El flujo de calor se distribuye en forma radial en todas direcciones.

- El balance de calor para un estado estable.
- En los sistemas de transferencia con generación interna la propiedad de transferencia aumenta conforme se aproxima a la frontera.

En la figura se muestra el área circular de un cilindro de radio R y un volúmen diferencial comprendido entre r y r + Δr.



El calor volumétrico generado en el volúmen diferencial esta dado por:

$$q\ (\text{Vol.}) = q_{r+\Delta r} = q_r \text{ ---------- } (1)$$

$$\text{Vol.} = \text{Volúmen} = 2\pi\ r(\Delta r)\ L. \text{ ---------- } (2)$$

$$q_r = -k_f\ A\ \frac{dt}{dr} = -k_f\ (2\pi L)\ r\ \frac{dt}{dr}.$$

A = Area de transferencia = 2π rL.

t = Temperatura

k_f = Conductividad térmica del combustible.

$$q_{r+\Delta r} = q_r + \frac{dq_r}{dr} (\Delta r)$$

$$\frac{dq_r}{dr} = \frac{d}{dr} (-k_f \, 2\pi L) r \frac{dt}{dr}$$

$$= -k_f \, 2\pi L \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr}\right)$$

$$= -k_f \, 2\pi L \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \left(\frac{dr}{dr}\right) \right]$$

$$= -k_f \, 2\pi L \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right]$$

$$q_{r+\Delta r} = k_f \, 2\pi L \frac{r dt}{dr} - k_f \, 2\pi L \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right] \Delta r$$

$$q_{r+\Delta r} = q_r - k_f \, 2\pi L \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right] (\Delta r) \quad \text{----------} \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en la ecuación (1)

$$q(2\pi r \, (\Delta r) \, L) = q_r - k_f \, 2\pi L \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right] \Delta r - q_r$$

$$= -k_f \, 2\pi L \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right] \Delta r$$

que se reduce a:

$$q(r) = -k_f \left[r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} \right]$$

$$r \frac{d^2t}{dr^2} + \frac{dt}{dr} + \frac{q(r)}{k_f} = 0$$

$$\frac{d^2t}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{q}{k_f} = o. \text{ ---------- } (4)$$

La solución de esta ecuación diferencial es:

$$t = -q\frac{r^2}{4k_f} + C_1 \ln r + C_2 \text{ ---------- } (5)$$

C_1 y C_2 son constantes de integración que se evaluan a las condiciones de frontera del sistema:

$$\frac{dt}{dr} = o \text{ a } r = o$$

$$t = t_m \text{ a } r = o$$

Así que $C_1 = o$ y $C_2 = t_m$.

la solución es:

$$t\ (r) = t_m - \frac{qr^2}{4k_f} \text{ ---------- } (6)$$

La diferencia máxima de temperatura se tiene al hacer:

$$r = R \text{ y } t = t_s$$

$$t_m - t_s = \frac{qR^2}{4k_f} \text{ ---------- } (7)$$

El flujo de calor $q(r)$ a cualquier r es igual al calor total generado en el elemento y está dado por:

$$q_s = \pi R^2 L\ q \text{ ---------- } (8)$$

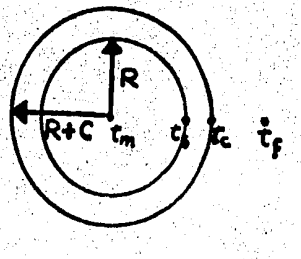
Sustituyendo q en la ecuación anterior

$$q_s = \pi R^2 L \left[\frac{4k_f\ (t_m - t_s)}{R^2} \right]$$

$$q_s = \pi L\ 4k_f\ (t_m - t_s) \text{ ---------- } (9)$$

haciendo $A_s = 2\pi RL$

$$q_s = 2k_f\ A_s \left[\frac{t_m - t_s}{R.} \right]$$



Considerando la resistencia, entre el combustible y el encamisado, despreciable, y que la cantidad de calor que pasa por la superficie del combustible es la misma que pasa através del encamisado se tiene:

$$q_s = \pi R^2 L\ q = 4\pi k_f L\ (t_m - t_s)$$

$$t_m - t_s = \frac{R^2 q}{4k_f} \text{ ---------- } (10)$$

$$q_s = \pi R^2 L\ q = 2\pi \frac{k_c L\ (t_s - t_c)}{Ln\left(\frac{R+C}{R}\right)}$$

$$t_s - t_c = \frac{Ln\ \left(\frac{R+C}{R}\right)\ R^2 q}{2k_c} \text{ ---------- } (11).$$

$$q_s = \pi R^2 L q = 2\pi (R+C)\ L\ h\ (t_c - t_f)$$

$$t_c - t_f = \frac{R^2 q}{2(R+C)h} \text{ ---------- } (12)$$

Sumando 10, 11 y 12 se tiene:

$$t_m - t_f = \frac{R^2 q}{4k_f} + \frac{R^2 q}{2}\left[\frac{1}{k_c}\ Ln\ \left(\frac{R+C}{R}\right) + \frac{1}{h(R+C).}\right] \text{ ---------- } (13)$$

Esta ecuación proporciona la caída de temperatura del centro del combustible hasta el refrigerante.

Para explicar la distribución del flujo del refrigerante se emplea el mecanismo de "Flujo en Ebullición" cuyos regímenes de flujo son:

- Ebullición Nucleada.

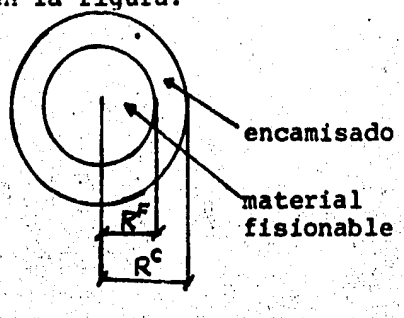
- Ebullición Pelicular.

La ebullición nucleada se produce cuando los flujos de calor son bajos, permitiendo que la transferencia aumente con pequeñas variaciones de la temperatura a través del encamisado.

Inicialmente el refrigerante se calienta por convección ganando calor sensible sin producir vapor, la ebullición no se produce hasta que la temperatura de la pared (tw) del encamisado excede la temperatura de saturación (ts) del refrigerante. La cantidad con la cuál la Tw > ts se conoce como el grado de "Sobrecalentamiento" y la cantidad con la cuál ts > que la temperatura del fluido como grado de "Subenfriamiento".

La ebullición nucleada se caracteriza por una distribución regular de burbujas de vapor en la fase líquida. Cuando la calidad del vapor aumenta se produce el flujo en ebullición pelicular que ocurre cuando las burbujas de vapor cubren la superficie del encamisado evitando el contacto con el líquido.

onsideremos un elemento combustible nuclear de forma esférica co-
o se muestra en la figura:



La ecuación general del balance de energía calorífica es:

Velocidad de entrada de energía calorífica	-	Velocidad de Salida de energía calorífica	+	Velocidad de producción de energía calorífica.	= 0 ---(1)

La energía calorífica producto de la fisión (S_n) puede representarse mediante:

$$S_n = S_{no}\left[1 + b\left(\frac{r}{R^F}\right)^2\right] \qquad \text{----------(2)}$$

S_{no}; Velocidad volumétrica de producción de calor en el centro de la esfera.

b ; Constante adimensional comprendida entre 0 y 1.

Balance de energía calorífica sobre la envoltura esférica de espesor Δr situado en el interior de la esfera de material fisionable:

entrada de energía calorífica por $r + \Delta r$ $\quad q_r^F\Big|_r 4\pi r^2$ ---------(3)

Salida de energía calorífica por $r+\Delta r$ $\qquad q_r^F\big|_{r+\Delta r} \cdot 4\,(r+\Delta r)^2$ (4)

Energía Calorífica producida $\qquad S_n \cdot 4\pi r^2 \Delta r$ (5)

Sustituyendo los términos en la ecuación general del balance de energía y pasando al límite cuando $\Delta r \to 0$ se obtiene:

$$\lim_{\Delta r \to 0} \frac{r^2 q_r^F\big|_{r+\Delta r} - r^2 q_r^F\big|_r}{\Delta r} = S_n r^2$$

de donde se deduce

$$\frac{d}{dr}(r^2\, q_r^F) = S_{no}\, r^2 \left[1+b\left(\frac{r}{R^F}\right)^2\right] \qquad \text{----------} (6)$$

integrando

$$q_r^F = S_{no}\left(\frac{r}{3} + \frac{b}{R^F)\,2}\,\frac{r^3}{5}\right) + \frac{C_1^F}{r^2} \qquad \text{----------} (7)$$

para el encamisado se tiene

$$q_r^c = \frac{C_1^c}{r^2} \qquad \text{----------} (8)$$

C_1^F y C_1^c son constantes de integración que se evalúan mediante las condiciones límites (CL).

C.L. 1 para $r = 0$ $\qquad q_r^F$ no es infinito

C.L. 2 para $r = R^F$ $\qquad q_r^F = q_r^c$

$$q_r^F = S_{no}\left(\frac{r}{3} + \frac{b}{R^F)\,2}\,\frac{r^3}{5}\right) \qquad \text{----------} (9)$$

$$q_r^c = S_{no}\,(R^F)^3\left(\frac{1}{3} + \frac{b}{5}\right)\frac{1}{r^2} \qquad \text{----------} (10)$$

estas ecuaciones expresan las distribuciones de densidad de flujo de calor en la esfera fisionable y en la vaina esférica del encamisado. Sí se sustituye en estás distribuciones la ley de Fourier de Conducción de Calor se tiene:

$$-k^F \frac{dT^F}{dr} = S_{no} \left(\frac{r}{3} - \frac{b}{R^{F)2}} \frac{r^3}{5}\right) \qquad \text{---------- (11)}$$

$$-k^C \frac{dT^C}{dr} = S_{no} R^{F)3} \left(\frac{1}{3} - \frac{b}{5}\right) \frac{1}{r^2} \qquad \text{---------- (12)}$$

integrando y haciendo k^C y k^F constantes.

$$T^F = \frac{S_{no}}{k^F}\left(\frac{r^2}{6} \frac{b}{R^{F)2}} \frac{r^4}{20}\right) + C_2^F \qquad \text{---------- (13)}$$

$$T^C = \frac{S_{no}}{k^C} R^{F)3} \left(\frac{1}{3} - \frac{b}{5}\right) \frac{1}{r} + C_2^C \qquad \text{---------- (14)}$$

C.L. 3 para $r = R^F$ $\qquad T^F = T^C$

C.L. 4 para $r = R^C$ $\qquad T^C = T_o$

Siendo T_o la temperatura conocida de la superficie externa del encamisado.

Las expresiones finales para los perfiles de temperatura son:

$$T_F - T_o = \frac{S_{no} R^{F)2}}{6\, k^F}\left\{\left[1 - \left(\frac{r}{R^F}\right)^2\right] - \frac{3}{10} b \left[1 - \left(\frac{r}{R^F}\right)^4\right]\right\}$$

$$+ \frac{S_{no} R^{F)2}}{3\, k^C} \left(1 - \frac{3}{5} b\right) \left(1 - \frac{R^F}{R^C}\right) \qquad \text{---------- (15)}$$

$$T^C - T_o = \frac{S_n R^{F)2}}{3\, k^C} \left(1 - \frac{3}{5} b\right) \left(\frac{R^F}{r} - \frac{R^F}{R^C}\right) \qquad \text{---------- (16)}$$

La temperatura máxima en la esfera del material fisionable puede hallarse haciendo <u>r = o en la ecuación</u>. (15).

Una vez discutidas en forma general las ecuaciones básicas de transferencia de calor se presenta, a continuación, un ejemplo práctico de análisis térmico de un combustible cilíndrico en un reactor rápido.

El reactor tiene una potencia térmica de 2125MW y el núcleo consiste de 498 conjuntos de combustible con 123 barras de combustible por conjunto.

Otras especificaciones:

- Refrigerante.

Flujo de refrigerante:	1.14×10^8 lb/h
Aumento de temperatura del refrigerante:	250°F
Aumento de temperatura del refrigerante a través del núcleo:	263°F
Temperatura inicial del refrigerante:	950°F

- Encamisado.

Diámetro exterior	0.3 in
Diámetro interior	0.244 in
Espesor	0.028 in
Longitud	5ft.

- Combustible.

Diámetro exterior	0.2405 in
Diámetro interior	0.0998 in
Longitud activa	4 ft
Generación de calor promedio	8.6×10^3 W/ft
Flujo de calor promedio	0.375×10^6 BTU/h ft^2

- Distribución de potencia.

(Pmax./Ppromedio) axial	1.3
(Pmax./Ppromedio) radial	1.18
(Pmax./Pprom)	1.52

- Temperatura máxima del combustible al inicio del ciclo:

Nominal	3424°F
Sitios calientes (multiplicativos)	4615°F
Sitios calientes (estadísticos con 99.7% de confianza)	3861°F

- Parámetros hidráulicos

Lado del conjunto de combustible	2.455 in
Area de la sección hexagonal del conjunto del combustible	15.6 in^2

$$\frac{\text{Area de enfriamiento}}{\text{conjunto}} = \text{Area total} - \text{Area de la barra de comb.}$$

$$= 4.81\text{X}10^{-2} ft^2$$

$$\text{Diámetro-equivalente} = \frac{4(\text{área de enfriamiento})}{\text{Perímetro mojado}}$$

$$= \frac{4(4.81\text{X}10^{-2})\,ft^2}{10.89 ft} = 1.77\text{X}10^{-2} ft.$$

- Flujo dentro de la canal caliente:

Flujo masico del refrigerante $2.158\text{X}10^5$ Ib/h

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{flujo masico}}{(\text{densidad})\,(\text{área de enfriamiento})}$$

$$= \frac{2.15\text{X}10^5}{(51.2)\,(4.81\text{X}10^{-2})\,(3600)} = 24.4 \text{ ft/seg.}$$

- Coeficiente de transferencia de calor.

$$Nu = 5.0 + 0.025\, Pe^{0.8} = 9.375 \text{ (a Pe=631)}$$

$$h = \frac{Nu(k)}{Deq} = \frac{9.375\text{X}37.8}{1.77\text{X}10^{-2}} = 20050 \frac{BTU}{h\ ft^2\,°F}$$

- Valores en la canal caliente

Aumento del refrigerante	1.46
decremento de temperatura en la película	1.49
decremento de temperatura en el encamisado	1.44
decremento de temperatura a través del gas	1.44
decremento de temperatura del combustible	1.52

- Perfil de temperatura en la canal

Temperatura del refrigerante a media altura de la canal

$$T_f = 950 + \frac{1}{2}(263)(1.46) = 1142°F$$

$$\Delta T\ (\text{película}) = \frac{(\text{factor}\ \Delta t\ \text{película})\ (P_{max}/P_{promedio})\ (\frac{q}{A})}{h}$$

$$= \frac{1.49(1.52)}{20050}\ (3.75X10^5) = 42.3°F$$

Temperatura en la superficie del encamisado

$$T_c = 1142 + 42.3 = 1184.3°F$$

$$\Delta t\ (\text{encamisado}) = 1.52(1.44)\ (3.75X10^5) \left| \frac{(0.028/12)}{k} \right| = 191°F$$

$$\Delta t\ \text{interfase encamisado-combustible} = \frac{(1.52)(1.44)(3.75X10^5)}{1000} = 821°F$$

El coeficiente de transferencia de calor se considera de 1000 BTU/h °F ft^2 para la interfase encamisado-combustible.

Temperatura en la superficie exterior del combustible

$$T_s = 1184 + 191 + 821 = 2196°F$$

$$\Delta t \text{ combustible} = \frac{1.52(1.52)(8.6)(3412)}{4(1.6)(3.14)} \left[1 - \frac{2(0.0998)^2}{(0.2405^2-0.0998^2)} \ln\frac{0.2405}{0.0998} \right]$$

$$= 2141°F$$

Temperatura en el interior del combustible

$$Tm = 2196+2141=4337$$

El perfil de la distribución de temperatura se muestra en la fig. IV.

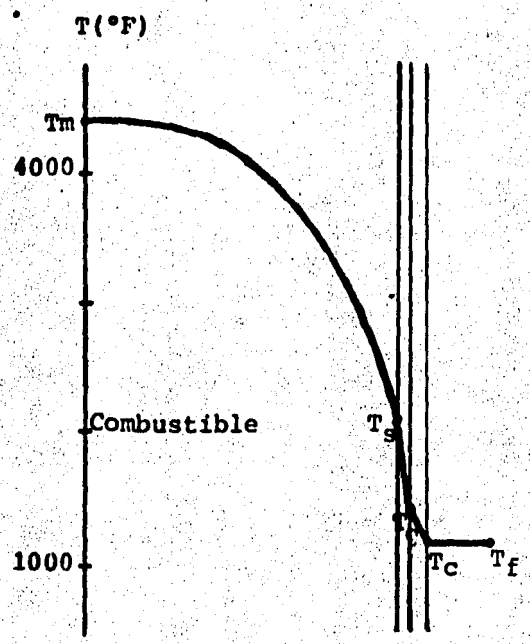


Fig. IV Perfil de distribución de temperaturas.

CAPITULO III

"DISEÑO DEL EQUIPO PRELIMINAR

RESULTADOS Y CONCLUSIONES"

1.1 DISEÑO DEL CAMBIADOR DE CALOR ---------- 58

1.2 SISTEMA DE CONTROL. ---------- 68

1.3 RESULTADOS ---------- 70

1.4 CONCLUSIONES ---------- 75

CAPITULO III

DISEÑO DE EQUIPO PRELIMINAR

Dentro de las actividades de diseño y enseñanza de reactores nucleares, es importante contar con modelos que simulen ciertas funciones y características de reactores reales, ya que es muy difícil disponer de equipo real para realizar prácticas y experimentos de diseño.

En este capítulo se discute el diseño de un simulador termohidráulico en el que se dá prioridad al diseño de la parte instrumental. En la fig. (V) se muestra el diagrama general del equipo.

En este caso se utiliza como núcleo del reactor un sistema de resistencias eléctricas contenidas en un recipiente cilíndrico (acero), en el cual se calienta un líquido (agua o aceite) que funciona como refrigerante primario y circula por el tubo interior de un cambiador de calor tipo "doble tubo" para suministrar parte del calor ganado a un refrigerante secundario (agua).

La secuencia de operaciones para el diseño del cambiador de calor se muestra en la Fig. (VI): Se fijó la velocidad de los fluídos que permiten la existencia de un "flujo turbulento" que facilitan la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor, individual, parcial y global del sistema, y con este último es posible determinar el área total de transferencia de calor. El cambiador de calor tiene una longitud de 32ft(9.75m).

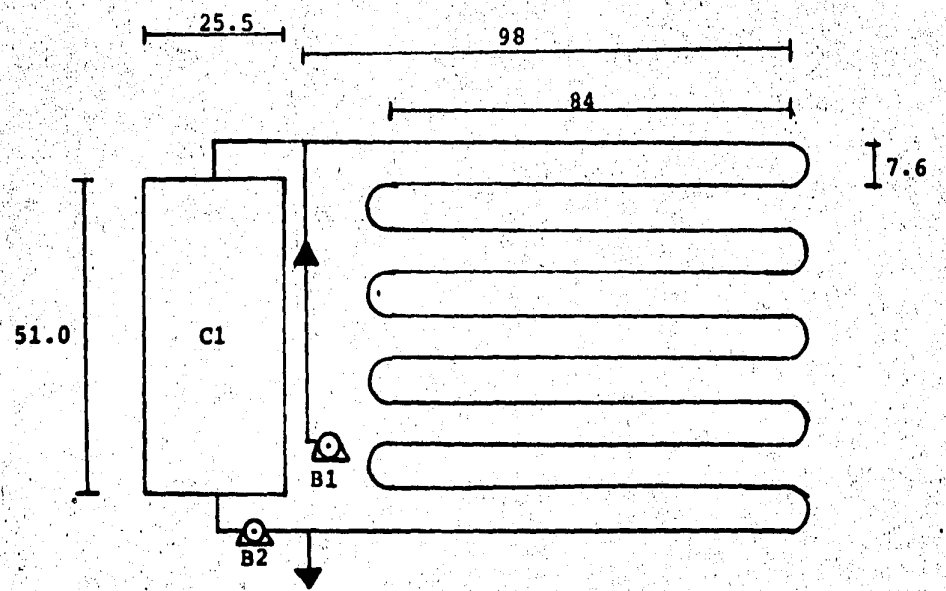


Fig. V Diagrama de flujo del simulador Termohidráulico.

B1 Bomba para líquido frio.

B2 Bomba para líquido caliente

C1 Contenedor de líquido caliente.

Acotación: Centímetros.

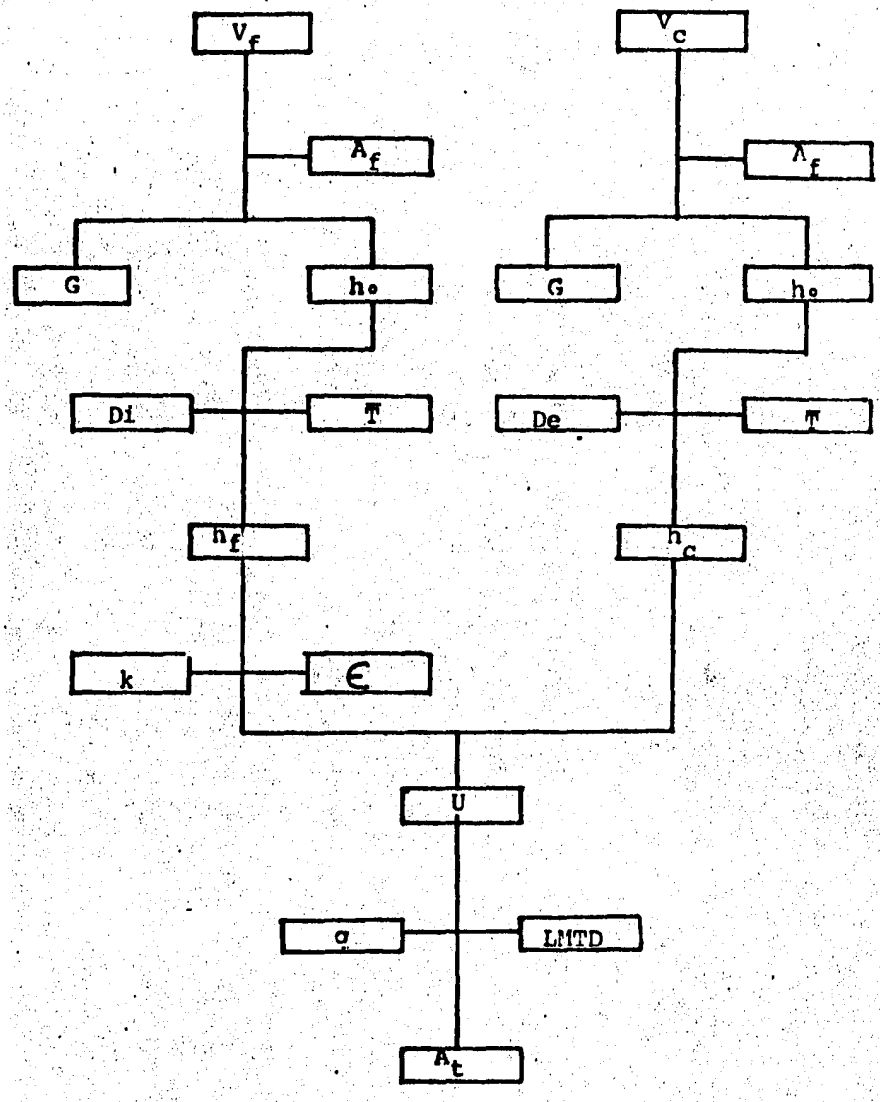


Fig. VI Secuencia de operaciones para el diseño del cambiador de calor.

En las tablas XV, XVI y XVII, se especifican las condiciones empleadas para el diseño del cambiador de calor.

En el diseño del cambiador de calor se sigue el método, proporcionado por la referencia (1), para cambiadores de doble tubos.

El sistema estará aislado con lana mineral para una temperatura de 149°C. Las propiedades físicas de la lana mineral se indican en la tabla (XVIII).

	Tubo 3/4 in	Tubo 1 1/4in
Espesor de la pared (ϵ)	0.049in	0.049in
Diámetro interno (Di).	0.652in	1.152in
Diámetro externo (Dex.)	0.75in	1.25in
Diámetro equivalente (De).	——	1.02in
Area de sección transversal interna	$0.334in^2$	$1.042in^2$
Area de sección transversal externa	$0.442in^2$	$1.227in^2$
Area equivalente	——	$0.6in^2$
Longitud de tubo por ft^2- de superficie.	5.1	——
Conductividad térmica del Cobre (k).		218BTU/h ft°F

Tabla IV Especificaciones de los tubos para el cambiador de calor.

	Fluido frio (f)	Fluido caliente(c)
elocidad V. (ft/seg).	1.13	1.79
rea de flujo A_f. (ft^2).	0.0042	0.0023
lujo volumétrico G.(ft^3/seg).	0.0047	0.0041
emperatura(inicial-final). T.	(59-131)°F	(194-112)°F
emperatura promedio $\overline{T}$ (°F).	95	153
oeficiente individual parial de transferencia de calor (h_o).	323 BTU/ft^2h °F	440 BTU/ft^2h °F
oeficiente individual de transferencia de calor (h).	323 BTU/ft^2h °F	626 BTU/ft^2h °F

abla (XVI) Condiciones de los fluidos dentro de los tubos.

Calor transferido (q) .	76032 BTU/hr.
Media logarítmica de las diferencias de temperatura (L.M.T.D.).	57.86
Coeficiente global de transferencia de calor (U).	210 BTU/h f_t^2 °F
Area total de transferencia de calor (A_t).	6.25 ft^2
Longitud del cambiador de calor.	32 ft

Tabla XVII Valores de diseño del cambiador de calor.

Tabla XVIII

Propiedades físicas de la Lana Mineral

Temperatura máxima	770°C
Densidad	200 Kg/m^3
Resistencia al fuego	incombustible
Corrosión al acero	ninguna
Encogimiento lineal	1 % a 400°C
Temperatura de fusión	1000°C
Absorción de humedad	0.2 % en peso a 100°C
Conductividad térmica a 150°C	0.38 BTU $in/ft^2 \cdot Fh$
Espesor	1in.
Temperatura en la superficie.	30°C

El diseño del cambiador de calor se desarrolló para velocidades relativamente bajas para ambos fluidos, como puede apreciarse en la tabla XVI. Si se considera que la potencia para ambas bombas es de 1/4 H.P. las velocidades desarrolladas por ambos fluidos se incrementarán como consecuencia de la capacidad de la bomba. Las características de una bomba centrifuga se muestran en la tabla XVIII. Con el propósito de mantener las velocidades de ambos fluidos de la misma magnitud los diámetros de los tubos se incrementan a 1 in y 1 1/2 in obteniéndose velocidades de 5.5 ft/seg y 4.13 ft/seg respectivamente. Los cambios de temperatura que se obtienen son:

FLUIDO FRIO: de 15°C a 37°C (agua)

FLUIDO CALIENTE: de 80°C a 53°C (agua)

La longitud del cambiador de calor se mantiene constante, es decir 32 ft.

Los cambios necesarios para el recipiente contenedor de agua caliente son:

DIAMETRO	40cm.
ALTURA	100cm.
VOLUMEN	120 l.

Las caídas de presión que se tienen en el cambiador de calor son:

Para el tubo interior de 1 in BWG 18

$$\Delta P = 1.66 \frac{lb}{in^2}$$

- Para el tubo exterior de 1 1/2in BW6 16

$$\Delta P = 5.34 \frac{lb}{in^2}$$

considerando las 5 horquillas de tubos mostradas en el diagrama de flujo del simulador termohidráulico Fig. V.

Las caídas de presión permitidas en el diseño se considera para ambos fluidos de:

$$\Delta P \text{ PERMISIBLE} = 10 \frac{lb}{in^2}$$

Para la evaluación de las caídas de presión en el cambiador de calor consultar la referencia (22).

La carga de succión neta positiva (NPSH) para la bomba que circula el líquido caliente (80°C), considerando las pérdidas por fricción (h_L) despreciables, es:

N.P.S.H. = 13.56 ft.

Consultar Referencia (25).

Las principales señales disponibles utilizadas en el control automático son:

- La potencia del reactor.
- La presión y la temperatura a la salida del núcleo del refrigerante primario.
- La presión y la temperatura de entrada y salida en el cambiador de calor.
- La presión y la temperatura a la entrada de la turbina.
- La frecuencia de generación.

Los lugares importantes para la aplicación del control son:

- Barras de control para variar la distribución y el nivel de potencia.
- El flujo de circulación de refrigerante primario.
- El flujo de circulación de refrigerante secundario.

Un sistema de control esta formado por los circuitos eléctricos, interruptores, indicadores y alarmas que son necesarias para mantener las condiciones de seguridad y de operación. Los controladores se utilizan para tomar las señales de control convenientes y compararlas con una señal determinada.

na vez que se ha completado el diseño del simulador, es necesario diseñar la parte asociada de instrumentación electrónica. En la figura VII se muestra un diagrama de bloques de las funciones electrónicas necesarias para el funcionamiento automático del simulador. Las funciones de este instrumento son las siguientes:

1.- Control de Temperaturas: Entregar energía al nucleo en tal forma de mantener la temperatura constante durante cierto intervalo de tiempo.

2.- Prender y apagar el sistema completo en tiempos pre-determinados.

3.- Medir temperaturas en sensores escogidos con el termómetro digital.

4.- Graficar temperaturas en forma secuencial de todos los sensores durante tiempos escogidos.

El funcionamiento del circuito es como sigue:

Todas las partes eléctricas y electrónicas se prenden y apagan con un control general de encendido (CgE) al que le fija los tiempos el reloj 1. Una vez que se prende todo el equipo, el control de temperatura fijará una temperatura al núcleo, con el sensor S1 dando información para la retroalimentación del control. Además todos los otros sensores entrarán en paralelo al primer switch (sw), el cual podrá mandar los sensores al medidor (termómetro) digital o los mandará al switch automático (SrG), el cual irá escogiendo los sensores en forma secuencial durante un cierto tiempo prefijado para ser graficados, una vez que termina el último sensor, se termina el proceso, o puede empezar repitiéndose este.

El circuito fué construído en el departamento de Ciencias Nucleares de la

Facultad de Química, de la División de Estudios de Posgrado. En la figuraVIII muestra la gráfica de distintos sensores durante dos minutos cada uno. En la figura IX se muestra la gráfica del funcionamiento del control de temperatura, a distintas temperaturas haciendo notar que la primera parte se graficaron algunos minutos y ya que se logró cierta estabilidad, se graficó por varias horas.

Como se nota de estos resultados, la instrumentación es adecuada para llevar a cabo mediciones en el simulador, faltando unicamente su construcción que es parte de otra tesis.

En la figura X se incluye la curva de comportamiento de los termopares Hierro-constantan.

El tiempo empleado para la construcción de la instrumentación electrónica fué de 5 meses y los costos asociados fueron:

Control de temperatura	$ 7,500
Control mauestro	$ 25,000
Termómetro digital	$ 15,000
Graficador HonneyWell	$ 500,000

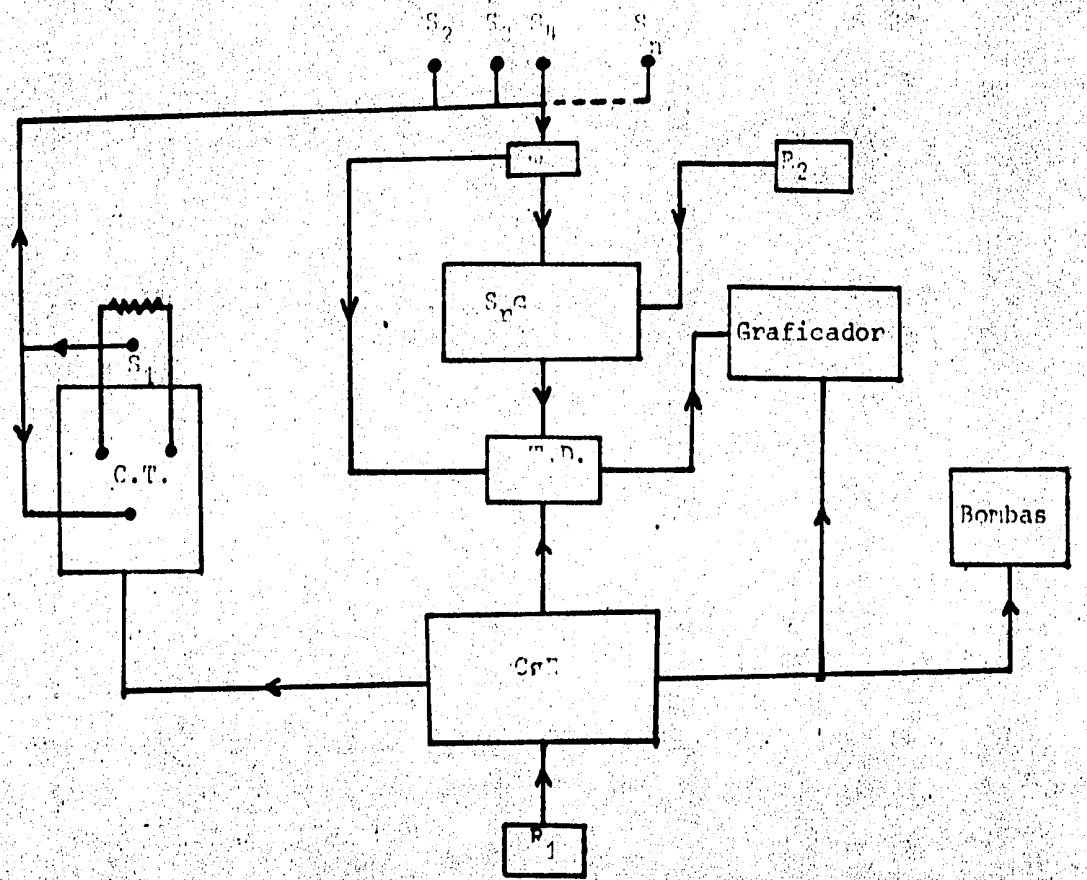


Fig.VII Diagrama de bloques de la instrumentación electronica

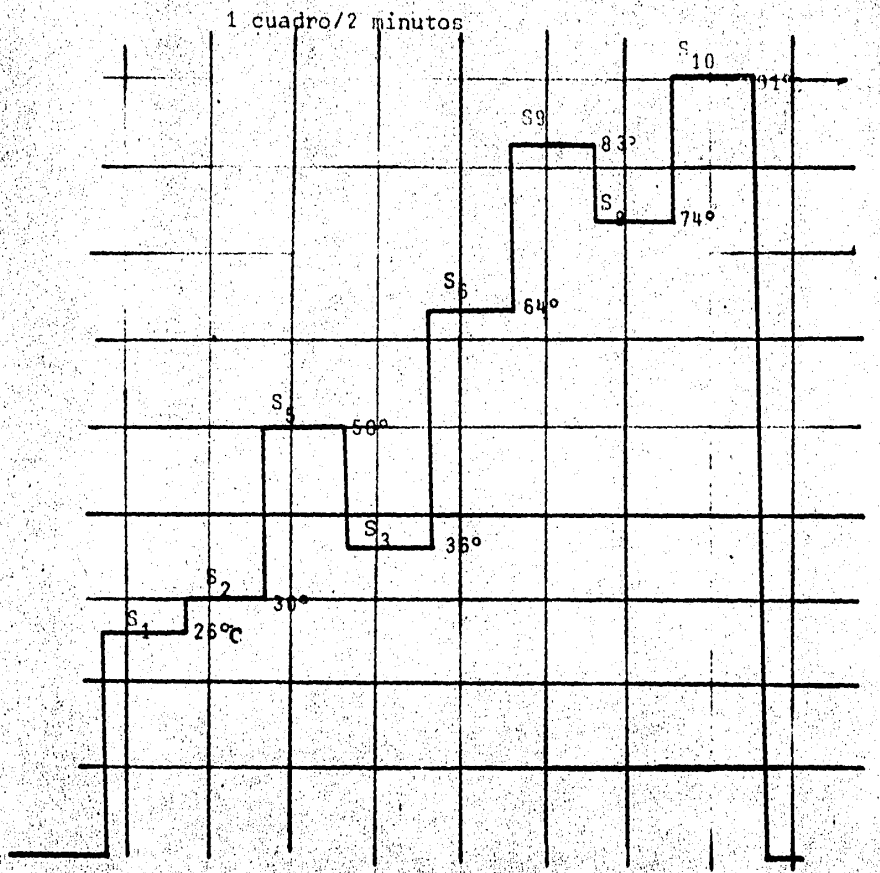
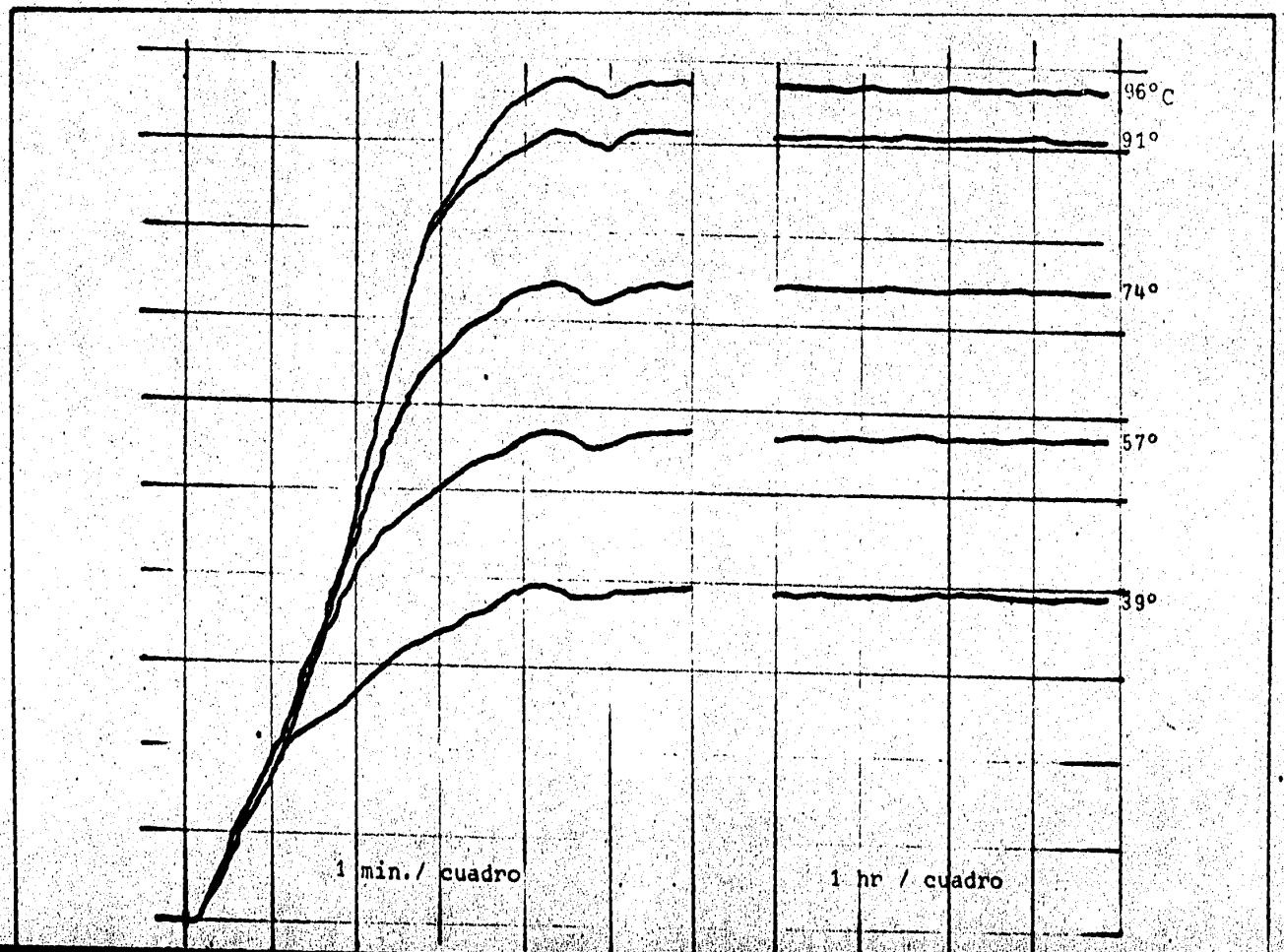


Fig.VIII . Registro automático de temperaturas.


96°C
91°
74°
57°
39°
1 min./ cuadro
1 hr / cuadro

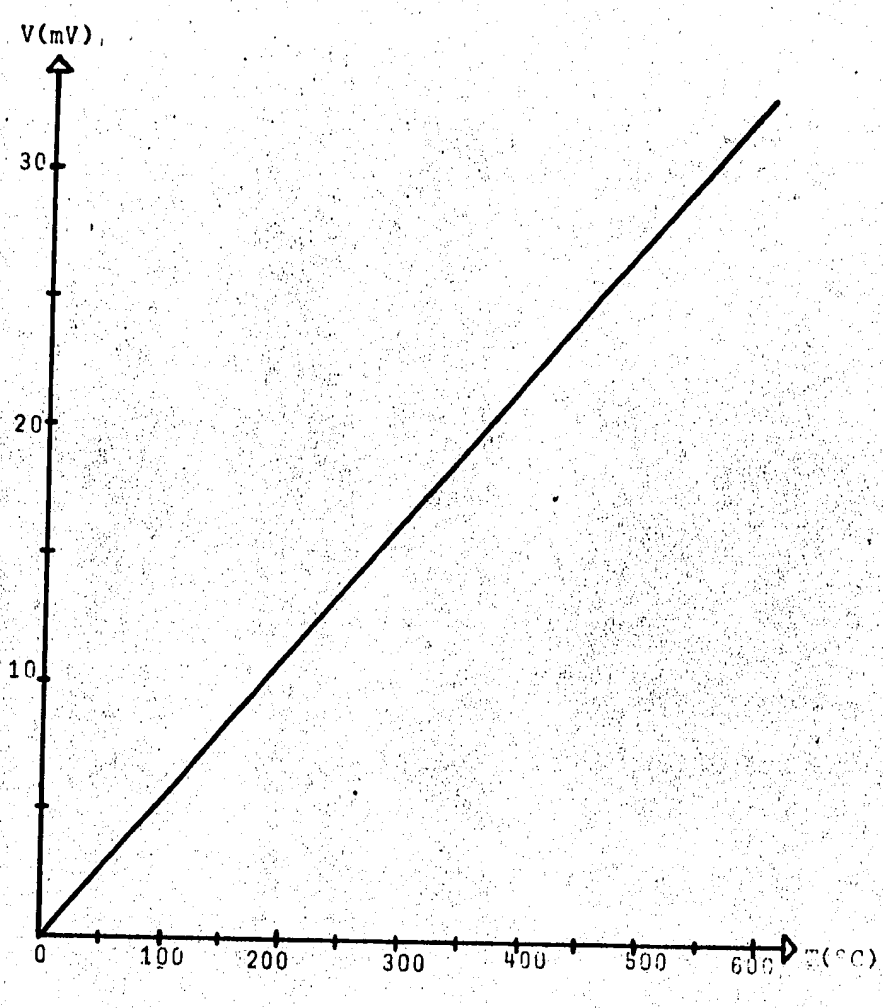


Fig. (X) Curva de la diferencia de Potencial - Temperatura en Termopares Hierro - Constantan.

C O N C L U S I O N E S

Los resultados obtenidos de la instrumentación asociada al modelo termohidráulico son satisfactorios y realizan los fines para los cuales fueron diseñados, por lo que la siguiente etapa consiste en la construcción del modelo termohidráulico de Reactor Nuclear para el cuál se pretende emplear esta instrumentación, quedando de esta forma completo el sistema de simulación.

BIBLIOGRAFIA

1.- H.J. Stoever
Applied heat transmission
Mc Graw Hill 1941

2.- Charles F. Bonilla
Nuclear Energy
Mc Graw Hill 1957

3.- United Nations
Peacefull uses of atomic energy
Vol. 5 Geneva 1958

4.- Harold Etherington
Nuclear Energy Handbook
Mc Graw Hill 1958

5.- Journal of Nuclear Materials
Zirconium - 2.5% Niobium Alloy
Vol. 6 No. 3 agosto 1962

6.- Journal of Nuclear Materials
Fission Product effects in uranium dioxide
Vol. 9 No. 3 agosto 1963

7.- Paul Ageron
Tecnología de los Reactores Nucleares
Ediciones Urmo 1968

8.- Revista IMIQ
Hidrocarburos
marzo 1976

9.- Considine
Energy Tecnology
Mc Graw Hill 1977

10.- James J. Duderstadt
Nuclear Power
Ann Arbor Science 1979

11.- Gregory R. Chopin
Nuclear Chemistry
Pergamon Press 1980

12.- Murray
Nuclear Energy
Pergamon Press 2nd Ed. 1980

13.- Physics of modern materials
International Atomic Energy Agency
Vol. I, II Viena 1980

14.- M.M. El - Wakil
Nuclear Heat transport
The American Nuclear Society 1981

15.- Erick S. Pedersen
Nuclear Power
Vol. I, II Ann Arbor Science 1982

16.- Nuclear Power Reactors in the Wordl
International Atomic Energy Agency
Viena 1983

17.- Programa Nacional de Energéticos 1984-1988
Poder Ejecutivo Federal

18.- Robert H. Perry
Chemical Engineer Handbook
Fifth Edition

19.- Aislantes minerales S.A. de C.V.
Lana Mineral.

20.- Planta Nucleoeléctrica de Laguna Verde
Unidad Número I.
Vol. II y IV
Comisión Federal de electricidad 1973.

21.- Boletin Informativo del Sector Energético
"Energéticos"
Año 6 Vol. 8 Agosto 1982.

22.- Donal Q. Kern.
Procesos de Transferencia de Calor
C.E.C. SA 1969.

23.- Crane
Technical Paper N° 410 "Flow of Fluids"
Crane Co. 1969.

24.- Chemical Engineering
"How to Design Piping For
Pump - Suction Conditions"
Abril 28, año 1975.

25.- Ernest E. Ludwig
Applied Process Design for Chemical
And Petrochemical Plants. Vol. I
Gulf Publishing Company 1965

26.- James F. Boland
Nuclear Reactor Instrumentation
Gordon and Breach Science Publishers 1970.

27.- -R. Byron Bird
Transport Phenomena
John Wiley 1960

28.- - Alan S. Foust
Principles of Unit Operations
John Wiley 1962