

110  
2 ejem.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DEGRADACION DE LA RESPUESTA DEL TERMOPAR  
DE UN COMBUSTIBLE POR RADIACION.

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERIA QUIMICA**

PRESENTA:

**ABIGAIL RODRIGUEZ VILLASEÑOR**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D. F. 1994



## **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:**

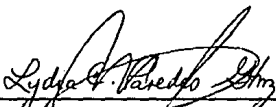
Presidente: Prof. Juan Lartigue Gordillo  
Vocal: Ing. Lydia Concepción Paredes Gutiérrez  
Secretario: Profra. Guillermina Burillo Amezcua  
1er. Suplente: Prof. Luis Cabrera Mosqueda  
2do. Suplente: Prof. Martín Jesús Soberón Mobarak



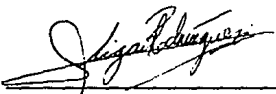
**Sitio donde se desarrolló el tema:**

Departamento del Reactor y Materiales Radiactivos,  
Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (I N I N).

Asesor del tema:

  
Ing. Lydia Concepción Paredes Gutiérrez

Sustentante:

  
Abigail Rodríguez Villaseñor

*A mis padres: Aurora y Miguel*

*por su infinita paciencia y su gran apoyo,  
a ellos les dedico este esfuerzo que por fin  
se ve cristalizado, los quiero mucho.*

*A mis hermanas: Edith y Aurora*

*con cariño.*

*A Mónica:*

*por la amistad incondicional de tantos años.*

*A Rafael:*

*por los años que convivimos en la Facultad.*

*A Lorena y Betty:*

*por las desveladas.*

*A mis compañeros de Generación:*

*por los momentos.*

*A Jorge:*

*con todo mi amor.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por el apoyo técnico, por la ayuda humana y económica brindada durante el tiempo de elaboración de esta Tesis.*

*A la Ing. Lydia Paredes Gutiérrez, por su gran ayuda, asesoría y consejos en la dirección de esta tesis y por sus enseñanzas de las Ciencias Nucleares, pero sobre todo por la amistad que me brindó y que hizo patente en todo momento.*

*Al M. en C. Leonardo Macías Betanzos, por sus valiosas consideraciones a mi tesis, por su apoyo incondicional y por sus enseñanzas.*

*Al M. en C. Ruperto Mazón y Atanasia Monroy por su apoyo y amistad.*

*Al grupo de Operación del Reactor, Don Robert, Roberto, Wenceslao, Margarito, Fernando y Goyo por la ayuda brindada y por facilitar las condiciones de experimentación requeridas que sin su apoyo no hubiesen sido posibles.*

*En general a todos los que laboran en el Instituto y que de alguna manera facilitaron mi estancia al hacer posible que esta tesis se llevara a cabo.*

## INDICE

RESUMEN	1	
CAPITULO UNO	INTRODUCCION	2
I.	Antecedentes de los termopares del reactor nuclear.	3
II.	Objetivo de la Tesis.	4
CAPITULO DOS	GENERALIDADES	5
I.	Degradación de metales por gradientes de temperatura.	6
II.	Proceso radiactivo.	7
III.	Degradación de materiales no fisionables por radiación.	10
1)	Principios Generales.	10
2)	Desplazamiento Atómico.	10
3)	Picos térmicos y de desplazamiento.	11
4)	Efectos debido a la radiación de neutrones.	14
5)	La transferencia de energía cinética a la red atómica.	17
6)	La energía de umbral y sección eficaz de desplazamiento.	18
IV.	Principios del funcionamiento del termopar.	18
1)	Efecto Seebeck.	19
2)	Termoelectricidad, desde un punto de vista microscópico.	19
3)	Ley de los materiales homogéneos.	19
4)	Ley de los materiales intermedios.	19
5)	Ley sucesiva de las temperaturas intermedias.	20

V. Funciones de un termopar dentro de un combustible y su interacción con el ambiente.	20
1) Descripción del reactor.	20
2) Elemento combustible-moderador.	21
3) Elemento combustible instrumentado.	21
4) Termopar tipo K.	21
5) Funciones del termopar en el reactor nuclear.	22
CAPITULO TRES           PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	24
I. Criterios para el diseño del experimento.	25
1) Requerimientos para el diseño del dispositivo de irradiación.	26
2) Dispositivo de irradiación.	27
3) Especificaciones y calibración del termopar.	28
II. Criterio de selección de las condiciones de irradiación.	28
III. Procedimiento de medición de la temperatura y de la resistividad.	31
1) Sistema de medición y software para procesamiento de datos.	31
2) Método para evaluar la resistividad de un termopar irradiado.	32
CAPITULO CUATRO       RESULTADOS	36
I. Resultados.	37
1) Temperatura.	37
2) Resistencia.	39
3) Potencia.	41

<b>CAPITULO CINCO</b>	<b>METODO DE EVALUACION DE LA DEGRADACION</b>	<b>47</b>
I.	Métodos estadísticos de evaluación.	48
1)	Planeación estadística.	48
2)	Evaluación.	48
II.	Transmutación teórica sufrida.	49
III.	Relación de parámetros.	50
IV.	Porcentaje de variación de parámetros medidos.	51
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>53</b>
<b>REFERENCIAS</b>		<b>55</b>
<b>APENDICE</b>		<b>57</b>
I.	Diagrama del elemento combustible instrumentado.	58
II.	Diagrama de la placa superior del núcleo del reactor.	59
III.	Programa TERMOPAR.C.	60
IV.	Pantalla de presentación de datos del programa TERMOPAR.C.	66



## RESUMEN.

Se llevó a cabo una evaluación de las condiciones en las cuales se encontraron los termopares del combustible instrumentado, se planteó el problema de su falla temprana y se llevó a efecto una experimentación con un termopar similar tipo K sometiendo a condiciones semejantes con algunas variantes en temperatura pero con un mismo flujo neutrónico. Se observaron ligeros cambios en sus propiedades eléctricas, específicamente resistencia eléctrica y resistividad. En cuanto a su composición química, se puede hablar de cambios insignificantes del orden de 0.05 al 0.1%. Al realizarse el estudio y análisis del núcleo del reactor se encontró que el principal motivo en la degradación de los termopares fue en conjunto, la radiación por neutrones rápidos y productos de fisión sumados a los gradientes térmicos en cortos intervalos de tiempo, donde el caso más grave, es el que ocurre en el modo de operación pulso de potencia. La cantidad de estos pulsos repercute de manera decisiva en el arreglo cristalino del metal, traduciéndose así en daños permanentes en las propiedades eléctricas y mecánicas. En base a este análisis y a los resultados de la experimentación, se estableció una relación del tiempo de exposición, el flujo neutrónico y el número de pulsos a los cuales se somete el reactor con el tiempo de vida útil del termopar.

## **CAPITULO UNO**

### **INTRODUCCION**

## I. ANTECEDENTES DE LOS TERMOPARES DEL REACTOR NUCLEAR.

Desde que el Reactor Nuclear TRIGA<sup>1</sup> Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) llegó a criticidad en 1968, se han empleado tres elementos combustibles instrumentados. Un elemento combustible instrumentado consta de un elemento combustible enriquecido en U-235 e hidruro de zirconio y en su interior cuenta con tres termopares. La configuración del núcleo del reactor sólo dispone de un combustible instrumentado. Estos termopares se utilizan para el registro de la temperatura que prevalece en el combustible nuclear en operaciones en estado estacionario, onda cuadrada y pulsos. Sólo un termopar se encuentra conectado a la consola de operación mientras que los otros dos quedan libres para ser utilizados en caso de falla del primero.

Debido a que alguna falla en el combustible y su instrumentación puede repercutir en un cambio de reactividad dentro del reactor, es necesario que cada modo de operación cuente por lo menos con tres fuentes independientes de medición, razón por la cual el combustible cuenta con tres termopares. Por otro lado, cuando se lleva a cabo una operación en modo pulso, también se requieren fuentes alternas de medición; una de ellas la proporciona el termopar, que transmite una señal la cual es retardada por un circuito analógico y traducida como potencia. En este modo de operación, aunque la señal obtenida no ayuda a controlar el pulso, es un requisito del procedimiento que de no cumplirse es origen de una falta a la normativa que rige la operación segura del reactor, adicionalmente a que proporciona información cuantitativa de la potencia generada.

Cuando un termopar falla se substituye por un segundo termopar; sin embargo, por haber estado en las mismas condiciones de irradiación y temperatura que el termopar que dejó de funcionar éste sólo funciona por un corto intervalo de tiempo o, en su defecto, su medición no es confiable. Así, la vida útil de los termopares de los dos primeros combustibles instrumentados que se utilizaron fue menor a la de los combustibles mismos. Esto trajo como consecuencia que durante el tiempo que aún tenía de vida útil el combustible en turno, no se pudiera pulsar el reactor, ya que este modo de operación depende del buen funcionamiento del termopar del combustible.

---

<sup>1</sup> Training, Research and Isotope production of General Atomic.

## II. OBJETIVO DE LA TESIS.

Esta tesis, tiene como propósito conocer las causas que influyeron en el acortamiento de la vida útil de los termopares del combustible instrumentado que operaron durante un lapso de aproximadamente 5 años. El conocimiento de dichas causas aporta información importante para la predicción del tiempo de vida útil de los subsecuentes combustibles instrumentados y, así mismo, para la planeación de las futuras recargas del núcleo, logrando con ello una mejor administración y máximo aprovechamiento del combustible del reactor.

En base a un análisis de los registros de operación del reactor, a anteriores experimentos de evaluación de la temperatura del combustible instrumentado y al desarrollo experimental de selección de la posición del combustible instrumentado; para abordar el problema se realizará una experimentación que permita tomar en cuenta de manera muy concreta dos puntos de vista: degradación química por transmutación de elementos y degradación debida a gradientes de temperatura. Se utilizará la estadística como una herramienta para la planeación de la experimentación así como para la interpretación de los datos obtenidos.

## **CAPITULO DOS**

## **GENERALIDADES**

## I. DEGRADACION DE METALES POR GRADIENTES DE TEMPERATURA.

Las propiedades físicas y químicas de los metales sugieren una estructura en la que los electrones son relativamente móviles. Así, al someter un metal a un campo eléctrico externo, ocurre un flujo de electrones que origina una corriente eléctrica. De forma semejante, la conductividad térmica se explica suponiendo que se transfiere calor por el metal debido a las "colisiones" entre los electrones. La red de un cristal está conformada por una repetición en tres dimensiones de la unidad más pequeña llamada celda unidad, la cual varía de acuerdo al material mismo. Cuando todos los átomos de una red cristalina son del mismo tamaño, como sucede con los metales, tienden a aglomerarse lo más estrechamente posible. Las propiedades físicas y químicas de un sólido pueden cambiar considerablemente cuando en la red cristalina se forman defectos. Puede haber varios tipos de defectos, el más común es cuando un ión se mueve de su lugar normal y ocupa lo que se conoce como una posición intersticial. Por lo regular se traslada el catión por ser de menor tamaño que los aniones. La incorporación de un número pequeño de átomos o iones ajenos a una red cristalina, puede ocasionar un efecto drástico en las propiedades del sólido. Un caso notable, es el efecto en la conductividad eléctrica. Si en la red de un cristal metálico se incorpora un átomo diferente puede ocurrir lo siguiente:

1) Si hay un exceso de electrones por parte del átomo ajeno, entonces estos electrones pueden desplazarse con relativa libertad en el cristal bajo la influencia de un campo eléctrico. Ocurre entonces una conducción tipo n.

2) Si el átomo ajeno posee menos electrones, entonces en este lugar se crea un déficit de un electrón, así hay un "agujero positivo" en la red. En un campo eléctrico, un electrón se traslada de un átomo vecino para llenar este hueco, pero al hacerlo crea un déficit de un electrón en torno del átomo que abandona. Ocurre entonces una conducción tipo p.<sup>(1)</sup>

Cuando un metal es sometido a una elevación de temperatura, se lleva a cabo una excitación de los electrones de valencia (nube electrónica) los cuales se mueven por las bandas de conducción. Pero si la temperatura a la que se ha sometido es muy grande, entonces no sólo ocurre desplazamiento de electrones, sino que la energía cinética que obtienen los átomos del metal es tal que ocurren desplazamientos atómicos y con éstos la formación de vacancias.

Al ser desplazado un átomo de su posición inicial, se encontrará en un nivel energético mayor al que poseía (inestable) y tratará de disipar esta energía desplazando más átomos (si esta energía es lo suficientemente grande) o simplemente buscará arreglo dentro de la red atómica. Si no encuentra una vacancia en la cual pueda localizarse, tal vez quede localizado en un lugar intermedio. Así, se formarán dislocaciones en el cristal las cuales permanecerán de forma constante mientras la temperatura así lo sea.

El crear una vacancia en una región deformada permite un rearrreglo de los átomos, lo que disminuye la energía de deformación de la red. El incremento de la densidad de dislocaciones y de vacancias tiene una relación prácticamente lineal con la deformación a la que se ha sometido el metal, aunque la relación entre las dos es diferente; al parecer las deformaciones plásticas introducen pocas vacancias y más dislocaciones. Las deformaciones plásticas incrementan la resistividad eléctrica, la cual es naturalmente reestablecida por la desaparición de las vacancias, en donde se rearreglan las dislocaciones existentes. El exceso de resistividad eléctrica que permanece entonces, es debida a las dislocaciones que no encontraron un reacomodo en la red atómica. Ahora bien, las vacancias incrementan la resistividad de forma independiente de la pureza del material, mientras que para una misma deformación, la densidad de dislocaciones se incrementa con la concentración de impurezas.

## II. PROCESO RADIACTIVO.

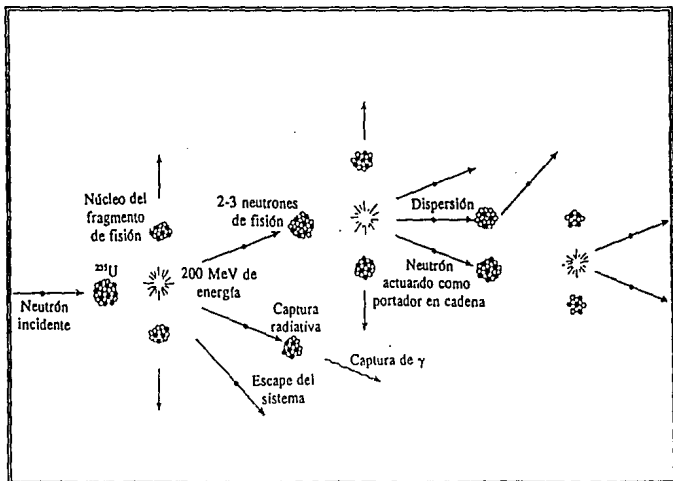
Durante una reacción nuclear, ocurren diferentes transformaciones de la energía. Inmediatamente después de una reacción con un desprendimiento de energía, el valor de ésta se encuentra ya sea en la forma de energía de excitación o en la forma de energía cinética de los productos. La energía de excitación aparece como radiación gamma, mientras que la energía cinética de los productos se convierte en energía térmica a través de las interacciones de dispersión con los átomos y electrones del medio en que ocurren. La energía cinética de unas cuantas partículas se distribuye así a un gran número de partículas en el medio.<sup>[1]</sup>

De las tres clases de reacciones nucleares (fisión, fusión y radiactividad) que ofrecen posibilidades como fuentes de energía, la fisión es la que en el presente tiene el primer lugar en la cantidad de energía nuclear que realmente se está produciendo. La palabra "fisión" se

aplica a una clase de reacciones nucleares en las que un núcleo pesado se parte en dos núcleos más pequeños, emisiones de neutrones y fotones gamma también acompañan al proceso.

En la fisión, entre los productos de la reacción hay neutrones los que a su vez sirven como reactantes, a estos neutrones se les conoce como neutrones de fisión. El espectro de energía de los neutrones de fisión es muy importante y éste comprende un valor más probable de alrededor de 1 MeV y un valor promedio de 2 MeV. Del valor de estas energías depende que estos neutrones sirvan o no como reactantes para la reacción de fisión, ya que el promedio de energía para que ocurra el proceso de fisión en átomos de U-235 requiere de neutrones de 0.0253 eV<sup>[1]</sup> (neutrones térmicos). A tal intervalo se le denomina "energía de umbral". Los neutrones con energía mucho mayor a la requerida para la fisión entonces pueden disminuir su energía por medio de las reacciones de dispersión (ver página 14). Cuando un neutrón con energía térmica no encuentra un isótopo fisionable y se encuentra con algún otro, puede ocurrir que este isótopo capture al neutrón, llevándose a cabo una reacción de captura neutrónica, la cual produce transmutación de elementos y decaimiento radiactivo en la mayoría de los casos.

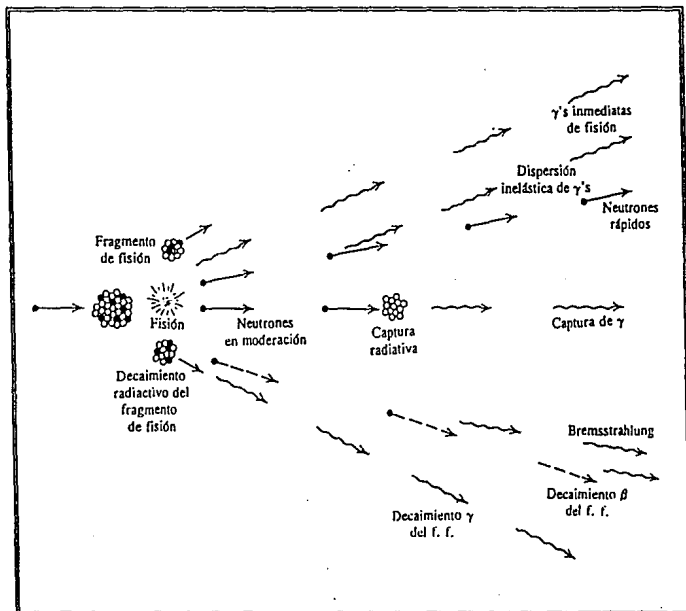
Figura 1. Esquema simple de una reacción de fisión en cadena.





Los productos de fisión se encuentran en un estado excitado inmediatamente después de la reacción. Dependiendo de la energía en exceso con la que se encuentren, decaen con la emisión de neutrones, si es muy alta; con la emisión de alfas, de partículas beta y por último con la emisión de fotones gamma, los que reciben el nombre de gammas retardadas. Estos fotones gamma poseen una energía promedio de alrededor de 6.65 MeV/fisión  $U^{235}$ .<sup>[2]</sup>

Figura 2. Tipos de radiación producida en una reacción de fisión en cadena.



### III. DEGRADACION DE MATERIALES NO FISIONABLES POR RADIACION.

#### 1) Principios Generales.

La principal característica del ambiente en un reactor nuclear es la presencia de radiación intensa. Esta radiación consiste de partículas alfa y beta, fotones gamma, neutrones, fragmentos de fisión, y, posiblemente, protones. Aunque los fragmentos de fisión no son estrictamente radiaciones nucleares, su comportamiento es generalmente similar al de las partículas alfa y los protones, que son partículas cargadas. Existe sin embargo un alto grado de diferencia proveniente de la gran masa de los fragmentos de fisión.

El efecto de la radiación en los sólidos cristalinos depende del tipo de estructura y de la naturaleza de la radiación. La ionización y la excitación electrónica, por ejemplo, producida por las partículas beta y los rayos gamma, causan muy pequeños cambios permanentes en los metales. La razón es, que en un metal los electrones en la banda de conducción son capaces de aceptar pequeñas cantidades de energía de excitación, y así una considerable proporción de energía de radiación es absorbida a causa de la excitación electrónica. Debido al gran número de estados de energía vacíos disponibles, los electrones excitados rápidamente pierden su exceso de energía; esta es tomada por los átomos del metal y aparece en forma de calor, tal como energía vibracional del núcleo. Sin embargo, las partículas más pesadas, tales como protones, neutrones, partículas alfa, y fragmentos de fisión, producen cambios significantes en las propiedades de los metales. Como un resultado de las colisiones elásticas, estas partículas pueden transferir cantidades apreciables de energía al núcleo de un sólido. Si la cantidad de energía transferida es suficiente para causar que el núcleo sea desplazado de su posición normal (en equilibrio) en la red espacial, se observarán cambios físicos de un carácter esencialmente permanente en el metal. Este efecto de la radiación nuclear es algunas veces conocido como "daño por radiación". Experimentalmente, la alteración de una propiedad física es observada como una función de la exposición total a la radiación y como una función de la elevación de temperatura.

#### 2) Desplazamiento atómico.

Si, como el resultado de una colisión elástica entre la relativamente pesada partícula

nuclear y un núcleo atómico, la energía transferida excede un cierto valor mínimo (usualmente del orden de 25 eV para un metal), el átomo impactado puede ser desplazado de su posición normal o de equilibrio en la red del sólido. Si muchos átomos cercanos son desplazados de ésta forma, algunos serán meramente transferidos de una posición de equilibrio a otra en la red. Sin embargo, si un átomo impactado es incapaz de encontrar un sitio de equilibrio vacante, su localidad final será una posición en no-equilibrio. Un átomo de éste tipo se supone ocupa un lugar intersticial y es conocido como un átomo intersticial, o en su defecto, como un "intersticial". Para cada átomo intersticial producido por la acción de la radiación, debe haber un sitio vacante correspondiente en la red, posiblemente a la misma distancia. Así, el resultado neto es un defecto más o menos permanente en el sólido, el cual si es lo suficientemente común, puede estar acompañado por un cambio en las propiedades físicas.

En muchos casos, la energía cinética transferida por la partícula nuclear al átomo impactado es tan grande, que más tarde puede producir átomos impactados secundarios por colisiones elásticas con otros átomos en el sólido. Si la energía cinética del primer átomo en cuestión es más grande que el límite poco definido de la energía de ionización, la cual esta en el orden de  $A$  keV, donde  $A$  es el número de masa del átomo, entonces la probabilidad es que dicho átomo perderá mucha de su energía por causa de la ionización.

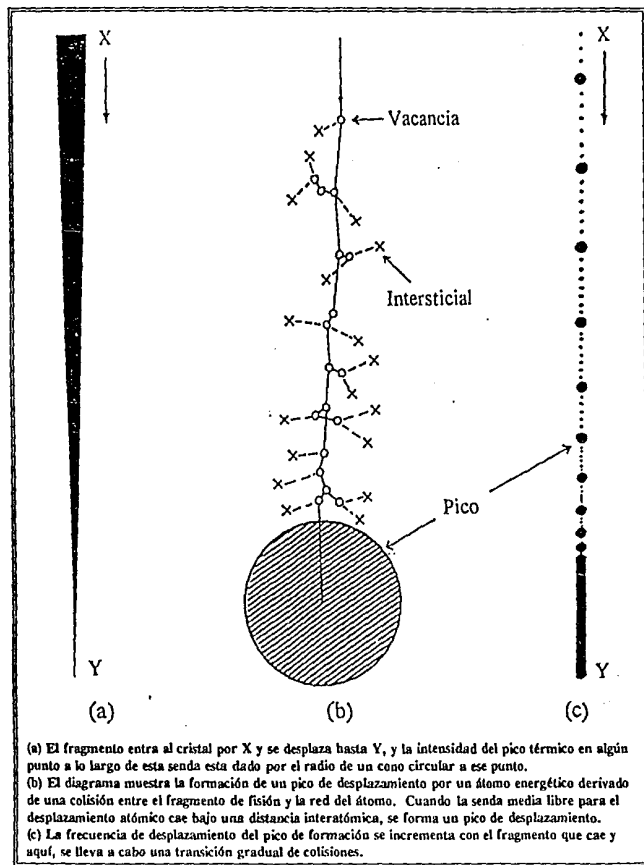
### 3) Picos térmicos y de desplazamiento.

Suponiendo un átomo impactado por una partícula cargada o por un átomo desplazado con energía cinética alta, puede observarse que estas energías vibratorias de exceso serán rápidamente transferidas a sus vecinos inmediatos los cuales, en reacción, transferirán alguna energía a sus vecinos.

Si la excitación es relativamente pequeña, tal que los pocos átomos vibratoriales dejan su sitio de equilibrio, el disturbio es nombrado como un pico de temperatura. Se ha estimado que en tal situación, una región que contenga del orden de unos miles de átomos será calentada a una temperatura alrededor de  $1000^{\circ}\text{C}$  por un período de cerca de  $10^{-10}$  segundos. A las altas temperaturas del pico térmico, se espera una distorsión en la red debido a la expansión. En el rápido enfriamiento, resultante de la conducción de calor de los átomos de alrededor, una cierta cantidad de distorsión de la red será mantenida, puesto que no será

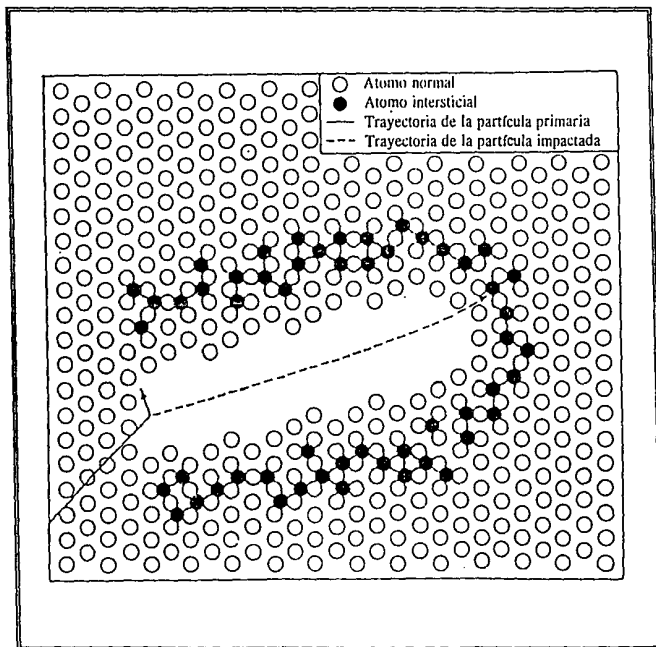
suficiente el tiempo para que todos los átomos sean relocalizados en posiciones de equilibrio. Consecuentemente, pueden desarrollarse esfuerzos en el material.

Figura 3. Representación esquemática de un pico térmico producido por un fragmento de fisión.



Por otra parte, la excitación vibracional puede ser suficiente para permitir que un gran número de átomos dejen sus posiciones en la red y se muevan. Como un resultado de las colisiones con otros átomos, se producirá un pico de desplazamiento. Se ha sugerido que cuando la energía cinética de un átomo impactado cae a un cierto valor, de algunas decenas de keV en un elemento pesado, el átomo en movimiento es rápidamente llevado a disipar su energía en una corta distancia del orden de 100 Å. Muchos miles de átomos en un pequeño volumen, adquirirían suficiente energía vibracional para permitirse mover a través de la red con la que colindan, desplazando así a otros átomos. Como consecuencia, ellos formarían un pico conteniendo un gran número de átomos intersticiales, vacancias y otras regiones desorientadas.<sup>(4)</sup>

**Figura 4. Representación esquemática de átomos intersticiales alrededor de una vacancia múltiple durante la producción de un pico de desplazamiento.**



#### 4) Efectos debido a la radiación de neutrones.

Son diferentes clases de reacciones que ocurren en los materiales no fisionables debido a la radiación neutrónica, estas son: reacciones de dispersión y reacciones de absorción.

##### a) Reacciones de dispersión.

Se llevan a cabo dos tipos de dispersión, elástica e inelástica. En la dispersión elástica o potencial, el neutrón es repelido por fuerzas nucleares de muy corto alcance al pasar muy cerca del núcleo. Se produce un intercambio de impulso lineal entre el neutrón y el núcleo, ocasionando un cambio tanto en la dirección como en la rapidez del neutrón. La energía cinética se conserva, lo que significa que la suma de las energías cinéticas del neutrón y del núcleo es la misma antes y después de la reacción. Esta interacción se abrevia como  $(n,n)$ . En el caso de la dispersión inelástica, el neutrón se incorpora a un núcleo compuesto. Este rechaza después al neutrón pero, en el proceso, el núcleo original pasa a un estado excitado del que decae emitiendo radiación gamma. La energía cinética no se conserva, ya que parte de la energía se convierte en fotones los cuales son emitidos del átomo; para que puedan ocurrir estas reacciones se requiere que los neutrones tengan una energía mínima (energía de umbral). Por lo común, estas reacciones no ocurren de modo significativo, si la energía de los neutrones se encuentra por debajo de aproximadamente 1 MeV. La interacción ocurrida puede ejemplificarse como  $(n,n')$ .

##### b) Reacciones de absorción.

Este tipo de reacciones se caracterizan por la emisión de una partícula diferente al neutrón, el cual es absorbido. Son varias las reacciones de absorción: fisión, captura radiativa, reacciones de partículas cargadas y reacciones de producción de neutrones.

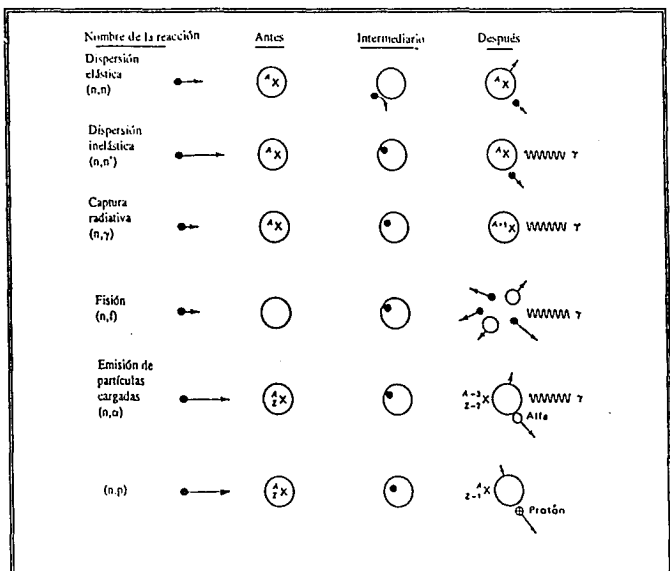
- Reacción de fisión,  $(n,f)$ . Ocurre sólo cuando un neutrón se impacta con un átomo de gran número atómico el cual se fracciona en dos partes para dar lugar a dos diferentes átomos. Esta reacción, es la fuente principal de energía nuclear de aplicación práctica.

- Reacción de captura radiativa. Su nombre se debe a que siempre se produce radiación gamma ( $n,\gamma$ ). El neutrón simplemente se une al número de masa mayor por uno. Desde luego, el núcleo producto,  $^{A+1}X$ , puede ser radiactivo y decaer en el núcleo-hijo. Dichas reacciones son casi siempre exotérmicas porque la energía de enlace del  $^{A+1}X$  es mayor que la del  $^AX$  más un neutrón libre.

- Reacción de emisión de partículas cargadas. Reacción común de los neutrones, que conduce a la emisión de una partícula cargada que por lo general, es una partícula alfa ( $n,\alpha$ ) o un protón ( $n,p$ ). Cada reacción puede ser exotérmica o endotérmica.

- Reacción de producción de neutrones. Son del tipo ( $n,2n$ ) y ( $n,3n$ ) y ocurren tan sólo con neutrones energéticos. Son endotérmicas por el hecho de extraer 1 ó 2 neutrones de la partícula impactada.<sup>[1]</sup>

Figura 5. Diferentes tipos de reacciones de neutrones.



La captura de un neutrón por el núcleo de un sólido puede producir dos efectos, estos son: (a) la introducción de impurezas atómicas y (b) desplazamiento atómico debido al rebote. Después de una larga exposición a los neutrones rápidos y térmicos en un reactor, un número suficiente de tales átomos puede acumularse para afectar las propiedades físicas del material. Debe notarse sin embargo, que dado que sólo una impureza atómica puede resultar de cada reacción neutrónica, el daño por transmutación es probablemente menor que el debido a la formación de picos térmicos y de desplazamiento por neutrones rápidos.

Adicionalmente a la producción de impurezas atómicas, otra de las consecuencias de las reacciones  $(n,\gamma)$  la cual puede ser más significativa, es el desplazamiento producido por el rebote seguido de la emisión de un fotón gamma. La energía total de los rayos gamma inmediatos que acompañan una reacción  $(n,\gamma)$  es aproximadamente de 6 a 8 MeV, y más para un elemento de bajo peso atómico, por ejemplo de 10; la energía de rebote sería de 2 ó 3 keV. Esto probablemente se ha subestimado debido a que no toma lugar dentro de la cantidad el efecto de emisión cascada de rayos gamma, los cuales ocurren frecuentemente. No obstante, a pesar de que se requieren sólo 25 eV para desplazar un átomo, la energía de rebote deberá ser capaz de causar un apreciable número de desplazamientos atómicos. En un reactor térmico, en el cual el flujo de neutrones térmicos puede exceder ampliamente a los neutrones rápidos, los daños por radiación causados por el rebote de las reacciones  $(n,\gamma)$  puede ser del mismo orden (o más grande) que el debido a los neutrones rápidos en un material que tenga una apreciable sección eficaz de captura radiativa de neutrones térmicos. Es de observarse, que si la sección eficaz fuese grande, el efecto de las reacciones  $(n,\gamma)$  estará principalmente cerca de la superficie del material donde la mayoría de las capturas pueden ocurrir. En el interior del material se llevarían a cabo con mayor probabilidad, daños producidos por neutrones rápidos.

Los cambios producidos por radiación en metales y sustancias relacionadas, dependen de la naturaleza de los materiales y de la temperatura. Como una regla, los efectos son más pequeños a temperaturas elevadas y en algunos casos el daño puede ser removido por elevación de la temperatura. A temperaturas elevadas los átomos pueden difundirse más rápidamente de un sitio a otro a través de la red del sólido; consecuentemente, los átomos desplazados (intersticiales) pueden moverse dentro de las vacancias y así restablecer la estructura normal existente antes de la irradiación.



Bajo condiciones apropiadas, muchos metales exhiben un incremento en su dureza y fuerza de tensión y un decremento en su ductilidad como un resultado de la exposición a la radiación gamma. La resistencia térmica, la constante de red y la masa volumétrica aumentan con el incremento integrado del flujo neutrónico. La variación de ciertas propiedades, es presentada como una función del flujo integrado de neutrones con energía en exceso de 1 MeV. El flujo integrado, representado por NVT, expresado en términos de neutrones por  $\text{cm}^2$ , es igual al producto del flujo de neutrones térmicos promedio y el tiempo de exposición.<sup>(4)</sup>

### 5) La transferencia de energía cinética a la red atómica.

Los diferentes tipos de radiación, que pueden producir átomos desplazados en los metales, efectivamente pueden ser juzgados grotescamente por la energía máxima  $T_m$ , dichos átomos pueden transferir esta energía a la red atómica, y por otra parte, esto depende de la relación entre masas de la partícula de radiación y el átomo del metal. Para partículas no relativistas, el máximo de energía cinética transferible a la red atómica es

$$T_m = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} E \quad (1)$$

donde  $M_1$  es la masa de la partícula incidente,  $M_2$  la masa del átomo impactado y  $E$  la energía cinética del átomo incidente.

Generalmente hablando, las redes atómicas son efectivamente los límites para sitios de la red con energías en el rango de 10-50 eV, así que si la radiación transfiere menos energía que ésta a la red atómica, es muy improbable que los átomos sean desplazados de su sitio en la red. Un valor típico de su energía conjunta es de 25 eV. Esta energía, es usualmente llamada la "energía de umbral de desplazamiento" y se denota por  $E_d$ . Entonces para un desplazamiento dado, la partícula incidente debe tener suficiente energía cinética  $E_1$ , así que

$$T_m(E) \geq E_d \quad (2)$$

#### 6) La energía de umbral y sección eficaz de desplazamiento.

La energía de umbral  $E_d$ , da lugar a un importante paso dentro del proceso de daños por radiación. Es claro, que para casos para los cuales  $T_m \approx E_d$  la naturaleza exacta de la unión de los átomos a su sitio en la red, será crucial para determinar cuantos átomos desplazados serán creados. Sin embargo, esto es solo verdadero en los casos para los que  $T_m > E_d$ . De igual forma, si la radiación incidente transfiere una gran energía cinética a una red atómica (la primaria), esa red atómica disipará lentamente (por colisiones elásticas) suficiente energía cinética a otra red atómica (secundaria), para desalojarla de su posición. Este proceso continúa como las lentas disipaciones secundarias, para producir terciarias y así, hasta que una entera cascada de movimiento de átomos desplazados es formada. Todas estas redes atómicas bajan a través de la región de energía de umbral, y el número de mayor orden de átomos desplazados, se crea haciéndose de nuevo dependiente sensitivamente de la energía de umbral y los detalles del proceso de desplazamiento.<sup>[3]</sup>

#### IV. PRINCIPIOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL TERMOPAR.

Cuando la unión de dos metales distintos forman un circuito cerrado y son expuestos a diferentes temperaturas, se produce una fuerza electromotriz (fem) térmica neta e induce a una corriente eléctrica continua. La fem, para un par de metales dados, depende de la diferencia de temperatura entre sus soldaduras. A este dispositivo se le llama termopar.

El mecanismo de dispersión del electrón a través de la nube electrónica, se lleva a cabo cuando existe un gradiente de potencial eléctrico y este a su vez surge siempre que existe un gradiente de temperatura en un conductor. A dicho fenómeno se le conoce como fem termoeléctrica. Este mecanismo está relacionado con la energía cinética del mismo, de tal manera que a mayor velocidad, el ángulo de dispersión disminuye. Sin embargo, la relación no es simple dado que además depende en gran medida de la estructura electrónica de la red.<sup>[6]</sup>

Los termopares, son los sensores de temperatura de uso más común en la industria. Entre las características que los hacen tan populares se distinguen las siguientes: simplicidad,

rigidez, bajo costo, tamaño físico pequeño, intervalo de medición de temperatura grande (desde alrededor de  $-270^{\circ}\text{C}$  hasta  $3000^{\circ}\text{C}$ ) y facilidad de medición. Estas propiedades los hacen muy convenientes para mediciones multipunto de temperatura y monitoreo de procesos de planta, grandes y complejos y para una enorme variedad de aplicaciones industriales, tecnológicas y científicas.

### **1) Efecto Seebeck.**

Cuando dos conductores se unen por sus extremos para formar un circuito y son colocados en un gradiente de temperatura, se manifiesta un flujo de calor y un flujo de electrones, conocido como corriente Seebeck. La fuerza electromotriz (fem), que genera la corriente, es conocida como la fem de termopar o la tensión Seebeck, debido a que los termopares basan su funcionamiento precisamente en este fenómeno termoelectrónico.<sup>[7]</sup>

### **2) Termoelectricidad, desde un punto de vista microscópico.**

Cabe recordar que cuando los electrones de valencia saltan libremente de un material, absorben suficiente energía de las fuentes externas, esto puede estar esencialmente libre de la influencia de los núcleos. Una vez libres, estos electrones pueden absorber alguna cantidad de energía suministrándosela, y es usual suponer que los electrones libres en un metal actúan colectivamente como un gas ideal.

### **3) Ley de los materiales homogéneos.**

Una corriente termoelectrónica no puede ser generada en un circuito de un material simple homogéneo, sin embargo, esta varía en la sección transversal por la sola aplicación de calor.

Si se observa tal corriente, deberá tomarse como una indicación de la no homogeneidad del material.

### **4) Ley de los materiales intermedios.**

La suma algebraica de las fuerzas termoelectromotrices en un circuito compuesto de

algún número de materiales diferentes es cero si todo el circuito está a una temperatura uniforme o constante. Un tercer material, insertado dentro de un circuito del termopar y mantenido a una temperatura uniforme a lo largo de su magnitud total, no tendrá efecto en la fem total del circuito.

Se tienen tres metales distintos a, b y c; se conoce la fem de dos pares de combinaciones, entonces, la fem de la tercera combinación, es la suma de las otras dos fem. Conociendo la fem termoelectrónica contra un metal de referencia (platino), es posible calcular la fem de cualquier combinación. Si las fems térmicas de cualesquier par de metales con respecto al metal de referencia son conocidos, la fem de la combinación de los dos metales es la suma algebraica de sus fems contra el metal de referencia.

#### **5) Ley sucesiva de las temperaturas intermedias.**

Si dos materiales homogéneos diferentes, producen una fem térmica de  $E_1$  cuando las uniones están a temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , y una fem térmica de  $E_2$  cuando las uniones están a  $T_2$  y  $T_3$ , la fem generada cuando las uniones están a  $T_1$  y  $T_3$  serán  $E_1 + E_2$ .<sup>[1]</sup>

### **V. FUNCIONES DE UN TERMOPAR DENTRO DE UN COMBUSTIBLE Y SU INTERACCION CON EL AMBIENTE.**

#### **1) Descripción del reactor.**

El Reactor TRIGA Mark III del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, es un reactor inherentemente seguro, diseñado para la investigación en el campo nuclear, así como para la producción de radioisótopos y entrenamiento de personal. El reactor opera rutinariamente en estado estacionario a niveles de potencia térmica de hasta 1 MW y tiene la capacidad de ser pulsado repetitivamente (cada 10 minutos) hasta una potencia pico de aproximadamente 2000 MW .

## 2) Elemento combustible-moderador.

El reactor usa elementos combustible-moderador de dos tipos: estándar y FLIP<sup>2</sup>, en los que el moderador, hidruro de zirconio, es homogeneizado y combinado con uranio parcialmente enriquecido. La sección activa del elemento combustible moderador estandar, contiene 8.5% en peso de uranio enriquecido al 20% en U-235, su peso es de 3.4 kg. y el contenido promedio de U-235 es de 38 g. La sección activa del elemento combustible moderador FLIP, contiene 8.5% en peso de uranio enriquecido al 70% en U-235, el contenido promedio de U-235 es de 133g. La razón de átomos de hidrógeno a zirconio en ambos materiales combustible-moderador es de 1.7 a 1.

## 3) Elemento combustible instrumentado.

Un elemento combustible instrumentado consiste en un elemento combustible-moderador equipado con tres termopares tipo K como se muestra en la figura del Apéndice I; los extremos sensibles de los termopares del elemento combustible, están localizados a la mitad de la línea central vertical, al centro de la sección transversal del combustible y a 2.5 cm. arriba y abajo de la mitad de la altura del combustible.

Actualmente, el elemento combustible instrumentado está constituido por un combustible tipo FLIP.<sup>91</sup>

## 4) Termopar tipo K.

El termopar tipo K, originalmente conocido como termopar Cromel-Alumel, es muy resistente a la oxidación a temperaturas elevadas por lo que se prefiere para mediciones por encima de 500°C. El termoelemento positivo, KP, es una aleación compuesta típicamente de 89 a 90% de níquel, de 9.0 a 9.5% de cromo, 0.5% de hierro y silicio, además de pequeñas cantidades de otros elementos tales como carbono, manganeso, cobalto y niobio. El termoelemento negativo, KN, está compuesto típicamente por 95 a 96% de níquel, 1 a 1.5% de silicio, 1 a 2.3% de aluminio, 1.6 a 3.2% de manganeso, hasta alrededor de 0.5% de

---

<sup>2</sup> Fuel Lifetime Improvement Program.

cobalto y pequeñas cantidades de otros elementos tales como hierro, cobre y plomo. La norma E 230-87 de la ASTM<sup>(10)</sup> recomienda el uso de los termopares K dentro del intervalo -270 a 1372°C en atmósferas inertes u oxidantes. Tanto la magnitud del cambio en la tensión termoeléctrica como la vida útil del termopar, dependerán de factores tales como la temperatura, el tiempo que ha estado expuesto a dicha temperatura, el diámetro de los termoelementos y las condiciones de uso.

Debido a que ambos termoelementos del termopar tipo K son razonablemente estables, desde el punto de vista termoeléctrico ante una irradiación de neutrones, dado que son muy pequeños los cambios resultantes en sus composiciones químicas debido a la transmutación, es que se recomienda su uso en ambientes radiactivos como en este caso del combustible nuclear instrumentado. Los termoelementos KN son ligeramente menos estables que los termoelementos KP, puesto que experimentan un pequeño incremento en el contenido de hierro acompañado por un ligero decremento en los contenidos de manganeso y cobalto.

Ninguno de los dos termoelementos del tipo K es muy sensible a cambios menores en la composición o en los niveles de impurezas, esto se debe a que ambos están hechos de aleaciones en las que son altos los contenidos de los constituyentes.<sup>(7)</sup>

### 5) Funciones del termopar en el reactor nuclear.

Existen tres diferentes categorías de seguridad nuclear en cuanto a equipo e instrumentación se refiere.

La categoría I, se refiere a aquellos equipos que cuando ocurre una falla en ellos repercute en un cambio de reactividad inmediata en la instalación nuclear.

La categoría II, se da cuando en caso de falla ocurre un incremento de la exposición del personal a la radiación nuclear.

La categoría III, es cuando falla algún equipo que repercute tan sólo en la seguridad física pero no a nivel radiológico.

Existe otra categoría llamada general, que se refiere a los demás daños que no están contemplados en las tres anteriores.

Por cuestiones de seguridad nuclear, la instrumentación del reactor se clasifica como categoría I debido a que alguna falla puede repercutir en un cambio de reactividad dentro del mismo. Lo anterior obliga a que cada modo de operación cuente por lo menos con tres fuentes independientes de medición, razón por la cual el combustible cuenta con tres termopares dentro de un combustible nuclear. Cuando se requiere una operación en modo pulso, es necesario contar con fuentes alternativas de medición, una de ellas es la que proporciona el termopar que transmite una señal que a través de un circuito retardador se traduce en flujo neutrónico y en potencia. En dicho modo de operación, la señal obtenida nos proporciona información acerca de la potencia alcanzada además de ser un requisito de procedimiento que, de no cumplirse, es considerado como una falta a la normativa que rige la operación segura del reactor.

La interacción de estos termopares con el combustible instrumentado no interfiere la configuración del núcleo del reactor ni la reactividad del mismo. El contacto físico que se lleva a cabo es con la funda del termopar la cual está constituida de acero inoxidable, material cuyas características son muy convenientes a la acción nuclear debido a que presenta temperatura de fusión mayor a la máxima posible en un combustible, y a la vez, sus componentes aunque se activan no producen elementos gaseosos o nocivos que reaccionen químicamente entre sí o con algún otro constituyente presente.

## **CAPITULO TRES**

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**



## I. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

Debido a que el objetivo fundamental de este trabajo, es el de poder discernir la o las causas que motivan el acortamiento de la vida útil de los termopares del combustible instrumentado del reactor, es necesario tener muy claras las condiciones en las cuales estos se encuentran inmersos y así poder reproducir de alguna forma esta mismas condiciones en el experimento.

El combustible instrumentado no se ha encontrado siempre en la misma posición en el arreglo de anillos concéntricos del núcleo, en este momento por ejemplo, se encuentra situado en la posición C-6, ver figura del Apéndice 2. Sin embargo, las condiciones que prevalecieron en las diferentes posiciones son muy semejantes. Así, en la posición actual puede hablarse de flujos experimentales promedio<sup>[11]</sup> de neutrones térmicos de  $9.5536 \times 10^{12}$  n/cm<sup>2</sup>-s, flujo de neutrones rápidos de  $2.5280 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>-s y un intervalo de temperatura 330 a 396°C a 1 MW de potencia<sup>[12]</sup>.

Dado que las condiciones que prevalecen en el núcleo del reactor, son de alto flujo neutrónico y de temperaturas relativamente altas y debido a que se registra cada operación del reactor en una bitácora de operación, se cuenta con información de los termopares a estas condiciones. Pero si se desea encontrar un efecto aislado, ya sea por radiación o por temperatura, es necesario eliminar uno de los dos efectos. Puesto que un termopar posee un amplio intervalo de operación en cuanto a temperatura se refiere, se puede suponer que este solo efecto no es el causante de la degradación temprana del termopar. Por lo tanto, queda por analizar el alto flujo neutrónico y la combinación de los dos efectos.

El análisis del comportamiento del termopar del combustible conectado a consola en operaciones a 1 MW y su posterior evaluación, dará como resultado la concatenación de dos factores: alta temperatura y alto flujo neutrónico. Para poder eliminar uno de estos factores, lo ideal es implementar un dispositivo que permita realizar un seguimiento del comportamiento a bajas temperaturas y alto flujo neutrónico. Dado que ésto no es posible de realizar con los termopares del combustible ya que una condición es inherente a la otra, es necesario acondicionar un nuevo termopar e implementarlo dentro del reactor de tal manera que se satisfagan las condiciones requeridas para la experimentación. Analizar ambos casos, dará

como resultado dos diferentes condiciones experimentales:

- a) Radiación alta y temperatura alta.
- b) Radiación alta y temperatura baja.

Para poder tener un termopar sometido a alto flujo de neutrones y de radiación en general pero a temperatura moderada, es necesario construir un dispositivo que se pueda situar en algún lugar del núcleo que ofrezca las características deseadas. Lo más indicado, es simular al máximo posible las condiciones del termopar del combustible eliminando tan sólo las altas temperaturas.

#### 1) Requerimientos para el diseño del dispositivo de irradiación.

Se requiere someter en forma continua a un termopar tipo  $K^3$  a un flujo alto de neutrones y radiación gamma, en un ambiente de helio por un período mínimo de 4 meses, cumpliendo con los criterios de seguridad radiológica y nuclear del Reactor TRIGA Mark III. Por consiguiente, el diseño del dispositivo de irradiación deberá cumplir con las siguientes características:

a) Su diseño, forma y tamaño deberá considerar que será irradiado en el núcleo del reactor en la zona de flujos altos, gradientes de temperatura menores a  $100^{\circ}\text{C}$  y sus dimensiones deberán ser tales que quede perfectamente posicionado entre la placa superior e inferior del núcleo.

b) No debe presentar riesgos de seguridad para la operación rutinaria del reactor, asegurando que el dispositivo permanecerá en su lugar sin hacer contacto con las paredes de los combustibles.

c) Deberán emplearse para su construcción, materiales que soporten períodos prolongados de irradiación a flujos altos en un medio acuoso y no produzcan corrosión.

---

<sup>3</sup> Se aprovecharon los extremos sobrantes de termopar que tenía el combustible instrumentado tipo FLIP, para asegurar el mismo fabricante, especificaciones y tipo de aislante, que se tiene en los termopares que fallaron en los combustibles instrumentados.

d) Deberá contener un termopar con la punta no aterrizada y localizada a la mitad de la longitud activa de un combustible. Por lo tanto, el termopar deberá contar con separadores equidistantes para evitar el contacto con las paredes del dispositivo.

e) El diseño, deberá asegurar la hermeticidad del dispositivo considerando la presión absoluta (presión interna de helio, presión de la columna de agua de la piscina del reactor y la presión atmosférica), por lo menos durante 4 meses.

f) Asegurar, que tanto la extensión del termopar como los cables adicionales para medición de la resistividad, no se mojarán y quedarán protegidos de la turbulencia del agua que produce la bomba difusora, para evitar señales espurias en la respuesta del termopar.

## 2) Dispositivo de Irradiación.

Para cumplir los requerimientos planteados anteriormente, fue necesario seguir los pasos anteriores y así:

a) Se seleccionaron, tubo de acero inoxidable, barra del mismo material y barra de aluminio, como los materiales de construcción del dispositivo de irradiación, debido a que las características que presentan estos materiales cumplen con los criterios de seguridad del reactor.<sup>1101</sup> El material empleado fue:

- Tubing rectificado de acero inoxidable-316 de 0.622 cm de diámetro externo y 0.124 cm de espesor de pared.
- Tubing rectificado de acero inoxidable-316 de 0.937 cm de diámetro externo y 0.165 cm de espesor de pared.

b) Se verificó la presión final del dispositivo el cual quedó en una presión total de 2 atm. La presión atmosférica en el Centro Nuclear es de 0.7105 atmósferas y la presión de la columna de agua en la alberca del reactor es de 0.6880 atm., por lo que la presión absoluta a la que se sometió el dispositivo fue de 2.6688 atm.

c) Se verificó cada uno de los cordones de soldadura y se comprobó que el dispositivo no presentaba fugas de gas helio.

d) Se verificó la continuidad del termopar después de todo el proceso de ensamble y soldadura.

### **3) Especificaciones y calibración del termopar.**

Aunque el termopar K posee un amplio intervalo de operación, se limitó el intervalo de calibración debido a que algunos de los materiales empleados en el sistema de aislamiento presentan puntos de fusión menores al límite máximo de operación del termopar. Dicha situación no presenta ningún problema para la experimentación, debido a que la temperatura de operación del termopar durante la irradiación será menor a 100°C, lo cual fue planeado de esta forma para minimizar el daño producido al termopar por los gradientes de temperatura diarios que ocurren durante la operación rutinaria del reactor y poder evaluar únicamente los daños producidos por la radiación.

Se verificó que no se tuvieran problemas con el aislamiento del termopar y se tuvo un cuidado especial para que se conectaran correctamente las terminales del termopar y extensión de termopar con la polaridad correcta.

Finalmente se realizó la conexión del termopar con la extensión de termopar y los cables adicionales para la medición de la resistividad.

Se realizó la calibración en temperatura del termopar para garantizar su buen funcionamiento.<sup>(13)</sup> En base a los resultados obtenidos de la calibración en temperatura de resistencia y resistividad, se concluyó que el dispositivo estaba listo para su irradiación.

## **II. CRITERIO DE SELECCION DE LAS CONDICIONES DE IRRADIACION.**

Para la irradiación del termopar es necesario seleccionar una posición en el núcleo que tenga las características siguientes:

- a) Alto flujo de neutrones y de radiación gamma.
- b) Pueda posicionarse el dispositivo de irradiación entre las placas superior e inferior,

sin hacer contacto con las paredes de los combustibles y sin interferir con el proceso de refrigeración natural del núcleo del reactor.

c) Pueda emplearse por un período de tiempo mayor a 4 meses, sin interferir en los programas de operación rutinaria del reactor.

d) Que presente gradientes de temperatura menores a 100°C.

e) Que no presente variaciones fuertes del perfil de flujo neutrónico.

f) Que sea reproducible.

g) Que pueda colocarse un tubo de acero inoxidable de diámetro lo suficientemente grande para que por el pase el cableado necesario para la obtención de las señales requeridas. Dicho tubo, no debe interferir con los instrumentos de medición que se encuentran sobre la rejilla superior del núcleo.

El núcleo del Reactor TRIGA Mark III, contiene 126 posiciones para elementos combustibles, elementos de grafito y barras de control y seguridad, arreglados en 6 anillos concéntricos alrededor del dedal central. Las posiciones de estos anillos, se identifican por medio de una letra de la B a la G y de un número consecutivo. Además, sobre la placa superior del núcleo, existen 16 instalaciones de irradiación pequeñas de 0.625 cm de diámetro, como se muestra en la figura del Apéndice 2. Existen otros espacios para irradiar muestras de mayor tamaño, pero para ello es necesario retirar algún elemento combustible, lo cual para la finalidad de este trabajo no es conveniente dado que precisamente lo que se desea es tener un flujo neutrónico alto del orden de  $1 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>-s que pueda acelerar la degradación del termopar.

En un estudio previo<sup>(14)</sup>, se comprobó experimentalmente que los parámetros que más afectan las variaciones de la temperatura en un combustible son: el factor de potencia pico por combustible en cada anillo, la reactividad negativa insertada por las barras de control en función de su recorrido y la posición del combustible en el núcleo. Por lo anterior, dado que esta experimentación requiere de condiciones reproducibles de los perfiles de flujo y

temperatura obtenidos a lo largo de las numerosas mediciones, es conveniente especificar claramente las condiciones de operación del reactor, como son posición de las barras de control, potencia, posición del núcleo, etc., que aseguren dicha premisa.

Anteriormente, se realizaron estudios del perfil de flujo de neutrones dentro del núcleo<sup>[3]</sup>, donde se determinaron las posiciones con mayor flujo de neutrones y una distribución axial de tipo gaussiano, cuyo máximo se encuentra a la mitad de la longitud activa del combustible cuando el reactor se encuentra a 1 MW de potencia térmica. Sin embargo, esta distribución no es uniforme en la dirección radial del núcleo, debido a que en los anillos C y D se tiene combustible con 70% de enriquecimiento de U-235 y en el resto de los anillos se tiene combustible con 20% de enriquecimiento, de tal manera que se produce un incremento del flujo de neutrones térmicos y rápidos en el anillo C con respecto al dedal central.

Lo anterior, permite que se descarten las posiciones alejadas del núcleo y seleccionar las que se encuentren entre los anillos C y D, quedando sólo 4 instalaciones de irradiación de acuerdo al diagrama mostrado en el Apéndice 2.

Por otra parte, el sistema de refrigeración del núcleo que emplea agua desmineralizada circula en forma ascendente por convección natural a través de este, por lo que la parte que presenta mayor temperatura es la superior. Dado que este estudio se basa principalmente en el daño por neutrones, es conveniente que la temperatura a la cual esté localizado el termopar sea la menor posible y de esta forma no tener efectos sumatorios.

Además, para tener una mayor circulación de agua fría dentro del núcleo, el reactor cuenta con una ventana por la cual entra el agua y forma una especie de remolinos que permite el mayor enfriamiento de los combustibles. Esta ventana, que se encuentra localizada del lado sur de la coraza del núcleo, provoca una perturbación importante en el perfil de flujo de neutrones, traduciéndose en un aumento en el flujo de neutrones térmicos por anillo. Por ende, se seleccionó la posición de irradiación Sur-1, dadas las características que presenta esta instalación y a que cumple con los requisitos de experimentación deseados.

El núcleo es movable y puede operarse en 3 posiciones diferentes. Dado que se

requiere tener condiciones máximas de reproducibilidad, lo más conveniente es tener el núcleo en la posición centro de la alberca, ya que esta es la que presenta menos fluctuaciones en su flujo integrado así como temperatura más uniforme.

### **III. PROCEDIMIENTO DE MEDICION DE LA TEMPERATURA Y DE LA RESISTIVIDAD.**

#### **1) Sistema de medición y software para procesamiento de datos.**

Dadas las características de este trabajo, se requiere la implementación de un sistema de captura y procesamiento de datos experimentales procedentes de 3 termopares, uno es el termopar encamisado y dos son del combustible instrumentado FLIP, que sea rápido, confiable, reproducible, de operación accesible y que tenga puerto de comunicación con una computadora personal para el control del experimento.

Por otra parte, se requiere del desarrollo de un programa de operación dentro del ambiente de LAB-WINDOWS<sup>4</sup>, como una herramienta para el desarrollo de instrumentos de medición computarizados. Este programa de computo deberá cumplir las características siguientes:

- a) Generación de pantallas de presentación.
- b) Ventanas para almacenamiento de datos como fecha, condiciones de operación, etc.
- c) Proceso de muestreo, graficado y procesamiento de las señales provenientes de los 3 termopares.
- d) Medir señales de voltaje(mV) y transformarlas a temperatura(°C), haciendo la corrección correspondiente por la temperatura ambiente.

---

<sup>4</sup> Marca registrada por National Instruments.

e) Calcular la desviación estandar para secuencias de 10 conteos y los reporte en forma independiente para cada termopar.

f) Monitorear 3 termopares a intervalos de tiempo constantes y presentar sus correspondientes gráficas de temperatura vs. tiempo.

g) Al final de cada experimento, debe procesar las gráficas obtenidas y obtener los parámetros de ajuste para cada caso, por medio de cálculos estadísticos.

h) Permitir guardar en forma independiente y confiable la información experimental, así como las pantallas de presentación, gráficas y ajustes obtenidos para cada experimento.

i) Permitir la impresión de los resultados y pantallas de información.

Para satisfacer las necesidades anteriores, se requirió lo siguiente<sup>[16]</sup>:

- Tarjeta de conversión analógico a digital DAS-8 de Keithley Metrabyt, que cuenta con 8 canales de conversión con 12 bits de resolución.
- Módulo de acondicionamiento y linealización MB47-K-05 de Keithley Metrabyt.
- Computadora personal PC-AT, compatible con ranuras de conexión tipo ISA de 8 ó 16 bits.

Se elaboró el programa TERMOPAR.C (ver Apéndice 3), dentro del ambiente del programa de desarrollo LAB-WINDOWS, el cual cumple con las especificaciones requeridas para el archivo de datos.

## 2) Método para evaluar la resistividad de un termopar irradiado.

La resistividad, es una medida indirecta que requiere de conocer el valor de la resistencia eléctrica, sin embargo la razón por la cual requerimos del dato de la resistividad, es que con ella se puede comparar con los datos que se encuentran en la teoría así reportados.



Resistividad volumétrica es el cociente del gradiente de potencial, en la dirección del flujo de corriente eléctrica y la densidad de la misma. Dimensionalmente, la resistividad se reporta en  $\Omega\text{-cm}$ .

$$\rho = \frac{Vl}{I/A} = \frac{VA}{I^2} = R \frac{A}{l} \quad (3)$$

Para el caso de termopares, en que se tienen dos alambres de distinto material que forman una unidad inseparable y que tienen la misma longitud y área, se reporta la suma de las resistividades de ambos alambres. Sus unidades usuales son  $\Omega$  por doble pie.<sup>[17]</sup>

La medición de la resistividad implica entonces, la medición de la resistencia eléctrica, la longitud y el área de sección transversal del alambre.

#### a) Alternativas de medición de resistencia.

Debido a la fuerza electromotriz generada por el gradiente de temperatura a lo largo del termopar, para medir la resistencia de éste utilizando un multímetro convencional, es necesario tomar dos mediciones: una con las dos puntas del multímetro conectadas a las dos puntas libres del termopar y la otra intercambiando las puntas del multímetro. Estas dos mediciones tendrán que ser procesadas para obtener la verdadera resistencia del termopar.

Hay dos formas en las que un multímetro puede medir resistencia: aplicando una corriente constante y midiendo la caída de voltaje o aplicando un voltaje constante y midiendo la corriente drenada (hay una tercera que consiste en determinar la resistencia por medio de la obtención del factor de atenuación de un divisor de tensión formado por una resistencia patrón y la resistencia desconocida, pero ésta se utiliza generalmente con resistencias muy altas). De éstas, la utilizada en instrumentos digitales es la primera debido a la facilidad de obtener una indicación directa de la resistencia escalando las mediciones de caída de tensión, mientras que la segunda fue muy utilizada en instrumentos analógicos convencionales tipo serie y paralelo.

La mejor opción, es utilizar un multímetro digital con el cual inyectemos una corriente constante, así, la forma de procesar los datos de las dos mediciones para obtener el valor

verdadero de la resistencia será el promedio de las dos lecturas

$$R_x = \frac{R_{x_1} + R_{x_2}}{2} \quad (4)$$

donde:

$R_{x_1}$  = valor menor de resistencia obtenido en las mediciones.

$R_{x_2}$  = valor mayor de resistencia obtenido en las mediciones.

Para una diferencia de 40°C entre las puntas fría y caliente del termopar, la tensión generada será del orden de 2 mV para los termopares tipo J y K. La inyección de una corriente suficiente para producir una caída de tensión de 2 V, nos producirá un error menor que 0.1%, aún sin tomar las dos mediciones mencionadas con anterioridad. Si el termopar tiene una resistencia total de 10Ω, los efectos térmicos sobre el termopar serán los que pueda producir la aplicación de 400 mW en él.

#### b) Determinación de la resistividad.

Para el caso en que sea importante obtener con un error determinado el valor de la resistividad, sería necesario medir con límites de exactitud adecuados tanto la resistencia como el área de sección transversal promedio y la longitud del termopar.

Si lo que se requiere, es detectar cambios porcentuales en la resistividad de un solo alambre sometido en todas sus partes de manera uniforme al mismo proceso de degradación y que mantiene inalterables tanto su longitud como su área de sección transversal promedio, la exactitud en la determinación de estas no será importante y se podrá tomar el área de sección transversal nominal de las tablas proporcionadas por el fabricante.

Para determinar la resistividad después de haber calculado el verdadero valor de la resistencia, se utilizará la ecuación (3).<sup>(18)</sup>

**c) Dispositivo de medición empleado.**

- Multímetro digital Fluke 8020-B serie 4295004.
- Puntas positiva y negativa del termopar a evaluar.

**d) Desarrollo teórico experimental.**

- Activar el multímetro en la posición de corriente alterna (AC), de ésta forma sabremos cuando tenemos continuidad en el dispositivo al escucharse un sonido continuo.
- Colocar el botón que indique medición de resistencia ( $\Omega$ ).
- Colocar el botón que indique 200  $\Omega$ .
- Dado que nuestro objetivo es medir resistencia, colocar la extensión positiva en la entrada para inyección de corriente.
- Conectar las puntas del multímetro a las puntas del termopar y tomar medición; posteriormente intercambiar las puntas del multímetro y tomar la segunda medición.
- Registrar ambas mediciones.

## **CAPITULO CUATRO**

### **RESULTADOS**

## I. RESULTADOS.

Los parámetros que directamente se midieron fueron temperatura y resistencia eléctrica de los termopares. Los datos se muestran a continuación y comprenden el período del 11 de febrero de 1994 al 6 junio de 1994, dando como resultado una exposición total de 204.7 hr a 1 MW de potencia térmica y un flujo térmico integrado de  $724.790296 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>.

Se llevaron a cabo tres mediciones, dos con el termopar instalado en el reactor y una con el termopar del combustible instrumentado, estas son:

### 1) Temperatura.

La primera consistió en hacer 30 mediciones de la temperatura cada 4 minutos con el termopar que se instaló en el núcleo del reactor, estando el reactor operando a 1 MW. Se llevó a cabo la medición por medio de una tarjeta de conversión que a su vez se muestran en pantalla con el programa elaborado de TERMOPAR.C el cual realiza un tratamiento estadístico a los datos lo que permite minimizar errores en los resultados.

La toma de datos de temperatura por medio de la tarjeta de conversión, se llevó a cabo como se muestra a continuación:

- La tarjeta, posee una alta velocidad de medición razón por la que se realizan 10 lecturas por evento.
- Las diez lecturas no se registran, el registro corresponde a la media aritmética del evento.
- En total, se efectuaron 30 eventos con lapsos definidos de tiempo.
- De los eventos registrados, se calcula la media aritmética, la desviación estándar, el coeficiente de variación y el error de la media aritmética.
- Al finalizar la toma de datos, estos y los cálculos estadísticos se muestran en gráfica de la pantalla de la microcomputadora y son los que aparecen en la figura del Apéndice 4.

En las Tablas 1 y 2 se reportan los datos obtenidos. Como puede observarse, estas

mediciones se llevaron a cabo aproximadamente una vez a la semana.

**Tabla 1. Temperatura media registrada por el programa TERMOPAR.C con reactor sin operar.**

FECHA	ARCHIVO	DIA	TERMOPAR 1 (°C)	TERMOPAR 2 (°C)	TERMOPAR 3 (°C)
7/FEB/94	FEB7-2	1	29.3	22.18	21.31
11/FEB/94	FEB11-3	5	16.5	22.8	23.81
14/FEB/94	FEB14-3	8	13.26	13.34	13.34
25/FEB/94	FEB25-4	19	13.1	13.6	13.75
2/MAR/94	MAR2-1	24	10.85	12.34	12.72
8/MAR/94	MAR8-1	30	12.12	12.53	12.96
9/MAR/94	MAR9-1	31	11.40	12.59	12.69
14/MAR/94	MAR14-1	36	13.8	16.4	15.55
19/ABR/94	ABR19-P	72	15.54	15.65	15.63

**Tabla 2. Temperatura media registrada por el programa TERMOPAR.C con el reactor en operación a 1 MW.**

FECHA	ARCHIVO	DIA	TERMOPAR 1 (°C)	TERMOPAR 2 (°C)	TERMOPAR 3 (°C)
14/FEB/94	FEB14-5	8	49.49	345.33	430.66
14/FEB/94	FEB14-6	8	53.94	346.22	431.86
14/FEB/94	FEB14-7	8	53.89	345.46	430.68
15/FEB/94	FEB15-1	9	55.54	342.18	425.84
15/FEB/94	FEB15-2	9	57.97	342.11	425.36
28/FEB/94	FEB28-1	22	47.62	339.2	426.2
2/MAR/94	MAR2-K	24	36.06	344.32	426.9

Termopar 1 : Termopar encamisado tipo K.

Termopar 2 : Termopar localizado en la parte inferior del combustible instrumentado.

Termopar 3 : Termopar localizado en la parte superior del combustible instrumentado.

En los datos anteriores, se observan diferencias en las temperaturas registradas con uno y otro termopar localizados en el combustible instrumentado, lo cual es incongruente. La razón, se debe a que uno de ellos se encuentra en la parte superior del combustible y está sometido a menor flujo neutrónico y con ello a menor temperatura; el otro termopar se encuentra en la parte inferior y está sometido a mayor flujo neutrónico y con ello a mayor temperatura.

## 2) Resistencia.

La segunda, consistió en la medición de la resistencia del mismo termopar desde el momento de su instalación hasta el posterior retiro de la piscina habiendo sido irradiado en el período de tiempo en el que se encontró sumergido el termopar. El tiempo contabilizado, es el tiempo de irradiación a 1 MW de potencia térmica del reactor. Las mediciones de resistencia, se llevaron a cabo estando el reactor apagado y de preferencia a una hora temprana del día, como puede observarse en la Tabla 3. También aparecen aquí, el tiempo de exposición y el flujo integrado a los que se sometió el termopar mientras permaneció en la piscina del reactor.

Se cuenta con el valor inicial de resistividad de la extensión del termopar el cual se considera que no variará en todo el experimento por encontrarse por encima de la zona de alto flujo neutrónico, así  $\bar{\rho}_2^o = 9.36007127 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ . Haciendo referencia a la ecuación (3) del capítulo tres, se sabe que  $A_2 = 2.04714 \times 10^3 \text{ cm}^2$  y  $L_2 = 2181 \text{ cm}$ , entonces se tiene que la resistencia inicial de la extensión es  $R_2^o = 99.72798387 \Omega$ . A la lectura inicial del dispositivo  $\bar{R}_1^o = 100.5 \pm 0.05 \Omega$  se le resta este dato y se obtiene el valor de la resistencia inicial del termopar  $\bar{R}_1^o = 0.77201613 \Omega$ . Dado que longitud del termopar es  $l_1 = 55 \text{ cm}$  y su área  $A_1 = 5.0671 \times 10^4 \text{ cm}^2$ , entonces se puede saber el valor de su resistividad inicial,  $\bar{\rho}_1^o = 7.1125144 \times 10^6 \Omega\text{-cm}$ .

La Figura 6 muestra el comportamiento de la resistencia del dispositivo conforme se irradió a 1 MW de potencia.

**Tabla 3. Resultados de resistencia, NVT y tiempo de exposición del termopar K.**

DIA	FECHA	TIEMPO (h)	RESISTENCIA (Ω)			NVT x 10 <sup>16</sup> (n/cm <sup>2</sup> )	TIEMPO DE EXPOSICION (min.)
			1a.	2a.	Prom.		
1	7/feb/94	10:45	100.2	100.3	100.25	-	-
2	8/feb/94	9:30	100.6	100.9	100.75	-	-
3	9/feb/94	9:35	102.1	102.4	102.25	-	-
4	10/feb/94	10:25	100.6	100.8	100.7	-	-
*5	11/feb/94	9:30	100.5	100.9	100.7	1.18024	20
8	14/feb/94	9:20	100.0	100.5	100.25	256.11382	4340
24	2/mar/94	9:15	99.3	100.2	99.75	380.57097	6449
25	3/mar/94	10:10	99.3	100.3	99.8	381.10208	6458
26	4/mar/94	9:33	99.7	100.1	99.9	381.10208	6458
29	7/mar/94	9:30	99.6	100.6	100.1	392.31444	6648
33	11/mar/94	9:30	99.8	101.0	100.4	393.49468	6668
36	14/mar/94	10:00	99.7	100.8	100.25	393.49468	6668
44	22/mar/94	9:30	99.3	100.2	99.75	402.81864	6826
57	4/abr/94	11:00	99.9	101.1	100.5	408.12976	6916
71	18/abr/94	9:47	100.5	101.0	100.75	492.29144	8342
78	25/abr/94	9:00	99.9	100.2	100.05	515.70936	8739
86	3/may/94	9:20	101.9	102.5	102.2	570.35485	9665
89	6/may/94	10:30	99.8	100.7	100.25	578.61658	9805
96	13/may/94	10:15	101.5	102.0	101.75	592.77956	10045
102	19/may/94	10:05	101.5	101.9	101.7	620.81044	10520
106	23/may/94	9:42	100.5	101.2	100.85	627.18378	10628
110	27/may/94	9:50	99.8	100.6	100.2	669.02357	11277
113	30/may/94	9:30	100.1	100.7	100.4	683.18655	11577
114	31/may/94	9:10	101.6	102.1	101.85	702.83768	11910
115	1/jun/94	9:45	101.1	101.7	101.4	704.19496	11933
116	2/jun/94	10:05	99.9	100.3	100.1	724.79029	12282
117	3/jun/94	9:32	100.0	99.9	99.95	724.79029	12282
120	6/jun/94	9:30	99.9	102.0	100.95	724.79029	12282

\* Fecha de entrada del termopar a la configuración del núcleo del reactor.



### 3) Potencia.

Esta tercera medición, consistió en recabar información de la consola de operación pertinente al funcionamiento normal en el mismo, es decir en operación a 1MW de potencia térmica. Para ello, se registraron la potencia y la temperatura de un termopar con terminal en consola, localizado en el combustible instrumentado a diferentes intervalos de tiempo, cuyos datos que se muestran en la Tabla 4, al trazar su gráfica nos proporcionan una importante información.

**Tabla 4. Comportamiento en el tiempo de la potencia y la temperatura en el reactor en operación rutinaria.**

TIEMPO (seg)	POTENCIA (Watts)	TEMPERATURA (°C)	% POTENCIA	% TEMPERATURA
0	25000	18	2.5	5.29411
56	25000	20	2.5	5.88235
150	50000	32	5	9.41176
192	50000	40	5	11.76471
300	50000	42	5	12.35294
401	50000	45	5	13.23529
426	70000	50	7	14.70588
465	100000	70	10	20.58824
500	100000	74	10	21.76471
540	100000	78	10	22.94118
996	100000	78	10	22.94118
1016	100000	78	10	22.94118
1435	150000	80	15	23.52941
1448	200000	90	20	26.47059
1455	225000	100	22.5	29.41176
1472	250000	120	25	35.29412
1500	250000	150	25	44.11765
1530	250000	160	25	47.05882
1703	250000	160	25	47.05882

**Tabla 4. Comportamiento en el tiempo de la potencia y la temperatura en el reactor en operación rutinaria.**

(Continuación)

TIEMPO (seg)	POTENCIA (Watts)	TEMPERATURA (°C)	% POTENCIA	% TEMPERATURA
1731	250000	160	25	47.05882
1793	350000	162	35	47.64706
1806	400000	190	40	55.88235
1815	450000	210	45	61.76471
1818	500000	220	50	64.70588
1832	500000	228	50	67.05882
1850	500000	235	50	69.11765
1880	500000	238	50	70.0
1932	500000	238	50	70.0
2050	650000	240	65	70.58824
2058	750000	250	75	73.52941
2067	850000	270	85	79.41176
2074	950000	290	95	85.29412
2086	1000000	320	100	94.11765
2101	1000000	332	100	97.64706
2124	1000000	338	100	99.41176
2167	1000000	340	100	100.0
2170	100000	300	10	88.23529
2184	30000	230	3	67.64706
2196	15000	160	1.5	47.05882
2209	12000	120	1.2	35.29412
2220	9000	110	0.9	32.35294
2222	8000	90	0.8	26.47059
2234	7000	80	0.7	23.52941
2240	6000	68	0.6	20.0
2248	5000	55	0.5	16.17647
2255	4000	49	0.4	14.41176
2265	3000	40	0.3	11.76471

**Tabla 4. Comportamiento en el tiempo de la potencia y la temperatura en el reactor en operación rutinaria.**

(Continuación)

TIEMPO (seg)	POTENCIA (Watts)	TEMPERATURA (°C)	% POTENCIA	% TEMPERATURA
2278	2400	35	0.24	10.29412
2289	2100	30	0.21	8.82352
2297	1800	25	0.18	7.35294
2304	1500	24	0.15	7.05882
2308	1200	23	0.12	6.76470
2322	1100	23	0.11	6.76470
2347	800	23	0.08	6.76470
2351	700	23	0.07	6.76470
2357	600	23	0.06	6.76470
2365	500	22	0.05	6.47058
2372	450	22	0.045	6.47058
2383	400	22	0.04	6.47058
2389	350	22	0.035	6.47058
2392	300	21	0.03	6.17647
2414	270	21	0.027	6.17647
2420	240	21	0.024	6.17647
2435	210	21	0.021	6.17647
2440	180	21	0.018	6.17647
2454	150	21	0.015	6.17647
2469	120	21	0.012	6.17647
2488	90	21	0.009	6.17647
2505	80	21	0.008	6.17647
2521	70	21	0.007	6.17647
2528	60	21	0.006	6.17647
2540	50	21	0.005	6.17647
2560	40	21	0.004	6.17647
2583	30	21	0.003	6.17647

La Figura 7, muestra el comportamiento teórico de la potencia y la temperatura, dicha gráfica, podemos compararla con la generada experimentalmente a partir de los datos anteriores mostrada en la Figura 8. Como puede observarse, la potencia cae con mayor

velocidad que la temperatura semejándose al segundo caso teórico.

Se obtuvieron las energías de transferencia ( $T_m$ ) de los productos de fisión de mayor abundancia, encontrándose valores entre 64.4 y 82.8 MeV, y como se requieren del orden de 25 eV para desplazar un átomo de la red cristalina, el átomo en movimiento es rápidamente llevado a disipar su energía en una corta distancia del orden de 100 Å. Es por ello, que en un volumen pequeño cientos de átomos adquieren suficiente energía vibracional para poder moverse a través de la red con la que colindan desplazando así a otros átomos. Como consecuencia, ellos forman un pico de desplazamiento conteniendo un gran número de átomos intersticiales y vacancias y otras regiones desorientadas.

Por otro lado, a partir de las bitácoras de operación del reactor, se obtuvieron los datos experimentales para analizar la trayectoria de los 3 combustibles instrumentados, los cuales se resumen en la Tabla 5, donde se observa que el combustible instrumentado no se ha encontrado siempre en la misma posición. Sin embargo, las condiciones que prevalecieron en las diferentes posiciones son semejantes. Además, se observa como los 2 primeros combustibles operaron (antes de presentar problemas en su respuesta) alrededor de 2,500 h a 1 MW y sostuvieron 50 pulsos altos de potencia, quedando expuestos a gradientes de temperatura y flujo en intervalos de tiempo muy cortos, como se muestra en la Figura 9.

**Tabla 5. Historial de los combustibles instrumentados en el Reactor TRIGA Mark III (1968-1994).**

No. de combustible instrumentado	Posición del núcleo	Días	Energía Generada (MW-d)	Tiempo de Operación Crítica (h)	Tiempo de Operación (h)	Pulsos		Flujo neutrónico ( $n/cm^2 \cdot s$ )
						Alto	Bajo	
5281	B-6	1760	71.7432	2127.390	3455.330	51	9	-
5282	B-6	1675	121.0969	3303.873	4697.033	58	0	-
5281	B-6	3755	128.2456	3522.537	7552.481	1	0	-
8867	C-9	975	27.6578	819.316	2066.990	8	3	$6.1582 \times 10^{12}$
8867	C-6	870	-	1499.450	2582.284	18	13	$9.5536 \times 10^{12}$
8867	C-6	120	-	275.064	428.150	2	0	-

Figura 6. Comportamiento de la resistencia en función del tiempo de operación a 1 MW.

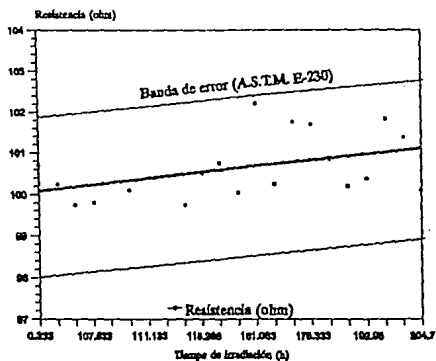


Figura 7. Posición relativa de los gradientes térmico y de flujo de neutrones en el tiempo.<sup>[19]</sup>

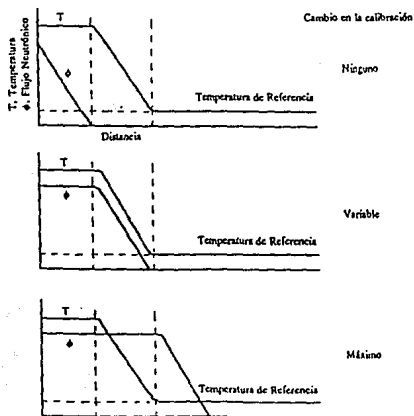


Figura 8. Comportamiento de la potencia y la temperatura en función del tiempo en el Reactor TRIGA Mark III.

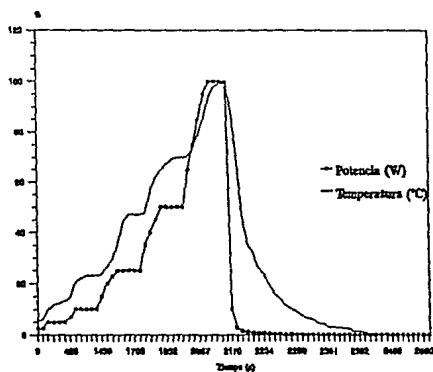
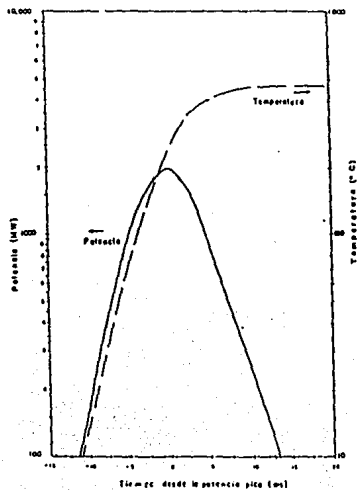


Figura 9. Pulso alto de potencia en el Reactor TRIGA Mark III,  $P=2000$  MW y  $\Delta t = 10$  ms.



## **CAPITULO CINCO**

### **METODO DE EVALUACION DE LA DEGRADACION**

## **I. METODOS ESTADISTICOS DE EVALUACION.**

Para la mayor y mejor confiabilidad de este tema de experimentación, se recurrió a la planeación estadística de la toma de datos, mientras que para una mayor precisión en la evaluación de los resultados, se recurrió así mismo al análisis estadístico.

### **1) Planeación estadística.**

Al elaborar un procedimiento experimental, es muy importante considerar los tipos de errores que se pueden tener al realizar las mediciones, pero además, si el experimento es repetitivo, entonces se deben tener en consideración la forma en que se desea medir, cuantas veces hacerlo, en que condiciones y por qué y analizar si éstas condiciones que para el propósito deseado son las óptimas, no presentarán variación con respecto al tiempo.

Al seleccionar las condiciones de irradiación, se tomaron en cuenta las consideraciones anteriores. Así, se utilizó un termopar aislado de tal forma que no fuera posible un ataque del ambiente que variara las condiciones que se requiere prevalezcan. La posición elegida dentro del núcleo, es aquella que experimentalmente muestra una gran estabilidad además de satisfacer el requerimiento de alto flujo radiactivo. La posición del núcleo en la piscina del reactor, es la que muestra menos fluctuaciones respecto al flujo convectivo del agua. La medición se prefirió a una hora determinada del día, para disminuir los cambios de temperatura que ocurren durante el mismo.

### **2) Evaluación.**

Se llevó a cabo un análisis de datos por propagación de errores, es decir las suposiciones hechas en la experimentación así como cálculos indirectos de datos que se tomaron como datos iniciales.

Para evaluar los datos obtenidos en las dos mediciones, se llevaron a cabo medidas de posición, como la media aritmética y así también se llevaron a cabo medidas de dispersión como la varianza, desviación estándar, coeficiente de variación y error de la media aritmética de los datos registrados y posteriormente se le dió su respectiva interpretación.<sup>[20]</sup>



## II. TRANSMUTACION TEORICA SUFRIDA.

De acuerdo a la teoría radiactiva, en un reactor nuclear dada la diversidad de energías que poseen los neutrones, puede o no llevarse a cabo una reacción de captura neutrónica que resulta en un átomo transmutado. Adicionalmente, la sección eficaz de captura del material que se está irradiando es decisivo en el proceso de transmutación.

Debido a que ésta tesis no pretende realizar cálculos de este tipo, se recurrió a la ayuda del programa EP2Y.FOR<sup>(21)</sup> que realiza tales cálculos con sólo conocer la composición del material, el flujo integrado de radiación térmica al que ha sido sometido y el tiempo de irradiación. Cabe señalar, que dicho programa realiza cálculos estrictos de cambios de composición de acuerdo a las características radiactivas de cada elemento y no toma en consideración los efectos por temperatura ni por condiciones ambientales. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6 y los cálculos se realizaron utilizando los siguientes datos:

- Flujo neutrónico:  $9.5536 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2$ .<sup>(11)</sup>
- Tiempo de exposición: 10 años.
- Composición porcentual del material<sup>(17)</sup>:

**Tabla 6. Porcentaje de cambio teórico en la composición del termopar K debido a la transmutación de átomos, después de un período de irradiación de 10 años.**

Termoelemento		Ni	Cr	Al	Si	Mn	Fe	Co	Cu	V
CROMEL	inicial	90.113	9.5260	0	0.3610	0	0	0	0	0
	final	90.0531	9.4065	0	0.3621	0	0	0	0.0593	0.1008
	% Var.	-0.0599	-0.1195	-	+0.0011	-	-	-	+0.0593	+0.1008
ALUMEL	inicial	94.0000	0	1.5800	0.7300	3.3070	0.0190	0.3250	0.0390	0
	final	93.9401	0	1.5721	0.7311	2.2407	1.0454	0.2329	0.0983	0
	% Var.	-0.0599	-	-0.0079	+0.0011	-1.0663	+1.0264	-0.092	+0.0593	-

Se encuentra que el Cromel es bastante estable a la transmutación por radiación, debido a que el material con mayor abundancia en el Cromel es el níquel y este último tiene muchos isótopos los cuales tienen una sección eficaz microscópica para neutrones pequeña. Los cambios en la composición encontrados para el Cromel después de este período de irradiación

fueron menores a 0.6%. En el caso del Alemel, está compuesto en su mayoría por níquel, pero el mayor cambio es debido al contenido de hierro, el cual se incrementa de 0.02 a 1.1%. En cambio, el manganeso y el cobalto decrecen.

Los datos anteriores justifican el que la norma E-230 de la ASTM recomiende el uso de termopares K dentro del intervalo -270 a 1372°C en atmósferas inertes u oxidantes, debido a que ambos termoelementos son razonablemente estables, desde el punto de vista termoelectrónico ante una irradiación de neutrones. Tanto la magnitud del cambio en la tensión termoelectrónica, como la vida útil del termopar dependerán de factores tales como la temperatura, el tiempo que ha estado expuesto a dicha temperatura, el diámetro de los termoelementos y las condiciones de uso.

### III. RELACION DE PARAMETROS.

De acuerdo a las Figuras 7 y 8, el motivo que propicia la degradación del termopar, y en sí de cualquier metal, es la forma en que están relacionados la temperatura a la que se somete el material y el flujo neutrónico al cual está expuesto. Como se dijo en un principio, el reactor opera continuamente en estado estacionario a 1 MW de potencia térmica y en este caso la forma que presenta la curva de descenso de estos dos parámetros corresponde a la segunda curva encontrada en la teoría. En este caso, de acuerdo a la gráfica teórica, se lleva a cabo un cambio en la calibración de carácter variable, es decir con mediana probabilidad de que ocurra.

En el caso del modo de operación pulso de potencia, la curva mostrada en la Figura 9, se asemeja más bien al primer caso en donde se supone no se lleva a cabo ningún cambio en la calibración por lo ya explicado en el capítulo dos. Sin embargo, lo anterior es válido para una potencia moderadamente baja y en este los termopares se encuentran a 2000 MW de potencia térmica aproximadamente. A esta potencia, lo más probable es que se lleven a cabo una serie de dislocaciones en cadena de los átomos los que no alcanzan a acomodarse por temperatura debido a que ésta no es lo suficientemente alta para producir rearrreglos en la red cristalina que se deformó.

#### IV. PORCENTAJE DE VARIACION DE PARAMETROS MEDIDOS.

Si se observan los resultados de la Tabla 3, se tienen 24 datos en igualdad de condiciones, es decir con el termopar dentro de la configuración del reactor. Los cálculos siguientes se realizaron sobre el valor promedio de la resistencia.

$$\bar{R}_t^{\circ} = 100.575 \Omega \quad \text{Media aritmética.}$$

$$\sigma = \partial \bar{R}_t^{\circ} = 0.719752 \quad \text{Desviación Estándar.}$$

$$\sigma^2 = 0.496458 \quad \text{Varianza.}$$

° : irradiado

Comparando con el dato de resistencia total inicial, se tiene:

$$e(R_t) = \frac{\bar{R}_t^{\circ} - \bar{R}_t^{\circ}}{\bar{R}_t^{\circ}} = 0.00074 \Omega \text{ ó } 0.074\% \quad \text{\% de variación.}$$

Comparando con el dato de resistencia inicial del termopar, se tiene:

$$\bar{R}_t^{\circ} = \bar{R}_1^{\circ} + \bar{R}_2^{\circ} = \bar{R}_1^{\circ} + R_2^{\circ}$$

$$\bar{R}_1^{\circ} = \bar{R}_t^{\circ} - R_2^{\circ} = 100.575 - 99.72798387 = 0.84701613 \Omega$$

$$\partial \bar{R}_1^{\circ} = \partial \bar{R}_t^{\circ} + \partial R_2^{\circ} = 0.719752 + 0.05 = 0.769752 \Omega$$

$$e(R_1) = \frac{\bar{R}_1^{\circ} - \bar{R}_1^{\circ}}{\bar{R}_1^{\circ}} = 0.09714 \Omega \text{ ó } 9.714\% \quad \text{\% de variación.}$$

Comparando con el dato de resistividad total inicial, se tiene:

$$\bar{\rho}_t^{\circ} = \bar{\rho}_1^{\circ} + \bar{\rho}_2^{\circ} = 7.1125144 \times 10^6 + 9.36007127 \times 10^5 = 1.00713 \times 10^4 \Omega\text{-cm}$$

$$\bar{\rho}_1^{\circ} = \bar{\rho}_t^{\circ} - \bar{\rho}_2^{\circ} = \bar{\rho}_1^{\circ} + \bar{\rho}_2^{\circ}$$

$$\bar{\rho}_t^* = \frac{\bar{R}_t^* A_1}{l_1} + \rho_2^0 = 7.8034826 \times 10^{-6} + 9.3607127 \times 10^{-5} = 1.014106 \times 10^{-4} \Omega\text{-cm}$$

$$\partial \bar{\rho}_t^* = \frac{A_1}{l_1} \partial \bar{R}_1^* + \partial \rho_2^0 = 7.0911761 \times 10^{-6} + 4.6931224 \times 10^{-4} = 7.1381073 \times 10^{-6}$$

$$e(\rho_t) = \frac{\bar{\rho}_t^* - \bar{\rho}_t^0}{\bar{\rho}_t^0} = 0.0069266 \Omega\text{-cm} \text{ ó } 0.692\% \quad \% \text{ de variación.}$$

Comparando con el dato de resistividad inicial del termopar, se tiene:

$$e(\rho_1) = \frac{\bar{\rho}_1^* - \bar{\rho}_1^0}{\bar{\rho}_1^0} = 0.09714 \Omega\text{-cm} \text{ ó } 9.714\% \quad \% \text{ de variación.}$$

Como se observa en los resultados, el cambio en la resistividad del termopar de experimentación es considerablemente alto si se toma en cuenta el corto período que permaneció irradiándose en el reactor. Este incremento en la resistividad, significa que las propiedades eléctricas cambiaron probablemente por cambios en la composición química. Sin embargo, como se vió en el cálculo de cambio de composición, no es factible que se hayan llevado a cabo transmutaciones considerables de elementos que propiciaran variación en las propiedades del material.

Tomando en cuenta que los termopares del reactor son sometidos a mayores gradientes de temperatura, es de esperarse que el incremento en los picos térmicos de desplazamiento sea mayor; sin embargo a su vez, este aumento ayuda al reacomodo de algunos átomos dislocados; entonces, la degradación sufrida por los termopares dentro del combustible instrumentado es menor que la obtenida con el termopar de experimentación.

## CONCLUSIONES

De los resultados y análisis hechos en los capítulos cuatro y cinco, se puede concluir que las condiciones a las que está expuesto el termopar y que motivan su degradación son, en orden de importancia, las siguientes: productos de fisión, neutrones rápidos, gradientes de temperatura, neutrones térmicos y rayos gamma.

Los productos de fisión y los neutrones rápidos producen dislocaciones de átomos en el arreglo cristalino; con esto, las propiedades mecánicas se ven seriamente afectadas. Los neutrones térmicos, aunque abundantes, no producen una cantidad apreciable de átomos transmutados en este material como para poder afirmar que ocurren cambios apreciables en la composición química. Los rayos gamma, producen una excitación electrónica que se suma a la generada por temperatura, sin embargo, esto no es de mayor relevancia para el caso de la degradación.

Por otra parte, se observa que mientras se pulsa el reactor, ocurre un incremento muy grande del flujo neutrónico en un corto lapso de tiempo. Esto puede ser causa de grandes picos de desplazamiento que ya no encuentran reacomodo puesto que la temperatura a la que se llega, no es lo suficientemente alta para ayudar a la relocalización de los átomos intersticiales que se generaron. Al ocurrir estos cambios en la propiedades mecánicas del termopar, la temperatura que registra ya no es la real, teniéndose así mediciones inexactas que no son confiables para la operación del reactor.

Debido a que no existe alguna forma de cambiar los termopares del combustible en el que se encuentran, lo único que puede hacerse es, con los datos obtenidos, una extrapolación en el tiempo y predecir en qué momento será necesario cambiar el combustible instrumentado y sustituirlo por otro. Esta predicción, como consecuencia, servirá para planear los cambios de configuración en el núcleo y seguir utilizando estos combustibles instrumentados, aunque no sus termopares, en alguna otra localización. Esto, sin embargo, impacta considerablemente los costos ya que se incrementará el número de combustibles instrumentados no utilizados con fines de medición, y éstos tienen un precio de un 70% mayor que el de un combustible normal, es decir aproximadamente U.S.\$ 7,010 más, lo que equivale, al tipo de cambio actual, a N\$ 24,310. Como puede observarse, el costo aumenta de manera tal que cabe la

opción de buscar otra posible solución a este problema.

Queda abierta la posibilidad de regenerar los termopares por un tratamiento de recocido, el cual consiste en un tratamiento térmico, tratamiento que se utiliza comúnmente en Ingeniería para reestablecer las propiedades mecánicas de los recipientes que fueron sometidos a esfuerzos de diversos tipos. Esto, sin embargo, sería muy difícil de realizar en el termopar dado que se encuentra inmerso dentro del combustible. Una opción sería inyectar una corriente por las puntas libres del termopar que generase una alta temperatura (600 - 800°C aproximadamente) y así observar su respuesta. Esto se llevaría a cabo con pequeños incrementos paulatinos de corriente a fin de obtener mayores temperaturas mientras se monitorea la respuesta y se observa si hay mejoría en la medición. Para ello se necesita proponer un procedimiento que involucre varios aspectos como son: comparación con un termopar no irradiado, tiempo de inyección de corriente, intensidad de la misma, etc. Lo que se esperaría, en este caso, es que se reacomoden las dislocaciones de átomos generadas y que con ello se restablezcan las propiedades mecánicas del mismo para así tener, nuevamente, una medición confiable de la temperatura con el termopar.

## REFERENCIAS

- [1] W. L. Masterton, E. J. Slowinski "QUIMICA GENERAL SUPERIOR". 4a ed. Nueva Editorial Interamericana, México, 1979.
- [2] T. J. Connolly "FUNDAMENTOS DE INGENIERIA NUCLEAR". Ed. Limusa, México, 1983.
- [3] J. R. Lamarsh "INTRODUCTION TO NUCLEAR ENGINEERING". Addison-Wesley Publishing Company. U. S. A., 1977.
- [4] S. Glasstone, A. Sesonske "NUCLEAR REACTOR ENGINEERING". Ed. Van Nostrand Reinhold Company. U. S. A., 1967.
- [5] D. K. Holmes "Radiation Damage in non-fissionable metals", THE INTERACTION OF RADIATION WITH SOLIDS. North-Holland Publishing Company. Netherlands, 1964.
- [6] F. W. Sears, M. W. Zemansky "FISICA GENERAL", Ed. Aguilar. España, 1962.
- [7] V. Martínez F., J. Valencia R. "TERMOPARES". Reporte Técnico. CNM-MET-PT-0003. Centro Nacional de Metrología, México, 1993.
- [8] R. P. Benedict "FUNDAMENTS OF TEMPERATURE, PRESSURE AND FLOW MEASUREMENTS", 2a. ed. Ed. John Wiley & Sons. U. S. A. 1977.
- [9] "INFORME DE SEGURIDAD DEL REACTOR TRIGA MARK III DEL CENTRO NUCLEAR DE MEXICO", No. GSN-001, Gerencia de Sistemas Nucleares, I.N.I.N., México, 1986.
- [10] American Society for Testing and Materials, E 230-87, "TEMPERATURE-ELECTROMOTIVE FORCE (EMF) TABLES FOR STANDARDIZED THERMOCOUPLES".
- [11] L. Paredes G. "COMPENDIO DEL MAPEO DE FLUJO NEUTRONICO DEL NUCLEO MIXTO DEL REACTOR TRIGA MARK III." GSTN-94-01. Gerencia de Servicios Técnicos Nucleares, I.N.I.N., México, 1994.
- [12] Datos tomados de la bitácora de operación desde el momento en que se instaló el combustible FLIP instrumentado.
- [13] S. Vázquez B., L. Rojas C. "CALIBRACION DE TERMOPAR TIPO "K", UR-TP-14, Gerencia de Combustibles, I.N.I.N., México, 1993.

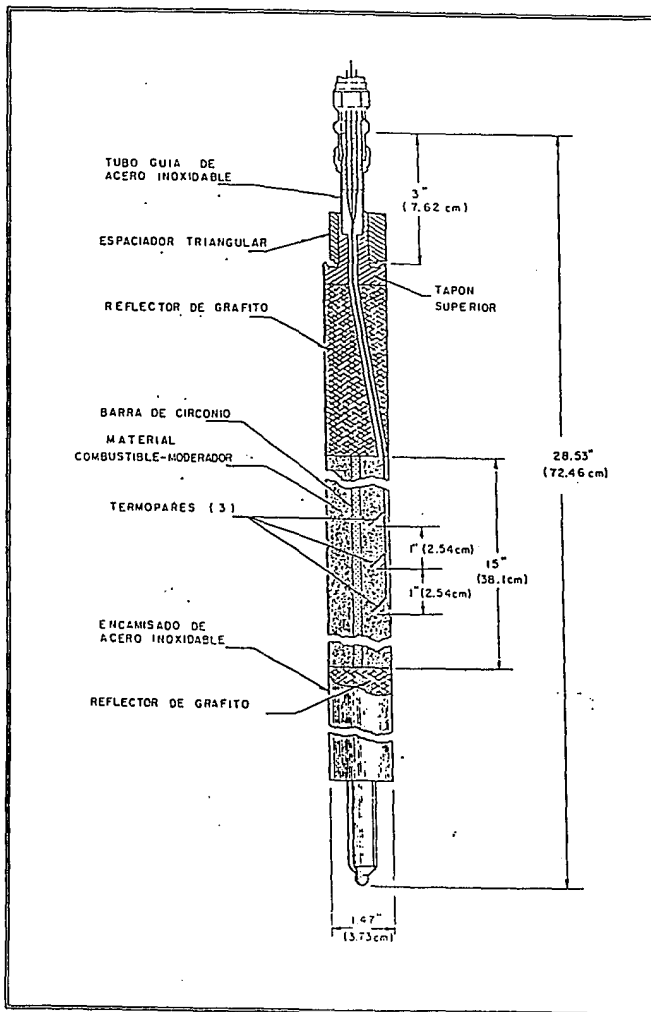
- [14] L. Paredes G. "INFLUENCIA DE LAS BARRAS DE CONTROL SOBRE LA TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE INSTRUMENTADO EN LOS ANILLOS C Y D", I.-GR-91-029, Gerencia del Reactor, I.N.I.N., México, 1991.
- [15] D. Lizcano, H. J. Parra "DETERMINACION DEL PERFIL DE FLUJO SUBCADMICO Y EPICADMICO DEL NUCLEO MIXTO DEL REACTOR TRIGA Mark III DEL CENTRO NUCLEAR DE MEXICO", U.A.M., México, 1989.
- [16] T. Rivero G., A. Rodríguez V. "PROGRAMA DE VERIFICACION DE LOS TERMOPARES DEL COMBUSTIBLE DEL REACTOR TRIGA MARK III", IT.SN.SC-9303, Gerencia de Sistemas Nucleares, I.N.I.N., México, 1993.
- [17] "TEMPERATURE MEASUREMENT HANDBOOK AND ENCYCLOPEDIA". OMEGA Engineering, U. S. A., 1985.
- [18] A. Vela H. "EVALUACION DE LA RESISTIVIDAD DE UN TERMOPAR". I.UR-46, Gerencia de Ingeniería, I.N.I.N., México, 1993.
- [19] W. E. Browning Jr., C. E. Miller Jr. "CALCULATED RADIATION INDUCED CHANGES IN THERMOCOUPLE COMPOSITION". Temp. Meas. Control Sci. Ind., 3: pt 2, O. R. N. L. Tenn., U. S. A., 1962.
- [20] D. Owen L. "METODOS ESTADISTICOS APLICADOS A LA INVESTIGACION Y A LA PRODUCCION." 2a. ed. Editorial Aguilar, España, 1965.
- [21] L. Paredes G. "SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE TRANSPORTE Y DIFUSION DE NEUTRONES POR EL METODO DE ELEMENTO FINITO TIPO NODAL PARA VARIOS GRUPOS DE ENERGIA". Gerencia del Reactor, I.N.I.N., México, 1993.



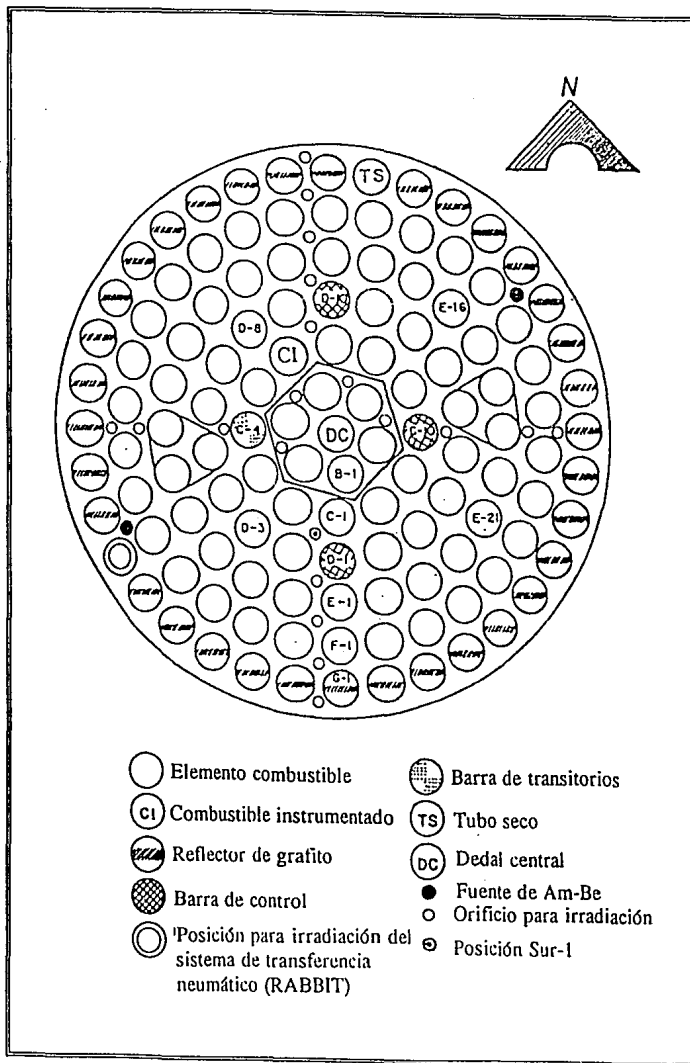
## APENDICE

1. Diagrama del elemento combustible instrumentado.<sup>[9]</sup>
2. Diagrama de la placa superior del núcleo del reactor.<sup>[9]</sup>
3. Programa TERMOPAR.C.<sup>[15]</sup>
4. Pantalla de presentación de datos del programa TERMOPAR.C.

Apéndice 1. Diagrama del elemento combustible instrumentado.



Apéndice 2. Diagrama de la placa superior del núcleo del reactor.



### Apéndice 3. Programa TERMOPAR.C.

```
#include "tona2.h"
#include "lidia2.h"
#include "printer1.h"
#include "panel2.h"

#define TRUE 1
#define FALSE 0
#define DIR 0x300

int adcdas8(int);
double temperatura(int);
void lee_conteo(void);
void test(void);
double muestreo(int, double *);
void producto(void);
void MEANSQUARE(int n, double x[], double y[], double *m,
                double *b, double *dstd, double *r);
void texto(char *, char *, char *, char *, char *, char *, char *,
           char *);
int p1, p2, p3;

void main()
{
    double x[50], y1[50], y2[50], y3[50];
    double ds1[50], ds2[50], ds3[50];
    double z[50], t1, timeinit;
    double slope1, slope2, slope3, intercept1, intercept2, intercept3,
           dstd1, dstd2, dstd3, r1, r2, r3;
    char acceso[40];
    char buf1[101], buf2[101], buf3[101], buf4[101], buf5[101],
          buf6[101], buf7[101], buf8[101];
    int s, id, handle, t2, handle1, dummy, eventos;
    dummy = LoadMenuBar("tona2.uir", mb);
    p1 = LoadPanel("Lidia2.uir", PANEL1);
    if(p1 < 0) {
        FmtOut("Panel lidia2.uir no existente \n");
        exit(0);
    }
    p2 = LoadPanel("printer1.uir", SAL);
    if(p2 < 0) {
        FmtOut("Panel printer1.uir no existente \n");
        exit(0);
    }
    p3 = LoadPanel("panel2.uir", TXT);
    if(p3 < 0) {
        FmtOut("Panel panel2.uir no existente \n");
        exit(0);
    }
}
```

```

DisplayPanel(p1);
while(TRUE) {
    GetUserEvent(TRUE, &handle, &id);
    switch(id) {
        case PANEL1_A:
/* ***** */
        GetCtrlVal(p1,PANEL1_L,acceso);
        GetCtrlVal(p1,PANEL1_J,&t1);
        GetCtrlVal(p1,PANEL1_K,&t2);
        GetCtrlVal(p1,PANEL1_M,&eventos);
        handle1 = OpenFile(acceso,2,0,1);
        dummy = FmtFile(handle1,"Archivo : %s \n",acceso);
        dummy = FmtFile(handle1," Lapso : %f[w8p2] \n",t1);
        dummy = FmtFile(handle1,"Eventos : %i[w5] \n\n",eventos);
        dummy = FmtFile(handle1,"                Tiempo Tmp.1
                Dstd.1 Tmp.2 Dstd.2 Tmp.3 Dstd.3 \n");
        timeinit = timer();
        for(s = 0; s<eventos; s++){
            dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_N,s+1);
            if (s==0) x[s]=0.00;
            else x[s] = timer()-timeinit + x[s-1];
            timeinit = timeinit + t1;
            y1[s] = muestreo(0,&ds1[s]);
            y2[s] = muestreo(1,&ds2[s]);
            y3[s] = muestreo(2,&ds3[s]);
            dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_G1,ds1[s]);
            dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_H1,ds2[s]);
            dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_I1,ds3[s]);
            dummy = PlotPoint(p1,PANEL1_D,(s*1.0),y1[s],8,12);
            dummy = PlotPoint(p1,PANEL1_D,(s*1.0),y2[s],9,10);
            dummy = PlotPoint(p1,PANEL1_D,(s*1.0),y3[s],10,14);
            dummy = PlotPoint(p1,PANEL1_C,(s*1.0),ds1[s],8,12);
            dummy = PlotPoint(p1,PANEL1_C,(s*1.0),ds2[s],9,10);
            dummy = PlotPoint(p1,PANEL1_C,(s*1.0),ds3[s],10,14);
            dummy = FmtFile(handle1,"Evento : %i[w5] %f[w8p4]
                %f[w8p4] %f[w8p4]",s,x[s],y1[s],ds1[s]);
            dummy = FmtFile(handle1," %f[w8p4] %f[w8p4] %f[w8p4] %f[w8p4]
                %f[w8p4]\n",y2[s],ds2[s],y3[s],ds3[s]);
            while((timer() - timeinit) < t1) {
                beep();
                test();
                delay(t2);
                lee_conteo();
            }
        }
        MEANSQUARE(eventos,x,y1,&slope1,&intercept1,&dstd1,&r1);
        MEANSQUARE(eventos,x,y2,&slope2,&intercept2,&dstd2,&r2);
        MEANSQUARE(eventos,x,y3,&slope3,&intercept3,&dstd3,&r3);
        dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_G2,slope1);
        dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_H2,slope2);
        dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_I2,slope3);
    }
}

```

```

dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_G3,intercept1);
dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_H3,intercept2);
dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_I3,intercept3);
dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_G4,r1);
dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_H4,r2);
dummy = SetCtrlVal(p1,PANEL1_I4,r3);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n\\n Tmp.1 Tmp.2
    Tmp.3 \\n\\n");
dummy = FmtFile(handle1,"Media : %f[w8p4]
    %f[w8p4] %f[w8p4] \\n",slope1,slope2,slope3);
dummy = FmtFile(handle1,"Desv. Std : %f[w8p4]
    %f[w8p4] %f[w8p4] \\n",dstd1,dstd2,dstd3);
dummy = FmtFile(handle1,"Error de Desv. Std: %f[w8p4]
    %f[w8p4] %f[w8p4] \\n",intercept1,intercept2,
    intercept3);
dummy = FmtFile(handle1,"Coef. de Var. : %f[w8p4]
    %f[w8p4] %f[w8p4] \\n",r1,r2,r3);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf1);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf2);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf3);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf4);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf5);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf6);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf7);
dummy = FmtFile(handle1,"\\n %s \\n",buf8);
CloseFile(handle1);
/* ***** */
break;
case PANEL1_E:
    producto();
    break;
case PANEL1_P:
    texto(buf1,buf2,buf3,buf4,buf5,buf6,buf7,buf8);
    break;
case PANEL1_B:
    exit(0);
    break;
}
}
}
/* ***** Funcion 08 ***** */
void texto(char buf1[],char buf2[],char buf3[], char buf4[],
    char buf5[], char buf6[], char buf7[], char buf8[])
{
    int opc,id,dummy;
    dummy = InstallPopup(p3);
    while(TRUE){
        GetPopupEvent(TRUE,&id);
        switch(id) {
            case TXT_S:
                GetCtrlVal(p3,TXT_ENT1,buf1);

```

```

        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT2,buf2);
        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT3,buf3);
        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT4,buf4);
        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT5,buf5);
        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT6,buf6);
        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT7,buf7);
        GetCtrlVal(p3,TXT_ENT8,buf8);
        RemovePopup(0);
        return;
        break;
    }
}
}

/* ***** Funcion 07 ***** */
void MEANSQUARE(int n,double x[],double y[],double *m,
                double *b,double *dstd,double *r)
{
    int i;
    double sumx,sumy,sumxy,sumx2,sumyy,xmed,ymed,summb;
    sumx = 0.0; sumy = 0.0; sumxy = 0.0; sumx2 = 0.0; sumyy = 0.0;
    xmed = 0.0; ymed = 0.0; summb = 0.0;
    for(i=0; i<n; i++) {
        sumy += y[i];
    }
    ymed = sumy/n;
    for(i=0; i<n; i++)
    {
        sumyy += (y[i] - ymed) * (y[i] - ymed);
    }
    *m = ymed;
    *dstd = sqrt((sumyy/(n-1)));
    *b = *dstd / (sqrt (2 * (n-1)));
    if(sumyy == 0 ) {
        *r = 0;
        return;
    }
    *r = 100*(dstd/ymed);
    return;
}

/* ***** Funcion 06 ***** */
void producto(void)
{
    int opc,id,dummy;
    dummy = InstallPopup(p2);
    while(TRUE){
        GetPopupEvent(TRUE,&id);
        switch(id) {
            case SAL_OUT:
                GetCtrlVal(p2,SAL_DEV,&opc);
                switch(opc) {

```

```

    case 0: /*imprimir panel*/
        RemovePopup(0);
        OutputPanel(-1,"",0,p1);
        return;
        break;
    case 1: /*imprimir grafico de voltaje/temperatura*/
        RemovePopup(0);
        OutputGraph(-1,"",1,p1,PANEL1_D);
        return;
        break;
    case 2: /*imprimir grafico de Desviacion Standard*/
        RemovePopup(0);
        OutputGraph(-1,"",1,p1,PANEL1_C);
        return;
        break;
    }
    break;
    case SAL_SAL:
        RemovePopup(0);
        return;
        break;
}
}
}
/* ***** Funcion 05 ***** */
double muestreo(int channel, double *desvstd)
{
    int i;
    double aa[10],media, sumatoria;
    media = 0.0;
    for(i=0; i <=9; i++)
    {
        aa[i] = temperatura(channel);
        media = media + aa[i];
    }
    media = media/10;
    sumatoria = 0.0;
    for(i=0; i<=9; i++)
    {
        sumatoria = sumatoria + ((aa[i] - media)*(aa[i] - media));
    }
    *desvstd = sqrt(sumatoria/9.0);
    return media;
}
/* ***** Funcion 04 ***** */
void test(void)
{
    int handle,key,n;
    while(TRUE) {
        GetUserEvent(FALSE,&handle,&key);
        switch(key) {

```



```

    case PANEL1_E:
        producto();
        break;
    case PANEL1_A:
        break;
    case PANEL1_B:
        exit(0);
        break;
    default:
        return;
        break;
}
}
}
/* ***** Funcion 03 ***** */
void lee_cuento(void)
{
    SetCtrlVal(p1,PANEL1_G,temperatura(0));
    SetCtrlVal(p1,PANEL1_H,temperatura(1));
    SetCtrlVal(p1,PANEL1_I,temperatura(2));
    return;
}
/* ***** Funcion 02 ***** */
double temperatura(int channel)
{
    int dato;
    /*if(channel == 0) return 225.0;*/
    /*if(channel == 1) return 250.0;*/
    /*if(channel == 2) return 275.0;*/
    dato = adcdas8(channel);
    if(dato == -1) return -1.0;
    return((dato * (10.0/4096) - 5.0) * 100.0);
}
/* ***** Funcion 01 ***** */
int adcdas8(int channel)
{
    int hi,lo,i;
    if(channel < 0 || channel > 7 ) return -1;
    lo = inp(DIR);
    hi = inp(DIR+1);
    outp(DIR + 2, channel);
    for (i=0; i<=10000; i++);
    outp(DIR + 1, channel);
    while(inp(DIR + 2) & 0x80);
    lo = inp(DIR);
    hi = inp(DIR+1);
    return hi*16+(lo>>4);
}

```

