

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 2	AÑO 1982

03.82.10
(04.82.00)

CNEA-AC 35/82

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA

Gerencia de Protección Radiológica y Seguridad

MINISTERIO DE SALUD PUBLICA Y MEDIO AMBIENTE

Dirección Nacional de Saneamiento

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ingeniería

COMPATIBILIDAD DE MATERIALES

Recopilación realizada
por la Dra. Sara LIBERMANN

Apuntes para el Curso de Post-Grado
en Protección Radiológica y Seguridad Nuclear

BUENOS AIRES
1982

COMPATIBILIDAD DE MATERIALES

Nos vamos a ocupar de los aspectos químicos en una central nuclear, de qué manera dichos factores determinan los campos de radiación y la integridad de sus materiales en las diferentes partes del mismo. Química de Reactores Nucleares es la disciplina que considera este tipo de problemas.

Una central termoeléctrica es un sistema en el cual la energía producida como resultado de la oxidación de un combustible se utiliza para calentar agua y producir vapor, el cual es responsable de accionar las turbinas generadoras de energía eléctrica.

La diferencia fundamental entre una central termoeléctrica y una termonuclear reside en que en este último caso el combustible genera energía como resultado de una reacción nuclear. Por lo tanto, una parte de la tecnología es común para ambas centrales, aunque las centrales nucleares son mucho más elaboradas por los problemas asociados a la radiactividad.

En primer lugar vamos a considerar las diversas fuentes de producción de radiactividad en un reactor en relación con sus materiales constitutivos, al transporte de los productos que se forman y los problemas que ellos ocasionan.

Haremos luego una descripción de los diferentes tipos de corrosión y su efecto sobre los materiales de los diversos circuitos.

Finalmente veremos las formas de disminuir la contaminación, con el uso de sistemas de limpieza y métodos de descontaminación.

I - FUENTES DE RADIATIVIDAD EN REACTORES

El origen de la actividad en un reactor nuclear proviene de las siguientes fuentes:

- 1 - Productos de fisión y activación formados en los elementos combustibles.
- 2 - Productos de activación del agua y de los aditivos.
- 3 - Productos de activación de los productos de corrosión.

- 1 - Productos de fisión y activación formados en los elementos combustibles.

La generación de productos de fisión y activación es un evento que necesariamente acompaña a la producción de energía nuclear. De no mediar deterioro de los elementos combustibles los productos de fisión quedarían confinados por las vainas de los mismos y por ende no pasarían al refrigerante del reactor. Sin embargo, en condiciones normales de operación de los reactores hay una pequeña cantidad de productos de fisión, producidos por la contaminación de las vainas de los elementos combustibles con restos de uranio adheridos a la parte exterior de los mismos durante su fabricación y en menor escala, proveniente del uranio que se halla como impureza en los materiales estructurales del reactor.

El proceso de fisión produce cientos de radionucleidos. Aquí nos restringimos a aquellos que se detectan cuando se producen fallas en los elementos combustibles, y los clasificaremos de acuerdo a su comportamiento químico y a su período de semidesintegración.

En la Tabla I se ilustran los productos de fisión gaseosos más importantes. En ella están incluidos varios isótopos del kriptón y xenón. Estos gases no son atrapados por los sistemas de limpieza del reactor (sistemas de intercambio iónico) pero si sus productos de decaimiento que son atrapados por resinas catiónicas y también por las paredes del reactor.

TABLA I

PRODUCTOS DE FISION GASEOSOS - Gases Nobles

RADIONUCLEIDO	VIDA MEDIA	ENERGIA
		MeV
^{87}Kr	76 min.	0,40(84%), 0,85(16%) 2,57(35%)
^{88}Kr	2,8 horas	0,191(35%), 0,85(23%) 2,19(18%), 2,4(35%)
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	4,4 horas	0,15(74%), 0,305(13%)
^{138}Xe	14 minutos	0,260, 1,78 2,02
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	15,6 minutos	0,527 (80%)
^{135}Xe	9,15 horas	0,250(91%), 0,61(3%)
^{133}Xe	5,65 días	0,081(37%)

Los halógenos escapan fácilmente del elemento combustible, cuando se producen fallas, pero son eliminados de la solución por el paso a través de resinas aniónicas. La actividad de los halógenos, (Ver tabla II) se puede dividir en dos grupos muy distintos; una mezcla de isótopos de bromo e yodo de período de semidesintegración corto, menor que el minuto, que decae por emisión de neutrones retardados y una mezcla de isótopos de período de semidesintegración largo que decae emitiendo radiación alfa y gamma.

En la Tabla III se listan algunos radionucleidos que tienen gran tendencia a depositarse en las paredes del reactor. En esta Tabla se ha incluido el Neptunio, a pesar de que éste no es un producto de fisión, debido a que se comporta químicamente igual a estos. Se ha observado que varios de estos nucleidos muestran una absorción diferencial entre varias superficies de metales. Por ejemplo el ^{132}Te muestra una marcada preferencia para absorberse sobre Nb , propiedad que es posible aprovechar para detectar fallas en elementos combustibles durante

la operación del reactor.

Una consecuencia adicional de la fisión, es el escape de tritio por difusión a través de la vaina de los elementos combustibles. Aún cuando estos no estén dañados. El escape de tritio, para elementos envainados con acero inoxidable es alrededor del 10% del generado¹ y, en el caso de estar envainados en Zircaloy, este valor varía entre 1,5 y 10%.²

2.- Productos de activación del agua y de los aditivos

En la Tabla IV se muestra los productos de activación del agua pesada y de los aditivos más importantes que se agregan al refrigerante para el control del pH y de la reactividad del reactor (litio y boro respectivamente) y de algunas impurezas como el sodio.

TABLA II
PRODUCTOS DE FISIÓN-HALOGENOS

RADIONUCLEIDO	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION	ENERGIA α Mev
^{87}Br	55,8 seg	
^{88}Br	15,9 seg	
^{137}I	23 seg	
^{132}I	2,4 horas	0,52(20%), 0,673(14%) 0,773(89%)
^{134}I	52 min.	0,85(95%), 0,89(65%) 1,15(10%)
^{135}I	6,7 horas	0,86, 1,14 1,28; 1,46
^{133}I	21 horas	0,530 (90%)
^{131}I	8,05 días	0,364(82%)

En la Tabla IV se puede apreciar que el ^{16}N presenta el mayor problema debido a las energías gammas de 6,13 y 7,11 MeV que son muy penetrantes y difíciles de blindar. Todos estos radionucleidos, con excepción del tritio, decaen muy rápidamente una vez que el reactor deja de operar, pero prohíben el acceso al reactor propiamente dicho durante la operación del mismo e influyen en el diseño de los blindajes.

1-Source Term Data for Westinghouse Pressurized Water Reactor WCAP-8253 May 1974.

2-Grant P.J. et al Radiochemistry Survey Program. American Nuclear Society, New Orleans, June 8-13(1975) Paper N°RDTPL-75 U.S. Nuclear Regulatory Commission-Nureg-75/077 (Nov.1975).

TABLA III

PRODUCTOS DE FISION QUE SE DEPOSITAN

RADIONUCLEIDO	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION	ENERGIA γ MeV
^{132}Te	78 horas	0,230 (90%)
^{99}Mo	67 horas	0,181-0,740
^{239}Np	2,35 días	0,106-0,228
^{95}Zr	65,5 días	0,724-0,756 0,765
^{103}Ru	40 días	0,497-0,610
^{141}Ce	32,5 días	0,145
^{144}Ce	285 días	0,34
^{90}Sr	28,1 años	- - - - -

El tritio, no emite rayos gamma, pero sí partículas beta de 17 keV. A pesar de que su alcance en aire es bajo, se incorpora fácilmente al agua del organismo.

3.- Productos de corrosión activados

Los productos de corrosión, que se originan en todo el circuito primario del reactor, al pasar por el núcleo son activados. La fuente principal de productos de corrosión se origina a través del fenómeno que se conoce como corrosión generalizada de los materiales de construcción del circuito primario, tanto en la zona del núcleo como en el resto del sistema.

Estos productos de corrosión activados constituyen la principal fuente de los efluentes radiactivos líquidos de una central nuclear, y son el origen de la contaminación del sistema de transporte de calor y de las piletas de almacenamiento de elementos combustibles irradiados. Esta fuente de contaminación, contrariamente a lo que acontece con los productos de fisión donde su aporte al inventario desaparece al retirar el elemento defectuoso del reactor, continúa a lo largo de toda la vida útil de la Central.

En la Tabla V se hace un resumen de los principales radionucleidos originados por la activación de los metales que componen los materiales de construcción de los sistemas de refrigeración más usuales.

TABLA IV

PRODUCTOS DE ACTIVACION INTRINSECOS

Nucleido madre	Abundancia de la madre	Reacción Nuclear	Sección eficaz 10 ⁻³ barn	Período de semidesintegración	Energía γ (Mev)	Abundancia de (fracción)	Producto
^2H		(n, γ)	$0,5 \pm 0,1$	12.26años	---	---	^3H
^{16}O	99.759	(n, p)	0.019 ± 0.001	7,4 s	6,13 7,10	0.69 0.05	^{16}N
^{17}O	0.037	(n, p)	0.0086 ± 0.008	4,2 s			^{17}N
^{17}O	0.037	(n, α)	235 ± 10	5760 años	---	---	^{14}C
^{18}O	0.204	(n, γ)	0.16 ± 0.1	26,8 s	1,6	0.7	^{19}O
^{18}O	0.204	(p, n)		110 min.			^{18}F
^{23}Na		(n, γ)		7,8 s	1,38 2,7		^{24}Na
^6Li		(n, α)					^3H

TABLA V

PRODUCTOS DE ACTIVACION DE LOS MATERIALES ESTRUCTURALES

RADIONUCLEIDO	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACION	ENERGIA γ (MeV)	ENERGIA β (MeV)	REACCION
^{60}Co	5,27 años	1,17-1,33	0,3-1,5	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$
^{58}Co	72 días	0,81	1,3 (+)	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$
^{59}Fe	45 días	1,10-1,29	0,5-16	$^{58}\text{Fe}(n,\gamma)^{59}\text{Fe}$
^{54}Mn	314 días	0,83	----	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$
^{51}Cr	27 días	0,32	----	$^{50}\text{Cr}(n,\gamma)^{51}\text{Cr}$
^{56}Mn	2,6 horas	0,85, 181	2,9	$^{56}\text{Fe}(n,p)^{56}\text{Mn}$
^{95}Zr	65 días	0,724-0,756		$^{94}\text{Zr}(n,\gamma)^{95}\text{Zr}$

De la Tabla V surge como veremos más adelante en "Transporte de actividad," la gran importancia que tiene la selección de los materiales pues hay que tratar de minimizar su contenido de cobalto.

En la Fig.1 se muestra la exposición en un determinado sitio del sistema de transporte de calor en función del tiempo desde la parada del reactor. Igualmente esta exposición es muy alta debido principalmente a la activación del agua. En tales condiciones el campo será debido principalmente al ^{19}O y al ^{16}N . Afortunadamente como hemos visto, estos isótopos tienen una vida media muy corta e inmediatamente de la fuera de servicio de la Central, el campo de radiación será dominado por las especies activas que se han depositado en la zona donde nos encontramos midiendo. Primero este campo estará regido por el ^{64}Cu , ^{56}Mn y el ^{51}Cr , producidos por activación de los productos de corrosión. Dentro de las 24 horas el campo irá decayendo y posteriormente no se modificará apreciablemente. En estas circunstancias se encuentra que el isótopo dominante es el ^{60}Co .

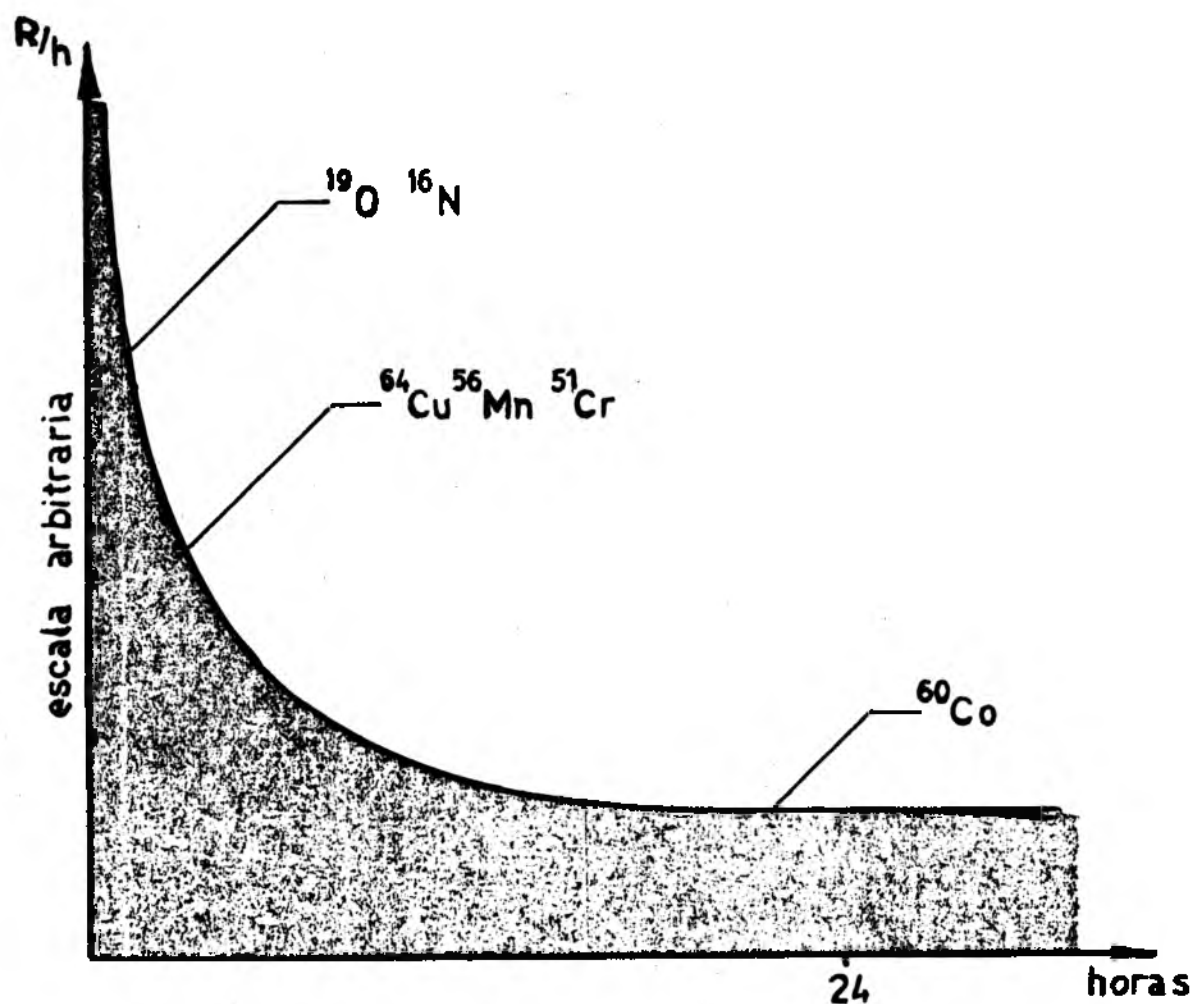


FIGURA 1

II- TRANSPORTE DE ACTIVIDAD

Problemas operacionales causados por los productos de corrosión

El fenómeno de corrosión generalizada origina en el sistema primario del reactor gran cantidad de productos de corrosión. La cantidad que se produce depende fuertemente de los materiales estructurales, de la superficie expuesta al refrigerante y del control químico que se realice en el sistema. En los reactores del tipo BWR se producen el orden de 200kg a 500kg de productos de corrosión por año mientras que un PWR típico la producción es del orden de las decenas de kilogramos por año.¹

Los productos de corrosión ocasionan en las centrales nucleares numerosos problemas operacionales, debido a la formación de depósitos en diversas partes del circuito, entre los cuales deben mencionarse:

- 1.- RESISTENCIA HIDRAULICA: se manifiesta primariamente en el incremento de la rugosidad o reducción de los canales de los elementos combustibles, lo cual tiende a incrementar la caída de presión en el núcleo. También contribuye a la reducción de las dimensiones de orificio, en válvulas, bombas de recirculación, líneas de agua de refrigeración de emergencia, etc.
- 2.- RESISTENCIA TERMICA: la ocasionan los productos de corrosión depositados sobre las vainas de los elementos combustibles. Estos depósitos dificultan la transferencia de calor entre el elemento combustible y el refrigerante, y como la producción de calor se mantiene constante, este fenómeno promueve fallas o rupturas de las vainas con la consiguiente contaminación del reactor por productos de fisión.
- 3.- PERDIDA DE REACTIVIDAD DEL REACTOR: este fenómeno puede originarse a través de diversos mecanismos, por ejemplo por incremento de la temperatura del moderador al "ensuciarse" el intercambiador de calor del mismo. Existen posibilidades adicionales de pérdida de reactividad, en los reactores que operan con control químico de reactividad, debido por ejemplo, a la absorción de boro por los productos de corrosión, que se depositan en las vainas de los elementos combustibles, y producen un aumento relativo de la concentración de venenos.
- 4.- ACTIVIDAD ASOCIADA A LOS PRODUCTOS DE CORROSION: estos productos se acumulan en cañerías y equipos fuera del núcleo creando los campos de radiación permanentes del reactor, especialmente debido a los radionucleidos de período largo ^{60}Co (5,3 años) y ^{54}Mn (312 días).

ORIGEN DE LOS CAMPOS DE RADIACION EN REACTORES NUCLEARES

Los productos de corrosión que se generan en todo el sistema primario del reactor son transportados por el refrigerante al núcleo. Allí permanecen por un tiempo durante el cual son activados, volviéndose radiactivos. Posteriormente son liberados otra vez al sistema volviéndose a depositar en zonas fuera del núcleo. El radionucleido que más aporta a los campos de radiación permanentes es el ^{60}Co .

PROCESOS QUE ORIGINAN LOS PRODUCTOS DE CORROSION Y SU TRANSPORTE.

Los procesos involucrados en el transporte de actividad se encuentran esquematizado en la Figura 2. En esta se muestra una película de productos de corrosión, las formas en que la misma puede crecer y su remoción a través de mecanismos de erosión, disolución y "spalling". Estos procesos pueden ocurrir en diferente grado y con distintas características en diversos puntos del circuito primario. El fluido actúa como medio de transporte entre estos sitios.

El fenómeno de corrosión es el que aporta el material al sistema y que además provee de la fuerza impulsora en algunos procesos de transporte.

La formación del depósito no es un proceso físico simple, se ve influenciado por la química del agua, los parámetros físicos del medio, las características superficiales de las partículas, y la pared como asimismo por la composición de los materiales.

La disolución de los materiales estructurales y de sus óxidos son diferentes a las temperaturas extremas del reactor (núcleo-generador de vapor) y hay una gran tendencia del material de disolverse en las regiones de alta solubilidad y depositarse en las zonas de baja solubilidad. A pesar de que la solubilidad es muy pequeña el flujo del refrigerante es tan grande que decenas o aún centenares de kilogramos de material pueden ser removidos.

Para entender y controlar el movimiento de los productos de corrosión en una planta nuclear se requieren programas integrales de investigación que incluyen la realización de estudios fisicoquímicos a escala de laboratorio pasando a través de ensayos a escala piloto con circuitos de presión y temperatura, a las observaciones sobre plantas nucleares en operación.

El conocimiento del comportamiento de los productos de corrosión es de gran importancia económica tanto para la operación de las centrales como para el diseño de futuras plantas por su implicancia económica y de seguridad. Para el operador, es de gran interés práctico poder trabajar con fácil acceso a los componentes para su mantenimiento e inspección y para los diseñadores poder predecir los campos de radiación con cualquier combinación de materiales bajo diversas condiciones de operación.

1. D.F. Charlesworth, Chem.Eng.Symposium Series 66 (1970)21

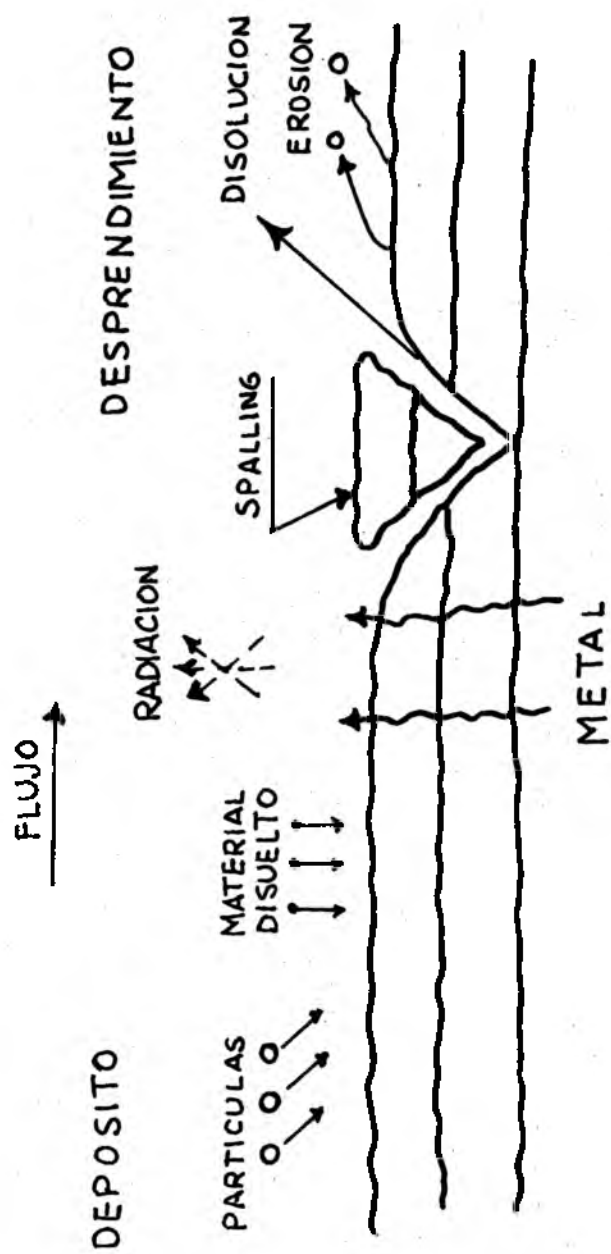


FIGURA 2

III- CORROSION

a) Introducción

Todos los materiales metálicos que forman parte de estructuras y equipos están sometidos al proceso de corrosión por el medio en el que operan. La corrosión es un proceso de deterioro que actúa desde la superficie del metal tendiendo a convertirlo en óxido. Puede imaginarse al resultado último de la corrosión como el proceso inverso al de extracción y fabricación de metales a partir de los minerales naturales. La obtención del metal involucra un proceso de reducción y la corrosión uno de oxidación.

El costo de la corrosión en la sociedad moderna es muy grande (entre $30-15 \times 10^9$ dólares por año en EE.UU. y 20×10^9 marcos por año en República Federal Alemana) y su tendencia es a aumentar. Se estima que por lo menos $1/4$ de estos gastos se hubieran evitado de haberse adoptado las prácticas de protección ya conocidas.

La corrosión en plantas nucleares tiene características comunes con las que ocurren en otras plantas de generación de energía eléctrica por vapor, excepto en lo que hace al circuito primario, es decir al circuito de transferencia de calor entre los elementos combustibles y los generadores de vapor. Ello se debe a que los procedimientos de corrosión circulan por el circuito primario (ver Figura N° 3), y se depositan en su superficie incluyendo la del núcleo donde se activan y son luego redistribuidos por el circuito. Es decir que además del deterioro de los materiales, la corrosión produce otro perjuicio al encarecer las labores de mantenimiento en las plantas nucleares.

Distintos tipos de corrosión

Mucho de lo discutido hasta ahora se refiere a la llamada corrosión generalizada, la que por ejemplo ocurre en el acero al carbono o en zinc en soluciones ligeramente ácidas. Sin embargo, esta es una forma de corrosión controlable y eventualmente de efectos predecibles y por lo tanto de efectos no muy perjudiciales en cuanto al deterioro de equipos y tuberías. En cambio esta corrosión generalizada conduce a una masa grande de productos de corrosión que eventualmente se activarían en el núcleo y al depositarse en el circuito aumentarían el campo de radiación del mismo. Por este motivo, el diseño CANDU que utiliza tubería de acero al carbono va acompañado de una mayor proporción de limpieza en el sistema para eliminar los productos de corrosión formados. La Tabla IV presenta valores de velocidad de corrosión (generalizada) para algunos metales de interés en centrales nucleares.

El otro tipo de corrosión es la corrosión localizada que puede corresponder al caso de una pequeña área anódica y una gran área catódica en contacto, a la presencia de rendijas o zonas recónditas en el sistema, a deficiencias químicas y/o estructurales en los metales, etc.

Estos distintos tipos de corrosión localizada son muy riesgosos, porque pueden producir el deterioro de los equipos y tuberías en grado muy superior al que cabe esperar por la masa de metal disuelto.

i) Corrosión por picado (Pitting)

Es una forma muy peligrosa de corrosión que consiste en la formación de cavidades de área expuesta en general pequeña, que penetra a lo largo del metal, conduciendo eventualmente a una rápida perforación del equipo afectado. Es de difícil predicción pues muchas veces las picaduras son relativamente aisladas conduciendo a escasa pérdida de material, pero a la falla total del equipo afectado

TABLA IV¹

Velocidad de corrosión de metales en circuitos primarios

Materiales	Reactores de agua a presión	Reactores de agua a ebullición
	Velocidad corrosión(mg dm ⁻² día ⁻¹)	
Acero al carbono	1,9	5,1
Acero inoxidable 30y	0,2	0,1
Inconel 600	< 0,1	< 0,1
Momel 400	< 0,1	< 0,1
Inconel 600	0,03 - 0,12	
Incoloy 800	0,02 - 0,15	

1.- G.F. Taylor, AECL-5648, (1977)

El picado tiene la característica de acelerarse por autocatalisis, por ello las picaduras tienen muchas veces un área expuesta mucho menor a la interna.

El picado es favorecido por presencia de algunos iones como Cl⁻. La Figura 3 donde se ve que dentro de la picadura se incrementa el contenido de especies agresivas Cl⁻ y H₃O⁺ (este último por hidrólisis de los iones metálicos del tipo MZ⁺ + nH₂O ⇌ M(HO)_n^(z-n) + nH⁺).

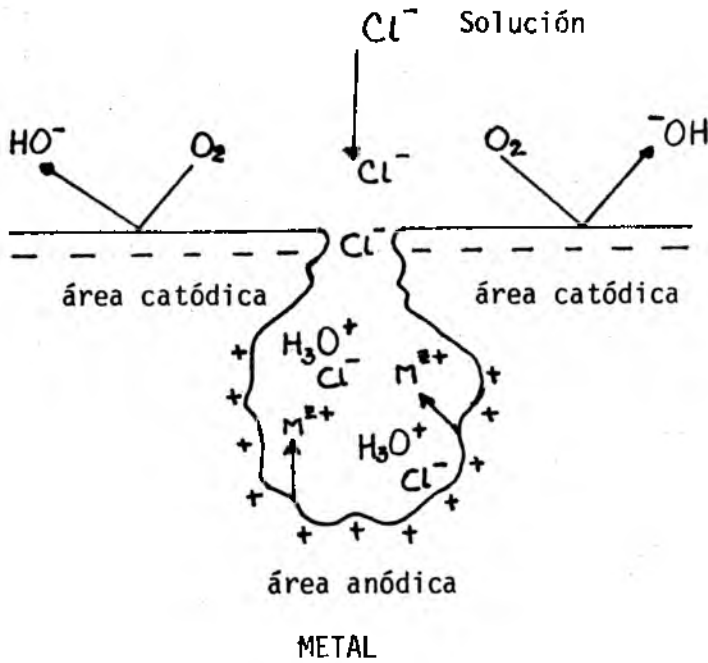


FIGURA 3

No existe una única razón visible para el inicio del picado aunque puede interpretarse como una falla en la película pasivante que expone una pequeña zona de metal al medio corrosivo. La presencia de ciertos agentes químicos puede acelerar grandemente este fenómeno. El Cl^- es el agente que más comúnmente provoca picado en los metales.

La figura ilustra el efecto del Cl^- sobre la curva (potencial-corriente) característica de metales que se pasivan. Se ve una disminución de la región de pasivación por corrimiento del potencial de iniciación de la zona transpasa a valores más negativos.

Los aceros inoxidable son particularmente susceptibles a corrosión por picado en presencia de iones Cl^- . Algunas medidas que se pueden tomar para inhibir el picado son la aplicación de tratamientos térmicos especiales a las aleaciones y modificación de su composición (v.gr., el agregado de Mo)

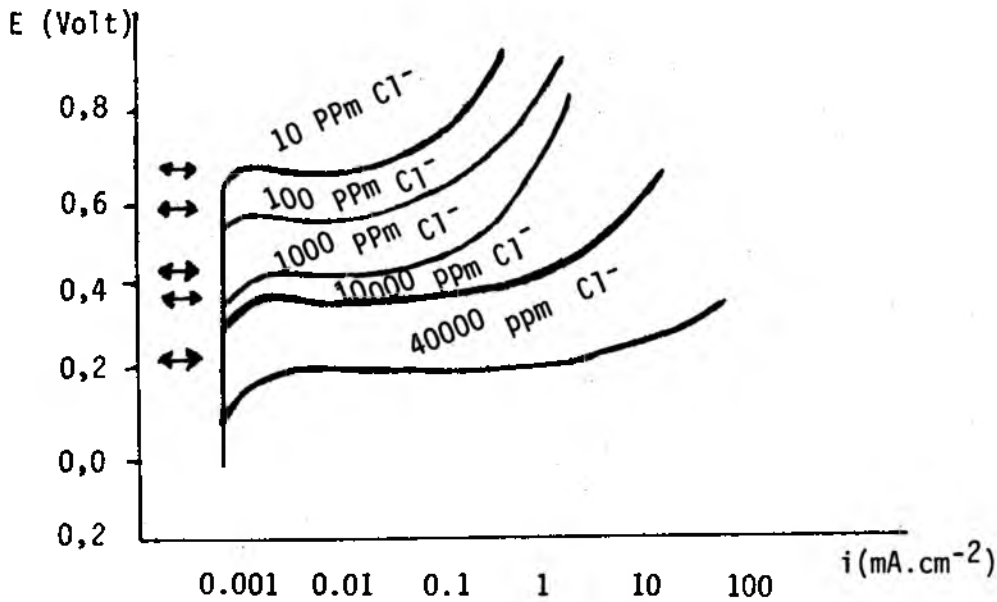


Figura 4 Efecto de la concentración de Cl^- en el picado de acero inoxidable 304 ¹

1.- M.J. Johnson-Localized Corrosion, ASTM.STP 516, p.262

ii) Corrosión en rendijas (crevice)

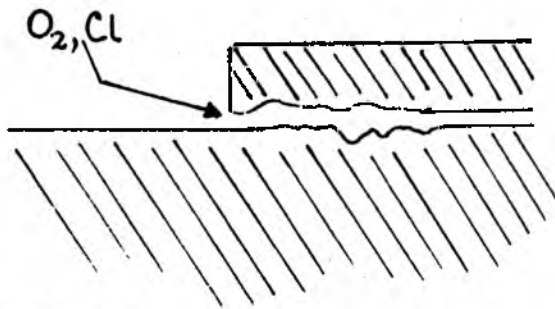


Figura 5

La corrosión en rendijas se produce muy frecuentemente por razones de diseño (Figura 5) cuando quedan zonas no protegidas donde penetra el líquido, que queda relativamente estancado. Estas condiciones se dan en bordes mal terminados, al superponer distintas piezas, por presencia de juntas defectuosas. También puede aparecer cuando se forman depósitos porosos por incrustaciones o por productos de corrosión. Esta corrosión es tan severa que puede producir el corte de láminas de acero inoxidable en agua de mar si se pone una banda de goma elástica alrededor de la lámina.

El ataque se produce en zonas donde es difícil el acceso de oxígeno y otras especies. Esto provoca una pila de concentración entre la rendija y el resto del metal siendo la rendija la zona anódica, a medida que se agota el O_2 en la rendija

sólo tiene lugar el proceso anódico y esto (como en el picado) lleva a un exceso de carga positiva que provoca la entrada de Cl^- en la rendija, y acelerándose el deterioro.

Este tipo de corrosión afecta a los aceros inoxidables, siendo la estabilidad de los mismos mayor en la serie

acero 13% Cr < acero 17 % Cr < acero Cr-Ni 18/8
< acero Cr Ni 18/8, Mo.

iii) Corrosión intergranular:

Normalmente la corrosión de un metal es similar en los granos y en los límites de granos, pero en algunos casos puede producirse un ataque preferencial en los límites de grano que lleva a la falla del metal. La corrosión intergranular ocurre cuando impurezas presentes en el metal se acumulan en los límites de grano. Este es el caso del Fe en aluminio, a veces del Zn en bronce y en aceros inoxidables por desaparición del Cr en los límites de grano.

Este es un problema sumamente serio en los aceros inoxidables y que tiene lugar por segregación del carburo de cromo (Cr_{23}C_6) en el límite de granos. Esta precipitación ocurre en los límites de grano, produciéndose una disminución del tenor de Cr en esas zonas y conduciendo a un ataque preferencial.

La corrosión intergranular en aceros inoxidables se debe en general a tratamientos térmicos que llevan a la aleación a temperaturas entre 510 y 700°C, en esas condiciones el acero queda sensibilizado puesto que se ha producido precipitación de carburo de cromo en borde de grano. Por esta razón la soldadura de aceros inoxidables es un proceso muy delicado que debe evitar que el metal quede sensibilizado cerca de la soldadura.

La prevención de este tipo de corrosión tan común en aceros inoxidables, se puede hacer: (a) con un tratamiento térmico adecuado, consistente en calentar el metal entre 1065 y 1120°C (región de temperaturas donde se disuelven los carburos) y enfriarlo rápidamente; (b) usando aleaciones de bajo contenido de carbono (< 0,03%) de modo que el carburo formado sea insuficiente para inducir el ataque y (c) usando aceros inoxidables estabilizados con Ti (serie 321) ó Nb (serie 347), elementos que se combinan con el C evitando la formación de carburo de cromo.

iv) Corrosión bajo tensión (stress corrosión cracking).

Este tipo de deterioro sumamente importante especialmente en metales sometidos a tensiones por trabajo a temperatura y presión altas. Las calderas han sido tradicionalmente afectadas por este tipo de corrosión que fue llamado fractura o fragilización alcalina (alkaline cracking or embrittlement). Se observa en metales que se pasivan y es un fenómeno sinérgico donde se acopla el daño químico por corrosión en el esfuerzo mecánico.

El medio es muy importante en la resistencia de un material a la corrosión bajo tensión. Así los bronce sufren corrosión en solución amoniacal, mientras los aceros austeníticos son especialmente susceptibles en solución de cloruros con oxígeno. La Figura N° 6 ilustra el efecto del Cl^- y del oxígeno en corrosión bajo tensión del acero inoxidable 304.

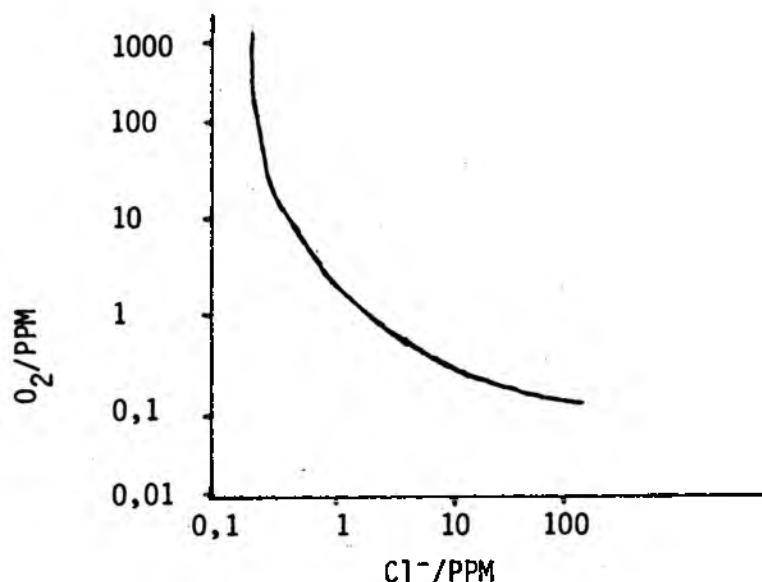


Figura 6 Relación O_2/Cl^- en agua de calderas con fosfatos alcalinos para que sea susceptible a corrosión bajo tensión.

Las tensiones de trabajo en los distintos materiales pueden provocar el inicio de una fractura. Se piensa que al deteriorarse mecánicamente la película pasivante, el metal queda expuesto al medio agresivo comenzando a propagarse una fractura (trans-o intergranularmente). En la punta de la fractura la tensión mecánica puede ser muy grande actuando en consecuencia como acelerador de la propia propagación. La naturaleza química y mecánica del problema está establecida.

El contenido de Ni en aleaciones Fe-Cr es muy importante para determinar la resistencia a la corrosión bajo tensión, siendo los materiales más susceptibles aquellos que contienen un 10% de Ni, aumentando la resistencia con el tenor de Ni en el acero.

Este tipo de ataque es importante en los generadores de vapor y por eso se utilizan tubos de aleaciones ricas en Ni, pudiéndose observar la influencia del tratamiento térmico y la concentración de álcalis en el daño producido.¹

Hay otros tipos de corrosión que son de importancia tales como los producidos por desplazamiento, de fluidos, erosión y cavitación, por fatiga mecánica o por desplazamientos del metal contra otro sólido (fretting). Todos ellos se encuentran descritos en textos especializados en corrosión.²

Para finalizar cabe mencionar dos fenómenos de corrosión que han afectado especialmente los generadores de vapor de

centrales nucleares.

El primero es el desgaste metálico (metal wastage) observado en tubos de generadores de vapor del lado secundario, se ha observado en sistemas que contienen fosfatos de sodio como aditivos y ocurre especialmente en tubos de INCONEL 600³. Los daños se inician como un picado en una pequeña área, las picaduras coalescen y tiene el aspecto de ataque generalizado en áreas de 1 a 10 cm² de la tubería. Se ha visto el efecto de la temperatura en acelerar este mecanismo que se iniciaría en zonas de poco flujo de agua donde puede acidificarse localmente la solución de fosfato⁴. (placas de soporte de tubos y zonas de barros).

El último tipo de corrosión, muy específica de generadores de vapor en la zona secundaria, se denomina indentación (denting) habiendo sido observado al comienzo de la década del 70. La Figura 7 ilustra este fenómeno que ha sido observado en la pequeña zona libre entre la placa soporte y los tubos propiamente dichos del generador de vapor. En esa zona se generan productos de corrosión que al crecer van comprimiendo las paredes de los tubos hasta quebrarlos. En general el volumen de hierro aumenta unas cuatro veces al formar óxidos hidratados. Se ha observado indentación con distintos aditivos en el agua y ciertamente con cambio de materiales y diseño puede paliarse su efecto.

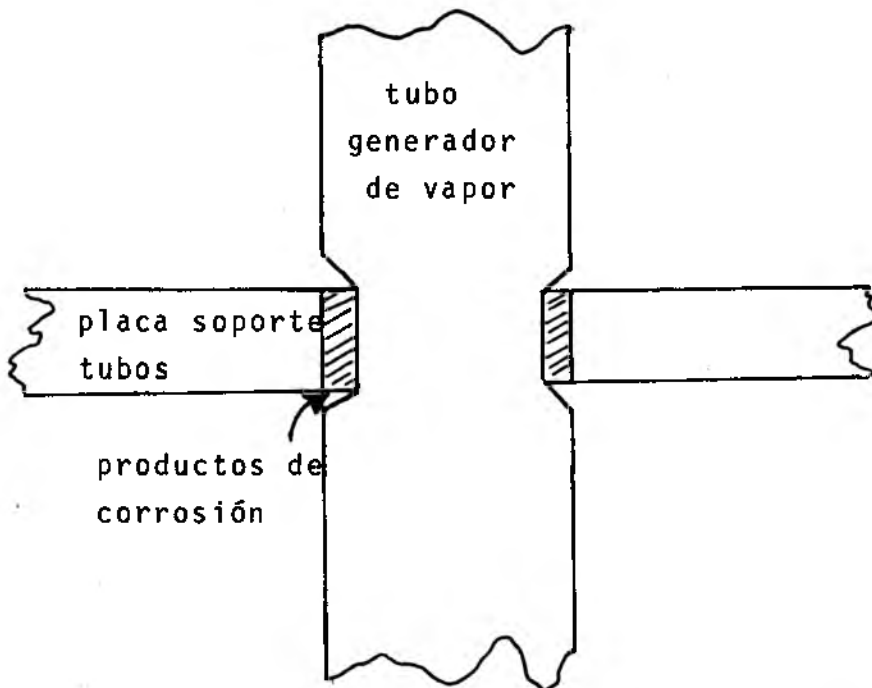


Figura 7

Referencias:

- 1.- R.S. Pathania, corrosión /76. Paper N°98
- 2.- M.G. Montana y N.D. Greene. Corrosion Engineering, M.C.Graw Hill Co, 1967
- 3.- Weeks, J.R., en "Corrosion Problems in Energy Conversion and generation" Ed. E.S. Tedmon, Electrochem Soc. Inc (1974)
- 4.- N. Pessall y A.B. Dunlap, Corrosion/75, Toronto, 1975. Paper 118.

IV-MATERIALES EN CIRCUITOS DE CENTRALES NUCLEARES

La selección que normalmente se hace para decidir sobre el tipo de materiales que se emplean en las plantas, se basa en los requerimientos técnicos que tiene la operación de la planta y en el costo del material. Una estructura metálica puede estar especialmente sometida a: vibración, medios agresivos, fuertes flujos hidrodinámicos, altas temperaturas, altas presiones y el material de construcción deberá poder responder a esos requerimientos. En centrales nucleares hay condiciones especiales que son requeridas. Los productos de corrosión de las aleaciones metálicas empleadas, se activan y es importante mantener a un mínimo el contenido de elementos, que como el ^{59}Co , se activan dando productos de larga vida que contribuyen significativamente a los campos de radiación de las Centrales.

Un requisito muy estricto es la confiabilidad de equipos y sistemas lo que obliga a seleccionar materiales con una muy baja frecuencia de fallas

a.- Circuito primario

En el circuito primario hay en general tres tipos de materiales cuyas superficies contribuyen apreciablemente a la superficie metálica total expuesta al refrigerante.

En el núcleo, los elementos combustibles están envainados en aleaciones de zirconio, las composiciones de las utilizadas usualmente se dan en la Tabla V.

TABLA V

Aleación	% en peso				
	Sn	Fe	Cr	Ni	Nb
Zircaloy-2	1,5	0,13	0,1	0,05	----
Zircaloy-4	1,5	0,2	0,1	0,007	----
Zr-2,5 Nb	---	---	---	---	2,5

La tubería del circuito es de acero al carbono (caso CANDU) o de acero inoxidable (AISI-347 en la Central Nuclear en Atucha) y los tubos del generador de vapor que están sometidos a un gradiente térmico importante y a un flujo hidrodinámico muy grande, son de Inconel-600, Incoloy 800 o Monel 400. En los primeros generadores de vapor se usaron tubos de acero inoxidable que no demostraron ser aptos pues se corroían por picado o por corrosión bajo tensión (ver Módulo Segundo, Capítulo 1).

En la Tabla VI se da la composición de los aceros y aleaciones con alto contenido de Ni, que integran las tuberías del circuito primario y de los generadores de vapor.

La corrosión de los aceros es mínima en la zona de pH correspondiente a neutralidad o ligeramente alcalina.

En la Figura 8 se ilustra la velocidad de corrosión de acero al carbono a 300°C en función del pH y se la compara con la

curva de solubilidad de la magnetita en esas condiciones.¹ Se ve en la Figura que el acero tiene baja corrosión en soluciones ligeramente alcalinas que son la adoptadas universalmente en el circuito primario (alrededor de pH 10).

El empleo de tubería de acero al carbono presenta las ventajas de menor precio del material y menor riesgo de corrosión localizada, pero su corrosión generalizada trae aparejado una concentración mayor de productos de corrosión activos en el circuito y habitualmente va acompañada de un circuito de limpieza de mayor capacidad que cuando se emplean aceros inoxidable. En la Tabla VII se dan las velocidades de desprendimiento de productos de corrosión para distintas aleaciones en condiciones de operación de reactores tipo CANDU.

Una estrategia posible para reducir la cantidad de elementos activos de período de semidesintegración largo, es especificar un menor contenido de estos elementos en la aleación.

La penalización económica para reducir el ^{59}Co de 0,015 a 0,010% en los metales de los tubos de generadores de vapor es 12% y para pasar de 0,010 a 0,006% de ^{59}Co en las tuberías de acero al carbono² es 11%.

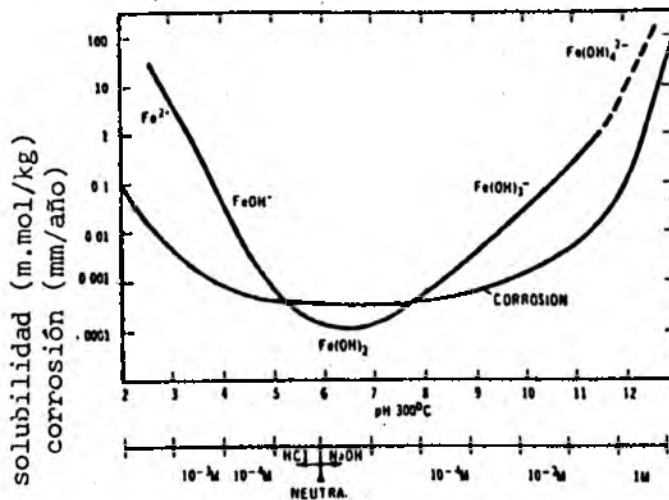


Fig. 8 Corrosión de acero al carbono y solubilidad de magnetita.

TABLA VI

Aleación	Ni	Cr	Fe	C	Mn	Cu	Co	Ti	Ti/C	Ti/C+N
Acero al carbono Serie 1300			Completa	0,2- 0,4	1,60- 1,90		(p=0,040; S=0,040; Si=0,20-0,35)			
AISI 304 acero inoxidable	8-12	18-20	Completa	≤ 0,08	2,00					
AISI 347 acero inoxidable	9-13	17-19	Completa	≤ 0,08	2,00				(Nb) /C ≥ 10	
INCONEL 600	≥ 72,0	14,0- 17,0	6,0- 10,0	≤ 0,03	≤ 1,00	≤ 0,50	≤ 0,015		≥ 5	
INCOLOY 800 (KWU)	32,0- 35,0	20,0- 23,0	Completa	≤ 0,03	0,4- 1,0	≤ 0,75	≤ 0,015	≤ 0,60	≥ 12	≥ 8
INCOLOY 800 (AECL)	32,5- 35,0	21,0- 23,0	Completa	0,03	≤ 1,00	≤ 0,75	≤ 0,015	≥ 0,35	≥ 12	≥ 8
Monel 400	6,30 70,0	---	≤ 2,5	≤ 0,3	≤ 2,00	Completa	≤ 0,015	----	----	----

TABLA VII

VELOCIDAD DE LIBERACION DE PRODUCTOS DE CORROSION

$$V_{\text{corr}}/\text{mg dm}^{-2}\text{día}^{-1}$$

Aleación	Condiciones RPP	Condiciones RPP
Inconel 600 o Incoloy 800	0,02	0,02
Monel 400	0,02	0,15-0,5

El circuito primario contiene también otras aleaciones con fines especiales, en sellos de bombas, cojinetes, o superficies sometidas a severos desgastes mecánicos. De todas ellas las estelitas (que son aleaciones ricas en cobalto de alta resistencia) son inconvenientes desde el punto de vista de los campos de radiación. La Tabla VIII presenta las áreas de distintos metales expuestas en el circuito primario de la Central Nuclear en Atucha.

A pesar que la estelita representa el 0,3% de la superficie total su alto contenido de Co (composición normal=50-60% Co, 5-20 % W, 20-33 % Cr, 0-13 % Ni, 0-1.5 % C y 0-6 % Mo) indica que su corrosión es un factor importante en el inventario final de ^{60}Co .

b) Lado secundario del generador de vapor.

El generador de vapor es un equipo crítico porque, además de ser el productor del vapor que acciona las turbinas, es la interfase natural más expuesta a posibles pasajes de sustancias activas fuera del circuito primario. Es por esto que se ha cuidado mucho el material de las tuberías y se ha estudiado el efecto de los distintos medios en la corrosión bajo tensión, que es una de las formas más importantes de corrosión de esos tubos, la que habitualmente ocurre desde el lado del secundario.

La Figura 9 da la posibilidad relativa de fisuración de aleación de hierro en función del contenido de Ni del material-

TABLA VIII

MATERIAL	SUPERFICIE m ²	%	VELOCIDAD DE CORROSION mg dm ⁻² mes ⁻¹	VELOCIDAD DE DESPRENDIMIENTO mg dm ⁻² mes ⁻¹	REFERENCIA
Acero al Cromo- níquel	3720	24,3	2,5-5,0	0,6-1,5	1
Incoloy-800	8270	54	1,0-2,5	1,0-1,5	1,2
Estellita	45	0,3	5 - 25	5 - 25	1
Zircaloy-4	3290	21,4	1,8*	muy baja	3

*Con exposición a radiación , la velocidad de corrosión aumenta notablemente
(ver Referencia 2)

PRINCIPALES MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL CIRCUITO PRIMARIO
DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA Y SUS CARACTERISTICAS DE CORROSION

- (1) K.K. Taylor, AERE - R 8164, marzo 1976
- (2) G.E. Taylor, Materials Research, AECL-5227 (1975)
- (3) P. Cohen, Water Coolant Technology of Power Reactors, Gordon and Breach Science Publ.(1969)

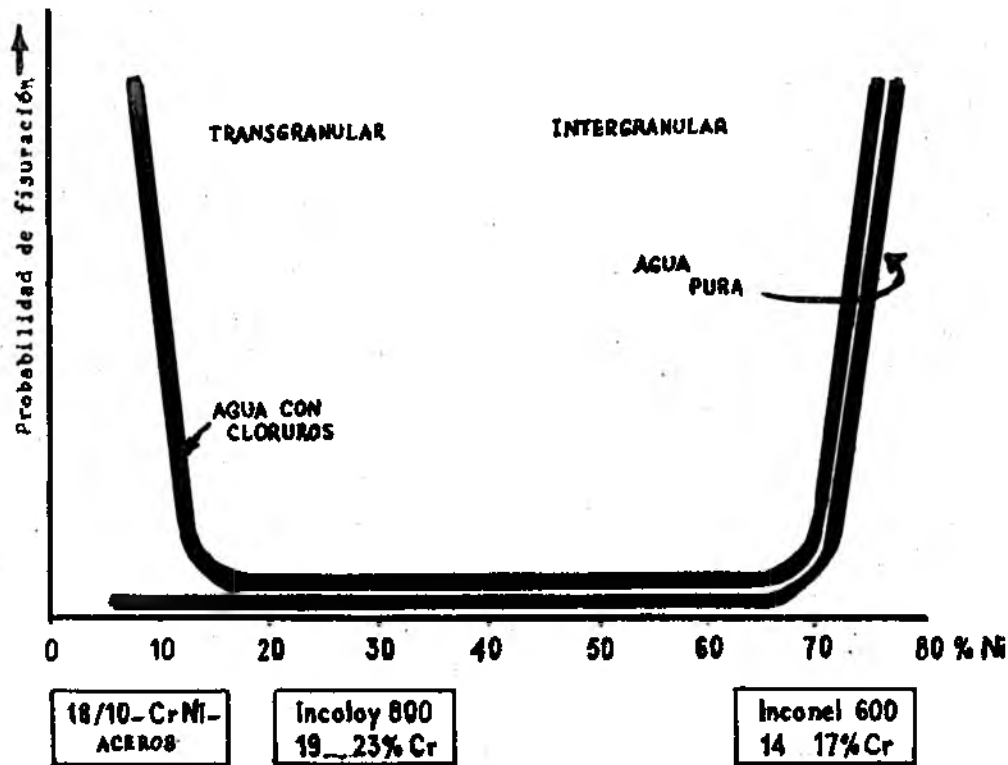


Fig. 9 Corrosión bajo tensión.- Influencia del contenido de Ni sobre la posibilidad de corrosión bajo tensión de aleaciones austeníticas. Agua pura y con 1000 ppm Cl^- , a 350 °C.

- 1.- R.Garnsey, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Proc. Int. Conf. B.N.E.S., Bournemouth, 1977, página 1.
- 2.- F.B Walton, Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems. Proc. Int. Conf. B.N.E.S. Bournemouth 1977, Pag. 401.

V- DESCONTAMINACION

1.- DESCONTAMINACION DE REACTORES

La efectividad de la descontaminación se expresa a través de un factor denominado Factor de Descontaminación (F.D.) que es el cociente entre el campo de radiación antes y después del tratamiento. Cuando el campo original es alto, es fácil lograr valores altos de factores de descontaminación, en cambio resulta de poca utilidad intentar disminuir los campos cuando sus valores son pequeños. En otras palabras, en sistemas poco contaminados no deben esperarse valores de FD mucho mayores que la unidad.

El factor de descontaminación, FD, puede vincularse en forma directa con la reducción del campo de radiación RCR.

como el F.D. = $\frac{\text{Actividad antes de la descontaminación}}{\text{Actividad después de la descontaminación}}$

se tiene que la reducción del campo de radiación (R.C.R.)

$$R.C.R. = 100 \left(1 - \frac{1}{FD}\right)$$

En la Figura 10 se ha graficado la reducción del campo de radiación en función del factor de descontaminación. Esta Figura permite visualizar claramente el significado del F.D. así por ejemplo en F.D.=5 significa su reducción del 80 % del campo de radiación.

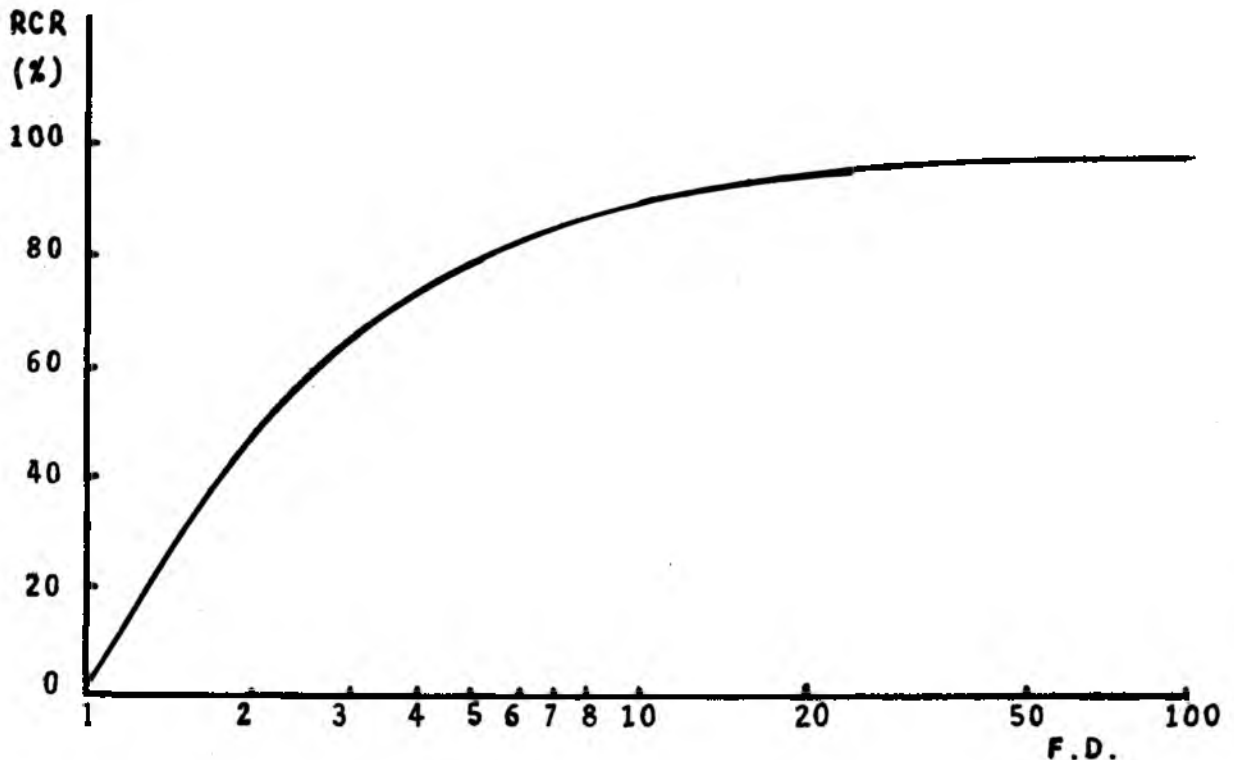


FIGURA 10

La evaluación de la descontaminación implica el monitoreo muy preciso y punto a punto del sistema antes y después, a fin de demostrar que la descontaminación fue adecuada en todos los puntos de interés y no sólo en algunos.

La decisión de descontaminar debe surgir de un análisis costo-beneficio siguiendo las recomendaciones de la International Commission on Radiological Protection (Publicación 26).

La descontaminación puede limitarse a un sistema o subsistema cuando el mismo requiere mantenimiento repetido y/o ha alcanzado altos niveles de contaminación. De cualquier manera la limpieza parcial es una solución transitoria dado que en lapsos cortos (algunos meses) el sistema descontaminado vuelve a contaminarse por transporte desde el resto del reactor.

Para que un dado método tenga significado debe cumplirse:

- a.- que la disminución del detrimento logrado con la descontaminación sea mayor que el esfuerzo necesario para llevar a cabo dicha tarea.
- b.- que produzca el menor daño posible a la instalación
- c.- que demande el menor tiempo posible.

2.- TECNICAS DE DESCONTAMINACION

Las distintas técnicas que se emplean para descontaminar reactores nucleares pueden dividirse en tres grandes grupos:

- a.- métodos mecánicos
- b.- métodos químicos
- c.- métodos operacionales

a.- Métodos mecánicos

Estos métodos utilizan procedimientos de abrasión tales como chorros de agua a presión, etc. También se emplean generalmente para pequeños componentes e instalaciones, que se puedan aislar del resto del sistema y que además sean accesibles a superficies exteriores de equipos de procesos, y a paredes y pisos de las instalaciones.

Como en el caso de los demás métodos, aquí tampoco hay una única técnica o material abrasivo que sea universalmente aplicable. Debentenerse en cuenta el material, la superficie contaminada, el área, la complejidad de la superficie, el nivel y el tipo de contaminación.

Además del costo, el cual es importante en cualquier proceso de limpieza, debe tenerse en cuenta otros factores. En plantas convencionales sólo se considera el costo inicial del equipamiento, el costo de la unidad de abrasivo, la vida de éste, el tiempo requerido para realizar la operación, el control de aerosoles, etc.

En los reactores nucleares, además de los factores mencionados, debe considerarse la posible contaminación de los alrededores, la protección del personal contra la radiación y el

tratamiento de los residuos radiactivos resultantes.

Algunas desventajas que presenta este método acotan su efectividad y su aplicación. Así por ejemplo, pequeñas partículas o depósitos retenidos en pequeños agujeros o fisuras o en codos de cañerías que se encuentran en la mayoría de los equipos y los cuales no representan un serio problema en la industria convencional, deben ser removidos en las instalaciones nucleares debido a que éstos, aún cuando desde el punto de vista másico es muy pequeño su actividad es en general relativamente alta.

En síntesis, las desventajas que presenta este método cuando se lo aplica en centrales nucleares son:

- inaccessibilidad de superficies
- limitado beneficio por la limpieza de componentes aislados.
- gran exposición del operador.

b.- Métodos Químicos

Los métodos químicos se basan en el ataque y disolución con reactivos apropiados, de las capas de óxidos existentes sobre las superficies metálicas. La composición química, estructura y morfología de los depósitos varían según la naturaleza de las superficies metálicas involucradas y según las condiciones operativas de la planta, siendo así diferentes los óxidos encontrados sobre acero al carbono y sobre el acero inoxidable, o los formados a 100°C y a 300°C sobre un mismo metal base. Hay dos tipos de métodos químicos que se emplean normalmente, el AP-Citrox y el CANDECON.

Método AP-Citrox

Su nombre deriva de los reactivos químicos que utiliza, permanganato alcalino (Alkaline Permanganate) y una mezcla de ácido cítrico (Citric acid) y ácido oxálico (Oxalic acid).¹

Este es un método agresivo que requiere demostración efectiva de su inocuidad frente a materiales estructurales, y de cualquier manera puede requerir cambios en componentes de válvulas, bombas, etc, en grado apreciable. En general emplea altas concentraciones (del orden del 10 %) de hidróxido de sodio y permanganato de potasio y posteriormente mezclas de citrato de amonio (del orden de 6 %), ácido oxálico (2%) e inhibidores; pudiéndose lograr altos factores de descontaminación. Es efectivo sobre superficies de aceros inoxidables por la etapa de permanganato alcalino, en el caso de circuitos de acero al carbono dicha etapa puede obviarse.

Este proceso ha sido empleado exitosamente para descontaminar sistemas contruidos con aceros inoxidables y es el método "standard" que se utiliza en los reactores del tipo BWR y PWR. El método consta de dos pasos: tratamiento con una solución de permanganato alcalino a 105°C por una o dos horas, para "acondicionar" las películas del depósito seguido por un tratamiento con ácido a 60-90°C por espacio de una o dos horas y posterior lavado con agua.

Este tratamiento nunca se utilizó en un reactor del tipo PHWR debido a que en este caso habría que retirar previamente el agua pesada, reemplazarla con agua liviana, realizar el procedimiento previamente descrito, secar perfectamente al sistema y posteriormente agregar el agua pesada.

En la tabla siguiente se resumen las ventajas y desventajas de este método aplicado hipotéticamente a un reactor del tipo PHWR

VENTAJAS	DESVENTAJAS
FD 10-100	Desplazamiento del D_2O
Limpia los elementos	Degradación del D_2O
Combustibles	Tiempo mínimo requerido: dos meses.
	Gran volumen de residuos líquidos
	Daños por corrosión relativamente altos.
	Costos del orden de 3.10^6 U\$S

En el costo mencionado no están incluidos el gasto de tratamiento de residuos, ni el almacenaje de los mismos. El costo de procesamiento es relativamente grande debido al gran volumen de agua requerida para realizar los lavados. Por ejemplo, para el caso del reactor en Atucha, se requerirá del orden de 2.10^6 litros.

Método "CANDECON" ²

El método CANDECON (Candu Decontamination) es empleado en los reactores canadienses refrigerados y moderados con agua pesada.

Este procedimiento involucra el agregado de reactivos ácidos al refrigerante en concentraciones del orden de $1g/kg$ de D_2O que disuelven y complejan las películas de los productos de corrosión. El reactivo que se emplea es el Nutek L-106 (mezcla de ácidos orgánicos y complejantes) fabricado por Nuclear Technology Corporation, Amstom, Conn.. Este método se emplea, como dijimos, en los reactores CANDU, cuyo circuito primario, exceptuando los generadores de vapor y las vainas de los elementos combustibles es, en su mayoría, de acero al carbono. Aún no hay experiencia sobre otro tipo de materiales.

El procedimiento, en líneas generales, es el siguiente: se para el reactor, el refrigerante se enfría y se purifica por un tiempo, luego se agrega la mezcla de ácidos diluidos. Estos atacan a los depósitos disolviendo parte de ellos y desprendiendo a los remanentes. Una vez que el depósito está suspendido se lo extrae del refrigerante utilizando los sistemas de limpieza del reactor o agregando otros auxiliares. Los filtros mecánicos remueven las partículas y los sistemas de resinas a los iones. Las resinas de intercambio iónico a su vez regeneran los aniones orgánicos consumidos. Los sistemas químicos así regenerados son otra vez introducidos al

sistema, los cuales vuelven otra vez a reaccionar. Para que el proceso de descontaminación se detenga la resina se reemplaza por un lecho mixto nuevo el cual remueve los ácidos y los metales disueltos residuales. En la Tabla siguiente se resumen las ventajas y desventajas de este proceso:

VENTAJAS

Aplicable al D_2O
 Pequeña degradación de D_2O
 5 días fuera de operación
 Los residuos se presentan como sólidos.

DESVENTAJAS

FD del orden de 2-4

c.- Método Operacional (Ciclaje Fisicoquímico oCFQ)³

Este método consiste en modificar programadamente los parámetros fisicoquímicos de operación de la Central tales como temperatura, pH, caudal y condiciones redox del fluido refrigerante.

Este método ha sido aplicado a la Central PHWR de Douglas Point (tipo CANDU) cuyos generadores de vapor son de monel y la tubería del primario de acero al carbón.

Los canadienses no observaron buena descontaminación de las superficies de acero al carbón por aplicación de este método. Concluyendo entonces que este método era especialmente apto para descontaminar monel cuya velocidad de corrosión aumenta mucho en presencia de oxígeno. Sin embargo observaciones en PHWR y circuitos experimentales de acero inoxidable permiten afirmar que el método de ciclaje fisicoquímico (CFQ) es intrínsecamente aplicable a generadores de vapor de Incoloy 800 y tubería de acero inoxidable.

La descontaminación por Centrales por CFQ, se basa en que las características estructurales y fisicoquímicas de los productos de corrosión depositados dependen críticamente de parámetros de operación como gradiente de temperatura, pH, velocidad del fluido circulante, condición redox del medio, etc. Al variar uno o más de estos parámetros de forma brusca, se inducen cambios repentinos en la estructura de los depósitos, lo que genera erupciones de productos de corrosión, que se desprenden de las superficies metálicas y son transportadas por el fluido refrigerante. Estas partículas en suspensión pueden eliminarse del circuito primario en su mayor parte por filtración mecánica.

Uno de los factores que debe tenerse en cuenta para el empleo del CFQ es la capacidad del sistema de limpieza para eliminar y retener los productos de corrosión producidos en las erupciones. Las modificaciones de pH y de condición redox en el circuito primario pueden implementarse con los circuitos auxiliares disponibles en la Central. En particular, las variaciones de condición redox en Douglas Point se realizaron entre 50 y 180°C para minimizar los riesgos de

daño en los materiales estructurales.

A continuación se resume el procedimiento del CFQ aplicado en Douglas Point.

Procedimiento

- 1.- Establecer condiciones oxidantes 6 horas antes de la parada por agregado de oxígeno y llevar el contenido de oxígeno a 50-100 $\mu\text{g/kg}$.
- 2.- Parada del reactor y máximo caudal de limpieza
- 3.- Ciclaje hidráulico de los generadores de vapor.
- 4.- Ciclaje de temperaturas.
- 5.- Cuando disminuye el crud, agregar 0,2 a 0,1 ppm de hidrógeno. Repetir pasos (3) y (4).
- 6.- Cuando disminuye el crud, retornar a condición oxidante.
- 7.- Se continúa el ciclaje mientras se disponga del reactor.
- 8.- Volver a condiciones reductoras (0,5-1,0 ppm de hidrógeno) reducir el crud a menos de 100 $\mu\text{g/kg}$ antes de aumentar potencia.

En algunos casos se hacen excursiones de pH entre 10,5 y 7,0.

La Tabla IX presenta algunos elementos a ser tenidos en cuenta para una operación de descontaminación por el método CFQ.

TABLA IX

Necesidades

Herramientas especiales	NO
Filtros	SI (en operación normal)
Resinas de intercambio.....	SI (en operación normal)
Tanque almacenaje	NO
Equipos para el manejo de desechos....	SI (en operación normal)
Repuestos	NO
Reactivos químicos, resinas IX	SI
Elementos filtrantes	SI
Trabajo	SI (en operación normal más supervisión especial)
Exposición personal	SI (en operación normal)
Tiempo de detención	Menor de 48 horas
Contaminación del refrigerante.....	NO
Daño por corrosión	Mínimo
Procesamiento de residuos.....	SI (en operación normal)

En la Tabla X se resumen las ventajas y desventajas del método.

TABLA X

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Aplicable a D ₂ O	FD 1,2-1,5
No degrada el D ₂ O	
Tiempo de ejecución menos de 48 horas	
Sólo produce residuos sólidos.	
Costo de 3×10^4 U\$S	

Su mayor desventaja, un FD relativamente pequeño, es más bien aparente puesto que, por sus características la descontaminación por CFQ puede repetirse muchas veces lográndose así un FD total muy aceptable. Como ilustración puede decirse que en el PHWR de Douglas Point la aplicación de este método por cinco meses redujo la dosis en la sala de los generadores de vapor de 3,5 rem-h⁻¹ a 0,5 rem-h⁻¹.

Referencias:

- 1.- Ayres J.A. (Ed) Decontamination of Nuclear Reactors and equipment the Ronald Press Co New York (1970).
- 2.- Montford B. Techniques to reduce radiation fields ACECL-5523 (1970).
- 3.- J.E. Le Surf Control of radiation exposures at CANON Nuclear power stations. J. Br. Energy Soc. 16, N°53 (1977)
M.A. Blesa, E. Diaz, R.L. Fernández Prini, A.J.G. Maroto. Influencia de parámetros operacionales en el comportamiento de los filtros mecánicos del circuito primario de la CNA.- CNEA. IN.Q.R.

VI-SISTEMAS DE LIMPIEZA

En las Centrales Nucleares se utilizan sistemas de limpieza para el circuito primario. Opcionalmente y cada vez con más difusión se lleva a cabo la limpieza del condensado, la purificación del agua de alimentación (primario y secundario), del agua de piletas de decaimiento y de los equipos de limpieza para fines especiales.

a) Limpieza del refrigerante y moderador en el circuito primario:

El fluido que circula por el circuito primario estará contaminado por productos de fisión gaseosos e iónicos provenientes del combustible, y por productos de corrosión activados, usualmente en forma de coloides. Para limitar en todo lo posible el aumento de las dosis de radiación, se hace circular una fracción del fluido primario por un circuito auxiliar de limpieza. Estos sistemas de limpieza consisten en general en tanques con resinas, aniónicas y catiónicas o mixtas, y filtros mecánicos. Los lechos de resina suelen ser de 1,0 a 1,5 m de profundidad, utilizándose resinas en formas de perlas de 1 a 0,5 mm de radio. En la mayoría de las plantas se ubican filtros a la salida de las resinas para retener cualquier partícula desprendida por la circulación del fluido a través de las resinas. La Figura (11) ilustra el sistema de limpieza de la Central Nuclear en Atucha donde los filtros tienen una porosidad de 5 μm .

Debido a que las resinas de intercambio iónico se deterioran a alta temperatura, es necesario refrigerar el fluido a purificar, de manera que circule por las resinas a temperatura menor de 50°C.

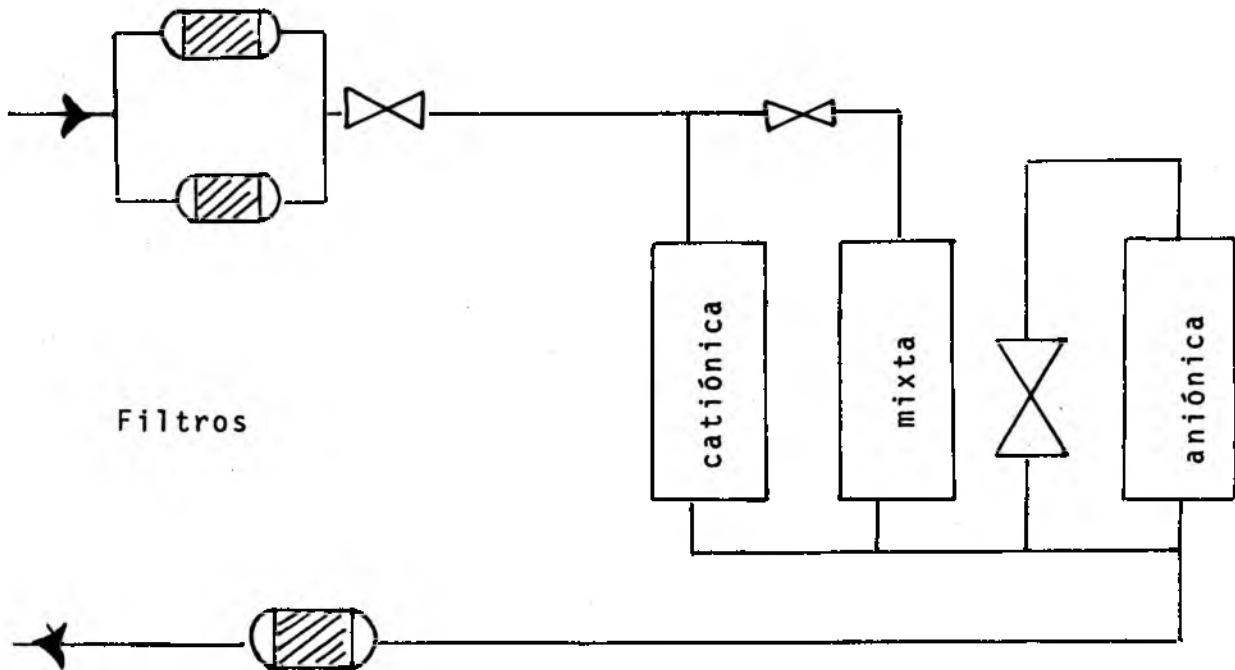


FIGURA 11

Este hecho establece una seria limitación en el caudal a circularse por el sistema de limpieza. En general el caudal de limpieza está entre 0,05 % y 0,1 % del caudal del primario, aunque hay veces en que llega cerca del 1 % del caudal total. Esto implica de 5 a 10 horas para purificar el volumen completo del refrigerante. Puede decirse que los sistemas de limpieza del circuito primario no han evolucionado mucho por la limitación apuntada en el caudal máximo a tratar; los progresos en el sistema de purificación del primario deben aguardar el desarrollo de elementos purificadores que puedan trabajar a alta temperatura.

Un dispositivo muy interesante para filtración a alta temperatura es el filtro electromagnético, dado que Fe_3O_4 que es ferromagnético es el producto de corrosión más abundante en el circuito primario.

Otros óxidos de hierro y óxidos mixtos también tienen propiedades magnéticas. Por esto es muy importante la posibilidad de utilizar un filtro electromagnético para eliminar los productos de corrosión.

La Figura 12 es un esquema de un filtro electromagnético conectado al circuito que debe ser purificado.

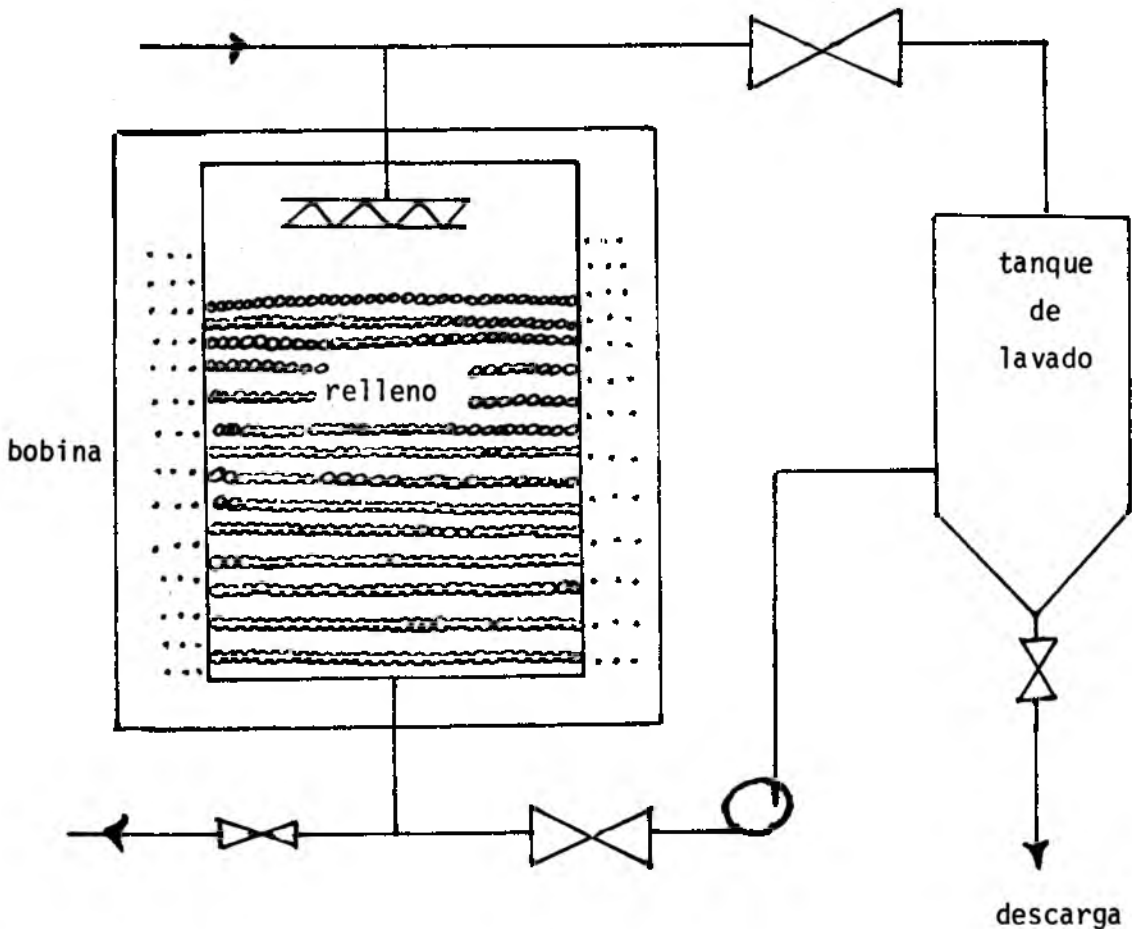


Figura 12 - Filtro electromagnético

Estos filtros electromagnéticos han sido instalados por KWU en reactores de agua en ebullición (BWR). Hasta el presente ninguno ha sido incorporado en un sistema primario de agua presurizada de un reactor de potencia. Esta aplicación se encuentra todavía en etapa de desarrollo.