



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

SISTEMAS DE DESECHOS RADIOACTIVOS DE UNA CENTRAL
NUCLEOELÉCTRICA ENFRIADA POR AGUA LIGERA (LWR)

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MIGUEL ANGEL CASTAÑEDA GALVÁN

TUTOR:

DRA. CECILIA MARTIN DEL CAMPO MARQUÉZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.C. Pamela Fran Nelson Edelstein
Secretario: Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez
Vocal: M. en C. Gabriel Calleros Micheland
1er Suplente: Dr. Juan Luis Francois Lacouture
2do Suplente: M. I. Carlos Villanueva Moreno

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Veracruz, Ver., y México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dra. Cecilia Martín Del Campo Márquez



FIRMA

DEDICATORIA

A mi querida esposa, Ary...Muchas ¡gracias! Gracias, por apoyarme en este reto que emprendimos juntos, y que después de tanto trabajo y esfuerzo, hemos llegado a la meta. Gracias princesa por el tiempo y la paciencia que me has dado; gracias por hacer de mi vida un viaje increíble y lleno de aventuras. Gracias, por ayudarme a levantarme cuando me he tropezado y el camino he errado; gracias... por hacerme tan feliz. Te amo.

A mis padres, Ana María y Miguel; y a mis hermanos, Benjamín y Daniel; que sin ellos...no estaría hoy escribiendo esta dedicatoria... ¡les quiero mucho!

AGRADECIMIENTOS

A mi tutora de tesis. Dra. Cecilia Martin del Campo, por el apoyo y la orientación que incondicionalmente siempre tuvo para mi persona. A mis revisores y miembros del jurado por el tiempo otorgado en la revisión y comentarios al trabajo presentado.

Al Ing. Jorge B. Cárdenas, por la oportunidad brindada y los retos impuestos.

A mis compañeros de maestría Ariadna, Héctor, Julio, Jorge, David, Raúl y Gilberto, por la amistad y el compañerismo demostrado durante todo el grado.

SIGLAS

Sigla	Significado
°C	Grado Celcius
°F	Grado Fahrenheit
μCi/gr	Micro curie por gramo
μCi/sec	Micro Curie por segundo
μm	Micra, 1 E-06 metros
a	Año
ABWR	Reactor avanzado de agua en ebullición
AIX	Aniones intercambiables
ALARA	Tan bajo como razonablemente sea posible
ANS	American Nuclear Society
ANSI	American Nuclear Society Institute
anti-c	Anti-contaminación
ASME	American Society of Mechanical Engineers
BWR	Reactor de agua en ebullición
CFR	Código Federal de Regulaciones
Ci	Curie
CIX	Cationes intercambiables
cm	Centímetros
cm ³ /gr	Centímetro cúbico por gramo
CN	Central Nucleoeléctrica
CNSNS	Comisión de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
CO	Carryover, porcentaje de humedad en vapor
CRD	Mecanismo de accionamiento de barras de control
d	Día
DAW	Desecho radiactivo seco activado
DOT	Departamento de transportación de los EEUU
DR	Desechos Radiactivos
EI.	Elevación
EN	Energía nuclear
ft/sec	Pies por segundo
ft ³	Pies cúbicos

Sigla	Significado
gal	Galones
gpd	Galones por día
gpm	Galones por minuto
gpm/ft ²	Galones por minuto por pie cuadrado
gr/día	Gramo por día
h	Hora
HEPA	Filtros de alta eficiencia para partículas en aire
HIC	Contenedor de alta integridad
HLW	Desechos radiactivos de nivel alto
kg/cm ²	Kilogramo por centímetro cuadrado
kg/h	Kilogramo por hora
lb(s)	Libras
LL-LILW	Desechos radiactivos de nivel bajo y medio de vida media larga
lpm/m ²	Litros por minutos por metro cuadrado
LWR	Reactor enfriado por agua ligera
m	Mes
m/seg	Metros por segundo
m ³	Metros cúbicos
m ³ /min	Metro cúbico por minuto
MB	Cama mixta intercambiables
mm	Milímetros
mRem	Mili Rem
MWt	Megawatt térmico
NCCW	Sistema de circuito cerrado de agua enfriamiento
OIEA	Organización Internacional de Energía Atómica
PA	Productos de activación
PF	Productos de fisión
ppb	Partes por billón
ppm	Partes por millón
psi	Libra por pulgada cuadrada
psig	Libra por pulgada cuadrada manométrica
RWCU	Sistema de limpieza de agua del reactor

Sigla	Significado
scfm/MWt	Pies cúbicos por minuto por mega watt térmico
scram	Apagado del reactor mediante la inserción automática de las barras de control
SJAE	Eyectores de aire
SL-LILW	Desechos radiactivos de nivel bajo y medio de vida media corta
SRP	Plan de revisión estándar
t	Tiempo
ton/h	Tonelada por hora
USNRC	Comisión Reguladora Nuclear de los EEUU
VAC	Ventilación y aire acondicionado
Vca	Voltaje de corriente alterna
VLLW	Desechos radiactivos de nivel muy bajo
W	Watt
wt%	Por ciento en peso

INDICE

1. Perspectiva general	1
1.1.Propósito de los sistemas de desechos radiactivos	1
1.2.Descripción general del proyecto de investigación.....	4
2. Bases de diseño de los sistemas de gestión de desechos radiactivos	5
2.1.Introducción	5
2.2.Origen de los desechos radiactivos	9
2.2.1.Base de diseño de acuerdo a la actividad.....	9
2.2.2.Desechos radiactivos gaseosos	18
2.2.3.Desechos radioactivos líquidos	20
2.2.3.1.Desechos de alta pureza	29
2.2.3.2.Desechos de baja pureza	30
2.2.3.3.Desechos químicos	31
2.2.3.4.Desechos detergentes.....	31
2.2.4.Desechos radioactivos sólidos	32
2.2.4.1.Desechos sólidos húmedos.....	32
2.2.4.2.Desechos radioactivos secos	34
2.3.Calidad del agua	34
2.3.1.Refrigerante primario	35
2.3.2.Alberca de combustible	36
2.3.3.Tanques de almacenamiento de condensado.....	37
2.4.Requerimientos regulatorios	38
2.5.Clasificación de las ESC de los sistemas de desechos radiactivos	46
2.5.1.Clasificación de seguridad	46
2.5.2.Clasificación de acuerdo a grupo de calidad	46
2.5.3.Aseguramiento de la calidad	46
3. Equipos y técnicas de procesamiento	47
3.1.Introducción	47
3.2.Intercambio iónico	47

3.3.Filtración	54
3.3.1.Tipos de filtros usados para desechos radioactivos líquidos	56
3.3.2.Factores que afectan la selección y la operación de los filtros	56
3.3.3.Proceso de filtrado tipo precapa	58
3.4.Evaporación	62
3.4.1.Consideraciones generales en el diseño de evaporadores	62
3.4.2.Tipos de evaporadores	63
3.4.2.1.Evaporador de desechos líquidos radiactivos concentrados	63
3.5.Ósmosis Inversa	69
3.5.1.Principios de osmosis inversa	69
3.5.2.Membrana de ósmosis inversa	72
3.6.Recombinación de hidrógeno-oxígeno	72
3.7.Absorción de gases nobles	77
4. Descripción de los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos	83
4.1.Sistemas de tratamiento de desechos radiactivos gaseosos	83
4.1.1.Introducción	83
4.1.2.Funciones del offgas	84
4.1.3.Criterios de diseño	84
4.1.3.1.Criterios de diseño funcionales	84
4.1.3.2.Criterios de diseño de seguridad	85
4.1.4.Descripción del sistema offgas	86
4.2.Sistemas de tratamiento de desechos radiactivos líquidos	100
4.2.1.Tipos, fuentes y cantidades de desechos radiactivos líquidos	100
4.2.2.Sistemas de procesamiento para los desechos radioactivos líquidos	105
4.2.3.Función de los sistemas de procesamiento de DR líquidos	107
4.2.3.1.Sistema de drenajes de equipo	109
4.2.3.2.Sistema de drenajes de piso	115
4.2.3.3.Sistema de desechos químicos	117
4.2.3.4.Sistema de desechos detergentes	122

4.2.3.5.Sistema de desechos regenerantes	124
4.2.3.6.Sistema de preparación pre-solidificación	129
4.3.Sistemas de manejo de desechos radiactivos sólidos	135
4.3.1.Propósito de los sistemas de gestión de desechos radiactivos sólidos	135
4.3.2.Función del sistema de tratamiento de desechos radiactivos sólidos.....	135
4.3.3.Clasificación de los desechos sólidos	137
4.3.3.1.Desechos sólidos húmedos.....	139
4.3.3.2.Desechos sólidos secos	147
4.3.4.Almacenamiento de desechos sólidos	148
4.3.4.1.Áreas de almacenamiento	148
4.3.4.2.Contenedores de desechos.....	149
4.3.4.3.Almacén temporal.....	150
4.3.4.4.Blindaje	151
4.3.4.5.Monitoreo de radiación	151
4.3.4.6.Protección contra incendio	152
4.3.5.Limitaciones en el traslado de desechos radiactivos sólidos	153
5. Arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos.....	154
5.1.Consideraciones generales.....	154
5.2.Arreglo general del equipo en el edificio de DR.....	156
5.2.1.Diagrama de arreglo general de edificio de Turbina.....	157
5.2.2.Diagrama de arreglo general del edificio Desechos Radiactivos El. -0.55 m.....	159
5.2.3.Diagrama de arreglo general del edificio DR El. 4.0 m / 5.20 m / 6.90 m	160
5.2.4.Diagrama de arreglo general del edificio Desechos Radiactivos El. 10.15 m	161
5.2.5.Diagrama de arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos El. 18.70 m.....	162
5.2.6.Diagrama de arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos El. 25.10 m.....	164
5.2.7.Diagrama de arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos El. 33.00 m.....	165
6.Administración del conocimiento en las organizaciones que llevan a cabo la gestión de DR	166
6.1.Introducción	166
6.2.Retos en la gestión del conocimiento de la EN -gestión de DR.	167

6.3.Administración del conocimiento en EN por periodos de tiempo prolongados	171
6.3.1.El conocimiento de los DR en perspectiva	174
6.3.2.El conocimiento en varias etapas de las gestión de DR	175
6.4.Implementación de la administración del conocimiento DR	176
6.4.1.Obligaciones de la organización.....	178
6.4.2.Implementación.....	179
6.4.3.Beneficios y riesgos	180
6.5.Herramientas y téc. de la administración del conocimiento para la gestión de DR.....	183
6.6.Conclusiones.....	184
7.Conclusiones.....	186

INDICE DE FIGURAS

#	Título	Página
Figura III-1	Reacciones de intercambio iónico	49
Figura III-2	Diagrama esquemático de una resina de intercambio iónico catiónica - ácido fuerte.	50
Figura III-3	Diagrama esquemático de sistemas de intercambio iónico de camas mixtas y camas separadas	53
Figura III-4a	Aplicación del proceso de precapa al medio filtrante	59
Figura III-4b	Uso de la precapa con el medio filtrante.	60
Figura III-4c	Remoción de la precapa para recuperación o disposición	60
Figura III-5	Evaporador de recirculación forzada con un calentador de un paso vertical externo y un dispositivo de restricción para prevenir la ebullición en los tubos	66
Figura III-6	Datos del desempeño de un recombinar catalítico, en donde se muestra la relación entre concentraciones de H ₂ en la entrada y en el efluente en función de la temperatura	73
Figura III-7	Flujo del proceso de recombinación de hidrogeno y oxígeno en un sistema de offgas de un BWR	76
Figura III-8	Flujo de un sistema de adsorción por carbón usado para limpiar el offgas en un BWR	78
Figura III-9	Coefficiente de absorción dinámica de kriptón y xenón en carbón, en función de la temperatura	79
Figura III-10	Efecto del contenido de humedad en el coeficiente de absorción dinámica	80
Figura III-11	Humedad del carbón en función de la humedad relativa	81
Figura III-12	Sistema de carbón refrigerado para la limpieza del offgas en un BWR	82
Figura IV-1	Condensador principal	87
Figura IV-2	Diagrama de flujo de remoción de aire	88
Figura IV-3	Suministro de aire de vapor principal	89
Figura IV-4	Componentes principales de un sistema offgas en un BWR	99
Figura IV-5	Diagrama de bloques del sistema de desechos líquidos	105
Figura IV-6	Sistema de drenes de equipo	111
Figura IV-7	Filtro desmineralizador	113
Figura IV-8	Intercambiador iónico de cama mixta	114
Figura IV-9	Sistema de tratamiento de drenes de piso	117
Figura IV-10	Sistema de tratamiento de desechos químicos	122

Figura IV-11	Sistema de tratamiento de desechos detergentes.	124
Figura IV-12	Sistema de tratamiento de desechos regenerantes (1/2)	127
Figura IV-12.	Sistema de tratamiento de desechos regenerantes (2/2)	128
Figura IV-13	Separador de fase del RWCU	131
Figura IV-14	Separador de fase de desechos lodos	132
Figura IV-15	Tanque de resinas gastadas.	134
Figura IV-16	Diagrama simplificado de drenes de piso, drenes de equipo, concentradores y desechos sólidos.	136
Figura IV-17	Diagrama simplificado de la trayectoria de flujo de los desechos radiactivos sólidos.	137
Figura IV-18	Pretratamiento de desechos	141
Figura IV-19	Subsistemas de solidificación y mezclado.	142
Figura IV-20	Extrusor/Evaporador	145
Figura V-1	Vista de planta CN de agua en ebullición avanzada (en rojo se resalta la localización del edificio de Desechos Radiactivos)	157
Figura V-2	Edificio de Turbina Elevación 1.90m	158
Figura V-3	Edificio de Turbina Elevación 10.15m	158
Figura V-4	Edificio de Desechos Radiactivos Elevación -0.55m	160
Figura V-5	Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 4.00m/5.20m/6.90m	161
Figura V-6	Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 10.15m	162
Figura V-7	Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 18.70m	163
Figura V-8	Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 25.10m	164
Figura V-9	Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 33.00m	165

INDICE DE TABLAS

#	Título	Página
Tabla II-1	Tasas de producción de gases nobles	11
Tabla II-2	Productos de fisión en el agua del reactor – halógenos	13
Tabla II-3	Productos de fisión del agua del reactor – otros isótopos	14
Tabla II-4	Productos de activación del refrigerante	15
Tabla II-5	Productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor	16
Tabla II-6	Desechos líquidos de alta pureza – corrientes de entrada continuas	22
Tabla II-7	Desechos líquidos de baja pureza – corrientes de entrada continuas	24
Tabla II-8	Corrientes de entrada periódicas	25
Tabla II-9	Corrientes de entrada esperadas en el sistema de procesamiento de desechos líquidos radiactivos	27
Tabla II-10	Desechos sólidos húmedos	33
Tabla II-11	Códigos de diseño y fabricación para equipos y componentes de sistemas de manejo de desechos radiactivos	44
Tabla III-1	Características de resinas de intercambio iónico típicas	49
Tabla III-2	Características típicas de sólidos suspendidos en corrientes líquidas de un LWR	55
Tabla III-3	Factores de operación de ósmosis inversa	70
Tabla III-4	Parámetros de flujo para un sistema de offgas típico de un BWR (3800 MWt) - Operación normal	75
Tabla IV-1	Corrientes de entrada de diseño para los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos líquidos en un BWR	103
Tabla VI-1	Periodos de tiempo típicos para aspectos de varios tipos en sistemas/instalaciones de disposición de DR	172

RESUMEN

Durante las etapas de desarrollo de una central nucleoelectrica, la gestión de los desechos radiactivos recibe muy poca atención. Los sistemas de gestión de desechos son diseñados por especialistas, lo que resulta, en que pocas personas el campo de la energía nuclear tengan la perspectiva global de los procesos de gestión de desechos radiactivos.

El objetivo del presente trabajo es conjuntar en un solo documento, la información básica de los sistemas de gestión de desechos radiactivos. En específico, aquellos sistemas requeridos para llevar a cabo la gestión de los desechos generados por los reactores de agua en ebullición.

El trabajo inicia con la descripción de las consideraciones principales utilizadas en el diseño de estos sistemas, en términos de concentraciones, calidad de agua y cumplimiento con requerimientos regulatorios. Al igual que la mayoría de los sistemas que conforman un central nucleoelectrica, los sistemas de gestión de desechos radiactivos, basan su diseño en documentación estándar de la industria e información específica de la tecnología de reactores de agua en ebullición. Así como la descripción a detalle de cada una de las técnicas de procesamiento de uso común, incluyendo la integración y arreglo general de cada uno de los sistemas que llevan a cabo el procesamiento de los desechos. Concluyendo con la importancia que tiene el manejo de la transferencia del conocimiento en el campo de la energía nuclear, en específico en el área de la gestión de los desechos radiactivos.

ABSTRACT

Comparatively little attention is given to the problem of radioactive waste management during the early stages of the development of a nuclear power plant. Radwaste systems are designed by specialists, and as a result, few persons in the nuclear field have an overall view of the management of radioactive waste.

The objective of this project is to place together, in one report the widely scattered information on radwaste systems. It is not possible to cover in a report of this size all aspects of the problem, consequently the contents of this work are limited to the treatment of boiling water reactors radioactive waste.

The report begins with a discussion of the values to be used for systems design in terms of radioactive concentrations, water purity and compliance with the regulations. The design volumes used throughout the project report are essentially those given by design standards and information provided by the reactor designer. Processing techniques, including filtration, demineralization, evaporation, hydrogen recombination and charcoal adsorption, are considered to provide a background to understand the different systems. And finally, the knowledge transfer in the management of radwaste system field is addressed.

INTRODUCCIÓN

La nucleoelectricidad es una opción energética con amplias ventajas sobre otras fuentes en lo referente a los costos externos de generación eléctrica¹ de su ciclo de vida. Sus principales desventajas ante la opinión pública son por un lado, el manejo de desechos radiactivos y la disposición final del combustible irradiado; por otro lado, el riesgo de proliferación hacia armas nucleares y el riesgo de accidentes graves. En este trabajo abordaremos únicamente el tema de los sistemas de manejo desechos radiactivos de bajo y medio nivel que se generan durante la operación normal de reactores avanzados de agua ligera.

Los proveedores del sistema de suministro de vapor nuclear y otras organizaciones han desarrollado a detalle cursos de entrenamiento intensivos, incluyendo simuladores, para familiarizar al personal de operación de la Unidad en desarrollo con el reactor y sus sistemas auxiliares, junto con los sistemas de balance de planta (i.e. turbogenerador). Muchos cursos son impartidos en las áreas de: física nuclear, protección radiológica, efectos en la salud del público, instrumentación y control, computadora de proceso, etc., con al menos una duración de dos a doce semanas. Sin embargo, pocos o ningún curso es impartido para el área de gestión de desechos radiactivos.

Normalmente, los fabricantes de equipos y componentes de los sistemas de desechos radiactivos pertenecen a la industria química, haciendo pública (disponible a la industria) su información técnica en conferencias, simposios y reuniones. Desafortunadamente, esta información es muy especializada para permitir un entendimiento suficiente sin conocimientos previos del tema.

La gestión de los desechos radiactivos en una central nucleoelectrónica es un campo muy amplio dentro de la industria de generación de potencia; no es posible cubrir todos los aspectos del problema con una profundidad razonable en un solo reporte. Por lo tanto, el presente trabajo estará limitado a revisar los sistemas de gestión de desechos radiactivos de un reactor enfriado por agua ligera. Este reporte se escribe con la finalidad de responder a las siguientes preguntas: ¿Qué es un sistema de desechos radiactivos?, ¿Cómo funciona y qué es lo que

¹ European Commission, Community research, "Externalities of Energy Methodology 2005 Update," EN35 External costs of Electricity Production, Luxemburg (2005).

hace? En muchos casos la discusión será aplicable para reactores de agua en ebullición típicos.

1. Capítulo 1. Perspectiva general

1.1. Propósito de los sistemas de desechos radiactivos

Como resultado del proceso de fisión, los núcleos se dividen en fragmentos. Estos fragmentos son radiactivos y pasan por varias etapas de decaimiento hasta alcanzar un estado estable. Los fragmentos del núcleo original y sus productos de decaimiento se denominan productos de fisión. Los productos de fisión más significativos en un reactor de agua ligera son nueve y emiten radiación β^- acompañada muy frecuentemente de radiación gamma.

Por otro lado también en el combustible se tiene radiación proveniente de los propios isótopos de uranio, de los transuránidos que se producen por captura de neutrones y de los productos de decaimiento de los anteriores (uranio y transuránidos). Estos materiales emiten radiación α acompañada de radiación gamma.

Para prevenir el escape de materiales radiactivos contenidos en el combustible irradiado, cada elemento de combustible es envuelto con una capa de material no combustible, tal como aleaciones de zirconio; a este recubrimiento se le denomina encamisado del combustible nuclear. Los materiales estructurales y el propio encamisado del combustible también pueden convertirse en materiales radiactivos por el proceso de activación radiactiva. Estos materiales emiten principalmente radiación β^- acompañada muy frecuentemente de radiación gamma.

Durante la operación normal del reactor se presentan fugas permisibles de los materiales radiactivos del combustible hacia el refrigerante del reactor, debido a fallas mínimas (defectos) del encamisado. Estas fugas son indeseables, deben ser monitoreadas adecuadamente y hacen obligatorio el tratamiento y descontaminación del agua que se utiliza para extraer la energía producida principalmente por las reacciones nucleares de fisión, y en menor cantidad por las reacciones nucleares de decaimiento de todos los materiales radiactivos que se encuentren en el núcleo del reactor.

Además de la radiación del combustible y de los materiales estructurales, la radiactividad en el refrigerante es una fuente importante de radiación hacia el sistema turbina condensador. Esta radiactividad se debe a diferentes procesos: a) por activación neutrónica del refrigerante, b) por activación de átomos de impurezas contenidas en el refrigerante, y c) por el transporte de átomos radiactivos fugados desde el combustible.

Ya que los desechos radiactivos se originan en el reactor, la gestión de desechos radiactivos debe iniciar aquí. Los materiales en el sistema primario son básicamente acero inoxidable tipo 304 y aleaciones de zirconio (encamisado de combustible), y los límites de la química del refrigerante del reactor se establecen con el fin de mantener un ambiente favorable para estos materiales.

Los productos de corrosión que llegan al reactor se depositan en la superficie del combustible, resultando en fallas del encamisado de combustible, además de activarse al pasar por el núcleo del reactor. Para prevenir fallas del encamisado de combustible o falla en otros componentes internos, estas impurezas (productos de corrosión) deben ser continuamente removidas del refrigerante.

Al igual que los productos de corrosión, los halógenos y no-halógenos productos de fisión (comúnmente llamados otros productos de fisión), son retirados del agua del reactor por medios de filtración y desmineralización. Estos productos de fisión son transportados por el vapor principal fuera de las fronteras del reactor. El vapor principal se expande en la turbina y es condensado. Los materiales radiactivos transportados por el vapor principal son removidos del condensado por medio de filtración e intercambio iónico.

Para propósitos prácticos, los gases nobles productos de fisión y los productos de activación del refrigerante son incondensables. Estos son removidos del sistema por medio de eyectores de aire vía el sistema de tratamiento de desechos gaseosos. Los eyectores de aire son utilizados para mantener la presión de vacío en el condensador principal.

Los materiales radiactivos colectados en filtros son removidos periódicamente mediante el reemplazo del material filtrante. Los materiales radiactivos colectados en los desmineralizadores se remueven mediante actividades de limpieza y regeneración. Estas actividades de remoción de material radiactivo originan desecho radiactivo, el cual debe ser procesado por los sistemas de gestión diseñados específicamente para tal fin.

Las fugas permisibles del refrigerante del reactor se localizan en vástagos de válvulas, sellos de bombas y conexiones bridadas. Estas fugas y las provenientes de otras fuentes como agua contaminada de lavandería, agua de limpieza de personal, desechos de laboratorio, residuos de actividades de descontaminación, y desechos debidos a la operación de varios sistemas y componentes de la planta; deben ser tratadas por los sistemas de desechos radiactivos.

Como se puede notar en los párrafos anteriores, los sistemas de gestión de desechos radiactivos son requeridos para procesar todos los desechos generados durante la operación comercial de la central. Estos sistemas deben reducir el contenido de radioactividad de los desechos a tratar, de tal manera que, los desechos puedan ser dispuestos fuera del sitio o retornados al ciclo de vapor de la central. El cómo se da cumplimiento a estos objetivos es el tema de discusión del presente proyecto de investigación.

1.2. Descripción general del proyecto de investigación

En el Capítulo 2 se dan las bases de diseño de los sistemas de desechos radiactivos de un reactor de agua en ebullición en términos de volumen, radiactividad por tipo de desecho, pureza del agua y cumplimiento con el marco regulador. La mayor parte de la terminología y valores usados en este capítulo se describen y/o justifican en capítulos subsecuentes. Así que, se solicita paciencia al lector.

La información requerida para permitir el entendimiento de las técnicas de procesamiento de los desechos radiactivos y el funcionamiento de los diferentes equipos, se proporciona en el Capítulo 3.

En el Capítulo 4, se discute cada sistema de gestión de desechos radiactivos desde un punto de vista de proceso y operativo. Se incluyen diagramas de flujo simplificados para facilitar el entendimiento.

Los dibujos de arreglo general del edificio de desechos radiactivos están incluidos en el Capítulo 5. Esto con la intención de describir físicamente la localización de los diferentes equipos y componentes dentro del edificio.

Finalmente, el Capítulo 6 se abocará a comentar la importancia de la administración del conocimiento en el campo de la Energía Nuclear, en específico en las organizaciones que lleven a cabo la gestión de Desechos Radiactivos. En el Capítulo 7, se listan una serie de conclusiones del presente trabajo.

2. Bases de diseño de los sistemas de gestión de desechos radiactivos

2.1. Introducción

En un reactor de agua en ebullición, el agua es convertida en vapor por el calor obtenido de los ensambles de combustible en el núcleo del mismo. El vapor se expande en la turbina y es condensado para ser retornado al reactor.

En los reactores nucleares se producen materiales radiactivos que en ciertas circunstancias podrían ser causantes de impactos ambientales y a la salud. Los radionúclidos que aparecen en el núcleo de un reactor se pueden generar por varias vías:

- Directamente como productos de la fisión.
- Por desintegración de los productos de fisión
- Por reacciones neutrónicas de activación, principalmente captura por cualquier nucleído presente en el reactor (combustible, encamisado, refrigerante, etc.)
- Por desintegración de los radionúclidos de activación.

La acumulación de productos radiactivos en el núcleo es un proceso dinámico complicado debido a:

- La velocidad de producción de los productos primarios de fisión es función de:
 - la concentración de átomos fisionables que varía a lo largo de la vida del reactor,
 - el flujo neutrónico, también función temporal,
 - la sección eficaz de fisión, que depende de la energía de los neutrones y del tipo de núcleo fisionable.
 - El rendimiento de producción por cada fisión.

-
- Hay nucleídos que pueden producirse directamente por fisión y al mismo tiempo, miembros intermedios de una cadena radiactiva.
 - Otros nucleídos se forman por captura neutrónica.
 - Cada nucleído, una vez formado desaparece por una de las siguientes vías:
 - Desintegración a una velocidad proporcional a su concentración,
 - Absorción de neutrones con una velocidad que depende del flujo y de la energía de los neutrones presentes en el reactor.

Las cantidades producidas, sus propiedades de corrosión, su tiempo de decaimiento radiactivo, su producción de calor y su riesgo biológico, son las características principales que deben ser consideradas en el diseño de los sistemas de gestión de desechos radiactivos de una central nucleoelectrica.

El principal mecanismo que afecta las concentraciones de materiales radiactivos en el refrigerante del reactor son:

- a) Fuga de productos de fisión y elementos transuránidos al refrigerante por defectos en el encamisado de combustible,
- b) Productos de activación de materiales estructurales en el núcleo,
- c) Radiactividad removida por el sistema de limpieza de agua del reactor,
- d) Radioactividad removida por el sistema de desmineralizadores de condensado,
- e) Radioactividad removida por los eyectores de aire del condensador, y
- f) Radioactividad removida por fugas del refrigerante del reactor.

Los productos de fisión pueden ser clasificados en tres diferentes tipos:

- a) gases nobles productos de fisión, los cuales son kriptones y xenones;

-
- b) halógenos productos de fisión, siendo los más importantes los bromos y yodos, y
 - c) otros productos de fisión los cuales son transportados ya sea por el vapor o aparecen como resultado de decaimiento radiactivo de los gases nobles que dejan el reactor.

Los productos de activación se pueden dividir en 2 categorías:

- a) productos de activación del refrigerante, los cuales son radioisótopos producidos por la activación del refrigerante del reactor, entre los más importantes están N-13, N-16, N-17, O-19 y Fr-18; y
- b) productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor los cuales se forman por la activación de impurezas en el refrigerante, o por la corrosión de materiales de sistemas irradiados.

Ya que los desechos radiactivos se originan en el reactor, el control primario debe iniciar ahí. Minimizando los productos de fisión en el refrigerante primario, así como minimizando las entradas de materiales de corrosión al refrigerante primario, se reduce la radioactividad de estas corrientes de proceso. Estas impurezas deben ser removidas continuamente del refrigerante del reactor para prevenir daños a los elementos combustibles y otros componentes del reactor. La remoción se lleva a cabo de dos maneras:

- a) Después de pasar a través de la turbina, el vapor condensado es procesado por el sistema de desmineralizadores de condensado antes de su retorno al reactor; y
- b) Parte del refrigerante del reactor es continuamente extraído y procesado por el sistema de limpieza del agua del reactor (filtros desmineralizadores), y retornado a la vasija del reactor.

Ambos sistemas de limpieza remueven partículas e impurezas iónicas del refrigerante del reactor. Los materiales colectados por los desmineralizadores son retirados periódicamente mediante regeneración química, limpieza ultrasónica, o por el reemplazo de las resinas. El líquido de desecho es procesado por los sistemas de tratamiento de desechos líquidos y las resinas gastadas de intercambio iónico son transferidas al sistema de tratamiento de desechos sólidos para su acondicionamiento de transporte fuera de sitio.

Los gases radioactivos son removidos del vapor en el condensador principal por los eyectores de aire. Esta fuente de desechos gaseosos es tratada principalmente mediante la demora de su liberación al ambiente, permitiendo su decaimiento radiactivo. Los métodos de tratamiento incluyen líneas de retención y sistemas de retención a largo plazo, haciendo uso de sistemas de decaimiento a base de lechos de carbón activado.

Las fugas del refrigerante del reactor, las cuales pueden ocurrir a través de vástagos de válvulas, sellos de bombas y conexiones bridadas, son colectadas en sumideros localizados en los diferentes puntos de los edificios. Estos desechos al igual que otras fuentes de desechos líquidos las cuales pueden incluir corrientes de líquidos para transferencia, retrolavado, regeneración y agua de lavado de resinas de desmineralizadores; agua de desecho de lavandería; desecho de regaderas personales; desechos de drenaje de laboratorio; desechos de descontaminación; y también los desechos asociados con la operación y mantenimiento de varios sistemas y componentes de la planta; son tratados en los sistemas de procesamiento de desechos radiactivos líquidos. Considerando también, que los desechos sólidos resultantes son confinados en los sistemas de solidificación para su transporte fuera del sitio.

El grado de procesamiento y el método de tratamiento se determinan por la naturaleza del desecho a procesar y su disposición final. El objetivo es asegurar que el desecho radiactivo es adecuadamente acondicionado sin afectar adversamente la disponibilidad, operación y seguridad de la planta.

2.2. Origen de los desechos radiactivos

En esta sección los desechos radiactivos serán clasificados según su fuente en términos de sus características químicas y físicas, es decir, conductividad, contenido de sólidos insolubles y contenido radiactivo.

2.2.1. Base de diseño de acuerdo a la actividad

La cantidad de material radiactivo liberado al medio ambiente, está en función del tipo del reactor y de las características incorporadas en el diseño del mismo para reducir los efluentes liberados. El promedio de las cantidades de los materiales radiactivos liberados al medio ambiente por un reactor de una planta nucleoelectrica durante su operación normal, incluyendo eventos operacionales anticipados, se le conoce como termino fuente. El termino fuente está normalmente conformado por una lista isotópica de radionúclidos esperados a ser liberados anualmente en los efluentes líquidos y gaseosos.

La concentración de radionúclidos en el refrigerante primario está en función del nivel de potencia, el quemado del combustible, el tipo de encamisado del combustible, la integridad del encamisado del combustible, las impurezas en el refrigerante primario, el volumen del refrigerante primario, y la razón de purificación y/o limpieza del refrigerante primario.

Con la intención de facilitar los cálculos del término fuente se han desarrollado tablas estandarizadas, las cuales son parte de la especificación nacional americana estándar del término fuente (ANS 18.1, ANSI N237-1976)², el cual proporciona concentraciones típicas de radionúclidos (actividades) en el refrigerante primario para varios diseños de reactores en un rango de operación a condiciones nominales. El uso de

² ANSI/ANS - 18.1-1976, Radioactive Source Term for Normal Operation of Light Water Reactors.

estas tablas elimina la necesidad de calcular la actividad del refrigerante primario caso por caso.

Por otro lado, las concentraciones específicas de radionúclidos en el refrigerante primario también son proporcionadas por el diseñador del reactor para cada proyecto en particular.

Productos de fisión

Los niveles de actividad de los productos de fisión están basados en mediciones del sistema de desechos gaseosos y agua del reactor de diferentes centrales BWR de los años 70's. Se ha puesto mucho énfasis en las mediciones hechas en los reactores KRB³ de Alemania y Dresden II en Estados Unidos.

Gases nobles productos de fisión

Las bases de diseño consideran defectos en el encamisado del combustible tal que la razón de liberación de gases nobles productos de fisión sea establecida en un promedio de 100,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ después de 30 minutos de decaimiento. A la mezcla de gases nobles que resulta en esta tasa de liberación se le conoce como la "mezcla de 1971"⁴. Ya que cada Unidad de Laguna Verde tiene tanques de decaimiento de 10 minutos como parte del diseño del sistema de tratamiento de desechos gaseosos la misma mezcla de 1971 resultará en una razón de 190,000 $\mu\text{Ci}/\text{sec}$ después de 10 minutos de decaimiento.

³ http://ec-cnd.net/eudecom/eudecomprj_krba.php?Sid=b76a8983db7c27ee08773815f44c71d4

⁴ R.J. Gutierrez and C.W. Miller, Licensing Topical Report, N66 SJA Off-Gas Treatment (NEDO-21056, 77NED36, Class 1, February 1977).

Se puede hacer uso de otra mezcla de gases nobles productos de fisión como base de diseño, por ejemplo, la mezcla usada por el código BWR-GALE⁵, el cual proporciona o determina una tasa de liberación de 60,000 $\mu\text{Ci}/\text{seg}$ medidos a 30 minutos de decaimiento. Las estimaciones hechas por este código se basan en observaciones hechas en centrales BWR entre los años 1971 y 1974.

Todas las liberaciones de gases nobles provenientes del núcleo son transportadas fuera del núcleo del reactor vía vapor principal, y son extraídas del ciclo en el condensador principal por medio de los eyectores de aire hacia el sistema de tratamiento de desechos gaseosos. Por lo que, su concentración en el agua del reactor es insignificante.

La Tabla II-1 muestra los gases nobles que forman la mezcla de 1971, su vida media y tasas de liberación⁶

Tabla II-1. Tasas de producción de gases nobles

Isótopo	Vida Media		Tasa de producción ($\mu\text{Ci}/\text{seg}$) a t=		
			0'	10'	30'
Kr-83m	1.86	hr	3.40E+03	3.20E+03	2.90E+03
Kr-85m	4.4	hr	6.10E+03	5.90E+03	5.60E+03
Kr-85	10.74	a	10-20	10-20	10-20
Kr-87	75.0	min	2.00E+04	1.80E+04	1.50E+04
Kr-88	2.79	hr	3.00E+04	1.90E+04	1.80E+04
Kr-89	3.18	min	1.30E+04	1.50E+04	1.80E+02
Kr-90	32.3	seg	2.80E+05	-	-
Kr-91	8.6	seg	3.30E+05	-	-
Kr-92	1.84	seg	3.30E+05	-	-
Kr-93	1.29	seg	9.30E+04	-	-
Kr-94	1.0	seg	2.30E+04	-	-
Kr-95	0.5	seg	2.10E+03	-	-
Kr-97	1.0	seg	1.40E+01	-	-
Xe-131m	11.96	día	1.50E+01	1.50E+01	1.50E+01

⁵ Calculations of releases of radioactive materials in gaseous and liquid effluents from BWR's, NUREG-0016

⁶ General Electric Company, "Technical Derivation of BWR 1971 Design Basis Radioactive Material Source Terms," NEDO-10871, March 1973.

Isótopo	Vida Media		Tasa de producción (μCi/seg) a t=		
			0'	10'	30'
Xe-133m	2.26	día	2.90E+02	2.90E+02	2.90E+02
Xe-133	5.27	día	8.20E+03	8.20E+03	8.20E+03
Xe-135m	15.7	min	2.60E+04	1.70E+04	6.90E+03
Xe-135	9.16	hr	2.20E+04	2.20E+04	2.20E+04
Xe-137	3.82	min	1.50E+05	2.40E+04	6.70E+02
Xe-138	14.2	min	8.90E+04	5.50E+04	2.10E+04
Xe-139	40	seg	2.80E+05	-	-
Xe-140	13.6	seg	3.00E+05	-	-
Xe-141	1.7	seg	2.40E+05	-	-
Xe-142	1.22	seg	7.30E+04	-	-
Xe-143	0.96	seg	1.20E+04	-	-
Se-144	9.0	seg	5.60E+02	-	-
Total =			2.33E+06	1.88E+05	1.01E+05
Notas: - Los valores a t=0 se proporcionan en la boquilla de vapor principal de la vasija. Se puede suponer un tiempo de residencia de 7.2 seg. antes de que los gases entren en el sistema offgas. - 1.0E+03 = 1 × 10 ³ .					

Halógenos productos de fisión

Las bases de diseño para las tasas de liberación de los halógenos productos de fisión del combustible han sido establecidas a un valor de 700 μCi/sec de I-131 (t=0). Aunque la base de diseño de las tasas de liberación de halógenos puede ser excedida por periodos de tiempo razonables, la contaminación de diferentes áreas de la planta y otras restricciones operativas conllevan a que la operación a largo plazo por arriba de este nivel no es deseable.

Se hace uso de un porcentaje de arrastre de humedad en el vapor (carryover) de 1.50 para calcular la concentración de halógenos en el vapor principal. Este factor se determinó a partir de datos tomados en los siguientes reactores en operación: Oyster Creek, Dresden III, Millestone, Monticello, Nine Mile Point y Quad Cities I. Adicionalmente, los halógenos

pueden ser considerados para propósitos prácticos solubles en el agua del reactor.

Los halógenos en cuestión, vidas medias asociadas y concentraciones se listan en la Tabla II-2⁷. Elementos halógenos con vidas medias menores a 3 minutos se han omitido, por considerarse sin afectación al desempeño de los sistemas de desechos radiactivos.

Tabla II-2. Productos de fisión en el agua del reactor – halógenos

Isótopo	Vida media	Forma	Concentración (μCi/gr)
Br-83	2.4 hr	Soluble	4.50E-02
Br-84	31.8 min	Soluble	9.00E-02
Br-85	3.0 min	Soluble	9.00E-02
I-131	8.065 d	Soluble	3.60E-02
I-132	2.284 hr	Soluble	4.20E-01
I-133	20.8 hr	Soluble	2.60E-01
I-134	52.3 min	Soluble	7.20E-01
I-135	6.7 hr	Soluble	4.00E-01
Total =			2.06E+00

Otros productos de fisión

Otros productos de fisión han sido observados en el refrigerante de reactores de agua en ebullición. Para estos radioisótopos, sus concentraciones en el agua del reactor han sido estimadas en base a datos de experiencias anteriores. Se estima que el contenido de estos isotopos en el arrastre de humedad en el vapor principal es menor o igual a 0.1% en peso del agua del reactor.

La vida media de estos isótopos, su estado (sólido, líquido o gas) esperado y su concentración en el agua de reactor se presentan en la Tabla II-3⁷

⁷ General Electric Company, "Technical Derivation of BWR 1971 Design Basis Radioactive Material Source Terms," NEDO-10871, March 1973

Tabla II-3. Productos de fisión del agua del reactor – otros isótopos

Isótopo	Vida Media	Forma	Concentración ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)
Sr-89	50.8 d	Soluble	4.00E-03
Sr-90	28.9 a	Soluble	2.20E-04
Sr-91	9.67 h	Soluble	1.00E-01
Sr-92	2.69 h	Soluble	2.00E-01
Zr-95	65.5 d	Insoluble	5.20E-05
Zr-97	16.8 h	Insoluble	4.60E-04
Nb-95	35.1 d	Insoluble	5.20E-05
Mo-99	66.6 h	Insoluble	4.30E-04
Tc-99m	6.007 h	Soluble	2.40E-01
Tc-101	14.2 m	Soluble	2.60E-01
Ru-103	39.8 d	Insoluble	2.80E-05
Ru-106	368 d	Insoluble	2.00E-06
Te-129m	34.1 d	Soluble	7.60E-06
Te-132	78.0 h	Soluble	2.80E-04
Cs-134	2.06 a	Soluble	2.10E-04
Cs-136	13.0 d	Soluble	1.50E-04
Cs-137	30.2 d	Soluble	2.30E-04
Cs-138	32.3 m	Soluble	4.30E-02
Ba-139	83.2 m	Soluble	1.40E-01
Ba-140	12.8 d	Soluble	1.30E-02
Ba-141	18.3 m	Soluble	2.80E-01
Ba-142	10.7 m	Soluble	2.90E-01
Ce-141	32.53 d	Insoluble	5.40E-05
Ce-143	33.0 h	Insoluble	2.60E-04
Ce-144	282.4 d	Insoluble	3.10E-05
Pr-143	13.58 d	Insoluble	6.80E-05
Nd-147	11.06 d	Insoluble	7.30E-05
Np-239	2.35 d	Soluble	3.80E-01
Total =			1.95E+00
Total Sol. =			1.95E+00
Total Insol. =			1.51E-03

Productos de activación

Productos de activación del refrigerante.

Los productos de activación del refrigerante del reactor presentan una gran variedad de propiedades físicas y químicas; en el refrigerante del reactor estas propiedades continúan siendo estudiadas y definidas. Sin embargo, la mayoría de estos productos de activación son extraídos como gases. Estos productos no son removidos eficientemente por los sistemas desmineralizadores de condensado, pero sus concentraciones son controladas mediante decaimiento radiactivo.

La base de diseño de los productos de activación del refrigerante representa los valores esperados a ser observados durante el monitoreo radioquímico del refrigerante del reactor. Estos productos de activación están presentes en ambas corrientes, vapor principal y agua del reactor sin embargo, la experiencia ha demostrado que su efecto en el término fuente es mínimo.

Su concentración y vidas medias se presentan en la Tabla II-4⁸

Tabla II-4. Productos de activación del refrigerante

Isótopo	Vida Media	Concentración - Vapor Principal ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)	Tasa de producción en Vapor Principal a $t = 0$ ($\mu\text{Ci}/\text{seg}$)	Concentración - Agua del reactor ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)
N-13	9.99 min	6.50E-03	6.80E+03	3.70E-02
N-16	7.13 seg	5.00E+01	5.20E+07	5.70E-01
N-17	4.14 seg	1.60E-02	1.70E+04	5.20E-03
O-19	26.8 seg	8.00E-01	8.40E+05	6.60E-01
F-18	109.8 min	4.00E-03	4.20E+03	4.00E-05

Notas:
- Los valores a $t=0$ se proporcionan en la boquilla de vapor principal en la vasija del reactor. Se puede suponer un tiempo de residencia de 7.2 segundos antes de que los gases entren en el sistema offgas.

⁸ General Electric Company, "Technical Derivation of BWR 1971 Design Basis Radioactive Material Source Terms," NEDO-10871, March 1973

Productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor

La base de diseño para los niveles de actividad de los productos de activación originados por la activación de impurezas o por la corrosión de sistemas de materiales irradiados, se basa en valores observados en reactores BWR en operación. El contenido de estos productos en la humedad contenida en el vapor principal se estima menor o igual a 0.1% en peso de agua del reactor.

La actividad de los productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor, su vida media y su forma esperada se enlistan en la Tabla II-5⁹

Tabla II-5. Productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor

Isótopo	Vida Media	Forma	Concentración ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)
Na-24	15.0 hr	Soluble	2.00E-03
P-32	14.31 día	Soluble	2.00E-05
Cr-51	27.8 día	Insoluble	5.00E-04
Mn-54	313 día	Insoluble	4.00E-05
Mn-56	2.582 hr	Insoluble	5.00E-02
Co-58	71.4 día	Insoluble	5.00E-03
Co-60	5.258 año	Insoluble	5.00E-04
Fe-59	45.0 día	Insoluble	8.00E-05
Ni-65	2.55 hr	Insoluble	3.00E-04
Zn-65	243.7 día	Soluble	2.00E-06
Zn-69m	13.7 hr	Soluble	3.00E-05
Ag-110m	253 día	Insoluble	6.00E-05
W-187	23.9 hr	Insoluble	3.00E-03
Total =			6.15E-02
Total Sol. =			2.05E-03
Total Insol. =			5.95E-02

⁹ General Electric Company, "Technical Derivation of BWR 1971 Design Basis Radioactive Material Source Terms," NEDO-10871, March 1973

Resumen de las fuentes de desechos radiactivos.

Es conveniente resumir las concentraciones de radioactividad esperadas en el agua del reactor, basado en los datos proporcionados en las Tablas II.2, II.3 y II.5, ya que se hace uso de estos resultados en la evaluación del desempeño esperado de los sistemas de gestión de residuos. Se hará uso de dos concentraciones de radioactividad base de diseño, considerando fugas de combustible y sin considerar fugas del combustible.

Para este propósito se usará la siguiente terminología:

- A Concentración de los productos de activación en el agua del reactor en $\mu\text{Ci/gr}$
- M Concentración de los productos de fisión en el agua del reactor, incluyendo halógenos, en $\mu\text{Ci/gr}$
- I Concentración de halógenos en el agua del reactor, en $\mu\text{Ci/gr}$

Concentración de la actividad sin fugas del combustible

La concentración de la radioactividad en el agua del reactor es debida a los productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor:

Total de solubles	$0.21 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/gr}$
Total de insolubles	$5.95 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/gr}$
Total	$6.16 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/gr}$

Concentración de la Actividad con fugas del combustible

La concentración de la radioactividad en el agua del reactor es debida a los productos de activación no provenientes del refrigerante del reactor y productos de fisión:

- Halógenos, Todos ellos son Solubles, I= $2.06 \mu\text{Ci/gr}$

- Otros productos de fisión

Total de solubles	1.95 $\mu\text{Ci}/\text{gr}$
Total de insolubles	$1.48 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{gr}$
Total	1.95 $\mu\text{Ci}/\text{gr}$

-Productos de fisión incluyendo halógenos

Total de solubles	4.01 $\mu\text{Ci}/\text{gr}$
Total de insolubles	$1.48 \times 10^{-3} \mu\text{Ci}/\text{gr}$
M	4.01 $\mu\text{Ci}/\text{gr}$

- Productos de activación no provenientes del refrigerante

Total de solubles	$0.21 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{gr}$
Total de insolubles	$5.95 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{gr}$
Total	$6.16 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{gr}$

-Total de Productos de fisión más productos de activación

Total de solubles	4.01 $\mu\text{Ci}/\text{gr}$
Total de insolubles	$6.10 \times 10^{-2} \mu\text{Ci}/\text{gr}$
A+M	4.07 $\mu\text{Ci}/\text{gr}$

2.2.2. Desechos radiactivos gaseosos

En reactores de agua en ebullición se consideran varias fuentes de liberación de materiales radioactivos (gases nobles, partículas radioactivas y yodos) en efluentes gaseosos por la operación normal, incluyendo eventos operacionales anticipados:

-
- Sistema de remoción de gases incondensables del condensador principal,
 - Sistema de vapor de sellos de la turbina,
 - Bombas mecánicas de vacío, y
 - Sistema de ventilación/extracción de aire de la contención primaria, edificio del reactor, edificio de turbina y edificio de desechos radioactivos.

Para propósitos del presente trabajo sólo se considerará el sistema de remoción de gases incondensables del condensador principal, por las siguientes razones:

- a) Comúnmente el sistema de remoción de gases incondensables del condensador principal ha sido la fuente principal de liberación de material radioactivo en efluentes gaseosos,
- b) El sistema de vapor de sellos de la turbina y las bombas mecánicas de vacío son considerados sistemas mecánicos, y los sistemas de ventilación/extracción de aire de los diferentes edificios son considerados como parte de los sistemas de ventilación y aire acondicionado de la central; y
- c) la mayoría de las estructuras y componentes del sistema de tratamiento de desechos gaseosos están localizados en el sistema de desechos radiactivos de una central con un reactor de agua ligera.

Actualmente, el tratamiento para los efluentes gaseosos llevado a cabo por los sistemas mecánicos y de ventilación y aire acondicionado (VAC, por sus siglas en inglés) mencionados anteriormente no es requerido durante operación normal y comúnmente se tienen filtros de carbón instalados en sus descargas asociadas, para absorber y propiciar el decaimiento de radionúclidos, si esto es requerido.

En párrafos anteriores, se mencionó que los gases nobles son extraídos del sistema en el condensador principal a través de los eyectores de aire y dirigidos al sistema de tratamiento de desechos gaseosos; lo mismo aplicará para los productos de activación del refrigerante, ya que estos son extraídos como gases. Por lo tanto, estos gases incondensables radioactivos aparecerán en la entrada del sistema de tratamiento de desechos gaseosos.

Los reactores de agua ligera avanzados cuentan con métodos naturales para la remoción de radioyodos, y debido al decaimiento y la solubilidad del lodo en el agua del reactor y condensado, las tasas de emisión de radioyodos en el sistema de tratamiento de desechos gaseosos son aproximadamente 10^6 veces menores que el contenido en el combustible. Adicionalmente, los gases incondensables aparecerán a la entrada del sistema de tratamiento de desechos gaseosos debido a la descomposición radiolítica del agua en el núcleo del reactor, y la tasa de descomposición esperada de hidrogeno en condiciones estándar será de 0.06 scfm/MWt.

2.2.3. Desechos radioactivos líquidos

Debido a la naturaleza de un reactor de agua en ebullición (BWR), los desechos radioactivos líquidos se originan por la operación normal de los sistemas y componentes de la central. De la Tabla II-6 a II-9¹⁰ se enlistan las corrientes más importantes de desechos radioactivos líquidos procesadas en los sistemas de tratamiento de desechos líquidos. Las cantidades esperadas se basan en la operación normal con un mantenimiento adecuado a los equipos de la central.

¹⁰ ANSI/ANS-55.6-1979. "Liquid radioactive waste processing system for LWR." American Nuclear Society

Adicionalmente, la concentración de la actividad asociada con cada una de estas corrientes ha sido listada, basándose en información proporcionada en la Sección 2.2.1.3

Tabla II-6. Desechos líquidos de alta pureza – corrientes de entrada continuas

Fuente	Base (# Corrientes, Flujo por corriente)	Flujo estimado (gpd)	Flujo Máx. (gpm)	Radioactividad Conc. (μCi/gr)	
				Productos de activación (PA)	PA + PF
<u>Equipo - Contenedor Primario</u>					
Sellos de bombas de recirculación	2, 0.75 gpm	2200	20 ^(a)	A ^(c)	A + M ^(d)
Sellos de válvulas de recirc.	6, 4 gph	600	10 ^(b)	A	A + M
Sellos de válvulas de vapor principal	4, 4gph	400	10 ^(b)	10 ⁻³ A	10 ⁻³ (A + M - I) 2×10 ⁻² I ^(e)
Total		3200	20	0.875A	0.875 (A + M)
<u>Equipo - Edificio del Reactor</u>					
Sellos de bombas del sistema de limpieza	2, 1 gph	50	10	A	A + M
Sellos de bombas del sistema CRD	2, 1 gph	50	10	10 ⁻⁶ ^(h)	10 ⁻³ ⁽ⁱ⁾
Drenajes de muestreo	6, 500 cc/min	1000	1	0.4A ^(j)	0.4 (A + M) ⁽ⁱ⁾
Fuga Interna de Valv. de scram (vía vol. de descarga de scram)	109 ^(g) , 10 gpd	1090	2	10 ⁻⁶ ^(h)	10 ⁻³ ⁽ⁱ⁾
Total		2190	10	0.2A	0.2 (A + M)
<u>Equipo - Edificio de Turbina</u>					
Sellos de bombas de condensado	3, 10 gph	720	20 ^(k)	10 ⁻³ A	10 ⁻³ (A + M)
Sellos de bombas de refuerzo de cond.	3, 10 gph	720	20	4×10 ⁻⁴ A ^(l)	10 ⁻⁴ (A + M) ^(m)
Sellos de bombas de drenajes de calentadores	2, 10 gph	480	20	10 ⁻³ A	10 ⁻³ (A + M)
Sellos de bombas de agua de alimentación	2, 10 gph	480	20	4×10 ⁻⁴ A ^(l)	10 ⁻⁴ (A + M) ^(m)
Sistema de muestreo del Ed. De Turbina ^(m)	4,500 cc/min	760	1	4×10 ⁻⁴ A	4×10 ⁻⁴ (A + M)
Total		3160	20	7×10⁻⁴ A	5×10⁻⁴ (A + M)
<u>Equipo - Edificio de Desechos</u>					
Fuga de flujo de sellos a bombas (cuando operan)	14×10gph, 2h	280	1	10 ⁻⁶	10 ⁻³

Fuente	Base (# Corrientes, Flujo por corriente)	Flujo estimado (gpd)	Flujo Máx. (gpm)	Radioactividad Conc. ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)	
				Productos de activación (PA)	PA + PF
<p>Notas:</p> <p>(a) Valor máximo en base a la fuga máxima de flujo de sellos y valores de alarma.</p> <p>(b) Limite de especificaciones técnicas.</p> <p>(c) A = Concentración de productos de activación en el agua del reactor.</p> <p>(d) M = Concentración de productos de fisión en el agua del reactor, base de diseño; incluyendo halógenos.</p> <p>(e) I = Concentración de halógenos en el agua del reactor, base de diseño.</p> <p>(g) Cantidad de barras de control.</p> <p>(h) Actividad en los tanques de almacenamiento de condensado, sin fugas en el combustible.</p> <p>(i) Actividad en los tanques de almacenamiento de condensado, considerado la fuga en el combustible base de diseño.</p> <p>(j) Líneas de muestreo: una en el CRD, una en recirc., dos en el sistema de limpieza y dos en la alberca de combustible.</p> <p>(k) En base a datos de la experiencia operativa.</p> <p>(l) En base a una eficacia de remoción del 60% para insolubles en desmineralizadores de condensado (i.e. factor de descontaminación del 2.5)</p> <p>(m) En base a una eficacia de remoción del 90% para insolubles en desmineralizadores de condensado (i.e. factor de descontaminación del 10)</p> <p>(n) Líneas de muestreo: una en drenaje de calentadores, una en condensado y dos en agua de alimentación.</p>					

Tabla II-7. Desechos líquidos de baja pureza – corrientes de entrada continuas

Fuente	Base (# Corrientes, Flujo por corriente)	Flujo estimado (gpd)	Flujo máx. (gpm)	Radiactividad Conc. (μCi/gr)	
				PA	PA + PF
<u>Equipo - Contenedor Primario</u> ^(d)					
Válvulas y equipos miscelaneos (no dirigidos a un colector de fugas)	Estimado	-	20 ^(a)	10 ⁻³ A	10 ⁻³ (A + M)
Drenajes del enfriador del pozo seco (fugas de vapor miscelaneas)	Estimado ^(b)	700	20	10 ⁻³ A	10 ⁻³ (A + M + I) 2×10 ⁻² I
Total		700	20	10 ⁻³ A	10 ⁻³ (A + M)
<u>Equipo - Edificio del Reactor</u>					
Venteos y drenajes miscelaneos, y drenajes de piso	Estimado ^(b)	2000	20	10 ⁻⁵	10 ⁻³
Sellos de válvulas de scram	109 ^(c) , 1.5 gpd	160	-	10 ⁻⁶	10 ⁻³
Fuga de la alberca de combustible	1 gph	25	20	10 ⁻⁵	10 ⁻³
Total		2185	20	0.9×10 ⁻⁵	10 ⁻³
<u>Equipo - Edificio de Turbina</u>					
Drenajes de piso	Estimado ^(b)	2000	20	10 ⁻⁵	10 ⁻³
<u>Equipo - Edificio de Desechos</u>					
Drenajes de piso	Estimado ^(b)	2000	20	10 ⁻⁵	10 ⁻³
Notas:					
(a) Limite de especificaciones técnicas. (b) Estimado = Cantidad estimada en base a experiencia. (c) Número de barras de control. (d) Los drenajes del pozo seco están normalmente canalizados a un tanque colector de desechos.					

Tabla II-8. Corrientes de entrada periódicas

Fuente	Base	Calidad	Cantidad esperada	Frecuencia		Radioactividad Concentr. ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)
				Normal	Máx	
Filtros-desmineralizadores del sistema de limpieza de agua del reactor	Nota 1	Lodos c/ agua	24 lbm/Uni. 850 gal/Uni.	2 Unidad / sem.	2 Unidad / día	de 10^{-6} a 10^{-3}
Filtros-desmineralizadores del sistema de limpieza de la alberca de combustible	Nota 2	Lodos c/ agua	55 lbm/Uni. 1200 gal/Uni.	1 Unidad / 10 días	-	de 10^{-6} a 10^{-3}
Filtros electromagnéticos	Nota 3	Lodos c/ agua	50 lbm/Uni. 2500 gal/Uni.	2 Unidad / mes	-	de 10^{-3} A a 10^{-3} (A + M)
<u>Desmineralizadores de condensado</u>						
Limpieza ultrasónica de resinas	Nota 4	Alto nivel crud Dren. Baja Cond. Agua transf. baja cond.	2580 gal/cama 5740 gal/cama 5040 gal/cama	2 camas / sem.	4 camas/ día	de 10^{-6} a 10^{-3}
Regeneración	Nota4	Alto crud - Baja cond. Bajo crud - Alta cond. — Bajo crud - Baja cond. Agua de transf.	12770 gal/cama 14085 gal/cama 17690 gal/cama 3540 gal/cama 5040 gal/cama	1 cama / sem.	3 camas/ día	de 10^{-6} a 10^{-3}
<u>Desechos durante arranque de Unidad</u>						
Prueba hidrostática de la vasija	Después de recarga		31000 gal/evento	Annual	-	10^{-3} Normalmente canalizado al pozo caliente del condensador

Fuente	Base	Calidad	Cantidad esperada	Frecuencia		Radioactividad Concentr. ($\mu\text{Ci}/\text{gr}$)
				Normal	Máx	
Agua de expansión térmica	Calentamiento del reactor a 100F/hr		22000 gal/evento	Cada arranque	-	10^{-3} Normalmente canalizado al pozo caliente del condensador
<u>Desechos durante operaciones paro de Unidad</u>						
Sistema de remoción de calor residual	Enjuague de líneas para modo enfriamiento en parada		20000 gal/evento	Cada paro	-	10^{-3}
Desechos de laboratorio	Registros historicos	Químico	500 gal / día	Diario	-	10-400 $\mu\text{Ci}/\text{día}$
Desechos de lavandería	Registros historicos	Detergentes	50 gal / día	20 lotes/ día	60 lotes/ día	10-50 $\mu\text{Ci}/\text{lote}$
<u>Desechos de descontaminación</u>						
Químicos		Químicos	3×Vol. sistema	1-5 años		Depende del sist.
Detergentes		Detergentes	3×Vol. sistema	1-5 años		Depende del sist.
Notas:						
(1) 2-50% Filtros de desmineralizadores de 93 ft ³ cada uno. Precapa a 0.2 lb/ft ² ; carga sucia a 0.3 lbm/lbm de precapa.						
(2) 2-100% Filtros de desmineralizadores de 275 ft ³ cada uno. Precapa a 0.2 lb/ft ² ; carga sucia hasta 10% de crecimiento.						
(3) 2-50% Filtros electromagnéticos de drenajes de calentadores. Volumen de enjuague de 2500 gal de agua con 50 lbm de crud.						
(4) 6 vajijas desmineralizadoras de condensado en servicio, más una de respaldo. Cada tiene una cama de resina de 168 ft ³						
(5) Se supone un ciclo de 10 veces limpieza de aire. Cada limpieza de aire de catión y anión produce 470 gal. y 313 gal. de agua con un alto contenido de crud, respectivamente.						
(6) 2% en peso de Na ₂ SO ₄						
(7) Ciclo de regeneración simple.						
(8) Ciclo de regeneración doble.						

Tabla II-9. Corrientes de entrada esperadas en el sistema de procesamiento de desechos líquidos radiactivos

Fuentes generadoras	Promedio de corrientes de entrada diarias esperadas, gal/d (L/d)				Corrientes de entrada esperadas por eventos base de diseño, gal/d (L/d)								
	Promedio de corrientes de entrada diaria esperadas	Entradas adicionales por regeneración	Entradas adicionales por decantado	Entradas adicionales por decantado y regeneración	Diaria esperada con fuga máxima en pozo seco	Fuga máx. condensado y máximo decantado	Máx. limpieza ultrasónica y máx. decantado	Máxima drenajes de piso	Máx. limpieza ultrasónica correspondiente a un "arranque"	Fuga máx. en pozo seco, decantado y decantado	Máx. limpieza de resinas ultrasónica y decantado	Fuga máx. en pozo seco, decantado y regeneración	Fuga máx. en pozo seco y fuga máx. condensado
Drenes de equipo													
Pozo seco	3400 (12,870)	3400 (12,870)	3400 (12,870)	3400 (12,870)	28,000 ^a (109,020)	3400 (12,278)	3400 (12,278)	3400 (12,278)	3400 (12,278)	3400 (12,278)	3400 (12,278)	28,000 ^a (109,020)	28,000 ^a (109,020)
Edificio del reactor y alberca de combustible	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)	3720 (14,082)
Edificio de desechos	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)	1060 (4013)
Edificio de turbine	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)	2960 (11,205)
Limpieza ultrasónica de resinas	15,000 (56,781)	15,000 (56,781)	15,000 (56,781)	15,000 (56,781)	15,000 (56,781)	-	60,000 (227,125)	15,000 (56,781)	-	15,000 (56,781)	60,000 (227,125)	15,000 (56,781)	-
Enjuague de resinas	-	17,280 (65,412)	-	17,280 (65,412)	-	69,120 (261,648)	-	-	60,000 (227,125)	-	-	17,280 (65,412)	69,120 (261,648)
Subtotal	26,140 (98,951)	43,420 (164,363)	26,140 (98,951)	43,420 (164,363)	51,540 (195,101)	80,260 (303,818)	71,140 (269,295)	26,140 (98,951)	71,140 (269,295)	51,540 (195,101)	71,140 (269,295)	68,820 (260,513)	105,660 (399,968)
Drenes de piso													
Pozo seco	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	28,800 (109,020)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)	700 (2650)
Edificio del reactor y alberca de combustible	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)
Edificio de desechos	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)
Edificio de turbine	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)	2000 (7571)
Subtotal	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	33,800 (127,947)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)	5700 (21,5777)
Decantado de limpieza del separador de fase	-	-	4200 (15,899)	4200 (15,899)	-	4200 (15,899)	4200 (15,899)	-	-	4200 (15,899)	4200 (15,899)	4200 (15,899)	4200 (15,899)
Drenes de lavandería	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)	1000 (3785)
Drenes de laboratorio	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)	500 (1893)
Regenerantes	-	12,000 (45,425)	-	12,000 (45,425)	-	48,000 (181,700)	-	-	-	-	-	12,000 (45,425)	48,000 (181,700)
Desechos del laboratorio químico	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)	100 (379)
Total	33,440 (126,585)	62,720 (237,422)	37,640 (142,484)	66,920 (253,321)	58,840 (222,735)	139,760 (529,051)	82,640 (312,828)	61,514 (232,955)	78,440 (296,929)	63,040 (238,340)	82,640 (312,828)	92,320 (349,471)	165,160 (625,201)
Frecuencia, días por año	158	67	55	12	14	14	14	14	12	2	2	1	1
Probabilidad	0.433	0.18	0.15	0.033	0.038	0.038	0.038	0.038	0.033	0.006	0.006	0.0025	0.0025

^a Se muestra una razón de fuga máxima para el pozo seco, más no así para el edificio de turbina, edificio de desechos radiactivos, edificios auxiliares y alberca de combustible. Se aplica únicamente para el pozo seco la máxima fuga supuesta. Sin embargo, fugas simultáneas de esta magnitud en todas estas fuentes es considerado un evento de baja probabilidad y se supone su pronta reparación.

Antes de entrar en más detalle, se revisará la actividad asociada con cada corriente. Revisando la información contenida en Tablas II-6, II-7 y II-8 se puede apreciar que los desechos radioactivos del agua del reactor tienen una actividad normal A, y una actividad máxima A+M. Ejemplos típicos son los sellos de las bombas de los sistemas de recirculación y bombas del sistema limpieza del agua del reactor.

Por otro lado, para el vapor condensado del reactor, las actividades anteriores son multiplicadas por un factor de 0.001 (0.1% wt del agua del reactor), el cual corresponde al valor estimado del carryover para estos isótopos contenidos en el vapor. Algunos ejemplos son: vapor para sellos de vástagos y drenajes de enfriadores del pozo seco. Adicionalmente, se debe notar que las concentraciones de halógenos en este caso, se multiplican por un factor de 0.02 para considerar el 1.5% de carryover de halógenos en el vapor.

Hay dos datos adicionales que frecuentemente aparecen en estas tablas, 10^{-6} $\mu\text{Ci}/\text{gr}$ y 10^{-3} $\mu\text{Ci}/\text{gr}$, los cuales corresponden a las actividades en los tanques de almacenamiento de condensado sin fuga de combustible y con fuga de combustible, respectivamente.

Los valores restantes de actividad dependen de los factores de descontaminación asociados con el proceso propio, y algunas veces se requiere utilizar promedios ponderados. En el menor de los casos los valores proporcionados han sido estimados basados en datos de experiencia. Para mayor detalle, se hace referencia a las notas incluidas en cada una de las Tablas.

Además, la Tabla II.9 ha sido preparada con base al formato del ANSI-N197-1976/ANS-55.3 pero el contenido de la Tabla ha sido modificado, adaptado y ampliado según aplique para reflejar los valores específicos de un reactor enfriado por agua ligera (LWR).

El propósito principal de la Tabla II-9 es poner en perspectiva los volúmenes esperados a manejar en el sistema de procesamiento de desechos líquidos radiactivos durante operación normal y eventos operacionales anticipados. Sin embargo, se hace notar que los valores listados corresponden a una sola unidad; para un sitio con dos unidades, con un sistema de procesamiento de desechos líquidos común, los eventos base de diseño deben de ser calculados basados en los valores proporcionados en la Tabla II-9 para una unidad. En cualquier evento, el sistema de procesamiento de desechos radioactivos líquidos debe ser dimensionado para gestionar las corrientes de entradas de aquellos eventos para los cuales se haya estimado una probabilidad de ocurrencia igual o mayor al 1% en una base anual.

Los líquidos radioactivos se clasifican en base a su tipo en: de alta pureza, de baja pureza, químicos y detergentes; así como también desechos líquidos continuos y periódicos.

2.2.3.1. Desechos de alta pureza

Estos son desechos líquidos de baja conductividad, del orden de 10 $\mu\text{mho/cm}$ (comúnmente valores más bajos), bajo contenido de sólidos insolubles (normalmente menor a 20 ppm), y un contenido radioactivo variable desde concentraciones similares a las del agua del reactor a muy bajas concentraciones, dependiendo de la corriente. Las corrientes principales de desechos de alta pureza son: drenajes de equipo en el pozo seco, en el edificio del reactor, en el edificio de turbina y en el edificio de desechos; agua de transferencia de la limpieza ultrasónica de resinas; resinas de transferencia de los desmineralizadores de condensado y agua del proceso de regeneración (baja conductividad, bajo crud). Este tipo de desecho líquido es filtrado, desmineralizado, y retornado al proceso.

Los desechos de alta pureza que se consideran como corrientes de entrada a los sistemas de procesamiento de desechos radioactivos líquidos se listan en la Tabla II.6 para flujos continuos y en la Tabla II.8 para flujos periódicos.

2.2.3.2. Desechos de baja pureza

Estos desechos consisten normalmente en líquidos de conductividad moderada (10-200 $\mu\text{mho/cm}$), con un contenido de sólidos insolubles moderado (20-500 ppm) y un contenido radioactivo variable. Las corrientes más importantes de los desechos radioactivos de baja pureza normalmente son: drenajes de piso del pozo seco, edificios del reactor, turbina y desechos; drenes de sistemas y equipos que caen en las condiciones de pureza descrita anteriormente; retrolavados de las resinas de limpieza ultrasónica; retrolavados de las resinas de los desmineralizadores de condensado (baja conductividad, alto crud¹¹). Estos desechos pueden ser filtrados, desmineralizados y retornados al proceso.

Los flujos continuos e intermitentes de desechos líquidos de baja pureza se enlistan en las Tablas II-7 y II-8, respectivamente.

¹¹ Crud: impureza; materia extraña; producto de corrosión; lodo de corrosión; depósito de impurezas; término coloquial para definir los productos resultantes de la corrosión y el desgaste de las estructuras que resultan activados bajo radiación.

2.2.3.3. Desechos químicos

Son desechos radioactivos líquidos con alta conductividad (mayor a 200 $\mu\text{mho/cm}$, del orden de 1000 $\mu\text{mho/cm}$), con un contenido de sólidos insolubles variable, un contenido de radioactividad variable y sin contener jabones o detergentes. Las corrientes principales de desechos radioactivos líquidos químicos son: soluciones de regeneración de desmineralizadores (alta conductividad, bajo crud), drenajes de laboratorio, desechos químicos no detergentes del proceso de descontaminación.

Los desechos químicos se enlistan en la Tabla II-8

Debido a que la alta conductividad hace impráctico el intercambio iónico, estos desechos son tratados por medio de evaporadores. El fondo de los evaporadores recibe un proceso adicional a través del sistema de solidificación, mientras que el destilado es retornado al proceso.

2.2.3.4. Desechos detergentes

Son desechos radiactivos líquidos que contienen detergentes, jabones o material orgánico similar normalmente con un contenido radioactivo bajo. Las fuentes de desechos detergentes son: lavandería, desechos del equipo de descontaminación de tipo personal y tipo de detergente, y agua de lavado de laboratorios.

Estos desechos se enlistan en la Tabla II-8. Debido a su bajo contenido radioactivo sólo se requiere filtración para su tratamiento. Sin embargo, estos desechos deben ser siempre colectados, procesados y dispuestos de manera independiente a cualquier otro tipo de desecho líquido. Estos desechos no deben ser descargados

a los tanques de almacenamiento de condensado, pero pueden ser tratados en los sistemas de tratamiento de aguas de la planta.

2.2.4. Desechos radioactivos sólidos

Los desechos radioactivos sólidos pueden ser divididos en desechos sólidos húmedos y desechos sólidos secos. Los desechos sólidos húmedos son colectados en varios tanques localizados en los edificios de desechos radioactivos y purificación, los cuales provienen de la operación de filtros, desmineralizadores y evaporadores. Los desechos sólidos secos consisten en equipos, componentes y herramientas contaminados. El objetivo en la gestión de este tipo de desechos, es solidificarlos en paquetes resistentes a daños físicos y acciones de agentes químicos por largos periodos de tiempo. Comúnmente en reactores de agua ligera estos desechos se almacenan en el sitio en tambores de 55 galones (208 litros). Estos tambores serán transportados fuera del sitio para su disposición final.

2.2.4.1. Desechos sólidos húmedos

Este tipo de desechos resulta de la operación de los sistemas y equipos asociados localizados en el edificio de desechos radioactivos.

En Capítulos posteriores se describirá: cómo los equipos y su operación generan desechos sólidos húmedos. En la Tabla II-10 se presenta una lista del equipo y tipo de desecho que se produce así como su corriente.

Tabla II-10 Desechos sólidos húmedos

Equipo	Desecho generado por	Tanque(s) colector(es)	Tipo de desecho
Desmineralizadores de Condesando	Soluciones regenerantes	Neutralizador de desechos	Concentrados ^(a)
	Transferencia de resina gastada	Resina gastada ^(b)	Resina gastada
Filtros del sistema de limpieza de agua del reactor	Retrolavados	Separador de fase del sistema de limpieza de agua del reactor ^(c)	Lodos
Filtro del sistema de limpieza de la alberca de combustible gastado	Retrolavados	Separador de fase de desechos lodosos ^(c)	Lodos
Filtro del sistema de drenajes de equipos	Retrolavados	Separador de fase de desechos lodosos ^(c)	Lodos
Filtro del sistema de drenaje de pisos	Retrolavados	Separador de fase de desechos lodosos ^(c)	Lodos
Desmineralizadores del sistema de drenajes de equipos	Soluciones regenerantes	Neutralizador de desechos	Concentrados ^(a)
	Transferencia de resina gastada	Resina gastada ^(b)	Resina gastada
Desmineralizadores del sistema de drenajes de pisos	Soluciones regenerantes	Neutralizador de desechos	Concentrados ^(a)
	Transferencia de resina gastada	Resina gastada ^(b)	Resina gastada
Desmineralizadores de destilado	Transferencia de resina	Resina gastada ^(b)	Resina gastada
Varios	Desechos de laboratorio, desechos del proceso de descontaminación química	Desechos químicos	Concentrados químicos ^(d)

Notas:

- (a). El contenido de los tanques neutralizadores de desechos es concentrado en un evaporador de desechos antes de ser transferido al sistema de manejo de desechos sólidos.
- (b). El contenido de los tanques de resinas gastadas es desagüado antes de ser transferido al sistema de manejo de desechos sólidos.
- (c). El contenido de los separadores de fase es desagüado antes de ser transferido al sistema de manejo de desechos sólidos.
- (d). El contenido del tanque de desechos químicos es concentrado en un evaporador de desechos químicos antes de

Equipo	Desecho generado por	Tanque(s) colector(es)	Tipo de desecho
ser transferido al sistema de manejo de desechos sólidos.			

2.2.4.2. Desechos radioactivos secos

Estos desechos consisten en objetos compresibles tales como filtros, trajes anti-c, cubrezapatos, guantes, plásticos, bolsas, hojas de papel, papel absorbente, trapos, etc., y pequeños objetos compresibles como herramientas pequeñas, componentes electrónicos, etc. Estos desechos compresibles son compactados en un equipo especial para su almacenamiento en tambores de acero de 55 galones (208 litros).

Cierto tipo de desechos sólidos secos tales como internos del reactor, que serán segregados después de su uso, incluyendo combustible gastado, barras de control, canales de combustible, monitores del núcleo; herramientas y equipo mayores, no pueden ser dispuestos en este tipo de tambores. Todos estos desechos son gestionados caso por caso, y probablemente requerirán contenedores especiales para su transportación y disposición.

2.3. Calidad del agua

En un reactor de agua en ebullición, el monitoreo de la calidad del agua del ciclo es de suma importancia ya que los límites especificados resultaran en la química esperada de las corrientes de entrada al sistema de desechos radioactivos líquidos, así como también los requerimientos de calidad en el agua de salida para ser usada como agua de repuesto en el ciclo de vapor de la Central.

2.3.1. Refrigerante primario

La calidad del agua en un reactor de agua en ebullición, está en función tanto de la calidad del agua de alimentación como de la operación del sistema de limpieza del agua del reactor. Ya que las entradas de impurezas en un reactor de agua en ebullición se deben principalmente al sistema de agua de alimentación, el control de la calidad de agua de alimentación es de suma importancia. Este control se lleva a cabo mediante la combinación de selecciones de materiales, y tratamiento de filtración/intercambio iónico en el sistema de tratamiento de condensado.

El sistema de limpieza del agua del reactor tiene como función principal el control de impurezas solubles provenientes del sistema de agua de alimentación controlando la concentración de los productos de fisión de vida media larga debido a posibles fugas de combustible, y la purificación del agua recirculada del reactor durante el calentamiento a potencia.

Los materiales en el sistema primario del reactor son principalmente aceros inoxidable tipo 304 y el material del encamisado del combustible es una aleación de zirconio. Los límites de la química del agua del reactor se establecen para propiciar un ambiente favorable a estos materiales, los límites se establecen en base a conductividad y concentración de cloros. La conductividad es limitada ya que puede ser continua y confiablemente medida dando una indicación de condiciones anormales y/o presencia inusual de materiales no deseables o en exceso en el refrigerante. Los límites de las concentraciones de cloro se establecen para prevenir la formación de grietas por corrosión intergranular debida a esfuerzos en el acero inoxidable. Los límites de la calidad del agua del reactor son los siguientes ⁽⁶⁾:

Agua del reactor

Los siguientes límites definen la calidad del agua del reactor para el diseño de los equipos y el control operativo a condiciones nominales:

Conductividad	1.0 $\mu\text{mho/cm}$ a 25°C
Cloros (Cl ⁻)	200 ppb
pH	5.6 a 8.6 a 25°C

Agua de Alimentación

La calidad de agua de alimentación del reactor (medida antes de la válvula de aislamiento exterior) no debe de exceder de los siguientes límites:

Conductividad	0.1 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C (medido después del sistema de tratamiento de Condensado)
pH	6.5 a 7.5 a 25°C
Impurezas metálicas	15 ppb, de los cuales no más de 2 ppb pueden ser cobre
Oxigeno	200 ppb máximo, 20 ppb mínimo (medido después del sistema de tratamiento de condensado)
Cloros (Cl ⁻)	Las concentraciones de cloro en agua de alimentación deben mantenerse en límites tal que la concentración de los cloros en el agua del reactor sea mantenida. Lo que significa que la concentración de cloros en el agua del reactor debe ser menor que 1-2ppb

2.3.2. Alberca de combustible

Es imprescindible mantener la suficiente claridad en la alberca de combustible tal que permita las operaciones de carga y descarga de los elementos combustible.

Los valores de los límites químicos de la alberca de combustible son los siguientes:

Conductividad	3.0 $\mu\text{mho/cm}$ a 25°C
Cloros (Cl^-)	0.5 ppb
pH	5.3 a 7.5 a 25°C
Elementos pesados (Fe, Cm, Hg, Ni)	0.1 ppm
Total de Insolubles	1 ppm

El proceso de tratamiento en los filtros desmineralizadores de la alberca de combustible gastado debe ser capaz de producir agua como efluente de salida a una calidad de 1 $\mu\text{mho/cm}$ a 25°C, 0.5 ppm de cloro, y pH entre 5.6 y 7.5.

2.3.3. Tanques de almacenamiento de condensado

El agua procesada a través del sistema de desechos radioactivos líquidos será retornada al ciclo de vapor tanto como sea posible; para mantener un balance general en el inventario de agua de la central. Los tanques de almacenamiento de condensado son la fuente principal de agua de repuesto al ciclo de vapor, teniendo como punto de entrada al ciclo el condensador principal. Por lo que, el agua en los tanques de almacenamiento de condensado debe tener una calidad compatible con la del agua de alimentación al reactor, y ya que el sistema de desechos líquidos descargará a los tanques de almacenamiento de condensado, la calidad del agua a la salida de los sistemas de tratamiento de desechos líquidos deberá estar entre los límites especificados para el agua de los tanques de almacenamiento de condensado. Cuando los tanques de almacenamiento de condensado tienen un nivel tal que no pueden aceptar el agua efluente del sistema de desechos líquidos, el agua será

descargada al sumidero de calor de la Central mediante una descarga controlada.

Los límites de la calidad de agua de los tanques de almacenamiento de condensado son los siguientes:

Conductividad	1.0 $\mu\text{mho/cm}$ a 25°C
Cloros (Cl ⁻)	0.05 ppm
pH	6 a 8 a 25°C
Boro (BO ₃)	0.1 ppm

2.4. Requerimientos regulatorios

La comisión nuclear de seguridad nuclear y salvaguardias (CNSNS) ha decidido adoptar y usar las regulaciones de la USNRC tal y como son requeridas por el Título 10 del Código Federal de regulaciones y las guías reguladoras asociadas, planes estándares de revisión y posiciones técnicas.

En los siguientes párrafos se describen brevemente los requerimientos regulatorios de los sistemas de desechos radiactivos.

10CFR20.1 Esta regulación requiere que las personas a cargo de actividades bajo licencias emitidas por la NRC, lleven a cabo cualquier esfuerzo razonable para mantener las exposiciones a la radiación, y las liberaciones de material radioactivo en efluentes hacia áreas no restrictivas, tan bajo como sea razonablemente posible.

10CFR20.103 Requiere que en ningún caso cualquier individuo dentro de un área restringida se le permita inhalar una cantidad de material radiactivo bajo un periodo de 3 meses mayor a la cantidad que resultaría por la inhalación durante 40 horas por semana, por 13 semanas en una concentración constante de material radiactivo

en aire especificado en la Columna 1 de la Tabla I del Apéndice B del 10CFR20

10CFR20.105 Requiere que los niveles de radiación en áreas no controladas radiológicamente no deben causar que cualquier individuo reciba una dosis a cuerpo entero en un periodo de un año calendario mayor a 0.5 rem.

10CFR20.106 Especifica los límites de radioactividad de los efluentes descargados en áreas no controladas radiológicamente. Para este fin, las concentraciones máximas permisibles en agua y aire se han especificado en la Tabla II del Apéndice B del 10CFR20

Apéndice I del 10CFR50 Proporciona guías numéricas para propósitos de diseño y condiciones límite por operación para cumplir con el criterio “tan bajo como razonablemente sea posible” en efluentes de material radioactivo en centrales nucleoelectricas enfriadas por agua ligera. Las conclusiones más importantes de dichos apéndice son las siguientes:

“A. Para material radioactivo por arriba del nivel de fondo en efluentes líquidos a ser liberados en áreas sin control radiológico:

1. El cálculo anual de la cantidad total de todo el material radioactivo de todos los reactores enfriados por agua ligera en el sitio no debe resultar en un dosis anual o dosis administrativa a cuerpo entero o cualquier órgano de un individuo en un área no controlada radiológicamente, proveniente de cualquier ruta de exposición; que excede 5 mRem; y
2. El cálculo anual de la cantidad total de material radioactivo, excepto tritio y gases disueltos, no debe exceder 5 Ci para

cada reactor enfriado por agua ligera del sitio.

B. Para material radioactivo por arriba del nivel de fondo en efluentes gaseosos la cantidad total anual de material radioactivo a ser liberado a la atmósfera por todos los reactores enfriados por agua ligera en el sitio:

1. La dosis anual en aire calculada debido a radiación gamma en cualquier localización cerca del nivel de piso que pudiera ser ocupado por individuos dentro o fuera de las fronteras del sitio no debe exceder 10 mRem; y
2. La dosis anual en aire calculada debido a radiación beta en cualquier localización cerca del nivel de piso que pudiera ser ocupado por individuos dentro o fuera de las fronteras del sitio no debe exceder 20 mRem.

C. Para yodo radioactivo y material radioactivo en forma de partículas provenientes de todos los reactores enfriados por agua ligera en el sitio:

1. No debe resultar en una dosis anual o dosis comprometida a cualquier órgano de un individuo en un área sin controles radiológicos por cualquier ruta de exposición que exceda 15 mRem. En la determinación de la dosis o dosis comprometida, la porción debida a la toma de material radiactiva vía ruta de alimentos; puede ser evaluada a la localización en donde la ruta de alimentos existe en realidad, y
2. La cantidad total anual calculada de I-131 en efluentes gaseosos no debe exceder 1 por cada reactor enfriado por agua ligera en el sitio.”

-
- 10CFR100.11
1. Requiere que: cualquier individuo localizado en cualquier punto dentro de la frontera del área de exclusión dentro de un periodo de dos horas inmediatamente después de una liberación de productos de fisión postulada no recibiría una dosis total por radiación a cuerpo entero que exceda 25 rem o una dosis total por radiación a tiroides que exceda 300 rem, por exposición al yodo.
 2. Cualquier individuo localizado en cualquier punto de la frontera exterior de zona de baja población, el cual es expuesto a la nube radioactiva resultada de la liberación postulada de productos de fisión (durante el periodo de tiempo que lo cubre la nube) no recibiría una dosis total por radiación a cuerpo entero que exceda 25 rem o una dosis total por radiación a tiroides que exceda 300 rem, por exposición al yodo.

Para cumplir con los requerimientos descritos anteriormente, los sistemas de desechos radioactivos son diseñados y operados de tal manera que: la dosis por radiación al medio ambiente debida a material radioactivo en todas las descargas no exceden los límites del Apéndice I del 10CFR50; las descargas radioactivas durante operaciones anormales infrecuentes y condiciones transitorias de la central serán limitadas a las permitidas por el 10CFR20; y las descargas radioactivas al medio ambiente durante condiciones de accidente serán limitadas a los límites establecidos en el 10CFR100. Adicionalmente, se contará con el suficiente blindaje y sistemas de ventilación de un solo paso para mantener la exposición a la radiación de los operadores de desechos radiactivos tan baja como prácticamente es posible.

Criterio 60 del Apéndice A del Control de liberaciones de material radioactivo al medio ambiente. Requiere que el diseño de una central

10CFR50 nucleoeléctrica incluya los medios para controlar adecuadamente las liberaciones de material radioactivo en efluentes gaseosos y líquidos, además de los medios para el manejo de desechos radioactivos sólidos generados durante la operación normal, incluyendo eventos operacional anticipados.

Criterio 64 del Apéndice A del 10CFR50 Monitoreo de liberaciones radioactivas. Requiere que deben ser provistos los medios para monitorear la radioactividad los efluentes en las diferentes rutas de descarga, los cuales pueden ser descargados durante operación normal incluyendo eventos operacionales anticipados y accidentes postulados.

Guía reguladora 1.21 Medición, Evaluación y Registro de radioactividad en desechos radioactivos sólidos y liberaciones de materiales radioactivos en efluentes gaseosos y líquidos provenientes de LWRPP. Esta guía describe programas aceptables para el organismo regulador en lo referente a medición, registro y evaluación de liberaciones de material radioactivo en efluentes líquidos y gaseosos; además de lineamientos para clasificar y registrar las categorías y el contenido de Ci en desechos sólidos.

Para dar cumplimiento con los criterios anteriores y los lineamientos de la guía reguladora, se requiere la instalación de instrumentación de monitoreo de radiación para llevar a cabo mediciones gruesas de radioactividad en efluentes líquidos y gaseosos. Las medidas de muestreo complementan las mediciones anteriores con la identificación de radionúclidos específicos. Ambas acciones, medición continua mediante monitores de radiación y muestreo, forman la base de la preparación de los reportes requeridos. Adicionalmente, monitores de radiación son instalados en la estación de manejo de contenedores de desechos sólidos

para medir el contenido de Curíes (Ci) en los desechos sólidos a gestionar.

10CFR71 Almacenamiento de material radioactivo para transportación y transporte de material radioactivo bajo ciertas condiciones; clasifica el material radioactivo para su transportación en “grupos de transporte” y “tipo de cantidad” como sigue:

Grupo de transporte	Tipo de Cantidad (en Ci)	
	A	B
I	0.001	20
II	0.05	20
III	3	200
IV	20	200
V	20	5,000
VI y VII	1,000	50,000
Forma especial	20	5,000

Los contenedores de desechos sólidos son tipo estándar de 208 litros tipo 17-H certificados por el departamento de transportación de Estados Unidos (DOT, por sus siglas en inglés). La transportación de dichos contenedores se clasifica como grupo de transporte II, III y IV de cantidades tipo B.

49CFR Transportación. El Embalaje, aduana y transporte de desechos solidificados está de acuerdo a esta regulación. Los desechos solidificados son clasificados en base a la actividad específica del material. Todos los contenedores de desecho solidificado son descontaminados según se requiera.

Del mismo modo los sistemas de desechos radioactivos son diseñados de acuerdo a las guías de diseño proporcionadas por la posición técnica de la USNRC ESTB No. 11-1 Rev. 1, guía de diseño para los sistemas de manejo de

desechos radioactivos instalados en Centrales Nucleoeléctricas de Agua Ligera. Específicamente, los sistemas deben ser diseñados y probados de acuerdo a los códigos y estándares listados en la Tabla II-11

Tabla II-11 Códigos de diseño y fabricación para equipos y componentes de sistemas de manejo de desechos radiactivos

Equipo	Códigos ^(h)			
	Diseño y fabricación	Materiales	Calificación del soldador y procedimientos	Inspección y pruebas
Vasijas de presión	Código ASME Sección VIII, Div 1 ^(a)	Código ASME Sección II	Código ASME Sección IX	Código ASME Sección VIII, Div I
Tanques a presión atmosférica o de 0-15 psig	Código ASME Sección III Clase 3 ó APJ 620 ^(b) ó API 650 ^(c) ó AWWA D-100 ^(d)	Código ASME ⁽ⁱ⁾ Sección II	Código ASME Sección IX	Código ASME Sección III, Clase 3 ó APJ 620 ó API 650 ó AWWA D-100
Intercambiadores de calor	Código ASME Sección VIII Div I y TEMA C ^(e)	Código ASME Sección II	Código ASME Sección IX	Código ASME Sección VIII, Div I
Tuberías y válvulas	ANSI B31.1 ^(f)	ASTM ó Código ASME Sección II	Código ASME Sección IX	Código ASME Sección VIII, Div I
Bombas	Estándares del fabricante ^(g) E	Código ASME Sección II ó estándares del fabricante	Código ASME Sección IX (según sea requerido)	Estándares del Instituto de Hidráulica (HIE)
<p>Notas:</p> <p>(a) No es requerido estampado de Código ASME.</p> <p>(b) API -620 "Recommended rules for design and construction of large welded, low pressure storage tanks", 1973</p> <p>(c) API-650 "Welded steel tanks for oil storage", 1973</p> <p>(d) American Water Works Association (AWWA) D-100</p> <p>(e) Standards of tubular exchanger manufacturer's association (TEMA).</p> <p>(f) ANSI B31 "Pressure piping", Sección B31.1-1973 "Power piping".</p> <p>(g) Estándares del fabricante para servicio específico. La prueba hidrostática debe aplicarse a 1.5 veces la presión de diseño.</p>				

Equipo	Códigos ^(h)			
	Diseño y fabricación	Materiales	Calificación del soldador y procedimientos	Inspección y pruebas
<p>(h) Se deberá proporcionar un certificado de cumplimiento para todos los materiales.</p> <p>(i) Además, se puede usar materiales plásticos reforzados. Los materiales plásticos deben estar de acuerdo con la Parte M de la Sección X del Código ASME.</p>				

En adición a las requerimientos regulatorios comentados, los sistemas de desechos radioactivos son diseñados para cumplir con los criterios de aceptación incluidos en las siguientes secciones del Plan Estándar de Revisión (SRP, por sus siglas en inglés) de la USNRC: Sección II.2 para el sistema de desechos radioactivos líquidos, Sección II.3 para el sistema de tratamiento de desechos gaseosos, y Sección II.4 para el sistema de desechos radioactivos sólidos. En general, las secciones mencionadas requieren que el diseño de los sistemas de desechos radioactivos cumplan con los requerimientos especificados en las partes 20 y 50 del 10CFR indicados anteriormente, además de contar con la capacidad adecuada para procesar desechos generados durante la operación normal incluyendo eventos operacionales anticipados.

2.5. Clasificación de las ESC de los sistemas de desechos radiactivos

2.5.1. Clasificación de seguridad

Los sistemas de desechos radioactivos solo son requeridos para operaciones de generación de electricidad, no son sistemas esenciales o sistemas de seguridad; y por lo tanto no cuentan con ninguna interface relacionada con seguridad o con componentes con categoría de seguridad.

2.5.2. Clasificación de acuerdo a grupo de calidad

La clasificación de los grupos de calidad se basa en la guía reguladora 1.26, clasificaciones de los grupos de calidad y estándares para componentes contenedores de agua, vapor y desechos radioactivos en Centrales Nucleoeléctricas. Los componentes de los sistemas de desechos radioactivos están clasificados como grupo de calidad D, ya que no forman parte de la frontera de presión del refrigerante del reactor.

2.5.3. Aseguramiento de la calidad

Debido a que los componentes de los sistemas de desechos radioactivos no llevan a cabo funciones de seguridad, no es requerido que cumplan con los requerimientos de aseguramiento de la calidad del Apéndice B del 10CFR50.

3. Equipos y técnicas de procesamiento

3.1. Introducción

Varias técnicas de ingeniería química han sido adaptadas para procesos de descontaminación de las diferentes corrientes de desechos radiactivos en los reactores de agua en ebullición. Lo anterior con el propósito de reducir la liberación de radionúclidos al medio ambiente a niveles controlados y monitoreados de acuerdo a las regulaciones descritas en el capítulo anterior. Estas técnicas son: intercambio iónico (desmineralización), filtración, evaporación, recombinación de hidrogeno y adsorción de gases nobles.

El objetivo de este capítulo es dar una descripción general de los principios asociados a cada una de estas técnicas, así como también, describir el equipo utilizado para realizar cada técnica en el tratamiento de las corrientes de desechos radiactivos. Esto brindará un panorama general para comprender los diferentes procesos y sistemas que se revisaran en capítulos posteriores.

Además, se describirá el equipo mecánico más importante usado en el diseño de sistemas de desechos radioactivos.

3.2. Intercambio iónico

El intercambio iónico se usa generalmente para purificar desechos radioactivos líquidos de baja conductividad. El uso de intercambio iónico para el tratamiento de corrientes líquidas en Centrales Nucleoeléctricas se revisa a detalle en las referencias^{12, 13}.

¹² Lin, K. H. Use of Ion Exchange for the Treatment of Liquids in Nuclear Power Plants. ORNL-4792 (December 1973)

¹³ Clark, Walter E. "The Use of Ion Exchange to Treat Radioactive Liquids in Light-Water-cooled Nuclear Power Plants." NUREG/CR-0143, August 1978

Las resinas de intercambio iónico son insolubles; poli-electrolitos de alto peso molecular que pueden intercambiar reversiblemente sus iones móviles con aquellos de misma carga de una solución circundante. Los intercambiadores en los cuales la parte aniónica está disponible para reaccionar, o es móvil, son intercambiadores de aniones; aquellos intercambiadores en donde la parte catiónica es móvil, son intercambiadores de cationes. Aunque la naturaleza de los iones intercambiables asociados con una resina de intercambio iónico es generalmente determinado por el usuario; las resinas usadas en las aplicaciones de tratamiento de desechos líquidos radioactivos son usualmente de la forma hidrogeno o hidróxido. Sin embargo, también se hace uso de otras formas tales como litio, potasio, amonio, y boro.

El intercambio iónico involucra una alteración no permanente de la estructura de la resina. La naturaleza del proceso de intercambio iónico requiere que los radionúclidos en solución de varias corrientes dentro de la operación de la Central Nucleoeléctrica estén en forma iónica para que este proceso de descontaminación sea efectivo. El efluente de formas no iónicas (partículas insolubles, coloidales, moléculas neutras [I₂] y complejos neutros), que son incapaces de procesarse mediante intercambio iónico, pueden ser responsables una baja descontaminación de la solución. Varias fracciones de algunas partículas y coloides pueden pasar a través de la cama de resinas; la parte que es retenida puede cubrir a las partículas de las resinas reduciendo su eficiencia. Se cuenta con varios pre-tratamientos adhoc para cada corriente de alimentación antes de ser procesadas mediante intercambio iónico.

La Figura III-1 ilustra dos reacciones fundamentales de intercambio iónico, división de sales y neutralización. Las reacciones muestran por separado camas de cationes intercambiables (CIX) y aniones intercambiables (AIX), y una cama mixta intercambiable (MB).

División de sales	
$R-H^+ + C^+ A^- \leftrightarrow R-C^+ + H^+A^-$	CIX
$R^+ OH^- + H^+ A^- \leftrightarrow R^+ A^- + H_2O$	AIX
ó	
$R-H^+ + R^+ OH^- + C^+ A^- \leftrightarrow R-C^+ + R^+ A^- + H_2O$	MB
Neutralización	
$R-H^+ + C^+ OH^- \leftrightarrow R-C^+ + H_2O$	CIX
$R^+ OH^- + H^+ A^- \leftrightarrow R^+ A^- + H_2O$	AIX

Figura III-1. Reacciones de intercambio iónico

Los copolímeros de estireno-divinilbenceno, material utilizado en la preparación de resinas de intercambio iónico sintéticas, son las resinas de mayor uso en Centrales Nucleoeléctricas. La **Tabla III-1** muestra las características de resinas de intercambio iónico tipo ácido fuerte y débil, y tipo base fuerte y débil; por grupo funcional activo.

Tabla III-1. Características de resinas de intercambio iónico típicas¹⁴.

Tipo de resina	Grupos funcionales	Regenerante típico	Nivel de regeneración (%)	Capacidad teórica (meq/mL resina húmeda)	Forma iónica	Rango de pH	Max. Temp. Op. (°F)
Ácido fuerte	Sulfúrico	4% H ₂ SO ₄	95	1.5-2.0	H ⁺	1-14	250
Base fuerte – Tipo 1	Amonio cuaternario Tipo 1	4% NaOH	80	0.5-1.0	OH ⁻	1-14	140
Base fuerte – Tipo 2	Amonio cuaternario Tipo 2	4% NaOH	80	0.5-1.0	OH ⁻	1-14	100
Base débil	Amina primaria, secundaria y/o terciario	4% NH ₄ OH	95	1.5-2.5	OH ⁻	1-7	200

¹⁴ Lin, K. H Use of Ion Exchange for the Treatment of Liquids in Nuclear Power Plants. ORNL-4792 (December 1973)

También se dispone de formas iónicas adicionales a H^+ y OH^- , para aplicaciones especiales. La Figura III-2 ilustra una resina de intercambio iónico catiónica.

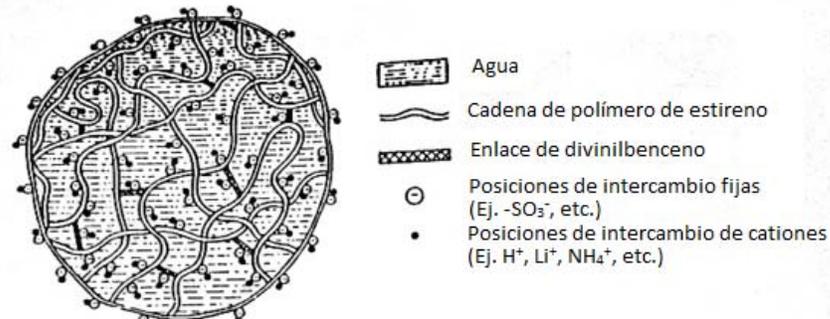


Figura III-2. Diagrama esquemático de una resina de intercambio iónico catiónica - ácido fuerte.

Las resinas catiónicas – ácido fuerte (de la forma H^+) se caracterizan por su habilidad para reaccionar fácilmente con sales ionizadas débiles o neutras, disociando la sal en su ácido en solución y convirtiendo la resina en forma de sal. Mientras que, una resina aniónica – base fuerte (de la forma OH^-) disociará una sal ionizada débil o neutra en su base en solución, simultáneamente, convirtiendo la resina a sal. Una desventaja común de este tipo de resinas es su baja eficiencia de regeneración, ya que se requiere una cantidad muy excesiva de regenerantes en concentraciones relativamente altas. Por lo contrario, una regeneración completa tanto de resinas catiónica – ácido débil y resina aniónica base débil se logra con cantidades de regenerantes en concentraciones aproximadamente estequiométricas. Sin embargo, este tipo de resinas tienen la desventaja de presentar un proceso de disociación lento y con baja efectividad en sales ionizadas o neutras. Además, la eficiencia en el intercambio iónico de las resinas débiles es considerablemente más sensible al pH de la solución que otras resinas fuertes. Y, las resinas débiles son generalmente más costosas y tienen una vida útil esperada menor, respecto a las resinas fuertes. Sin embargo, las cantidades menores de regenerante requerido por las resinas débiles puede ser una ventaja importante en vista de los problemas potenciales asociados con la disposición del regenerante.

La calidad del agua que está siendo usada en las Centrales Nucleoeléctricas enfriadas por agua ligera (LWR, por sus siglas en inglés) debe ser muy alta para minimizar los problemas de corrosión y reducir la formación de productos de activación neutrónica. Para cumplir con este requerimiento, se introdujeron en el comercio las resinas de intercambio iónico con grado nuclear. Este tipo de resina es generalmente el mismo que las resinas de grado comercial en lo que respecta a su estructura, pero tienen cantidades menores de impurezas que se puedan filtrar (en particular, impurezas orgánicas), un tamaño de partícula más uniforme (resinas catiónicas: ~0.45 mm, resinas aniónicas: ~0.6 mm, <1%), y un grado mayor de conversión a la forma iónica deseada (>95% para resinas catiónicas, >80% en resinas aniónicas).

El desempeño de un sistema de intercambio iónico está regido por las propiedades físicas y químicas de las resinas de intercambio iónico, además de las condiciones de operación. Entre las propiedades más importantes de una resina de intercambio iónico están:

- a) Capacidad de intercambio,
- b) Equilibrio de “barrido”,
- c) Grado de enlace cruzado,
- d) Tamaño de partícula de la resina,
- e) Selectividad iónica,
- f) Cinética de intercambio iónico, y
- g) Estabilidad química y física.

Dentro de las condiciones de operación a considerar se tiene:

- a) Forma química y física de las especies en la solución de alimentación (especies ionizadas o no ionizadas, tamaño de los iones, y valencias),
- b) Temperatura, pH y razón de flujo de la solución de alimentación,
- c) Diseño y dimensiones de las camas de intercambio iónico (método de empaque, ya sea que sea usado un sistema multi-etapa con unidades

separadas de intercambio catiónico y aniónico, ó un sistema de cama mixta; razón altura-diámetro), y

d) Nivel o grado de completos de regeneración.

El sistema de intercambio iónico empleado con mayor frecuencia en el tratamiento de agua y corrientes líquidas de desecho es el sistema de cama mixta (ó lecho mixto), el cual consiste en una cama estacionaria conteniendo resinas catiónicas y aniónicas mezcladas (ver Figura III-3a). La corriente líquida es alimentada en la parte superior de la cama. Cuando se empieza a tener presencia de cantidades considerables de contaminantes iónicos en el efluente (“ruptura” de la resina), la cama se considera agotada o cargada, y la alimentación es detenida. Entonces, la cama es regenerada (seguido de un proceso de enjuague con agua desionizada) o removida y reemplazada con resinas frescas. Las camas mixtas que contienen resinas con un rango de tamaño de partículas de 0.4-0.7 mm pueden tener dimensiones que varían de 2 a 8 pies (0.6 a 2.4 m) de diámetro y de 3 a 6 pies (0.9 a 1.8 m) de profundidad, y contienen de 30 a 180 ft³ (0.85 a 5.1 m³) de resina. Las razones de flujo a través de estas unidades van desde 1 a 50 gpm/ft² (40 a 2,000 lpm/m²) de área de sección transversal de cama de resina, y la caída de presión puede alcanzar hasta 25 psi (1.8 kg/cm²).

El sistema de cama mixta tiene una desventaja en el tiempo requerido de regeneración, el cual cubre la separación de dos tipos de resinas por flotación (haciendo uso de las diferencia de densidades), seguido de la transferencia a vasijas de regeneración individuales. Después de la regeneración, las resinas son mezcladas completamente y retornadas a la columna. En la Figura III-3b se muestran las capas de resinas catiónicas y aniónicas separadas, condición previa al proceso de regeneración. Algunos sistemas de camas mixtas se diseñan para permitir su regeneración en una sola vasija. Una ventaja del sistema de camas mixtas es que las reacciones de intercambio de cationes y aniones se llevan a cabo simultáneamente y los iones, son removidos de la resina (iones H⁺ y OH⁻), reaccionan con cada uno, lo que reduce la concentración electrolítica. El equilibrio iónico favorable que se alcanza en la columna, resulta una alta eficiencia de la columna (ver. Figura III-1).

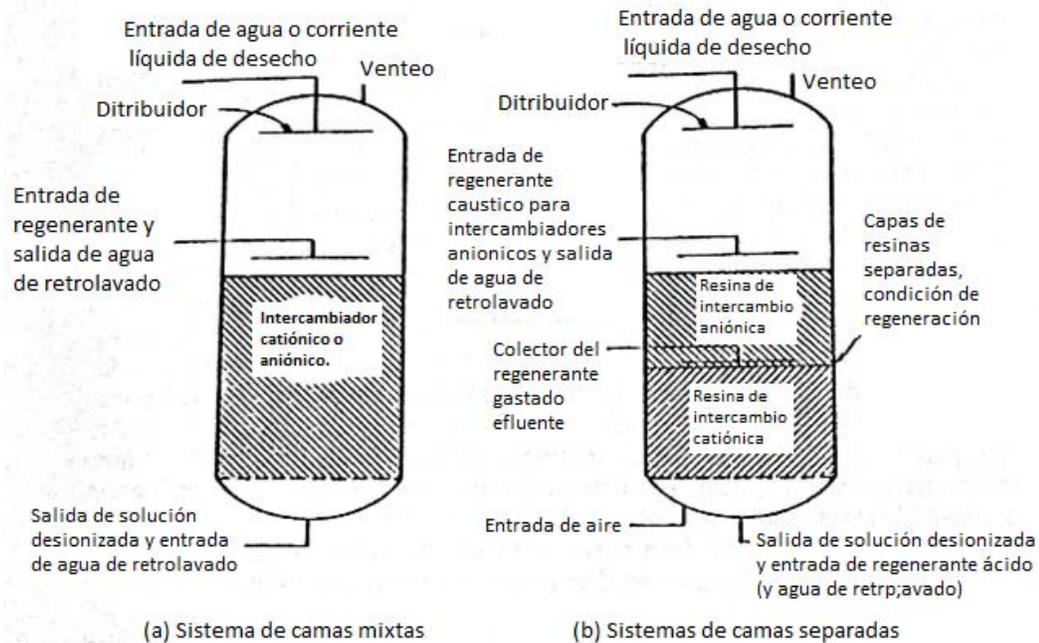


Figura III-3. Diagrama esquemático de sistemas de intercambio iónico de camas mixtas y camas separadas.

Para la remoción de ambos contaminantes, cationes y aniones, de la corriente de desecho líquido; algunas veces se hace uso de dos camas de intercambio iónico en serie, la cama catiónica por delante de la cama aniónica. El arreglo de camas separadas puede ser seleccionado para propósitos de remoción de radionúclidos específicos. El proceso de regeneración es más simple en una unidad de camas separadas que en una de camas mixtas.

El proceso de regeneración de camas de resinas de desechos radiactivos no es problema en la mayoría de las aplicaciones en la gestión de desechos radiactivos, ya que es práctica común desechar la cama hasta su agotamiento que regenerarla.

3.3. Filtración

La filtración se define como la separación de partículas sólidas suspendidas, no disueltas de un fluido mezclado mediante el paso de la mayor parte del fluido a través de una membrana que retiene los sólidos. La mezcla a ser separada se denomina lodo libre, el líquido que pasa a través de la membrana se denomina filtrado, y a la membrana se le denomina medio filtrante. Cuando los sólidos separados se acumulan en cantidades que se hace visible una cubierta en el medio filtrante, se les denomina capa del filtro. Los filtros seleccionados para el servicio en tratamiento de desechos radioactivos deben tener la capacidad de producir concentraciones de efluentes con un contenido menor a 1 ppm de insolubles¹⁵.

En Centrales Nucleoeléctricas enfriadas por agua ligera, las corrientes líquidas presentan varias cantidades de sólidos disueltos, más sólidos suspendidos con diferentes niveles de radiación asociados a ellos, dependiendo de su fuente generadora en el ciclo. Los productos de corrosión en la corriente del refrigerante se activan en los internos del núcleo del reactor, produciendo especies radioactivas como Co-58, Co-60, Mn-54, Cr-51, Ni-58 y Fe-59. La cuarta parte de los productos de corrosión activados (especialmente hierro y níquel) se presentan como sólidos en suspensión, y los productos de fisión se presentan principalmente como formas solubles. La concentración de sólidos suspendidos en las corrientes de un LWR varía desde unos pocos ppb en el sistema primario del reactor a 1500-2000 ppm, normalmente encontrados en las corrientes líquidas de drenaje de pisos, donde usualmente el promedio está entre 70-200 ppm. La Tabla III-2 ilustra la naturaleza de las partículas contaminantes en corrientes líquidas de un LWR, según se reporta en una encuesta pública.

¹⁵ Godbee, H. W., and Kibbey, A. H. "The use of Filtration to Treat radioactive Liquids in Light Water-cooled Nuclear Reactor Power Plant."NUREG/CR-0141, September 1978

Tabla III-2. Características típicas de sólidos suspendidos en corrientes líquidas de un LWR¹⁶

PWR's			
Corriente	Rango del tamaño de partícula, μm	Concentración de partículas, ppm	Tamaño deseado de part. a remover, μm
Refrigerante del reactor	1-22	0.01-1	>1-25
Agua de inyección de sellos	-	-	<5-10 (<0.005 ppm)
Alimentación de boro a evaporador	-	-	>25
Destilado de boro del evaporador	-	100	>25
Boro del evaporador	-	-	>2-75
Concentrados			
Misceláneos	-	250-1000	>1-25
Desechos líquidos			
Generador de vapor	-	-	>3-5
Purga			
BWR's			
Refrigerante del reactor	~10	0.01-5	-
Condensado	-	0.005-0.015	-
Desechos de alta pureza	-	3-200	-
Desechos de baja pureza	-	Normal, 70-500	-
		Periódica, 1500-2000	
Comunes/ PWR y BWR			
Alberca de combustible	-	10-300	>1-25
Desechos detergentes	-	100-200	>3-25

¹⁶ Idem

3.3.1. Tipos de filtros usados para desechos radioactivos líquidos

- I. Filtros desechables
- II. Filtros reutilizables
- III. Filtros de precapa
- IV. Filtros de cama plana
- V. Filtros centrífugos
- VI. Filtros metálicos
- VII. Filtros de disco
- VIII. Filtros electromagnéticos

3.3.2. Factores que afectan la selección y la operación de los filtros

La operación de un filtro se mide por:

1. su capacidad de remover y retener corrientes de sólidos contaminantes;
2. por la cantidad de desechos sólidos, líquidos y gaseosos que genera;
3. por la facilidad en su operación;
4. por los requerimientos de mantenimiento; y
5. por la exposición a la radiación que éste causa durante su operación y mantenimiento.

Los filtros usados en centrales nucleoelectricas son cambiados en la mayoría de los casos al alcanzar valores límites preestablecidos de caída de presión a través del elemento filtrante, o debido que la tasa de dosis de radiación (R/h) del filtro alcanza un valor límite superior preestablecido.

El factor de descontaminación, aunque es un factor para cuantificar el desempeño del filtro, comúnmente no es monitoreado, y muy

esporádicamente si a caso, se le considera un factor determinante para la finalización de un ciclo de filtración.

El grado de filtración requerido; la compatibilidad química del medio filtrante con el lodo que está siendo procesado; el peso, volumen y las distribución del tamaño de partícula de los sólidos a remover; y la concentración de sólidos suspendidos, volumen, razón de flujo, temperatura, y presión de la corriente a ser procesada, son los factores a considerar en la selección de un filtro.

Como se esperaría, el tamaño y la distribución del tamaño (i.e. la frecuencia de ocurrencia de la presencia de partículas de todos los tamaños), la forma, y las propiedades mecánicas de los sólidos suspendidos en un lodo a procesar afecta considerablemente la efectividad, con la cual varios medios filtrantes pueden atrapar y retener estos sólidos. Si todo los demás parámetros se fijan, partículas de mayor tamaño (grandes) son filtradas con mayor eficacia que las pequeñas; las partículas con una distribución de tamaño estrecha son más eficientes que aquellas con una amplia distribución; partículas en forma de esfera son más eficientes que partículas con forma de aguja o placa; y por último, partículas duras son más eficientes que las partículas suaves. Hay varios métodos disponibles para medir los parámetros de partículas. Los métodos pueden medir la longitud, masa, área presentada, área de superficie, o volumen. Hacer conversiones de datos entre un método y otro puede llevar a errores considerables. Para hacer comparaciones, los parámetros deben ser puestos en la misma base, por ejemplo, numero de distribución de tamaño.

La selección del medio filtrante representa un balance entre las características de desempeño del medio y el nivel de contaminante (sólidos suspendidos, en este caso) que el sistema agua abajo es capaz de permitir. A continuación se enlistan los atributos de un medio filtrante a considerar dependiendo del problema específico:

-
- (a).Habilidad para cerrar sus poros con sólidos, tan pronto la alimentación es iniciada (i.e. mínima inclinación de extracción)
 - (b).Resistencia para obstruir con partículas sus poros (i.e. mínima inclinación de taponamiento)
 - (c). Resistencia mínima para filtrar flujo (i.e. alta razón de producción con baja caída de presión)
 - (d). Resistencia a ataque químico
 - (e). Resistencia suficiente para soportar la presión de filtrado
 - (f). Resistencia aceptable para el desgaste mecánico
 - (g). Habilidad para descarga la capa fácilmente y con limpieza
 - (h). Habilidad de conformar mecánicamente con el tipo de filtro, con el cual será usado
 - (i). Costo mínimo

3.3.3. Proceso de filtrado tipo precapa

El proceso de filtrado de precapa es la remoción de partículas sólidas mediante el paso de un líquido a través de una capa delgada de material de apoyo del filtro, la cual ha sido depositada (colocada) en el medio filtrante antes del inicio del proceso de filtrado. La capa del material de apoyo del filtro protege el medio filtrante y proporciona una matriz más fina de filtrado para la remoción de partículas más pequeñas.

Comúnmente, el material de apoyo del filtro posee un gran número de poros microscópicos y laberintos para que el líquido fluya a través de él. Conforme los poros y los laberintos retienen sólidos, se van obstruyendo, limitando el número de poros y laberintos disponibles para el paso del líquido a través del material de apoyo. La caída de presión a través de la

capa incrementa según disminuye el número de laberintos disponibles. Cuando la caída de presión alcanza un valor predeterminado, el proceso de filtración es terminado.

Después de haber sido puesto fuera de servicio, la capa delgada de material de apoyo es removida, normalmente a través del retrolavado del filtro. Entonces, se deposita (coloca) una nueva capa en el medio filtrante, y el proceso de filtrado es reiniciado. Las Figuras III-4a, III-4b y III-4c muestran el proceso de precapa.

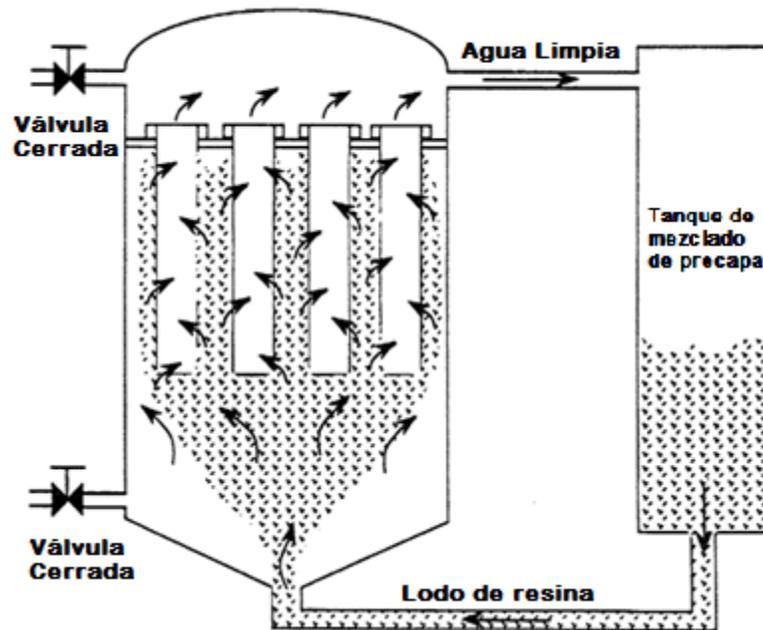


Figura III-4a. Aplicación del proceso de precapa al medio filtrante.

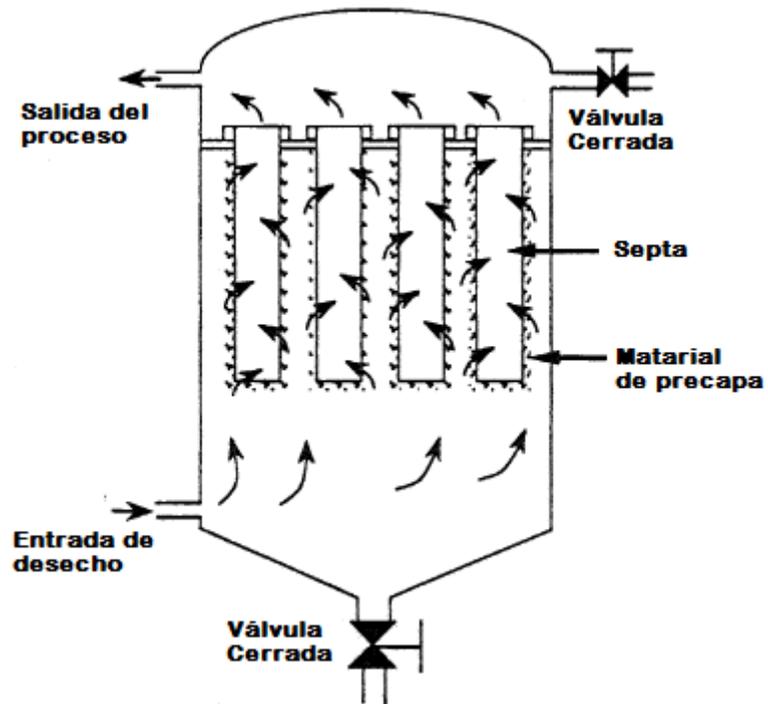


Figura III-4b. Uso de la precapa con el medio filtrante.

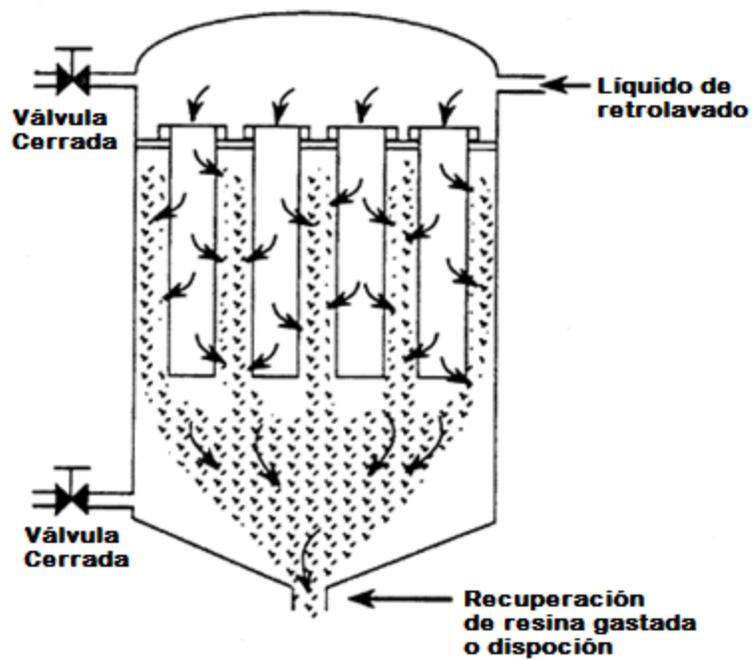


Figura III-4c. Remoción de la precapa para recuperación o disposición.

El proceso de filtración de precapa es usado comúnmente en reactores de agua en ebullición. Este proceso se usa en:

1. el sistema de limpieza de agua del reactor (RWCU);
2. el sistema de purificación de la alberca de combustible;
3. los subsistemas de drenes de equipo y piso del sistema de tratamiento de desecho líquidos; y
4. en muchas plantas, en el sistema de pulidores de condensado.

El proceso de filtración de precapa, en algunas Centrales, puede también ser utilizado en el sistema de limpieza del pozo caliente del condensador.

3.4. Evaporación

La evaporación es el proceso mediante el cual los componentes volátiles y no-volátiles (disueltos y no disueltos) de una solución o lodo son separados mediante la ebullición del componente volátil. Esta técnica es ampliamente aplicada en la industria nucleoelectrónica con fines de reducción de volumen y reducción de la cantidad de nucleidos radioactivos en el efluente líquido. La evaporación puede ser utilizada en soluciones o lodos que tengan una amplia diversidad de composición y concentración, sin embargo, la evaporación es más efectiva cuando se utilizan desechos líquidos radioactivos que tienen alta concentración de impurezas¹⁷.

3.4.1. Consideraciones generales en el diseño de evaporadores

Un evaporador es un equipo diseñado para transferir calor a un líquido que hierve y por lo tanto separar el vapor formado del líquido. La unidad o bloque de construcción en el cual se lleva a cabo la transferencia de calor se denomina el elemento de calentamiento, recalentador, o calandria. La unidad en donde se lleva a cabo la separación vapor-líquido se le llama cuerpo o cámara de flasheo. El término cuerpo también es usado para describir los mínimos componentes del bloque de construcción de un evaporador; es decir un elemento calentador y una cámara de flasheo. Un sistema evaporador de desechos radioactivos consiste básicamente en los siguientes bloques: un elemento calentador; una cámara de flasheo; uno o más accesorios para separar las gotas líquidas del vapor; un condensador para enfriar y convertir el vapor a líquido nuevamente; y bombas según se requiera para alimentar el sistema, para circular los contenidos cuando se hace uso de circulación forzada, y para descargar los líquidos concentrados o fondos.

¹⁷ Perry, R.H., and Clinton, C.H. (eds.). Chemical Engineers Handbook, 5th ed., 11-27 to 11-38. New York: McGraw-Hill, 1973

Las principales consideraciones de ingeniería involucradas en el diseño de un evaporador de desechos radioactivos son la transferencia de calor y separación vapor-líquido. Una operación confiable y libre de mantenimiento son factores importantes, los cuales deben ser tomados en consideración muy seriamente. La selección de materiales resistentes a la corrosión para la construcción y un diseño que minimice la pérdida de capacidad de transferencia de calor, debido a las películas o sólidos de baja conductividad térmica que se depositan en la superficie; son aspectos vitales para evitar problemas operacionales y de mantenimiento. Otros factores que afectan el diseño son la cantidad, a la cual la alimentación al evaporador es reducida en volumen y los costos totales de operación disminuyen.

3.4.2. Tipos de evaporadores

La circulación de un líquido a través de la superficie de calentamiento de un evaporador puede ser inducida por variaciones de densidades ocasionadas por la ebullición (circulación natural) o por medios mecánicos como una bomba (circulación forzada). El elemento calentador puede ser construido dentro del cuerpo del evaporador (calentador interno) o separado del cuerpo del evaporador (calentador externo). Los calentadores pueden ser verticales u horizontales, de tubos cortos o tubos largos.

3.4.2.1. Evaporador de desechos líquidos radiactivos concentrados

Los evaporadores de recirculación forzada han probado ser es el tipo más adecuado de evaporador para aplicaciones en tratamiento de desechos radiactivos y procesos nucleares. El uso de una bomba hace posible la separación de las funciones de transferencia de calor, separación vapor-líquido y cristalización. La bomba retira el líquido de la cámara de flasheo y forzándolo a pasar a través

elemento de calentamiento retornando a la cámara de flasheo. Debido a que la razón de flujo de recirculación es independiente de la razón de flujo de evaporación, este tipo de evaporador es muy adecuado para operaciones de cristalización en donde los sólidos se deben mantener en suspensión todo el tiempo. La velocidad del líquido a través de la superficie del calentador es limitada únicamente por la capacidad de bombeo requerida o disponible, y por la corrosión y erosión acelerada en altas velocidades. La velocidad del fluido a través de los tubos normalmente varía de un mínimo de aproximadamente 4 ft/sec (1.2 m/seg) en evaporadores que contienen 5% o más sólidos; hasta aproximadamente 10 ft/sec (3 m/seg) en evaporadores que contienen líquido con cantidades pequeñas de sólidos. Se puede hacer uso de velocidades mayores cuando la corrosión no es acelerada por erosión.

Los evaporadores de desechos radiactivos son diseñados para procesar una variedad extensa de corrientes de alimentación (entrada), con concentraciones de sólidos que varían normalmente de menos de 100 ppm a 2wt%.

Dentro de las dificultades más frecuentes en los evaporadores de recirculación forzada están: (a) obstrucción (taponamiento) de la entrada de los tubos por depósitos de sal desprendidos de las paredes internas del equipo; (b) baja recirculación causada por pérdidas por fricción mayores a las esperadas; (c) picaduras debido a la ebullición en los tubos; y (d) corrosión/erosión. Estos problemas pueden ser minimizados o eliminados con un diseño y operación adecuada.

Frecuentemente, los evaporadores de circulación forzada son de tipo tubos sumergidos, en donde el calentador está dispuesto lo suficientemente por debajo del nivel del líquido o la línea de retorno a la cámara de flasheo para prevenir la ebullición en los tubos. La

presión hidrostática debe ser la suficiente para evitar la ebullición, previniendo con esto picaduras en el tubo completo. Un orificio de restricción o caída de presión en la línea de retorno a la cámara de flasheo puede también prevenir la ebullición en los tubos; permitiendo con esto mayor flexibilidad en el arreglo del equipo en el edificio. Los evaporadores de este tipo tienen calentadores verticales u horizontales (comúnmente de dos pasos), pero el calentador vertical de un solo paso es usado siempre que se cuente con disponibilidad en la altura del cuarto. El elemento vertical requiere menos espacio de piso y es menos propenso a la acumulación de sedimentos que el calentador horizontal (Ver Figura III-5). Evaporadores de recirculación forzada del tipo de tubos sumergidos y/o orificio de restricción son normalmente inmunes a picaduras en los tubos, ya que no se alcanza condiciones de sobresaturación por evaporación en los tubos. También disminuye la tendencia al depósito de sedimentos en las paredes interiores. El incremento de temperatura a través del calentador, las dimensiones de los tubos, la velocidad del líquido en los tubos, y los requerimientos de carga de la bomba de recirculación; influyen la selección de la razón de flujo de circulación.

La Figura III-5 muestra el diseño de un evaporador que es típico de unidades de recirculación forzada. Como se puede ver, este diseño se caracteriza por una cámara de flasheo extensa con un fondo inclinado o cónico, un recalentador vertical externo, y un dispositivo mecánico de remoción seguido de una torre de destilación. Cuando la recirculación forzada es combinada con un fondo cónico, los sólidos no disueltos en el evaporador pueden mantenerse en suspensión mediante un flujo elevado de circulación. Durante la remoción de concentrados por la bomba, el recalentador de la bomba se mantiene en operación. El resultado es una reducción en la acumulación de sólidos radioactivos en el fondo de la vasija del evaporador.

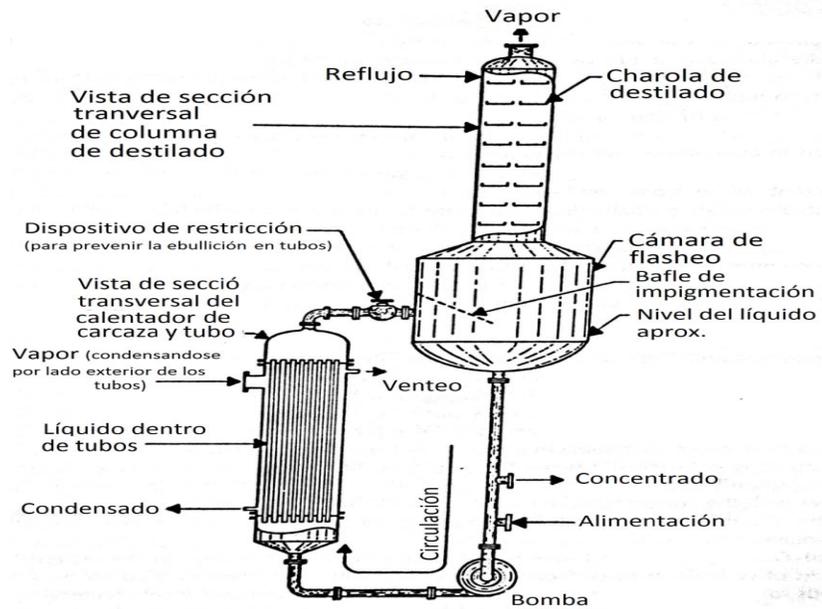


Figura III-5. Evaporador de recirculación forzada con un calentador de un paso vertical externo y un dispositivo de restricción para prevenir la ebullición en los tubos.

Un diseño de recirculación forzada denominado evaporador-cristalizador se ha venido utilizando en años recientes para el servicio de desechos radiactivos. Este dispositivo es esencialmente el mismo que un evaporador, pero diseñado para concentrar aproximadamente el 50wt% de sólidos en los fondos. Este evaporador es capaz de hacer circular líquido con sólidos en suspensión a través del circuito bomba-recalentador. La ventaja es que a mayor concentración en los fondos resulta en un menor volumen de desecho a solidificar, colocar en contenedor y disponer. Por otro lado, requiere mayor cuidado en la operación para prevenir problemas de ensuciamiento del evaporador y taponamiento; o problemas de transporte de lodos, de almacenamiento y de proceso aguas abajo del evaporador.

Hay varios modos para operar un evaporador: por lotes, por semi-lotes y en continuo. En una operación por lotes, el evaporador contiene inicialmente la cantidad total de líquido a ser procesado. Una operación por semi-lotes, más común en el tratamiento de desechos radiactivos, la alimentación es continua para mantener un nivel constante en el evaporado hasta que la carga completa alcanza la densidad final para ser dispuesta en un contenedor cilíndrico en el sistema de desechos radiactivos sólidos. En una operación continua, los flujos de alimentación y del producto (fondos y destilado) se mantienen constantes; la operación es en estado estable.

Se ha recomendado un procedimiento de operación en base a semi-lotes, el cual ofrece algunas ventajas respecto a los métodos mencionados anteriormente. La alimentación sería adicionada sin descarga de fondos hasta que la concentración en el evaporador alcance aproximadamente la mitad de la concentración final deseada. Entonces, la alimentación sería detenida mientras que el proceso de evaporación continúa hasta que se logra obtener la concentración final. El último paso para alcanzar la concentración final es relativamente corto. El contenido total sería descargado para posteriormente ser procesado y solidificado; y el evaporador llenado inmediatamente con agua o alimentación diluida para prevenir depósitos de material en las paredes y tuberías.

Las ventajas de este modo de operación son:

- (a). El periodo de tiempo durante el cual la solución “más” concentrada está en la unidad se minimiza considerablemente, reduciendo el potencial de corrosión, ensuciamiento y obstrucción (taponamiento) de tubos.
- (b). La reducción final y la descarga es llevada cabo durante un periodo de tiempo corto y puede ser monitoreado con

precaución tal que las concentraciones designadas no son excedidas. Se puede disponer de supervisión extra durante esta etapa crítica para minimizar los problemas operativos.

3.5. Ósmosis Inversa

3.5.1. Principios de osmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso que se lleva a cabo por medio de una membrana la cual actúa como filtro molecular que remueve hasta un 99% de todos los minerales disueltos, bacterias, partículas y orgánicos mayores a una masa molecular de 300.

En la ósmosis inversa se lleva a cabo una filtración cruzada, es decir se tiene una alimentación y dos corrientes de salida; el producto (el agua pura) y el rechazo donde se concentran todas las impurezas presentes en el agua, las cuales son rechazadas por la membrana y enviadas a drenaje, para lograr esto se utiliza una membrana semipermeable que separa un alto porcentaje de las moléculas no deseadas, de tal forma que se producen dos corrientes una libre de sales e impurezas llamada permeado y otra con todos los materiales que han sido removidos llamada concentrado.

Una de las ventajas del proceso de ósmosis inversa es que al ser un proceso mecánico no se requieren altos consumos de químicos para su operación además de ser un proceso continuo en su operación, produciendo agua con un bajo nivel de sales, libre de dureza, bacterias, pirógenos, virus, coloides, etc., además de que el rechazo del equipo de ósmosis inversa puede ser descargado libremente debido a que a éste no se le agrega ningún contaminante, sino que únicamente concentra las sales ya presentes en el agua.

La parte principal de un sistema de ósmosis inversa son sus membranas, por lo que la calidad, vida útil y desempeño de éstas son fundamentales para una operación eficiente y libre de problemas, las membranas

instaladas son las de más alta calidad en el mercado ya que por su configuración de fabricación ofrecen un muy alto porcentaje de rechazo de sales.

El agua es bombeada al contenedor de la membrana semi-permeable por una bomba de alta presión. El producto es expulsado del sistema a una presión atmosférica. Los sólidos disueltos rechazados por la membrana son sacados continuamente del sistema a través de una válvula reguladora.

Las unidades de ósmosis inversa estándar son diseñadas para producir agua de alta calidad. Los diseños están basados en los siguientes factores:

- i. TDS (sólidos disueltos totales)
- ii. Temperatura de operación de 25°C

Cambios en estos factores pueden tener un efecto considerable en la operación eficiente del sistema. Varios factores influyen en la operación de un módulo de ósmosis inversa. La **Tabla III-3** muestra el efecto de esos factores cuando cambian las condiciones de operación.

Tabla III-3. Factores de operación de ósmosis inversa

Factor	Acción	Productividad	Calidad producto
Presión aplicada	Adecuada	Incrementa	Incrementa
	Muy baja	Baja	Baja
Temperatura de alimentación	Adecuada	Incrementa	Baja
	Muy baja	Baja	Incrementa
Presión del producto	Adecuada	Baja	Baja
	Muy baja	Incrementa	Incrementa
SDI alimentación	Adecuada	Baja	Baja
	Muy baja	Incrementa	Incrementa
% conversión	Adecuada	Baja	Baja
	Muy baja	Incrementa	Incrementa

Dos términos comúnmente usados en la descripción de sistemas de ósmosis inversa son “rechazo de sales” y “conversión”. La cantidad de sólidos totales disueltos rechazados por la membrana es llamada “rechazo de sales” y es expresada como porcentaje. Un 99% de flujo rechazado significa que el 99% de sólidos disueltos en el agua serán rechazados por la membrana. Para calcular el % de rechazo, use la siguiente ecuación:

$$\% \text{rechazo} = \frac{\text{Alimentación TDS} - \text{Producto TDS}}{\text{Alimentación TDS}} \times 100$$

Donde “Alimentación TDS” es el total de sólidos disueltos presentes en el agua a tratar, y “Producto TDS” es el total de sólidos disueltos presentes en el agua fresca.

La cantidad de agua recuperada como porcentaje del agua alimentada dentro de la unidad de tratamiento de ósmosis inversa es llamado % de recuperación o conversión. Para calcular el % de recuperación, se hace uso de la siguiente ecuación:

$$\% \text{recuperación} = \frac{\text{Flujo de Agua producto}}{\text{Flujo de Agua alimentada}} \times 100$$

El flujo de agua alimentada es igual al flujo de agua producto más el flujo de rechazo, los cuales pueden medirse fácilmente.

La cantidad de sales rechazadas por la membrana semi-permeable es proporcional a la concentración de TDS del agua alimentada, pero es independiente a la presión aplicada. Sin embargo, la velocidad del agua producto es proporcional a la presión aplicada a la membrana. Un incremento de presión en operación elevará la velocidad del flujo de agua producto sin afectar el rechazo de sales. Por lo tanto, una mayor aplicación de presión da como resultado una mejor calidad de agua y una

productividad mayor. Esto es deseable cuando se opera a altas conversiones con el fin de abatir costos de operación en el sistema.

3.5.2. Membrana de ósmosis inversa

El agua alimentada a presión entra al contenedor la membrana y fluye a través de los canales entre las paredes en espiral del primer módulo. Parte del agua alimentada es permeada pasando a través del camino en espiral de 2,000 amstrong de espesor colectándose en el tubo central del módulo. El agua sobrante continua viajando por las capas en espiral, a lo largo del módulo. Esto continúa después en el siguiente contenedor donde se repite el proceso. El producto que sale de cada contenedor es colectado en un tubo común del sistema. El agua alimentada llega a ser más concentrada al paso de cada módulo y sale del contenedor como concentrado.

3.6. Recombinación de hidrógeno-oxígeno

La recombinación de hidrógeno y oxígeno se lleva a cabo mediante el uso de un catalizador tipo platino/paladio con una base metálica o cerámica. El hidrógeno en el aire del offgas es diluido para mantener su concentración menor al 4% en volumen (menor al límite de flamabilidad) y para prevenir temperaturas excesivas post-reacción en el recombinador. Ya que la operación del recombinador es afectada negativamente por la humedad, se usa un precalentador aguas arriba del recombinador para secar el gas de entrada y elevar su temperatura a 308 °F (190 °C) aproximadamente. Una curva típica de la operación de un recombinador de offgas de un reactor de agua en ebullición se muestra en la Figura III-6¹⁸, en la cual se puede apreciar que la concentración de hidrogeno en el efluente disminuye si se aumenta la temperatura de entrada. El desempeño del recombinador también depende de la concentración de hidrogeno en el flujo de

¹⁸ [6] Larlee, W.D. "Recombiners for Nuclear Power Generation." Darien, Connecticut: Air Correction Division, Universal Oil Products Company

entrada y de las entradas de aire. A valores de concentración del 2% de hidrogeno por volumen en el gas de entrada, la concentración del efluente cae aproximadamente a 0% y mantiene este nivel a concentraciones de entrada de diseño de 4% de hidrogeno por volumen. La completés de la reacción de recombinación dependerá de la cantidad de exceso de hidrogeno presente. En un reactor de agua en ebullición, las entradas de aire al condensador principal son la única fuente de exceso de hidrogeno; por lo que, si la entrada de aire es mínima el tamaño de la cama catalizadora del recombinador tendrá que ser aumentada para reponer la pérdida de eficiencia a bajas tasas de flujo de aire. Para compensar bajas tasas de entrada de aire, algunos sistemas de offgas han incorporado un suministro de aire de 6 scfm ó 0.17 m³/min (a condiciones estándar de presión y temperatura) suministrado a través del sistema de aire de instrumentos.

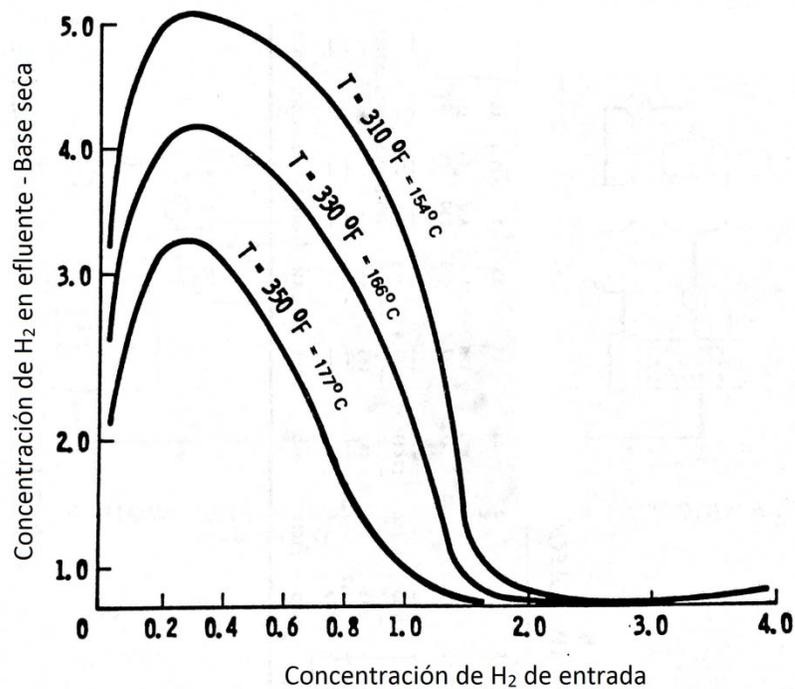


Figura III-6. Datos del desempeño de un recombinar catalítico, en donde se muestra la relación entre concentraciones de H₂ en la entrada y en el efluente en función de la temperatura.

La energía desalojada por la reacción del hidrogeno y oxigeno resultará en un incremento de temperatura de 125 °F (70 °C) por cada 1% de hidrogeno en el gas de entrada. Para una concentración de hidrogeno de 4% de volumen y una temperatura de entrada de 380 °F (190 °C), la temperatura del efluente será aproximadamente de 880 °F (470 °C). En un reactor de agua en ebullición, el gas a la salida del recombinador será esencialmente vapor, consistiendo en el vapor de entrada más el vapor de agua resultado de la recombinación del hidrogeno y oxígeno.

A presiones típicas de operación del sistema de 5 psig (0.35 kg/cm²), el gas será sobrecalentado a 600 °F (315 °C). El condensador del offgas debe ser capaz de sobrecalentar y condensar el vapor de la mezcla, subenfriar el condensado, y enfriar el aire a descargar. El agua de enfriamiento para el condensador del offgas debe tener un contenido bajo de sólidos disueltos para prevenir acumulación de material depositado en los tubos del condensador del offgas. Debido a que la razón de flujo de vapor es normalmente alrededor de 5.5 ton/h (5,400 kg/h), esta fuente puede representar una contribución mayor al sistema de desechos radiactivos. El condensado, el cual incluye el vapor de dilución y el agua formada por la recombinación del hidrogeno y el oxígeno, es dirigido de regreso al condensador principal para mantener el inventario del refrigerante primario, reduciendo el flujo hacia el sistema de desechos radiactivos, y minimizando los accidentes potenciales por liberaciones accidentales de las válvulas de drenaje que pudiesen atascarse en su posición abierta. La Figura III-7 muestra un diagrama de flujo típico de la sección de recombinación hidrogeno-oxígeno en el sistema offgas de un BWR. La Tabla III-4 lista las razones de flujo del gas, temperaturas y presiones correspondientes a un sistema típico con un flujo de vapor de dilución de 12,000 lb/hr (5,400 kg/h). Los puntos de flujo presentados en la Tabla III-4 corresponden a los mostrados en la Figura III-7.

Tabla III-4. Parámetros de flujo para un sistema de offgas típico de un BWR (3800 MWt) - Operación normal

Ubicación (punto #)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temperatura (°F)	135	353	290	165	353	290	165	353	320
Presión (psia)	1.2	140	5.0	4.7	140	15.0	14.7	140	19.0
Flujo, lbm/hr	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ O (vapor)	700	19700	2040	490	10000	10500	1290	12000	12000
H ₂ O (agua)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Aire	183	-	183	183	-	183	183	-	183
H ₂	47.7	-	47.7	47.7	-	47.7	47.7	-	47.7
O ₂	379	-	379	379	-	379	379	-	379
Total	1,310	19700	21000	1100	10000	11100	1900	12000	12610

Tabla III-4. (Continuación)

Ubicación (punto #)	10	11	12	13	14	15	16	17
Temperatura (°F)	380	880	120	401	401	95	120	120
Presión (psia)	18.3	17.9	17.6	250	250	70	70	17.6
Flujo, lbm/hr	-	-	-	-	-	-	-	-
H ₂ O (vapor)	12000	12427	14.9	840	-	-	-	-
H ₂ O (agua)	-	-	-	-	840	640000	640000	12412
Aire	183	183	183	-	-	-	-	-
H ₂	47.7	-	-	-	-	-	-	-
O ₂	379	-	-	-	-	-	-	-
Total	12610	12610	198	840	840	640000	640000	12412

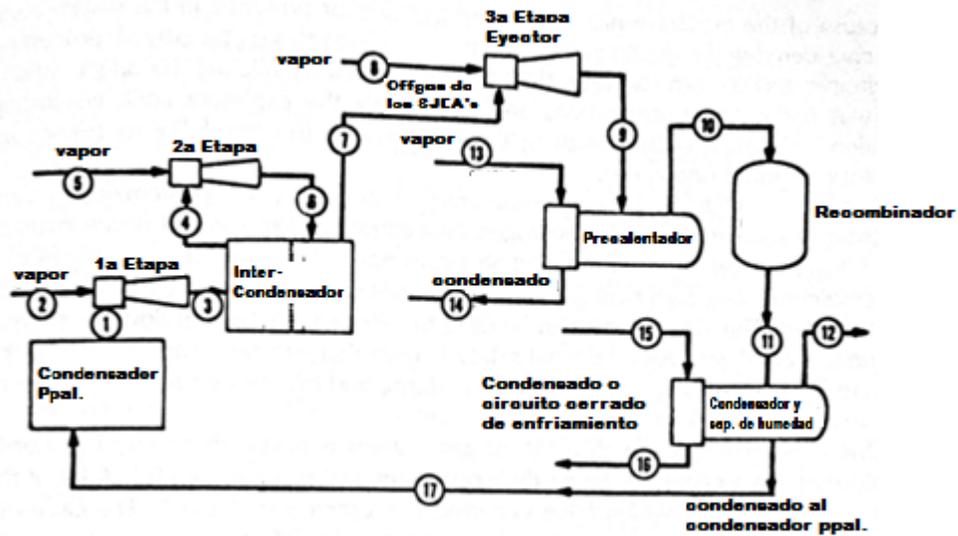


Figura III-7. Flujo del proceso de recombinación de hidrógeno y oxígeno en un sistema de offgas de un BWR.

Si en el flujo de vapor a través de los SJAE se pierde temporalmente mientras el reactor continúa en operación a potencia nominal, el hidrógeno y el oxígeno se incrementarían en el condensador hasta que la presión del condensador alcance el punto de ajuste de disparo por alta presión o se tomen las acciones manuales para iniciar el apagado del reactor. Por lo anterior y hasta el arranque del sistema offgas, los flujos de hidrógeno y oxígeno serán mayores que en condiciones de operación normal, resultando en un incremento en temperatura mayor de lo normal a través del recombinador. Las temperaturas excesivas en el recombinador pueden ser evitadas mediante el uso de sensores de temperatura en el recombinador para iniciar la disminución de la razón de flujo de offgas. Eso se puede llevar cabo regulando el flujo del condensador a los SJAE, aunque esto resultaría en un aumento del tiempo requerido para arrancar la unidad.

Para reducir los requerimientos de vapor de dilución del offgas en los SJAE, varios sistemas han incorporado una línea de recirculación de aire. El flujo de aire del condensador del offgas es retornado a la entrada del compresor jet. Una porción menor de aire proporcional a las entradas de aire en el Condensador se descarga

en una porción del sistema aguas abajo. Con un sistema de recirculación de aire, las razones de flujo en condiciones nominales pueden reducirse un 50%, es decir, a 2.2-2.7 ton/hr (2,250-2,700 kg/hr). Sin embargo, la disminución en el consumo de vapor debe ser comprada el costo capital mayor que representan componentes más extensos. En un sistema de recirculación de aire, se extrae aire del lazo de recirculación a la misma razón que éste entra. Un desbalance en el flujo de aire causa un transitorio de presión que podría interrumpir temporalmente la operación del sistema. El material catalítico utilizado en el recombinador de un sistema de recirculación de aire no debe estar sujeto a ensuciamiento por polvo, debido a que la experiencia ha mostrado que el polvo puede ser transportado agua arriba del recombinador, depositándose y causando problemas de detonación de hidrogeno.

3.7. Absorción de gases nobles

El sistema de absorción a través de carbón activado hace uso de la absorción dinámica de kriptón y xenón para remover estos gases radiactivos del gas de proceso, previo a su liberación controlada al ambiente. Después de salir de la porción del recombinador del sistema, el gas puede entrar a una línea de retardo de 10 min para permitir el decaimiento de los productos de fisión con vida media corta, o puede como alternativa, pasar a través de una cama de carbón de activado, la cual retendrá los gases productos de fisión el tiempo suficiente para remover aquellos gases con vidas medias cortas. Para incrementar la eficiencia de adsorción del carbón, se extrae cualquier porción de agua-vapor que viaje con el gas por medio de un subsistema de remoción de humedad. El carbón está contenido en varios tanques (vasijas) operados en serie, agua abajo del equipo de remoción de humedad. La Figura III-8 muestra el esquema de un arreglo típico de adsorbedores de carbón en un BWR.

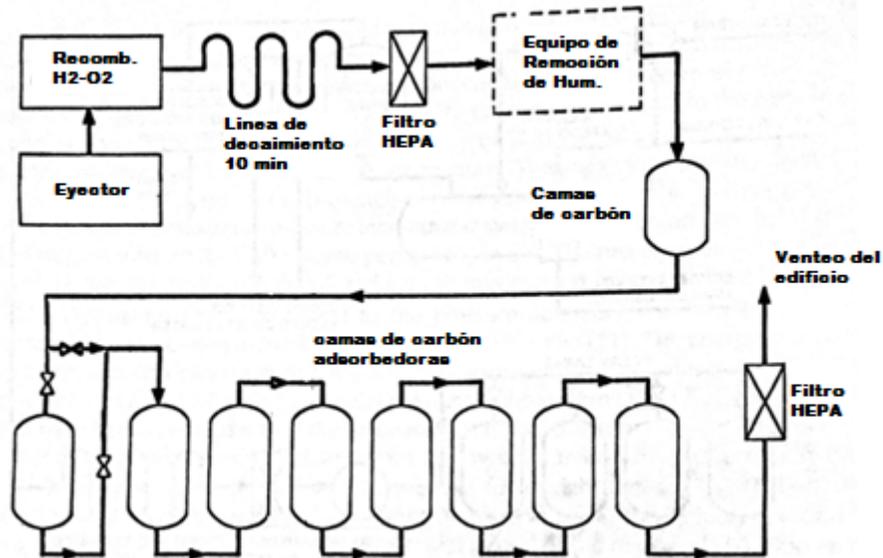


Figura III-8. Flujo de un sistema de adsorción por carbón usado para limpiar el offgas en un BWR.

Los grandes flujos de gas de proceso junto con su sistema de tratamiento asociado, y los costos elevados de construcción cuando se requiere que el flujo completo de entrada de aire sea almacenado el tiempo necesario para lograr el decaimiento requerido; conllevan a investigar a detalle los medios para la remoción del kriptón y xenón de la corriente de entrada de aire. Datos experimentales indican que el carbón puede ser utilizado para esta función, ya que muestra una adsorción dinámica de ambos gases nobles. El tiempo de retención requerido (eficiencia de remoción), de un lecho de carbón está en función de la tasa de flujo del gas, masa de carbón, y el coeficiente de absorción K . El valor de K depende de la concentración de los gases productos de fisión, la presión de operación del sistema, la temperatura de operación del sistema, y el contenido de humedad del carbón. A continuación se proporciona una ecuación¹⁹ usada para la determinación de los tiempos de retención de lechos de carbón:

¹⁹ Ackley, R.D., Adams, R.E., and Browing, W.E., Jr. "The Disposal of Radioactive Fission Gases by Absorption." CF-59-6-47. Oak Ridge, Tennessee: Oak Ridge National Lab., 1959 / Directorate of Regulatory Standards, U.S. Atomic Energy Commission. 1973 Final Environmental Statement Concerning Proposed Rule Making Action: "Numerical Guides for Design Objectives and Limiting Conditions for Operation to Meet the Criterion 'As Low as Practible' for Radioactive Material in LWR Nuclear Power Reactor Effluents." WASH-1258. Vol. 2, p. B-61. July

$$T = 0.53 \frac{MK}{P} \quad [\text{Ec. (1)}]$$

ó

$$T = 0.0165 \frac{MK}{P} \quad [\text{Ec. (2)}]$$

Donde

- T = Tiempo de retención, h
M = Masa de carbón (absorbedor), toneladas (2000 lb) [Ec. (1)] o toneladas métricas (1000 kg) [Ec. (2)]
K = Coeficiente de absorción dinámica, cm³/gr
F = Flujo de gas, scfm, [Ec. (1)] ó m³/min [Ec. (2)]

En la Figura III-9 se muestran valores de coeficientes dinámicos de absorción obtenidos de pruebas de laboratorio y datos de operación de equipo²⁰.

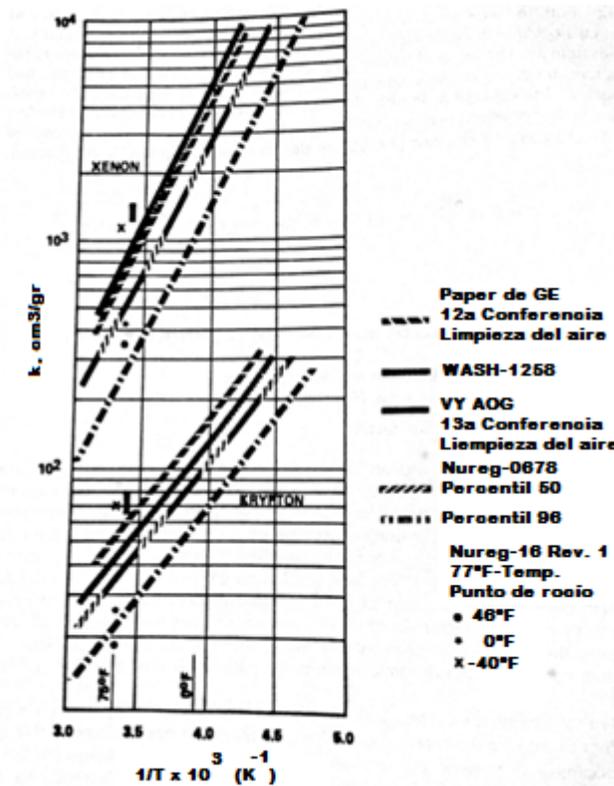


Figura III-9. Coeficiente de absorción dinámica de kriptón y xenón en carbón, en función de la temperatura

²⁰ Idem

Como se muestra en la Figura III-9 el coeficiente dinámico de absorción está en función de la temperatura. Una disminución de la temperatura de operación aumenta el coeficiente de absorción, reduciendo el volumen de carbón requerido para alcanzar un tiempo de retención específico. En base a los datos de la Figura III-9, una reducción de la temperatura del lecho de temperatura ambiente a 0 °F (-18 °C), aumenta el coeficiente de absorción por un factor de 3 y por lo tanto reduce el volumen requerido de carbón por el mismo factor. La remoción de vapor de agua de la corriente de offgas también aumenta la capacidad del carbón para remover gases productos de fisión. El efecto del contenido de humedad sobre el coeficiente de absorción se muestra en las Figuras III-10 y III-11²¹.

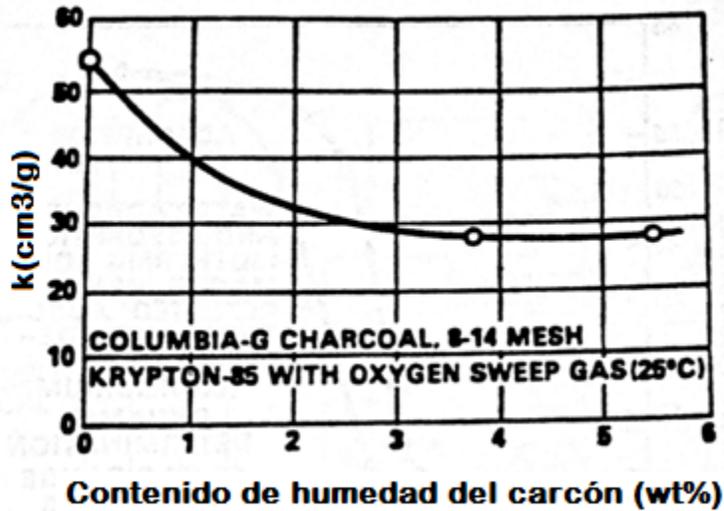


Figura III-10. Efecto del contenido de humedad en el coeficiente de absorción dinámica.

²¹ Ackley, R. D., Adams, R. E., and Browning, W.E., Jr. "The Disposal of Radiactive Fission Gases by Adsorption." CF-59-6-47. Oak Ridge, Tennessee: ORNL, 1959

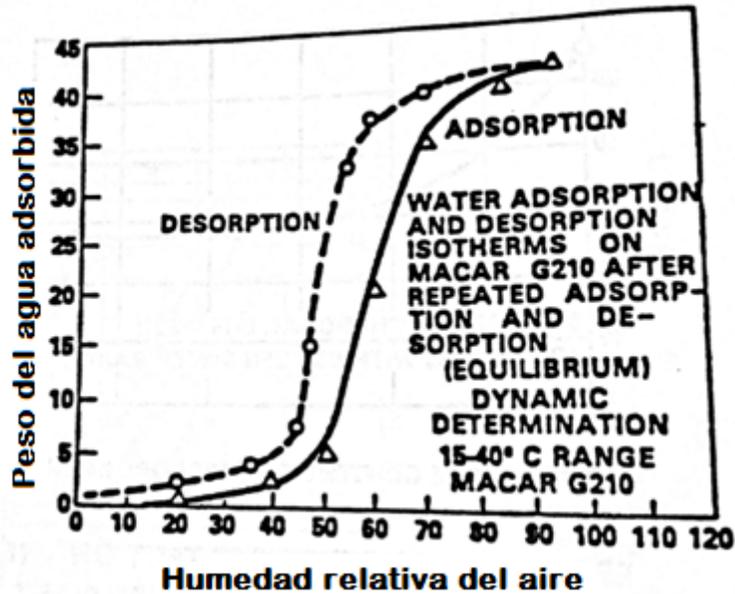


Figura III-11. Humedad del carbón en función de la humedad relativa.

Un esquema típico de un sistema refrigerado de absorción de carbón se presenta en la Figura III-12. Antes de entrar al lecho de carbón, la corriente de offgas es procesada a través de un secador para retirar el vapor de agua el cual de otra manera se congelaría a un valor nominal de 0 °F. La temperatura de la bóveda de 0 °F es mantenida por una unidad de refrigeración mecánica la cual también enfría a la corriente de gas de entrada. El gas enfriado entra a los lechos de carbón en donde el kriptón y xenón son removidos antes de la descarga de la corriente del gas. Los factores de reducción de la dosis fuera de sitio para un sistema refrigerado de lechos de carbón pueden ser aumentados tanto como sea necesario mediante la adición de más carbón. El sistema tiene la ventaja de factores de reducción de dosis mayores, comparado con su bajo costo capital y requerimientos de espacio menores. Las utilidades obtenidas de volúmenes de carbón menores deben ponerse en balance contra los costos adicionales por el equipo de refrigeración y aislamiento para la unidad de carbón²².

²² Stewart, J.E. and Desai, A.M. "Offgas System Optimization." In Cosmodyne, ASME Technical Paper 74-WA/NE-6. New York: ASME, 1974

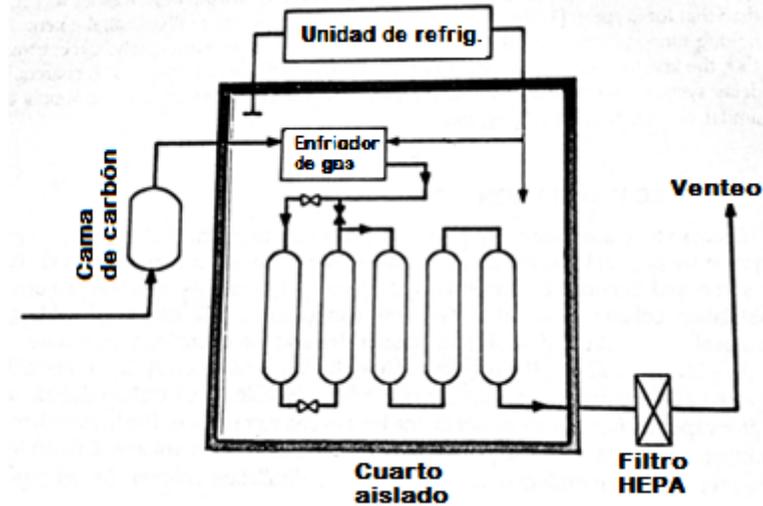


Figura III-12. Sistema de carbón refrigerado para la limpieza del offgas en un BWR

Los sistemas de absorción de carbón tienen diferentes tiempos de retención para el kriptón y xenón; ya que el coeficiente de absorción dinámica del xenón es aproximadamente 18 veces mayor que el del kriptón. Para una cantidad de carbón fija, el tiempo de retención del xenón es 18 veces mayor al del kriptón. Los isotopos de kriptón tienen vidas medias más cortas que los isotopos de xenón, excepto por el kriptón 85. Un sistema de retención de carbón que proporciona reducciones de dosis para el xenón satisfactorias, también proporcionara la misma reducción de dosis para el kriptón.

4. Descripción de los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos

4.1. Sistemas de tratamiento de desechos radiactivos gaseosos

4.1.1. Introducción

El sistema de tratamiento de desechos gaseosos comúnmente denominado offgas, forma parte del grupo de sistemas de tratamiento de desechos radiactivos de un reactor de agua en ebullición.

El sistema offgas está diseñado para permitir el decaimiento de los productos radiactivos gaseosos extraídos del condensador principal antes de ser descargados a la atmósfera.

Los gases incondensables son extraídos del condensador principal por medio de los eyectores, tras un precalentamiento son introducidos en el recombinador catalítico, donde se recombinan el H_2 y O_2 radiolíticos, formando vapor de agua. Posteriormente pasan a través de un intercondensador en donde se separa el vapor de agua en forma de condensado, y los gases incondensables son enviados a los tanques de decaimiento o retardadores, donde se produce el decaimiento de una parte de los productos radiactivos.

Los gases son pasados por un filtro de alta eficiencia y, enfriados en un enfriador-condensador, pasando al separador de humedad. Los gases, siguiendo la trayectoria de flujo, son enviados a través de un secador donde se elimina el resto de humedad contenida en la mezcla, disminuyendo su punto rocío, y posteriormente pasan por los preenfriadores para reducir su temperatura a $17.8^{\circ}C$ ($0^{\circ}F$) antes de entrar a los lechos de carbón activado, donde se adsorben y retardan selectiva y dinámicamente los productos radiactivos de la corriente gaseosa.

Después de pasar por los lechos de carbón activado, los gases son calentados a la temperatura ambiente para evitar condensaciones, después son pasados a través de un nuevo filtro de partículas de alta eficiencia y descargados al venteo principal de la planta, donde se monitorea su actividad con el fin de conocer las condiciones en que salen.

4.1.2. Funciones del offgas

El offgas minimiza y controla la liberación de gases radiactivos, retardando el paso de los isótopos radiactivos, principalmente kriptones, xenones, yodos (gases de fisión), N-13, N-16, O-19 y F-18 (gases de activación) lo suficiente para hacerlos decaer antes de descargarlos a la atmósfera. Además de recombinar el hidrógeno radiolítico para reducir los riesgos potenciales de explosión.

4.1.3. Criterios de diseño

4.1.3.1. Criterios de diseño funcionales

El sistema offgas está diseñado para limitar la liberación de partículas radiactivas fuera de la Central de acuerdo con el Apéndice I del 10CFR50²³, y bajo los límites del 10CFR20²⁴ durante operaciones imprevistas.

El sistema offgas se diseña bajo el criterio ALARA²⁵. La descarga de los desechos tratados se controla y monitorea para asegurar que cualquier

²³ Parte 50 del 10CFR "Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities"

²⁴ Parte 20 del 10CFR "Standards for Protection Against Radiation"

²⁵ ALARA (As Low As Reasonably Achievable): 'tan bajo como sea razonablemente alcanzable'; criterio general que tanto la Comisión Internacional de Protección Radiológica (International Commission on Radiological Protection, ICRP) como los organismos reguladores nacionales imponen a los explotadores de las instalaciones nucleares y radiactivas para que controlen el funcionamiento de sus instalaciones, de forma que los niveles de radiactividad se mantengan tan bajos como sea razonablemente

descarga sea tan baja como razonablemente sea posible. El sistema es capaz de proporcionar un periodo de retención de 10 minutos a los gases radiactivos para reducir la razón de dosis de radionúclidos de vida media corta. Además de proporcionar 22 horas de retardo a los isótopos de kriptón y 21 días de retardo a los isótopos de xenón en los lechos de carbón activado.

El sistema de tratamiento de desechos gaseosos está diseñado para controlar, coleccionar, procesar, manejar, almacenar y disponer los desechos radiactivos gaseosos generados de la operación normal de la planta. El offgas opera en forma continua y redundante en todas sus funciones y en todos los componentes del proceso donde la probabilidad de falla sea significativa.

Permite el mantenimiento de los componentes del tren en reserva mientras que el otro tren continúa operando. Así como también el sistema y el blindaje del sistema minimizan la exposición del personal a la radiación.

4.1.3.2. Criterios de diseño de seguridad

De acuerdo al Apéndice I del 10CFR50, el sistema offgas debe contar con las características de diseño adecuadas para:

- a) La cantidad anual calculada de los materiales radiactivos liberados a la atmósfera no será superior a 10 milirads de radiación gamma o de 20 milirads de radiación beta.

alcanzable. El criterio establece que deben evitarse todas las exposiciones no justificadas de las personas, y mantener tan bajas y alejadas de los límites fijados por el organismo regulador como sea posible las exposiciones justificadas, tomando en consideración el estado de la tecnología, así como los factores económicos y sociales que pueden intervenir en toda irradiación (el término original era "As Low As Practicable", ALARP)

-
- b) La cantidad anual calculada del yodo y material radiactivo liberado a la atmósfera no será superior en todos los tipos de exposición a 15 milirads en cualquier órgano.

Las concentraciones de materiales radiactivos de efluentes gaseosos liberados durante operación, hacia áreas no restringidas, no excederá los límites establecidos en la Tabla II del Apéndice B del 10CFR20.

El cumplimiento con estos criterios asegura la no afectación al público y medio ambiente, mediante el tratamiento de los desechos radiactivos gaseosos.

4.1.4. Descripción del sistema offgas

Los gases incondensables son extraídos continuamente del condensador principal mediante los eyectores de aire durante la operación normal de la Central (ver Figuras IV-1, 2 y 3).

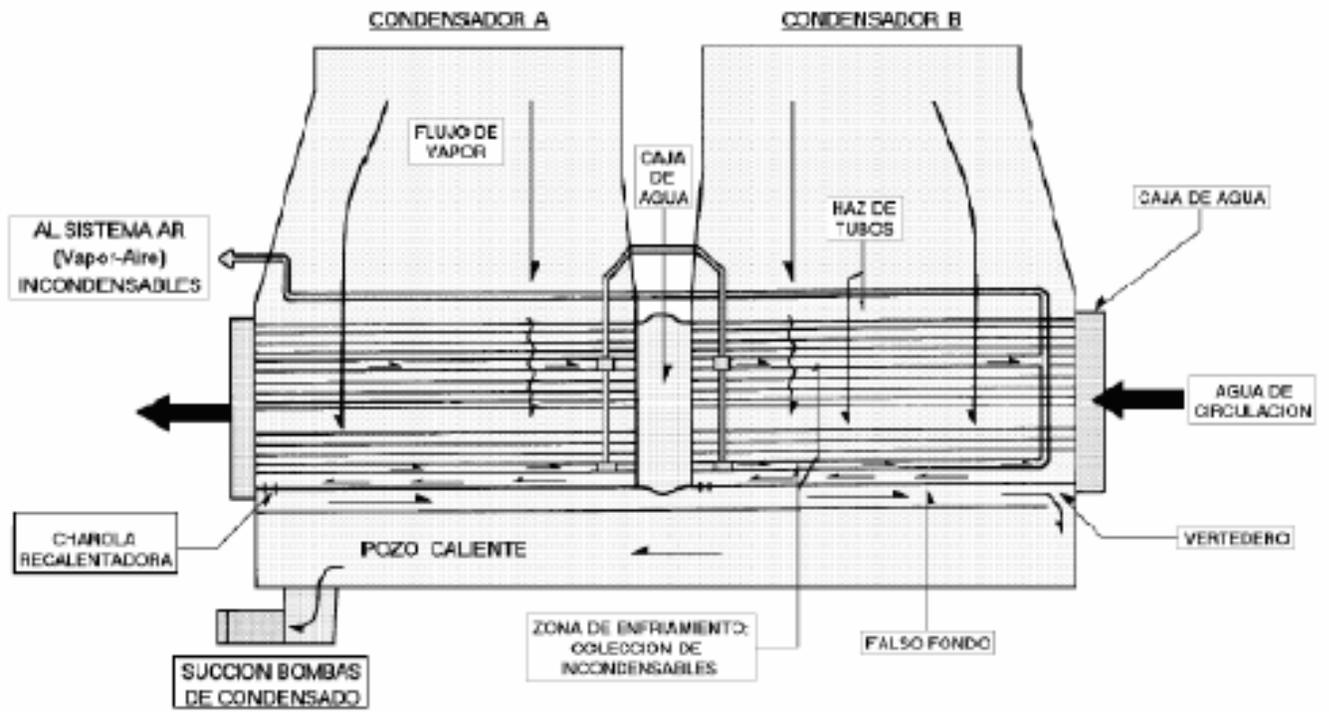


Figura IV-1. Condensador principal

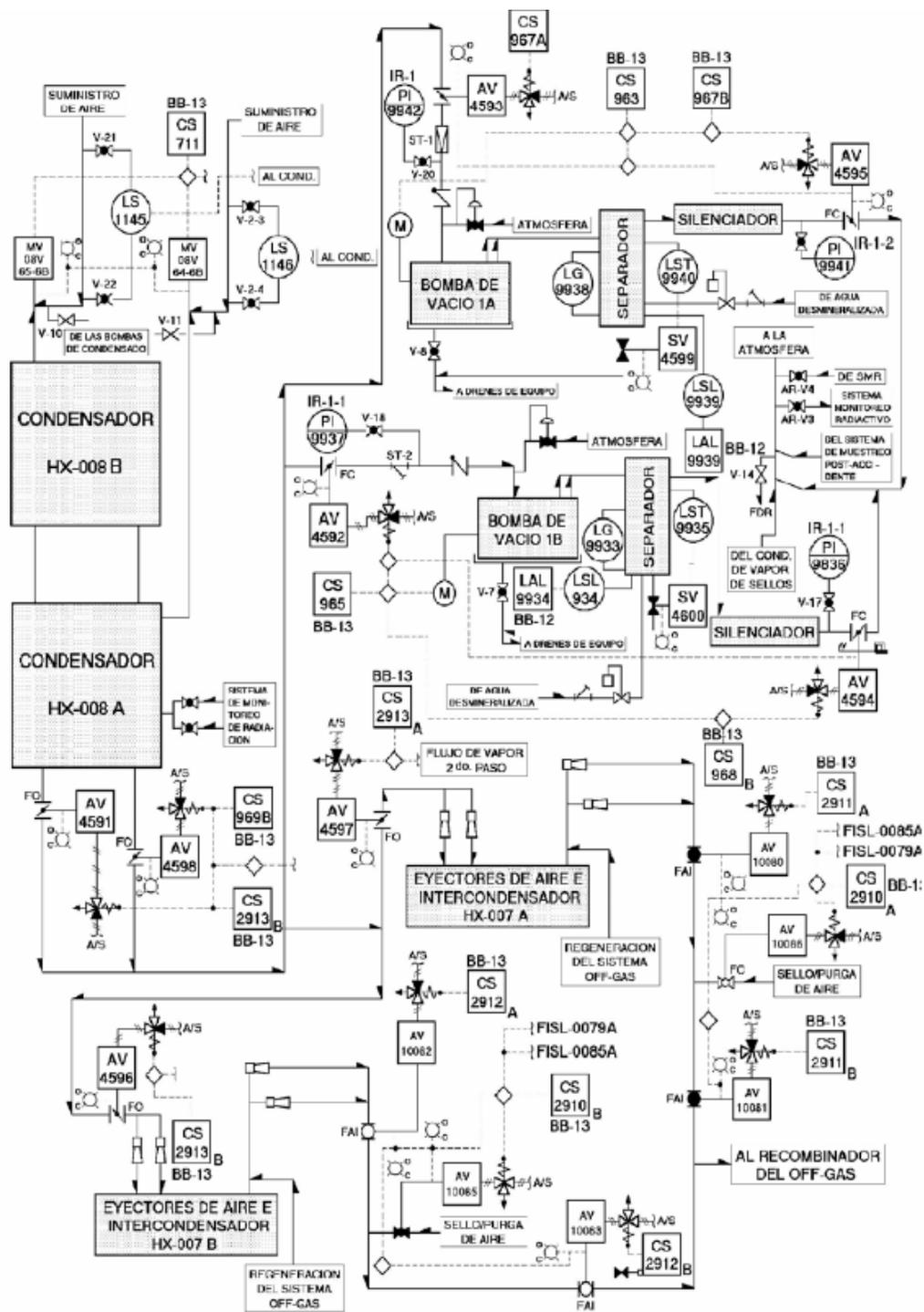


Figura IV-2. Diagrama de flujo de remoción de aire

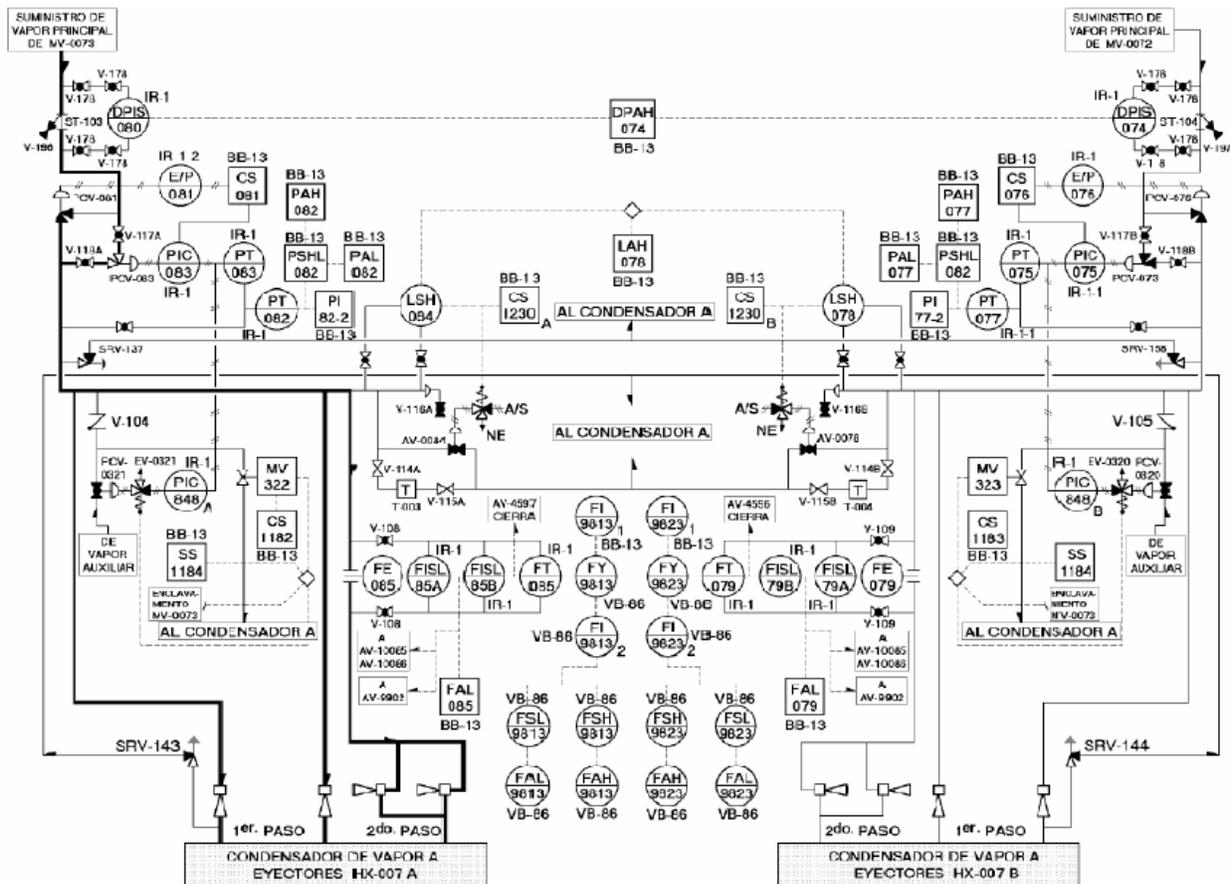
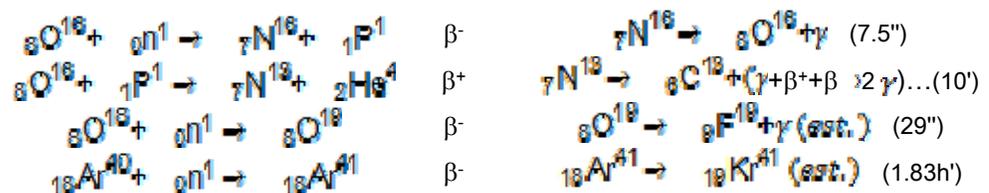


Figura IV-3. Suministro de aire de vapor principal

Estos gases radiactivos proceden de la irradiación del refrigerante del reactor, o bien son productos de fisión.

La activación de gases por irradiación del refrigerante del reactor depende únicamente de la potencia del reactor y no del número de ensamblajes de combustible con falla, las reacciones típicas que tienen lugar son:



El argón disuelto en el agua es introducido al reactor por las bombas del CRD (sistema del mecanismo de accionamiento de barras de control) desde el tanque de almacenamiento de condensado.

La presencia de productos de fisión en los gases no siempre es una indicación de falla en el encamisado del combustible. Algunos de los metales utilizados en los componentes estructurales del encamisado contienen pequeñas cantidades de uranio natural (>1 ppm) como impurezas, que pueden desprenderse en cierto momento.

Los gases debidos a la liberación de productos de fisión por defectos en los ensambles de combustibles están en función del número de ensambles fallados, del tamaño de la falla y de la temperatura del combustible.

Los productos de fisión liberados más importantes son:

Xe-135; $t_{1/2} = 9.1$ hr

Kr-88 ; $t_{1/2} = 2.84$ hr

I-131 ; $t_{1/2} = 8.04$ días

Los gases incondensables extraídos por los eyectores de aire del condensador principal son procesados a lo largo del sistema offgas, según los siguientes tratamientos:

1. Dilución de los gases con vapor,
2. Pre calentamiento de gases,
3. Recombinación de H₂ y O₂ radiolíticos,
4. Condensación del vapor,
5. Periodo de retención para decaimiento,
6. Filtrado de partículas,
7. Enfriamiento y eliminación de humedad,
8. Secado y disminución del punto de rocío,
9. Enfriamiento antes de los lechos de carbón activado,

-
10. Adsorción de los isótopos de Xe y Kr en los lechos de carbón activado,
 11. Calentamiento del flujo de gases a la temperatura ambiente,
 12. Filtrado final,
 13. Monitoreo radiactivo, y
 14. Descarga a la atmósfera.

La entrada de yodo en el offgas es mínima, en virtud de su característica de ser retenido (“scrubbing”) en el agua de alimentación y en el condensado del reactor. El yodo restante es eliminado esencialmente por adsorción en los lechos de carbón activado.

Los lechos de carbón activado eliminan el 99.9% del yodo en los primeros 5 cm de carbón. La longitud de la trayectoria de los gases a través del carbón activado es de aproximadamente 23.16 m.

Las partículas se eliminan con una eficiencia del 99.9% mediante los prefiltros. Los gases nobles se desintegran dentro de los lechos de carbón activado y sus descendientes son retenidos. El carbón constituye además un excelente filtro de partículas.

A continuación de los lechos de carbón existe un filtro de alta eficiencia para partículas (post-filtros) que es una protección contra el escape de polvo de carbón. La actividad de las partículas descargadas del offgas es esencialmente nula.

En los siguientes párrafos se describe cada uno de los equipos, componentes y/ procesos llevados a cabo en el sistema offgas, empezando por la extracción de gases incondensables del Condensador Principal, para terminar en su descarga controlada a la atmósfera.

Eyectores de aire del condensador principal

El offgas comienza en la descarga de la segunda etapa de los eyectores de aire del sistema de remoción de aire del condensador principal. Además de su función como impulsores de la mezcla de gases, los eyectores producen la dilución necesaria del hidrógeno contenido en dicha mezcla para mantener una concentración de hidrógeno menor al 4% en volumen, para evitar así la formación de mezclas explosivas.

Pre calentador

La mezcla de aire-vapor (con pequeñas trazas de gases radiactivos) circula por el lado carcasa, es calentada a 177 °C (350 °F) para asegurar un rendimiento óptimo del recombinador. El pre calentador hace uso de vapor principal por lado tubos, manteniendo la presión a 20 kg/cm² y a una temperatura aproximadamente de 220 °C.

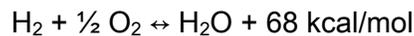
En el arranque de la Unidad se utiliza vapor auxiliar (si se cuenta con este suministro), durante operación normal del offgas se utiliza vapor principal. En el tren de reserva, el vapor pasa por lado tubos y, lado carcasa del pre calentador a través de un orificio restrictor. El pre calentador asegura que los gases a la entrada del recombinador estén sobrecalentados 15.5 °C (60 °F) o más, evitando la presencia de humedad en la parte superior del recombinador lo cual podría reducir su eficiencia.

Recombinadores

Al recombinador llega la mezcla de gases descargados, que contiene además de los gases radiactivos, el hidrógeno y oxígeno radiolíticos producidos en el reactor por disociación del agua. Debido a la presencia de aire en la mezcla, la cantidad de oxígeno en ella es superior a la requerida por la estequiometría de la reacción de recombinación. Se favorece la reacción por medio del catalizador de platino (en forma de esponja) soportado en una estructura de aluminio y así

recombinar el hidrógeno y oxígeno radiolítico en una reacción exotérmica; la mezcla de los gases saldrá del recombinador a una temperatura de 449 °C (840 °F). El recombinador está diseñado para garantizar un flujo de gases con una concentración de hidrógeno menor al 0.5% en volumen (base seca) para todas las condiciones de operación.

La reacción llevada a cabo en el recombinador es:



Intercondensador

La descarga de los recombinadores contiene además de los gases radiactivos, Kr y Xe; el vapor de agua producto de la recombinación. Esta mezcla se encuentra a una temperatura de 449 °C. Con la intención de separar el vapor de agua y enfriar los gases incondensables se dirige la trayectoria de flujo a través de un intercondensador. El fluido refrigerante proviene del sistema de condensado que circula por lado tubos; su temperatura de entrada es de 39.20 °C a una presión de 12.3 kg/cm². La mezcla de gases y vapor circula por el lado carcasa del intercondensador, removiéndose el 99.5% de la humedad, la cual es drenada a un cabezal; de este cabezal el condensado puede ser enviado al condensador principal o al sumidero de drenes de equipo. La corriente de incondensables sale a una temperatura de 60 °C (140 °F), y son dirigidos a los tanques de decaimiento con una presión de 0.20 kg/cm².

Tanques de decaimiento

El flujo de gases proveniente de alguno de los trenes de recombinación, está compuesto por isótopos de Xenón y Kriptón, y por pequeñas cantidades de yodo, vapor de agua, aire, N-13, N-15, O-19 y C-14. Los tanques de decaimiento permiten que la actividad de estos radioisótopos decaiga durante 10 minutos.

Prefiltros

Los prefiltros están localizados en la descarga de los tanques de decaimiento con el propósito de eliminar todas aquellas partículas sólidas hijas de los descendientes radiactivos de productos de fisión (isótopos de Xenón y Kriptón de vida media corta).

Cada prefiltro está constituido por un filtro de alta eficiencia para partículas en el aire (HEPA, por sus siglas en inglés), los filtros están hechos de fibra de vidrio y espaciadores de aluminio corrugado, que evitan el paso de partículas mayores de 0.3 micras (μm) con una eficiencia de 99.97%.

Tanque enfriador/condensador

El flujo de gases filtrado entra al tanque enfriador/condensador. Cada tanque contiene aproximadamente 1,000 galones de una mezcla agua-glicol (45% agua, 55% glicol, en volumen), la cual proporciona una considerable inercia térmica para asegurar una operación estable y reducir en cortos ciclos el trabajo de los compresores de la unidad enfriadora. El enfriamiento es proporcionado a la máquina de glicol por un serpentín de refrigeración que contiene Freón (el glicol a su vez enfría los gases de proceso). La unidad está diseñada para que en caso de fuga de freón, éste no pase al flujo de los gases del proceso. El vapor de agua contenido en el gas es condensado en el tanque enfriador/condensador disminuyendo la temperatura del gas a 4.4 °C (40 °F).

Separador de humedad

El flujo del sistema entra por la parte inferior de la vasija saliendo por la parte superior. Una malla de acero inoxidable remueve el agua contenida en el flujo de gas a la entrada, el condensado separado es colectado en la parte inferior de la vasija y descargado al sumidero de drenes de equipo. El separador de humedad reduce un 99% o más la humedad contenida en el flujo de gases.

Máquina refrigerante

Cada máquina está diseñada para enfriar la solución agua/glicol del tanque enfriador/condensador con gas Freón (R-12) a una temperatura de 1.9 °C (35 °F) con un flujo máximo del gas de proceso. En operación normal, ambas máquinas de refrigeración están en operación, con el propósito de garantizar el enfriamiento si existiese la necesidad de realizar cambio de trenes.

Calentador/Secador

Cada calentador consiste en una carcasa con un elemento calefactor de reborde. El elemento calefactor es revestido con una aleación del tipo de inmersión; es alimentado por 480 Vca y controlado por el programador del secador. El calentador descarga aire caliente que es empleado durante la etapa de calentamiento (adsorción de humedad) de la regeneración de los secadores.

Enfriador/Secador

Cada enfriador admite aire de servicio por el lado tubos y refrigerante (Freón-12) por el lado carcasa con el propósito de enfriar el aire y luego enviarlo a los secadores, durante la etapa de enfriamiento de estos últimos a lo largo de 6 horas.

Secadores

El secador desecante reduce la humedad relativa del gas reduciendo el punto de rocío, por lo menos 22.2 °C (40 °F) por debajo de la temperatura de operación de los lechos de carbón, -17.8°C (0 °F). La finalidad de alejar el punto de rocío a la mezcla de gases es para evitar saturar de humedad los lechos de carbón activado, teniéndose una mejor adsorción dinámica de los gases en el carbón (I, Xe, Kr).

Preenfriador

Los preenfriadores han sido diseñados para enfriar los gases antes de introducirlos a las vasijas adsorbedoras de carbón. El preenfriador se emplea en serie con el preenfriador de primera fase sirviendo como respaldo al proceso en caso de existir humedad en el flujo de gas y aumentando el enfriamiento a la salida de estos.

Cada enfriador está entre $-29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20\text{ }^{\circ}\text{F}$) y $-17.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{F}$).

Lechos de carbón activado

La actividad del gas noble predominante y la cantidad límite de actividad del halógeno son reducidas al pasar a través de cuatro largos tanques adsorbedores de carbón activado dentro de una cúpula mantenida a $-17.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{F}$) por el sistema de refrigeración de glicol. Los tanques son de 4 pies de diámetro por 19 pies de largo, y contienen 2,724 kg. (6,000 lbs.) de carbón activado cada uno. Esto sólo se permitirá en los arranques de la planta para evitar saturar de humedad al primer tanque.

Es práctica común hacer uso de carbón activado tipo MBQ de Unión Carbide base piedra debido a las siguientes propiedades:

- a. Alta adsorción para el Kr y el Xe.
- b. Alta estabilidad física.
- c. Gran superficie.
- d. Baja caída de presión.
- e. Alta temperatura de ignición (mayor a $250\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- f. Estructura libre de suciedad.

Recalentador

Los gases son calentados a 26.7 °C (90 °F) aproximadamente, antes de ser liberados a la atmósfera, mediante un recalentador, el cual consiste en una cinta trazadora de calor de 100 pies de longitud con una potencia total de 1,000 W. Esta cinta está enrollada en forma de espiral en la tubería entre las vasijas adsorbedoras y los post-filtros aproximadamente 4 veces por pie y cubierta con aislante.

Post-filtros

Están localizados a la descarga de los lechos de carbón activado con el propósito de retener las partículas que aún pudiera llevar la mezcla de gases y las de carbón que pueden desprenderse de los lechos. Los post-filtros son filtros de alta eficiencia para partículas en el aire (HEPA), al igual que los prefiltros.

El sistema descarga a la chimenea del venteo principal de planta vía ducto del sistema de ventilación y aire acondicionado del edificio de desechos radioactivos.

Monitores de radiación de proceso

El sistema de monitoreo de radiación toma lecturas en las siguientes partes del flujo de gas de proceso:

1. A la entrada de los tanques de decaimiento, entrando a la cámara de muestreo. Esta cámara envía una señal al registrador de radiación localizados en el cuarto de control principal. Este monitoreo es continuo.
2. A la descarga de los tanques de decaimiento, siguiendo la misma ruta que la anterior, pero esta toma no se realiza en forma continua.
3. A la entrada de los prefiltros.

-
4. A la descarga del primer tanque de adsorción, a la descarga del segundo tanque de adsorción, a la descarga del recalentador.
 5. A la descarga de los post-filtros.

Sistema de medición y análisis de hidrógeno

Dos analizadores de hidrógeno en paralelo e independientes son usados para medir el contenido de hidrógeno en el flujo de gas de proceso del offgas aguas abajo de los trenes de recombinación.

Las alarmas de alta concentración en los analizadores se presentan cuando la concentración alcanza 0.5% de H₂, mientras que alarmas de alta-alta concentración se presentan cuando la concentración alcanza 0.9% de H₂.

¿De dónde viene el hidrógeno? De manera muy resumida, la radiólisis del agua de refrigerante en el reactor genera hidrógeno y oxígeno gaseoso. Estos gases, junto con los gases nobles productos de fisión liberados por el combustible son arrastrados por el vapor hacia el condensador. El hidrógeno, el oxígeno y los gases nobles productos de fisión, más las entradas de aire al condensador, son extraídos del condensador principal por los eyectores de aire (SJAE²⁶). Gran diversidad de sistemas de proceso, desde almacenamiento simple hasta destilación criogénica, han sido desarrollados para remover los gases productos de fisión del flujo de escape de los SJAE.

Los sistemas de tratamiento de desechos gaseosos (offgas) en los BWR actuales tienen tres funciones de proceso en común:

²⁶ SJAE: Steam Jet air Ejectors

-
- a) Primero, el hidrogeno y oxígeno, que representan alrededor del 80% del flujo de incondensables al escape de los SJAE, debe ser extraído de la corriente de proceso para reducir el tamaño del equipo de tratamiento requerido. Lo anterior se lleva a cabo mediante el paso de estos gases a través de un recombinador catalítico, seguido de la remoción del vapor de dilución.
- b) A continuación, cualquier rastro de agua-vapor residual es removido por un secador o un intercambiador-separador de humedad.
- c) La última, pero no menos importante función de proceso, es extraer los gases productos de fisión del efluente por decaimiento o separación. En este punto, los gases productos de fisión remanentes en la corriente de proceso pueden ser liberados al ambiente. Las funciones principales del sistema offgas de un BWR se presentan en un diagrama de bloques en la Figura IV-4

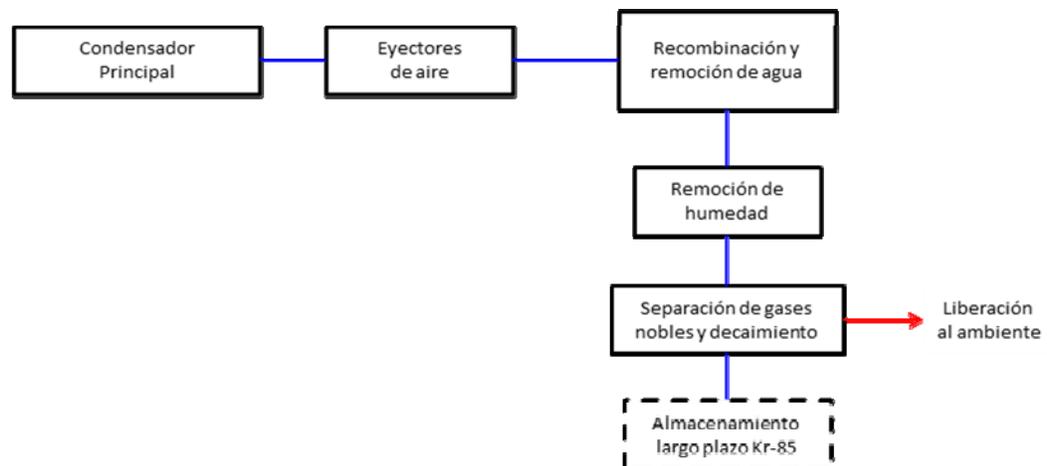


Figura IV-4. Componentes principales de un sistema offgas en un BWR

4.2. Sistemas de tratamiento de desechos radiactivos líquidos

La generación de desechos radiactivos líquidos durante todas las fases de operación y mantenimiento de la central requiere el uso de los sistemas de procesamiento de desechos. Estos sistemas aseguran que la calidad del efluente cumple con límites regulatorios aplicables y que el agua reciclada cumple con los requerimientos de la planta.

El objetivo de la gestión de desechos líquidos es alcanzar la descontaminación máxima de las corrientes de desecho, mientras se minimizan la acumulación de desechos que pudieran afectar la disponibilidad de la planta o la generación de energía eléctrica.

En general, los sistemas de desechos líquidos consisten en un banco de tanques de colección seguidos por procesos químicos y físicos de separación, usando una o más unidades de operación para alcanzar la pureza deseada. A través de tuberías inertes las unidades de operación pueden ser combinadas de diferentes maneras para procesar corrientes de alimentación de varias características.

Las unidades de operación o procesos que han formado la base en el tratamiento de las corrientes de desechos líquidos son: evaporación, filtración, e intercambio iónico.

4.2.1. Tipos, fuentes y cantidades de desechos radiactivos líquidos

Los desechos radioactivos líquidos generalmente se clasifican en términos de sus propiedades físicas y químicas.

Los desechos radioactivos líquidos en un reactor de agua en ebullición son normalmente segregados en cuatro tipos, los cuales se describen a continuación:

-
- a. **Los desechos radiactivos de alta pureza:** son líquidos de baja conductividad eléctrica pero tienen el potencial de contener algunos sólidos suspendidos (partículas) y aceites disueltos. Los mayores aportes de desechos de alta pureza provienen de los drenes de equipo del pozo seco y de los edificios de reactor, turbina y desechos radioactivos; agua de desecho del proceso de limpieza ultrasónica de resinas; agua de transferencia y retrolavado de resinas; retrolavado de filtros; líquido decantado del separador de fase; y condensado radioactivo de los evaporadores.
- b. **Los desechos radioactivos de baja pureza:** son líquidos de moderada a alta conductividad y tienen el potencial de tener un alto contenido de sólidos suspendidos y/o disueltos. Las fuentes de desechos radioactivos de baja pureza incluyen los sistemas de drenaje de piso del pozo seco y edificios del reactor, turbina y desechos radioactivos; fugas de sellos de bombas y de vástagos de válvulas; y agua resultante del proceso de desagüe de lodos.
- c. **Los desechos químicos:** son líquidos de alta conductividad y un alto contenido total de sólidos (sólidos suspendidos más sólidos disueltos). La fuente primaria de este desecho son las soluciones regenerantes de las columnas de intercambio iónico de las camas profundas (pulidores de condensado). Otras fuentes incluyen los drenes de laboratorio y los desechos químicos no detergentes del proceso de descontaminación
- d. **Los desechos detergentes:** son líquidos con alto contenido de sólidos suspendidos y químicos orgánicos (detergentes, jabones, etc.). En promedio, este tipo de desecho contiene muy baja radioactividad. Los

mayores aportes de este tipo de desechos provienen de lavandería en sitio, regaderas del personal, desechos de descontaminación de tipo detergente, así como también el agua de lavado de laboratorio.

Las cantidades probables de este tipo de desechos estimadas por el estándar ANSI se muestran en la Tabla IV-1²⁷. Estas cantidades son representativas para un reactor de agua en ebullición de 3,800 MWt.

²⁷ ANSI/ANS-55.6-1979. "Liquid radioactive Waste Processing system for Light Water Reactors." American Nuclear Society.

Tabla IV-1. Corrientes de entrada de diseño para los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos líquidos en un BWR

Fuentes generadoras	Promedio de corrientes de entrada diarias esperadas, gal/d (L/d)					Corrientes de entrada esperadas por eventos base de diseño, gal/d (L/d)							
	Promedio de corrientes de entrada diaria esperadas	Entradas adicionales por regeneración	Entradas adicionales por decantado	Entradas adicionales por decantado y regeneración	Diaria esperada con fuga máxima en pozo seco	Fuga máx. condensado y máximo decantado	Máx. limpieza ultrasónica y máx. decantado	Máxima drenajes de piso	Máx. limpieza ultrasónica correspondiente a un "arranque"	Fuga máx. en pozo seco, decantado y decantado	Máx. limpieza de resinas ultrasónica y decantado	Fuga máx. en pozo seco, decantado y regeneración	Fuga máx. en pozo seco y fuga máx. condensado
<u>Drenes de equipo</u>													
Pozo seco	3400	3400	3400	3400	28,000 ^a	3400	3400	3400	3400	3400	3400	28,000 ^a	28,000 ^a
	(12,870)	(12,870)	(12,870)	(12,870)	(109,020)	(12,278)	(12,278)	(12,278)	(12,278)	(12,278)	(12,278)	(109,020)	(109,020)
Edificio del reactor y alberca de combustible	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720	3720
	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)	(14,082)
Edificio de desechos	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060	1060
	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)	(4013)
Edificio de turbina	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960	2960
	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)	(11,205)
Limpieza ultrasónica de resinas	15,000	15,000	15,000	15,000	15,000	-	60,000	15,000	-	15,000	60,000	15,000	-
	(56,781)	(56,781)	(56,781)	(56,781)	(56,781)	-	(227,125)	(56,781)	-	(56,781)	(227,125)	(56,781)	-
Enjuague de resinas	-	17,280	-	17,280	-	69,120	-	-	60,000	-	-	17,280	69,120
	-	(65,412)	-	(65,412)	-	(261,648)	-	-	(227,125)	-	-	(65,412)	(261,648)
Subtotal	26,140	43,420	26,140	43,420	51,540	80,260	71,140	26,140	71,140	51,540	71,140	68,820	105,660
	(98,951)	(164,363)	(98,951)	(164,363)	(195,101)	(303,818)	(269,295)	(98,951)	(269,295)	(195,101)	(269,295)	(260,513)	(399,968)
<u>Drenes de piso</u>													
Pozo seco	700	700	700	700	700	700	700	28,800	700	700	700	700	700
	(2650)	(2650)	(2650)	(2650)	(2650)	(2650)	(2650)	(109,020)	(2650)	(2650)	(2650)	(2650)	(2650)
Edificio del reactor y alberca de combustible	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)
Edificio de desechos	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)
Edificio de turbina	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Fuentes generadoras	Promedio de corrientes de entrada diarias esperadas, gal/d (L/d)					Corrientes de entrada esperadas por eventos base de diseño, gal/d (L/d)							
	Promedio de corrientes de entrada diaria esperadas	Entradas adicionales por regeneración	Entradas adicionales por decantado	Entradas adicionales por decantado y regeneración	Diaria esperada con fuga máxima en pozo seco	Fuga máx. condensado y máximo decantado	Máx. limpieza ultrasónica y máx. decantado	Máxima drenajes de piso	Máx. limpieza ultrasónica correspondiente a un "arranque"	Fuga máx. en pozo seco, decantado y decantado	Máx. limpieza de resinas ultrasónica y decantado	Fuga máx. en pozo seco, decantado y regeneración	Fuga máx. en pozo seco y fuga máx. condensado
	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)	(7571)
Subtotal	5700	5700	5700	5700	5700	5700	5700	33,800	5700	5700	5700	5700	5700
	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(127,947)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)	(21,5777)
Decantado de limpieza del separador de fase	-	-	4200	4200	-	4200	4200	-	-	4200	4200	4200	4200
			(15,899)	(15,899)		(15,899)	(15,899)			(15,899)	(15,899)	(15,899)	(15,899)
Drenes de lavandería	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)	(3785)
Drenes de laboratorio	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)	(1893)
Regenerantes	-	12,000	-	12,000	-	48,000	-	-	-	-	-	12,000	48,000
		(45,425)		(45,425)		(181,700)						(45,425)	(181,700)
Desechos del laboratorio químico	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)	(379)
Total	33,440	62,720	37,640	66,920	58,840	139,760	82,640	61,514	78,440	63,040	82,640	92,320	165,160
	(126,585)	(237,422)	(142,484)	(253,321)	(222,735)	(529,051)	(312,828)	(232,955)	(296,929)	(238,340)	(312,828)	(349,471)	(625,201)
Frecuencia, días por año	158	67	55	12	14	14	14	14	12	2	2	1	1
Probabilidad	0.433	0.18	0.15	0.033	0.038	0.038	0.038	0.038	0.033	0.006	0.006	0.0025	0.0025

^a Se muestra una razón de fuga máxima para el pozo seco, mas no así para el edificio de turbina, edificio de desechos radiactivos, edificios auxiliares y alberca de combustible. Se aplica únicamente para el pozo seco la máxima fuga supuesta. Sin embargo, fugas simultáneas de esta magnitud en todas estas fuentes es considerado un evento de baja probabilidad y se supone su pronta reparación.

4.2.2. Sistemas de procesamiento para los desechos radioactivos líquidos

En la Figura IV-5 se muestra un diagrama de un sistema básico del procesamiento de desechos líquidos en una central con un reactor de agua en ebullición²⁸. Este diagrama muestra los procesos posibles o combinaciones de tratamiento. Los diagramas están divididos en columnas verticales que representan los pasos funcionales del proceso. Horizontalmente, este proceso está dividido por el tipo de desecho. Se indican esquemas de proceso alternativo para varios tipos de desecho.

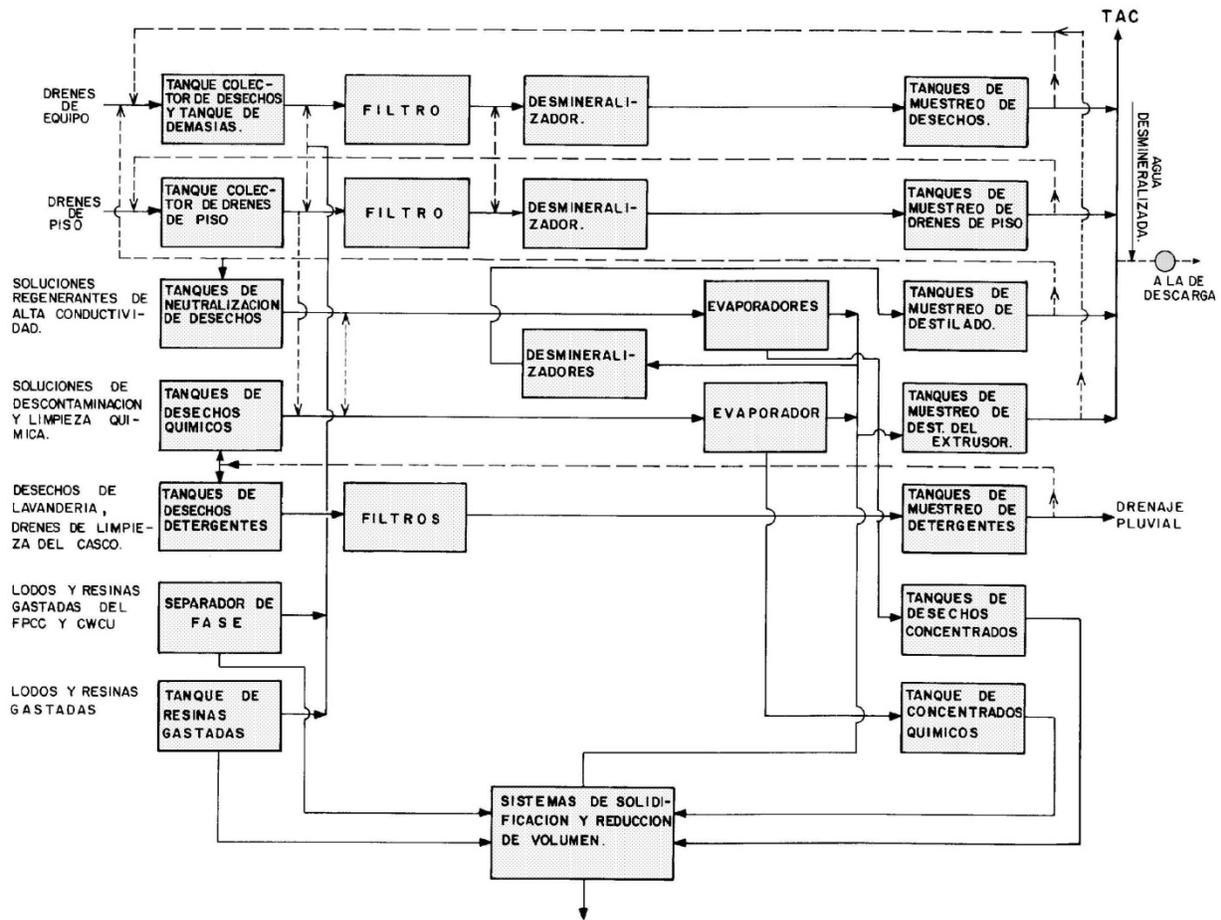


Figura IV-5. Diagrama de bloques del sistema de desechos líquidos

²⁸ ANSI/ANS-55.6-1979. "Liquid radioactive Waste Processing system for Light Water Reactors." American Nuclear Society..

Los sistemas de tratamiento de desechos radioactivos líquidos utilizados en muchas centrales con reactores de agua en ebullición se describen a continuación:

- a. Los desechos de alta pureza: debido a su baja conductividad eléctrica y al potencial de contener algunos sólidos suspendidos, este tipo de corriente es usualmente procesada mediante filtración e intercambio iónico. Después de un análisis, el desecho procesado es reciclado al tanque de almacenamiento de condensado.
- b. Los desechos de baja pureza: si la conductividad eléctrica es baja (menor a 100 $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C), el desecho de baja pureza es normalmente procesado mediante filtración e intercambio iónico; si el valor de conductividad es alto; se puede hacer uso de la evaporación. Ya sea que los filtros precedan o no al evaporador, esto dependerá del diseño del evaporador (susceptibilidad a ensuciamiento) y propiedades de la alimentación (sustancias no disueltas extrañas). Si se requiere, el condensado generado por el evaporador puede ser tratado por una unidad de intercambio iónico para desechos de alta pureza o por una unidad pulidora de separación de intercambio iónico.
- c. Los desechos químicos. Debido a que los desechos químicos tienen una alta concentración de sólidos disueltos y no disueltos, éste es procesado por evaporación en la mayoría de los casos. Se puede requerir el pulido del condensado destilado mediante intercambio iónico para cumplir con requerimientos de reúso o descarga.

d. Los desechos detergentes. Debido a que estos desechos contienen muy baja radioactividad, pero contienen cantidades considerables de sólidos suspendidos y químicos orgánicos que pudiesen afectar la operación de evaporadores convencionales o unidades de intercambio iónico, éste tipo de desecho es normalmente procesado mediante filtración antes de su descarga o disposición.

4.2.3. Función de los sistemas de procesamiento de desechos radioactivos líquidos

El sistema de desechos líquidos tiene la función de recoger, almacenar y procesar todos los efluentes líquidos que se generan en la central, de manera que una vez procesados alcancen una calidad tal que puedan ser reutilizados en los procesos de la central, logrando con esto un elevado porcentaje de reúso; descargas controladas al medio ambiente son permitidas siempre que se cumpla con los valores límite de concentración y actividad en la corriente a descargar.

El sistema de procesamiento de desechos radiactivos líquidos debe cumplir con los siguientes requerimientos de diseño:

- El sistema de desechos líquidos está diseñado para recolectar esencialmente todos los desechos potencialmente radiactivos producidos por la operación de la central y mediante diversos procesos reducir la concentración de radionúclidos, mejorando su calidad para permitir que el agua se pueda volver a usar en el ciclo de vapor o descargar al medio ambiente.
- El sistema está diseñado para que antes de ser descargado y una vez procesados los líquidos sean colectados en tanques de muestreo para efectuar análisis radioquímicos y determinar en base a los resultados, si

pueden ser descargados al medio ambiente, ser reutilizados o reprocesados.

- El sistema será diseñado para minimizar la exposición del personal durante la operación normal.

El sistema se divide en seis subsistemas diseñados para coleccionar los diferentes tipos de desechos líquidos y semilíquidos (lodos, concentrados, etc.) de acuerdo a las fuentes que los generan; su composición y sus requerimientos de proceso.

Estos subsistemas son:

- i. Sistema de drenes de equipo,
- ii. Sistema de drenes de piso,
- iii. Sistema de desechos químicos,
- iv. Sistema de desechos detergentes,
- v. Sistema de desechos regenerantes, y
- vi. Sistema preparatorio de solidificación.

A los desechos detergentes, químicos y regenerantes se les denomina desechos misceláneos.

La base de diseño del tratamiento de corrientes de desechos radiactivos líquidos es a base de procesamiento por lotes.

Las corrientes de líquidos que se procesan provienen de los edificios del reactor, control, turbina y desechos radiactivos. Para hacer más eficiente el proceso se separan los drenes de alta actividad y baja conductividad (drenes de equipo) de los drenes de baja actividad y alta conductividad (drenes de piso).

Los medios de colección utilizados como estaciones de transferencia de los diferentes desechos líquidos son los sumideros colectores; situados estratégicamente en áreas donde se localizan equipos o componentes de

sistemas que por causas inherentes a sus funciones puedan generar o verter al exterior líquidos potencialmente radiactivos.

También se cuenta con sumideros colectores de drenes de piso y de equipo radiactivos; los cuales reciben líquidos contaminados de aceite u otras sustancias no radiactivas pero que por su condición podrían causar contaminación al medio ambiente si se liberaran en forma no controlada.

Los sumideros colectores se clasifican de acuerdo a los afluentes que reciben de la siguiente manera:

- Sumideros de drenes de equipo radiactivo
- Sumideros de drenes de piso radiactivo
- Sumideros de desechos detergentes
- Sumideros de desechos químicos
- Sumideros de drenes de equipo no radiactivos
- Sumideros de drenes de piso no radiactivos

Estos sumideros descargan a los separadores de aceite en edificio de desechos radiactivos y al sistema de drenaje pluvial

4.2.3.1. Sistema de drenajes de equipo

El sistema de drenes de equipo cuenta con un tanque colector de drenes de equipo con capacidad de 17,000 galones y un tanque colector de demasías (*waste surge tank*) de 60,000 galones, el cual sirve como respaldo del tanque colector. Ambos tanques reciben periódicamente líquidos de alta actividad y alta pureza (baja conductividad y bajo contenido de sólidos) provenientes de las siguientes fuentes:

- a. Tanque colector de drenajes de equipo.

-
- 1.- Decantado de los separadores de fase del sistema de limpieza del agua del reactor (RWCU),
 - 2.- Sumidero de drenes de equipo del Edificio de Reactor,
 - 3.- Sumideros de drenes de equipo del pozo seco,
 - 4.- Sumideros de drenes de equipo del Edificio de Turbina,
 - 5.- Drenes de equipo del Edificio de Desechos Radiactivos,
 - 6.- Enjuague de resinas de baja conductividad,
 - 7.- Drenes de baja conductividad del sistema de limpieza ultrasónica de resinas, y
 - 8.- Enjuague del sistema de regeneración química.

b. Tanque colector de demasías.

1. Del sistema de remoción de calor residual (durante parada del reactor).
2. Del sistema RWCU (durante calentamiento del reactor).
3. Condensado del recalentador de los evaporadores.

La Figura IV-6 muestra un diagrama simplificado del sistema de drenajes de equipo, con sus componentes principales.

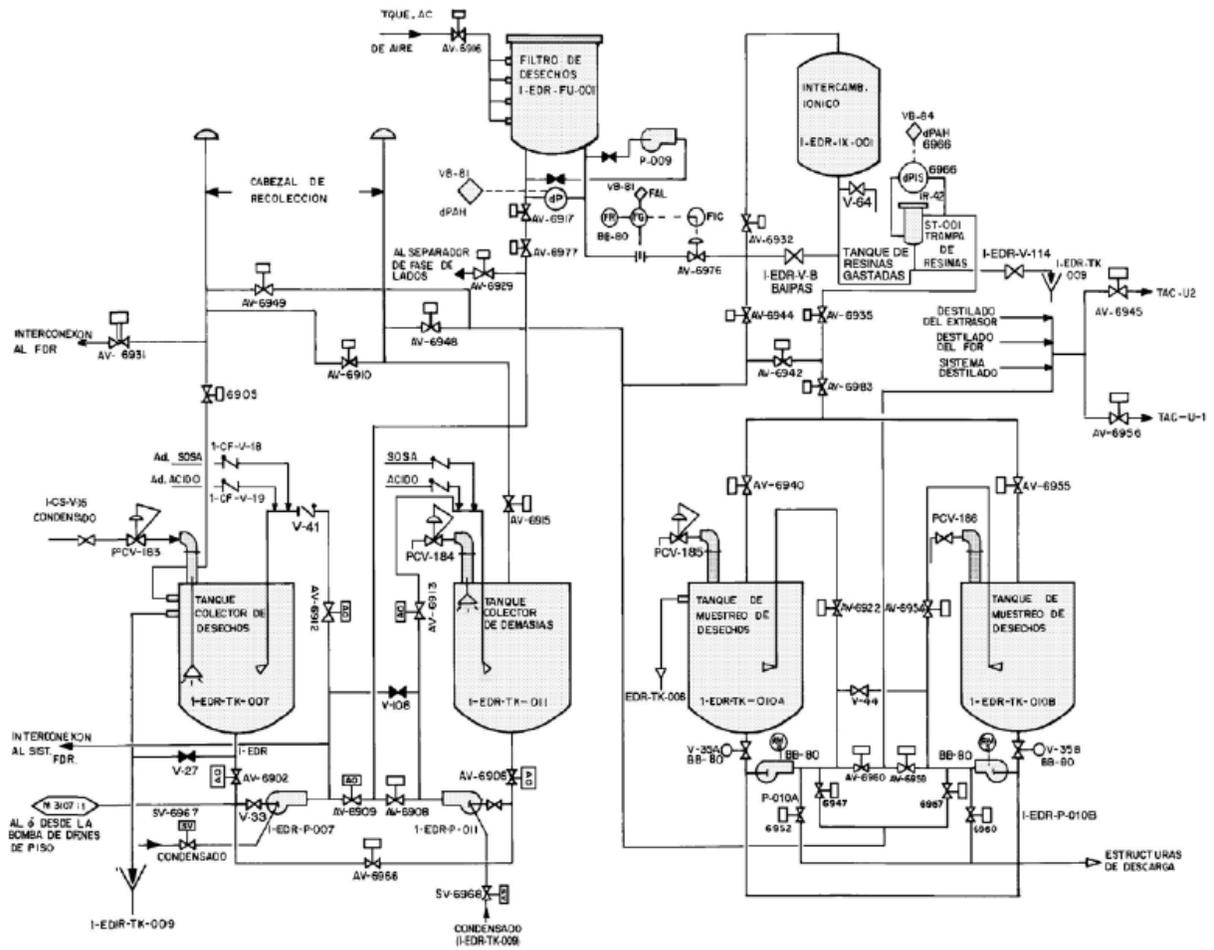


Figura IV-6. Sistema de drenes de equipo

El tanque colector de drenes recibe los efluentes a través del cabezal colector en donde se ubica una válvula operada por aire, la cual cierra manualmente desde el cuarto de control de desechos cuando se inicia el proceso; durante el periodo de tratamiento del primer lote, los desechos descargados al cabezal son enviados al tanque colector de drenes de piso. Los desechos son descargados al fondo del tanque hasta la succión de la bomba de desechos.

El tanque colector cuenta con una línea de recirculación, a la cual llegan las tuberías del sistema de adición de química para neutralizar los líquidos a tratar. La línea de recirculación descarga en el fondo del

tanque a través de un eyector, con el propósito de homogenizar la mezcla.

El tanque colector de demasías recibe grandes volúmenes de líquido radiactivo durante el paro del reactor, calentamiento y recarga, en su mayoría provenientes de la alberca de almacenamiento de equipo (secador de vapor separadores de vapor).

Ambos tanques colectores están interconectados a través de sus cabezales de recolección. Del mismo modo se cuenta con una línea de interconexión entre el tanque colector de drenes de equipo y tanque colector de drenes de piso.

Cada tanque del sistema de drenajes de equipo cuenta con una bomba de 160 gpm, para impulsar los líquidos radiactivos a su proceso de tratamiento. La descarga de la bomba principal tiene una línea de interconexión al tanque de drenes de piso y al tanque colector de demasías.

El flujo impulsado por las bombas del sistema de drenes de equipo pasa a través de un filtro (ver Figura IV-7), el cual emplea una carga de resinas en polvo como material filtrante. Este filtro cuenta con una bomba sostenedora de precapa, la cual evita la caída de la precapa cuando el flujo a través del filtro es bajo (mayor a 40 gpm). La bomba sostenedora de precapa del filtro arranca automáticamente por señal de instrumentación de flujo a través del filtro.

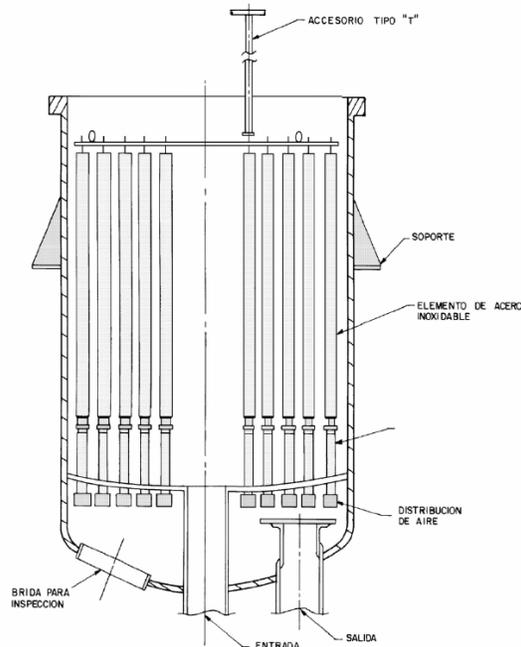


Figura IV-7. Filtro desmineralizador

Además, el filtro cuenta con instrumentación de presión diferencial para indicar cuándo el filtro debe ser retrolavado y llevado a formación de precapa nuevamente. La caída máxima de presión a través del filtro no debe exceder 1.75 kg/cm^2 .

Aguas abajo del filtro, la corriente líquida pasa a través de un intercambiador iónico (ver Figura IV-8), el cual emplea una carga de resinas granuladas en arreglo de lecho mixto para remover el material iónico de la corriente de entrada. La trampa de resinas tiene en su interior un filtro de canasta removible que impide que las resinas caigan a los tanques de muestreo en caso de falla/desprendimiento de las mismas.

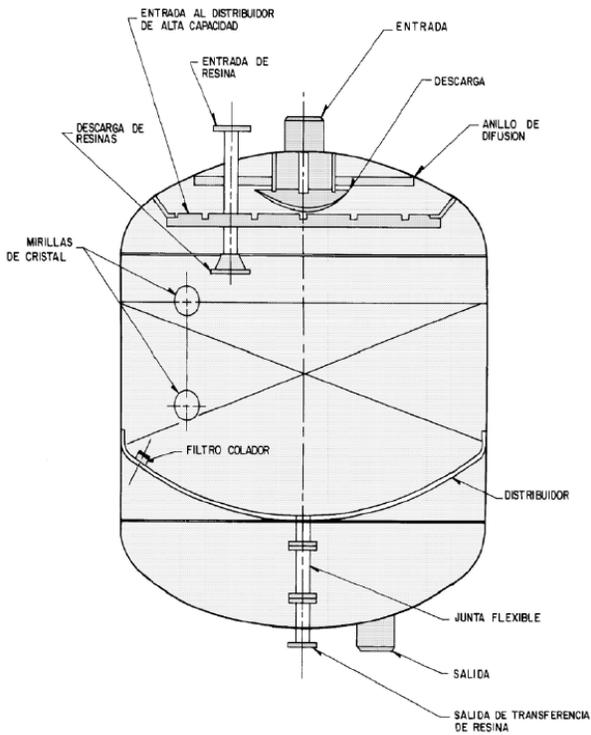


Figura IV-8. Intercambiador iónico de cama mixta.

La descarga del intercambiador iónico está monitoreada por una celda de conductividad y puede ser regenerada en el sistema de desmineralización de condensado o en el sistema de limpieza ultrasónica.

Una vez que se alcanza la conductividad deseada en la corriente de salida del intercambiador iónico, el agua puede ser descargada a los tanques de muestreo. Los tanques de muestreo (dos tanques) cuentan con una línea de recirculación para homogenizar el agua filtrada y poder tomar muestras representativas de radionúclidos y determinar en base a estas muestras, su descarga a los tanques de almacenamiento de condensado o a la obra de descarga del agua de circulación, o en su caso, ser reprocesada. Mientras un tanque de muestreo se está llenando,

el otro puede ser muestreado y descargado, para lo cual cada tanque tiene asignada una bomba.

Normalmente el agua de calidad aceptable se descarga a los tanques de almacenamiento de condensado para ser repuesto de agua al condensador principal. En caso de que no haya espacio (volumen) disponible en los tanques de almacenamiento de condensado, la corriente procesada se puede descargar a la obra de descarga bajo condiciones controladas y monitoreadas por instrumentación de medición de radiación de proceso.

La corriente que no cumpla con los requisitos de calidad puede ser retornada al tanque colector de drenajes o al tanque de demasías.

Cada tanque de muestreo cuenta con transmisores de nivel, los cuales envían señal de cierre a su válvula de llenado y disparo de la bomba en caso de presentarse altos niveles. En caso contrario, cuando se tiene bajo nivel en un tanque, la bomba del tanque en cuestión se detiene y el proceso termina.

Al termino del proceso, se inicia manualmente el lavado del tanque colector de drenajes, para lo cual se cuenta con una línea del sistema de suministro de condensado con una válvula manual de aislamiento y una válvula controladora de presión; la línea de lavado descarga en la parte interna superior del tanque a través de un aspersor durante un minuto.

4.2.3.2. Sistema de drenajes de piso

El sistema de drenes de piso cuenta con un tanque colector, el cual recibe periódicamente líquidos de mediana actividad y pureza intermedia (conteniendo algunos sólidos), provenientes de las siguientes fuentes:

-
1. Decantado de los separadores de fase de desechos,
 2. Sumidero de drenes de piso del Edificio del Reactor,
 3. Sumidero de drenes de piso del Pozo Seco,
 4. Sumideros de drenes de piso del Edificio de Turbina,
 5. Sumideros de drenes de piso del Edificio de Desechos Radiactivos,
 6. Decantado del tanque de resinas gastadas,
 7. Drenes de baja conductividad del sistema de limpieza y ultrasónica de resinas, y
 8. Enjuague del sistema de regeneración química.

El tanque colector de drenes de piso tiene una capacidad de 17,000 gal y cuenta con una línea de interconexión con el tanque colector de desechos.

El sistema cuenta con una bomba de 160 gpm, la cual succiona del tanque colector y descarga al filtro de drenes de piso. El filtro opera del mismo modo que el filtro de la corriente de drenajes de equipo, así como el resto del sistema.

Este sistema así como el de sistema de drenes de equipo cuenta con un modo de remoción de lodos del tanque colector para evitar la rápida saturación del filtro. Este modo debe ser iniciado antes del proceso de filtrado, enviando los lodos sedimentados al separador de fase de desechos.

La Figura IV-9 muestra un diagrama esquemático del proceso de tratamiento de drenes de piso.

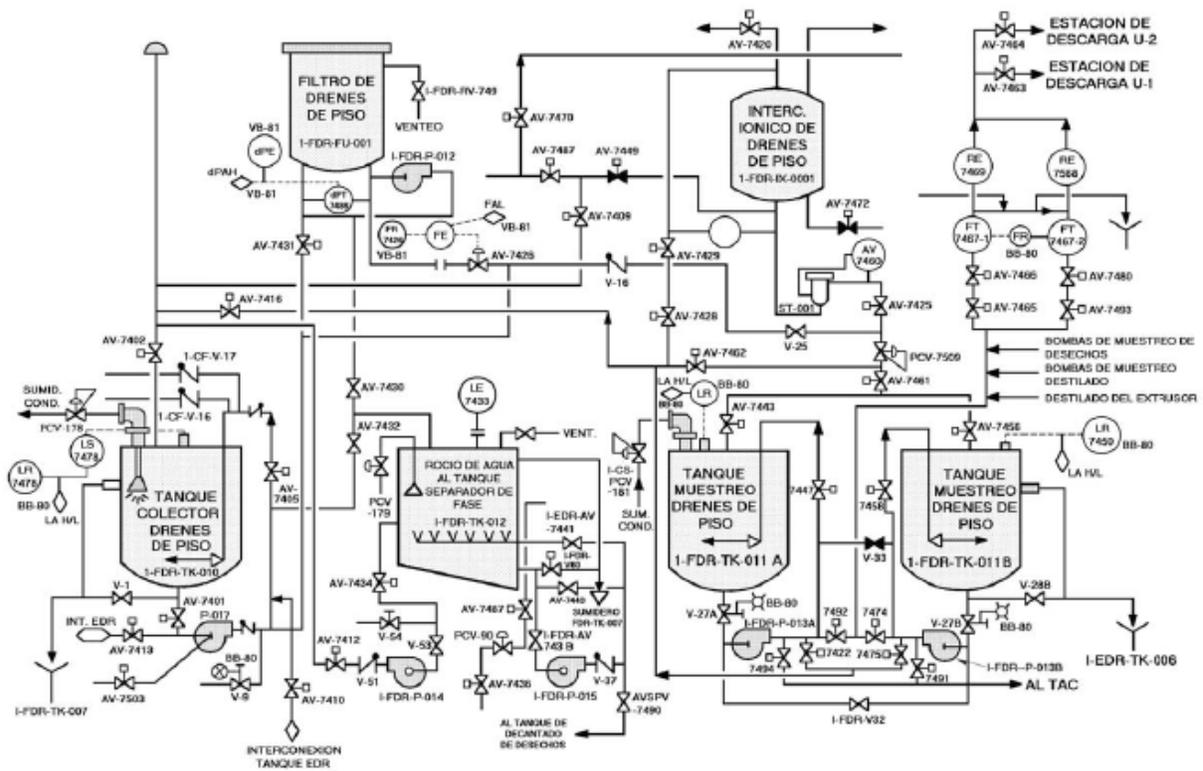


Figura IV-9. Sistema de tratamiento de drenes de piso

4.2.3.3. Sistema de desechos químicos

El propósito de este sistema es procesar soluciones utilizadas para limpieza química de equipos tales como filtros desmineralizadores, cuerpos de vapor de evaporadores, soluciones descontaminantes y desechos de laboratorios, fugas y muestreos de equipo que manejan soluciones químicas. Estas corrientes son colectados en sumideros químicos tales como:

- i. Sumidero de drenes de limpieza química de los filtros desmineralizadores de drenes de equipo y piso, y
- ii. Sumidero de drenes de la limpieza química de los filtros desmineralizadores del sistema de limpieza de la alberca de

combustible gastado y del sistema del limpieza del agua del reactor.

Las sustancias químicas más frecuentes son: amonio, citrato, permanganato de potasio, ácido nítrico, hidróxido de amonio, acetona, boratos, fenoles y detergentes.

Los desechos químicos son líquidos con alta conductividad (entre 200 y 1,000 $\mu\text{mho/cm}$) y alta actividad. La conductividad de estos desechos químicos es tan alta que no es factible procesarlos a través de intercambiadores iónicos, motivo por el cual tienen que ser procesados en concentradores. El destilado de los concentradores es procesado a través de intercambiadores iónicos para ser enviados a los tanques de almacenamiento de condensado y los lodos concentrados al tanque de concentrados químicos para ser transferidos al sistema de solidificación.

El sistema de desechos químicos cuenta con dos tanques colectores de 4,500 galones cada uno para recibir el aporte de los sumideros. El llenado de estos tanques se efectúa a través de un cabezal común; cada tanque cuenta con una válvula de llenado individual para permitir el llenado de uno de ellos mientras el otro se encuentra en proceso.

Ambos tanques cuentan con una bomba de transferencia de 35 gpm para efectuar los modos de operación de recirculación y alimentación al concentrador. El modo de recirculación se utiliza para ajustar el pH de la corriente para minimizar la corrosión en los componentes del concentrador. Esta operación debe hacerse durante 10 minutos aproximadamente con el objeto de homogeneizar la mezcla y hacerla más representativa. A la línea de recirculación se interconectan líneas de aporte de ácido y sosa. Una vez terminado el proceso de recirculación, se inicia el proceso de alimentación de la corriente al concentrador a una tasa de flujo de 5 a 15 gpm. Si se efectúa la transferencia de la corriente al concentrador a una tasa de flujo de 5 gpm, llevará 15 horas procesar

4,500 galones, generándose aproximadamente 0.05 gpm de lodos concentrados, los cuales son enviados al tanque de concentrados químicos. Las bombas de transferencia pueden descargar también al tanque de desechos concentrados o al tanque de neutralización de desechos.

Las bombas tienen una línea de sello del sistema de suministro de condensado; la cual recibe señal de apertura cuando se da señal de arranque a la bomba. La presión de la línea de lavado proveniente del sistema de suministro de condensado se regula a 3.5 kg/cm² y descarga a través de un difusor; el exceso de nivel así como el drenado del tanque descargan al sumidero de desechos químicos radiactivos.

La operación del concentrador se basa en el principio de la evaporación, proceso mediante el cual los componentes volátiles y no volátiles son separados mediante el calentamiento de la corriente. Esta operación tiene muchas aplicaciones en la industria nuclear para reducir el volumen de desechos y la cantidad de radionúclidos de los efluentes líquidos.

El método de evaporación puede ser usado con soluciones de diferente composición y concentración; siendo más efectivas corrientes que contienen alto grado de concentración e impurezas. Este proceso es más económico que si se usaran intercambiadores iónicos debido a la alta conductividad.

El sistema del concentrador consiste de un evaporador en el cual se efectúa la separación de fases y se mantiene a un nivel de entre 35.6% y 42.8% controlando la alimentación de la corriente de entrada a una tasa de flujo de 5 gpm. Una bomba de recirculación de 3,500 gpm envía la mezcla a través de un recalentador de dos pasos, el cual es alimentado por el lado carcasa con vapor principal proveniente de una estación de atemperación (vapor a 2.81 kg/cm² y 131 °C), el condensado resultante es enviado a un tanque colector.

El proceso de evaporación incluye los siguientes componentes para hacer más eficiente su operación: separador de arrastres; condensador, subenfriador, enfriador de gases, bombas de transferencia de condensado y bomba de recirculación, la cual también transfiere el concentrado hacia los tanques de concentrado químico.

La corriente caliente del recalentador pasa por los tubos al evaporador, en el cual, por diferencia de presión, las sustancias volátiles son separadas y arrastradas hasta el separador de arrastres, el cual tiene la función de separar la humedad arrastrada por el vapor así como las partículas sólidas en suspensión por medio de mallas filtrantes. Las mallas filtrantes cuentan con rociadores de agua caliente para desincrustarlas en caso de presentarse alta presión diferencial a través de ella.

La alimentación al evaporador también se controla por medio de un controlador/indicador de nivel que envía señal de control de apertura a la válvula de alimentación permitiendo la entrada del flujo procedente de los tanques de desechos químicos. En estado estable de operación, la rapidez de alimentación es proporcional a la rapidez de evaporación manteniendo un nivel constante del evaporador.

El flujo de recirculación es monitoreado antes de la succión de la bomba por un elemento de densidad, el cual al alcanzar un 20% en peso de concentración envía señal de apertura a una válvula y los desechos concentrados son enviados a través de una línea con resistencias calefactoras hacia el tanque de desechos químicos concentrados. El vapor que pasa a través del separador de arrastres fluye hacia el lado de la carcasa del condensador y el condensado resultante se acumula en tanque de condensado, el cual cuenta con instrumentación de nivel para proporcionar el mínimo NPSH a las bombas de destilado, los cuales extraen el condensado del tanque, lo pasan a través del lado de la

carcasa del subenfriador y lo envían a los intercambiadores iónicos de destilado. La función del subenfriador es bajar la temperatura del condensado para evitar daños a las resinas de los intercambiadores iónicos. Los subenfriadores son enfriados por el sistema de circuito cerrado de agua de enfriamiento nuclear (NCCW); el flujo que sale del subenfriador es monitoreado por una celda de conductividad y elemento de temperatura.

El flujo de destilado de los intercambiadores iónicos es descargado a los tanques de muestreo de destilado.

La corriente de salida (agua) con valores de calidad aceptable se envía a los tanques de almacenamiento de condensado, sin embargo también puede ser descargada al medio ambiente bajo condiciones controladas. La corriente con valores de calidad no satisfactorios, es retornada al tanque de neutralización de desechos o al tanque colector de desechos para su reprocesamiento.

La Figura IV-10 muestra un diagrama esquemático del proceso de tratamiento de desechos químicos.

-
- iii. Descontaminación de los edificios de: Reactor, Turbina, Control, y Desechos Radiactivos.

Cada tanque cuenta con una línea de suministro de condensado que descarga a través de un rociador en la parte superior del tanque a 3.5 kg/cm² para lavar el tanque e impedir incrustaciones en las paredes una vez que el proceso de filtrado ha terminado cuando el tanque ha alcanzado bajo nivel. El derrame y drenado del tanque se envían al sumidero de desechos detergentes.

El pH de los desechos detergentes es ajustado entre 6 y 9 antes de iniciar el proceso de filtrado; este ajuste se efectúa mediante el modo de recirculación durante un tiempo de 10 minutos, agregando ácido o sosa según se requiera; con lo que se neutraliza los desechos detergentes. Para este fin, cada tanque cuenta con una bomba de 30 gpm, la cual succiona del tanque de desechos detergentes y descarga hacia el mismo tanque. Una línea de interconexión entre las succiones de las bombas permite redundancia de proceso a ambos tanques colectores, así como una válvula que interconecta las líneas de recirculación de ambos tanques.

Este sistema cuenta con dos elementos filtrantes del 100% cada uno, tipo cartucho intercambiable. Los filtros están diseñados para un flujo nominal de 30 gpm, removiendo partículas de hasta 25 µm.

Los tanques de muestreo de desechos detergentes tienen una capacidad de 1,600 galones cada uno y su función es recibir y muestrear la corriente filtrada para su descarga al drenaje pluvial.

Cada tanque cuenta con una línea de lavado y una línea de recirculación. Mediante las bombas de muestreo, con capacidad de 30 gpm, se logra una mezcla homogénea para el análisis de radionucleidos.

resinas de los desmineralizadores de condensado, de intercambiadores iónicos de drenes de piso y de equipo. Estas corrientes consisten en grandes volúmenes de ácido sulfúrico y sosa cáustica con alta conductividad (mayor a 100 $\mu\text{mho/cm}$); también se procesan periódicamente sustancias de los tanques de desechos químicos, de los tanques de destilado y de los sumideros de drenes de piso.

Para efectuar sus funciones el sistema cuenta con los siguientes componentes:

- Dos tanques de neutralización de 17,000 galones cada uno.
- Dos concentradores de desechos del 100% cada uno.
- Dos tanques de desechos concentrados de 17,000 galones cada uno.

Los tanques de neutralización reciben el aporte de las fuentes mencionadas a través de sus válvulas de llenado, las cuales tienen un enclavamiento de tal manera que sólo un tanque puede estar recibiendo mientras que el otro se encuentra en proceso.

Estos tanques cuentan con una bomba de neutralización de desechos de 200 gpm cada bomba; con la función de recircular al mismo tanque evitando interferencias de tal modo que permiten redundancia de operación.

Antes de iniciar la alimentación al concentrador, los desechos deben ser muestreados por medio de una celda de pH y neutralizados, recirculando la corriente durante 20 minutos aproximadamente a través de un eductor el cual descarga en el fondo del tanque para hacer la muestra más representativa. El pH de la mezcla deberá mantenerse entre 8 y 10.

Una vez terminado el proceso de neutralización; se inicia el modo de alimentación al concentrador por medio de una bomba de alimentación

de 35 gpm. La capacidad máxima de alimentación a los concentradores es de 15 gpm por lo que el exceso, 20 gpm, se debe recircular al tanque.

Los tanques de neutralización alimentan a los concentradores de desechos, mediante dos bombas de 60 gpm, una por tanque, para efectuar las funciones de recirculación y transferencia de concentrado.

El modo de operación de recirculación se utiliza para homogenizar la mezcla a través de un eductor que descarga en el fondo del tanque, durante un período aproximado de 10 minutos. Posteriormente los desechos concentrados son transferidos al tanque de alimentación de desechos concentrados del sistema de solidificación para ser empacados y enviados fuera del sitio.

Tomando en cuenta el flujo de descarga de los concentradores a carga máxima se necesitarían 19 horas de descarga continua para llenar un tanque de desechos concentrados.

La Figura IV-12 muestra un diagrama esquemático del proceso de tratamiento de desechos regenerantes.

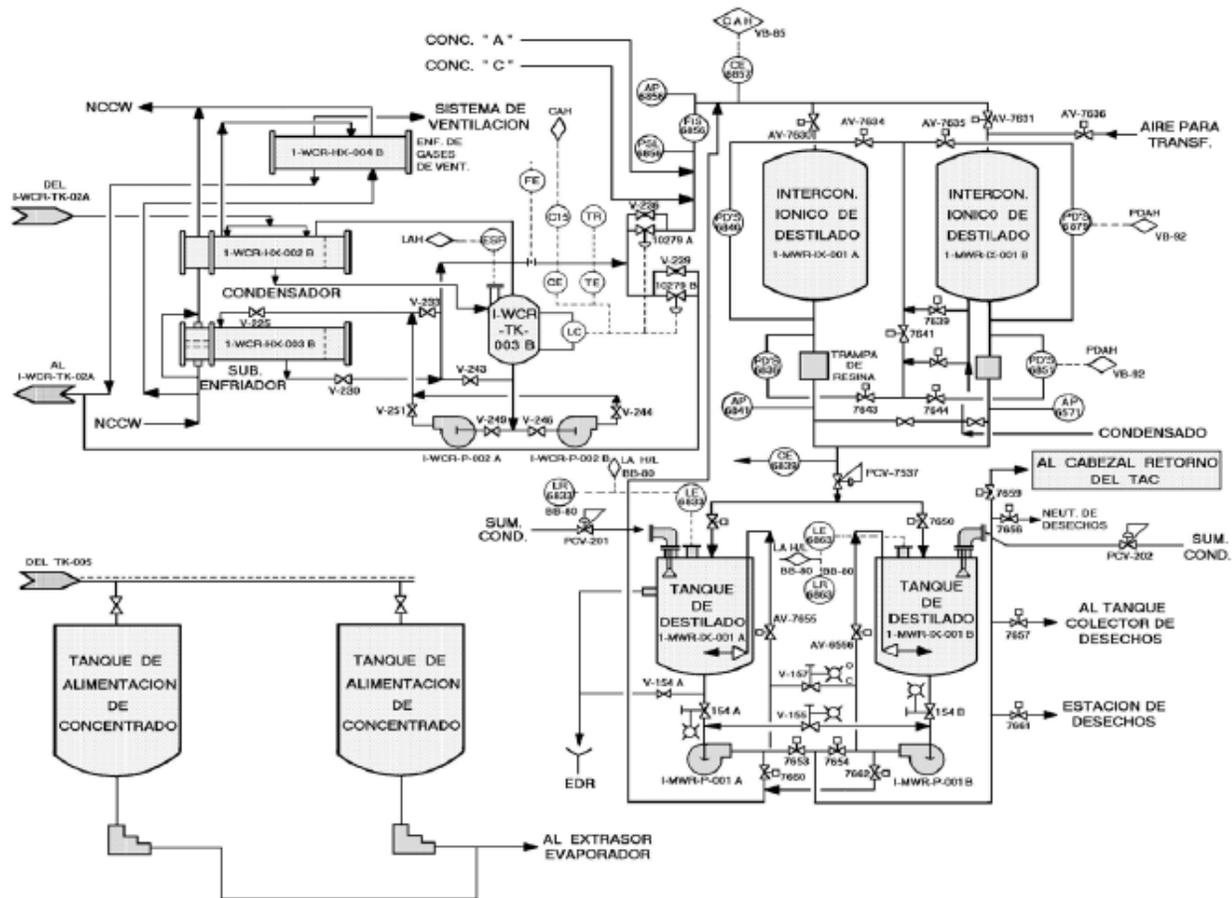


Figura IV-12. Sistema de tratamiento de desechos regenerantes (2/2)

4.2.3.6. Sistema de preparación pre-solidificación

El sistema preparatorio de solidificación recolecta los lodos radiactivos (desechos) generados en la Central productos de otros procesos y los prepara para su envío al sistema de solidificación. El sistema consta de los siguientes equipos:

- Separador de fase del sistema de limpieza del agua del reactor
- Separador de fase de lodos
- Tanque de resinas gastadas

Separadores de fase del sistema de limpieza de agua del reactor (RWCU)

Los separadores de fase son depósitos de almacenamiento, en los cuales los sólidos se sedimentan en el fondo. La función primaria del separador de fase del RWCU es procesar el agua de retrolavado de la resina en polvo y los lodos provenientes de los desmineralizadores.

Los sólidos sedimentados tienen una concentración de 15% en peso pero durante el proceso de transferencia de lodos la concentración disminuye. Los lodos sedimentados son enviados al tanque de decantado del sistema de solidificación; el agua de decantado es retornada al tanque colector de desechos para su reprocesamiento.

Este sistema cuenta con dos separadores de fase con capacidad de 9,500 gal. El período de almacenamiento y sedimentación en estos separadores está considerado en base al tiempo de decaimiento de los isótopos presentes en los desechos (aproximadamente 4 horas). Alrededor de 825 galones son enviados al separador de fase durante el retrolavado de los filtros desmineralizadores del RWCU, en los cuales existen aproximadamente 24 libras de sólidos debido a resinas y otros sólidos insolubles.

Los separadores de fase cuentan con una bomba de decantado, con capacidad de 100 gpm, que succionan de los tanques y descargan al tanque colector de desechos lodosos. También cuentan con una bomba de lodos de 240 gpm de capacidad, la cual succiona de los tanques y descargan al tanque de decantado.

Cada separador de fase está dimensionado para recibir hasta 3 lotes de retrolavado manteniendo un nivel normal de operación. El proceso del separador de fase consiste en separar la fase líquida de la fase sólida para lo cual debe transcurrir un tiempo de dos horas como mínimo después de la última descarga al separador dejando la mezcla para que las partículas sólidas se sedimenten en el fondo del separador y el agua clarificada pueda ser enviada a través de la bomba de decantado del separador al tanque colector de desechos.

El sistema de suministro de condensado proporciona condensado para lavado de la succión de la bomba de lodos. La Figura IV-13 muestra un esquema simplificado del separador de fase del sistema de limpieza de agua del reactor (RWCU) y sus componentes auxiliares.

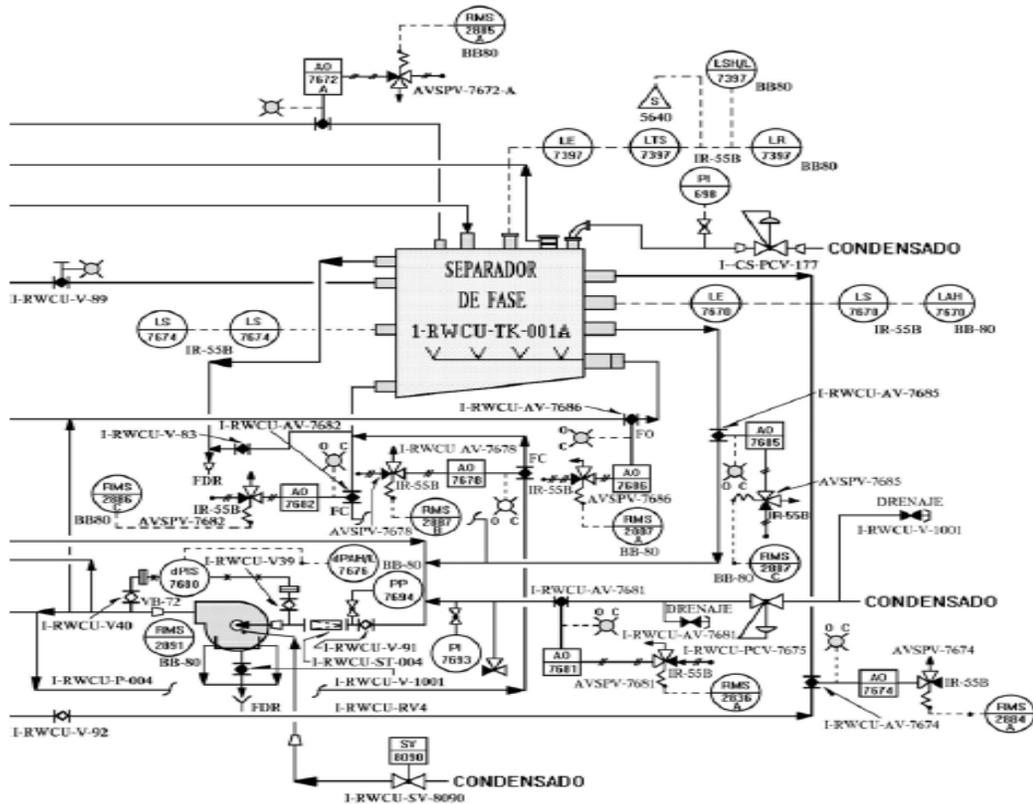


Figura IV-13. Separador de fase del RWCU

Separador de fase de lodos

La función de este separador es procesar el retrolavado de los filtros desmineralizadores del sistema de limpieza de la alberca de combustible gastada, del filtro de drenes de equipo y drenes de piso, de los filtros electromagnéticos y lodos de los tanques colectores de drenajes de equipo y de piso. Los aportes mencionados se reciben en un separador de fase de 14,150 galones. Los sólidos sedimentados en el separador de fase tienen una concentración de 5% en peso.

El separador de fase de lodos cuenta con una línea de suministro de condensado con una válvula controladora de presión, la cual aporta agua de

lavado al separador; una vez terminado el proceso de transferencia de lodos.

La línea de derrame así como el drenado del tanque descargan al sumidero (tanque) de drenes de piso.

La Figura IV-14 muestra un esquema simplificado del separador de fase de lodos y sus componentes auxiliares.

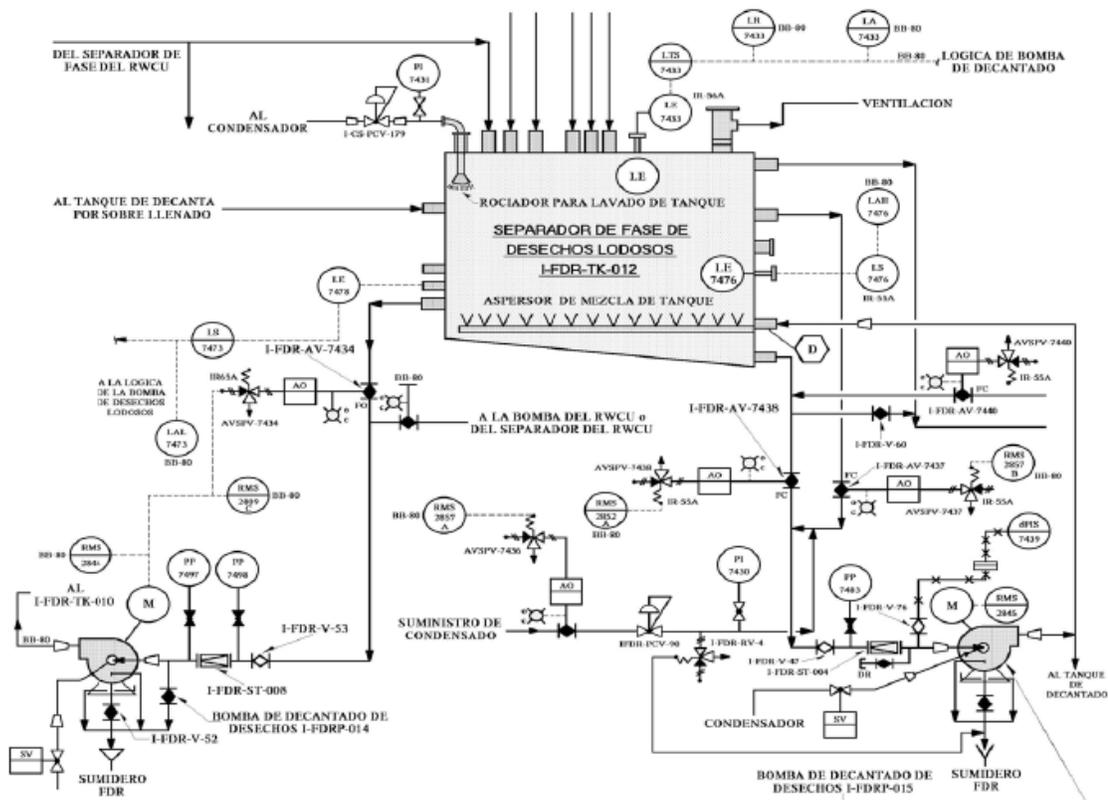


Figura IV-14. Separador de fase de desechos lodos

Tanque de resinas gastadas

El tanque es un cilindro vertical dividido en dos compartimentos 5,000 galones cada subcompartimento. El arreglo es tal que se puede recibir resinas de diferente concentración radiactiva, para lo cual se cuenta con un cabezal colector en donde descargan las siguientes corrientes de entrada:

- a. Intercambiadores iónicos de desmineralizadores de condensado,
- b. Intercambiadores iónicos de drenes de piso,
- c. Intercambiadores iónicos de drenes de equipo, y
- d. Intercambiadores iónicos de destilado que hayan perdido capacidad de intercambio iónico.

Cada compartimento puede recibir hasta 3 camas completas de 168 ft³ cada una. Consta de filtros tipo malla para remover el agua arrastrada con las resinas; también con una conexión de aire para romper el asentamiento de resinas y ser transferidas al sistema de solidificación.

Antes de iniciar la transferencia de resinas al sistema de solidificación, el exceso de agua en el tanque debe ser removido a través de la bomba de resinas gastadas con capacidad de 140 gpm; esto se logra inyectando aire al tanque para remover las resinas y la humedad contenida en ellas. La Figura IV-15 muestra un esquema simplificado del tanque de resinas gastadas y sus componentes auxiliares.

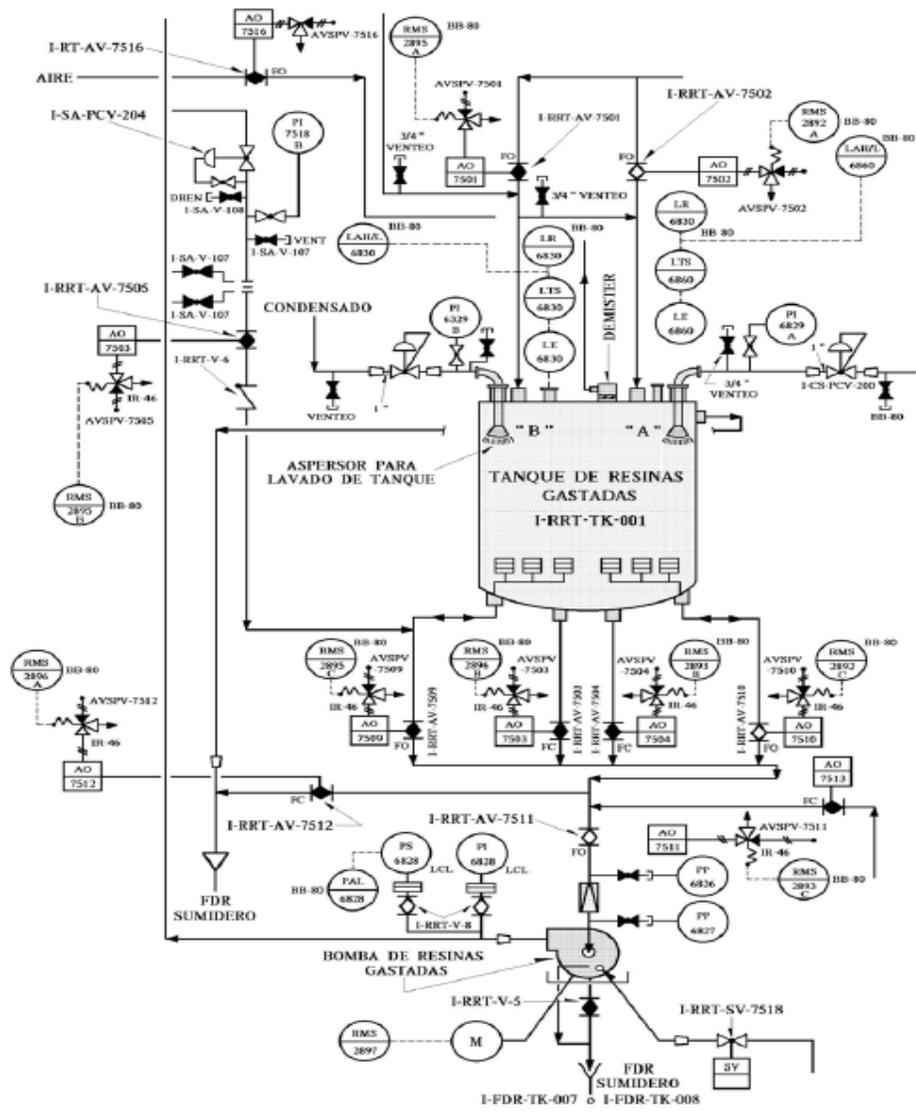


Figura IV-15. Tanque de resinas gastadas.

4.3. Sistemas de manejo de desechos radiactivos sólidos

4.3.1. Propósito de los sistemas de gestión de desechos radiactivos sólidos

Los desechos sólidos consisten de resinas gastadas de intercambio iónico, lodos filtrados y resinas de reborde de intercambio iónico.

Los desechos sólidos son recolectados y procesados de acuerdo con las clasificaciones de desechos sólidos húmedos y secos, y componentes irradiados del reactor

4.3.2. Función del sistema de tratamiento de desechos radiactivos sólidos

La función del sistema de desechos sólidos es recolectar, procesar, embazar en bidones, almacenar y preparar para transporte fuera del sitio los desechos producidos durante los diferentes modos de operación de la Central.

Las principales corrientes de entrada al sistema de desechos sólidos provienen de los sistemas de limpieza del agua del reactor, de limpieza de las albercas de supresión y de combustible gastado, de desmineralización de condensado y de desechos radiactivos.

En la Figura IV-16 y Figura IV-17 se ilustra un diagrama simplificado de drenes de piso, de equipo, concentradores y desechos sólidos hasta su almacenamiento y empaque final.

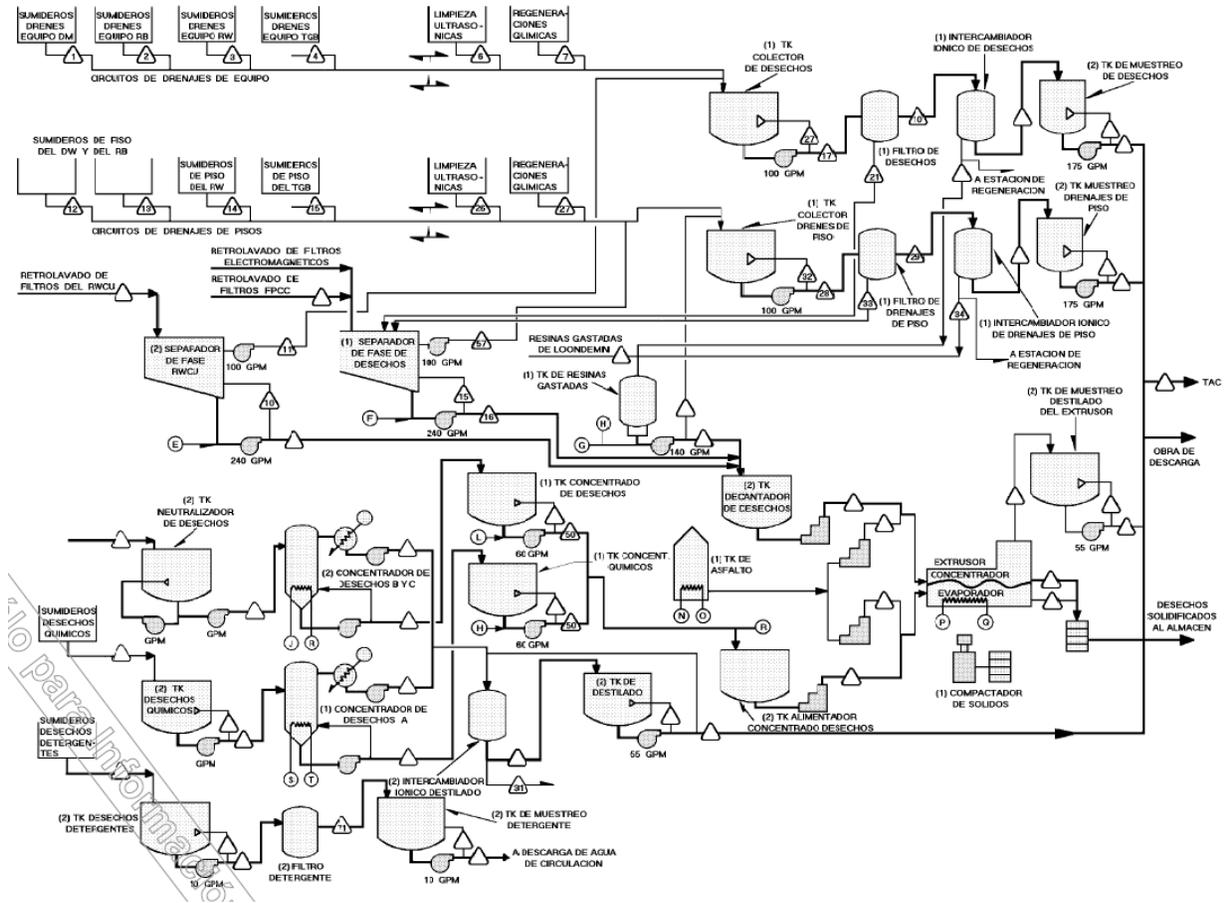


Figura IV-16. Diagrama simplificado de drenes de piso, drenes de equipo, concentradores y desechos sólidos.

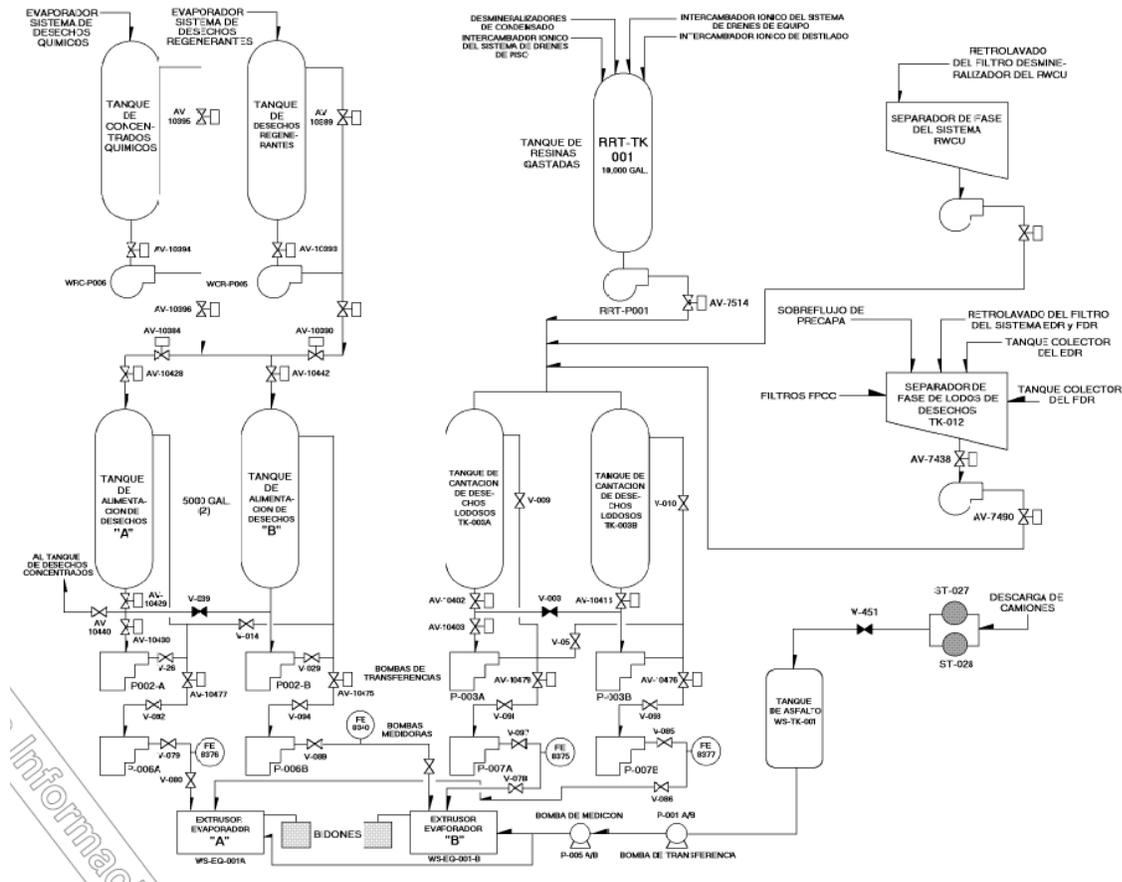


Figura IV-17. Diagrama simplificado de la trayectoria de flujo de los desechos radiactivos sólidos.

4.3.3. Clasificación de los desechos sólidos

De acuerdo a las corrientes de entrada al sistema, los desechos sólidos se clasifican en:

1. Desechos sólidos húmedos
2. Desechos sólidos secos
3. Material de desechos del reactor

Los desechos sólidos húmedos se forman de las aportaciones siguientes: resinas gastadas de intercambio iónico; lodos de los separadores de fase

provenientes del retrolavado de filtros desmineralizadores y de la sedimentación de los tanques colectores de drenes de piso y tanques colectores de desechos (drenes de equipo); y concentrados químicos de desechos de laboratorio, soluciones regenerantes y de descontaminación.

Los desechos sólidos secos están formados por filtros de cartucho, papel, trapo, estopa, ropa usada, cubiertas de calzado, guantes, bolsas, herramientas provenientes de áreas contaminadas que no pueden ser descontaminadas en forma efectiva así como desechos sólidos de laboratorios. Estos desechos son colectados en contenedores localizados en zonas apropiadas alrededor de la Central según lo requiera el volumen de desechos generados durante la operación normal y mantenimiento por recarga de combustible. Los contenedores llenos son sellados y trasladados al almacén de bidones para su decaimiento y disposición fuera del sitio. Los desechos sólidos secos compactables son compactados en tambores de acero de 55 galones con una prensa hidráulica para reducir su volumen. Este sistema de reducción de volumen incluye una cubierta ventilada alrededor del contenedor de concreto para controlar la liberación de polvos acarreados por aire y que son generados durante el proceso de compactación. El sistema de compactación cuenta con filtros de alta eficiencia para evitar que las partículas sean liberadas al medio ambiente. Los desechos sólidos secos no compactables son empacados manualmente en tambores similares de acero de 55 galones debido a su baja actividad. Alrededor de 500 lotes de 7.3 ft³ cada uno son acumulados cada año. La capacidad de almacenamiento en el sitio de la Central es de 250 tambores (1,825 ft³).

Los materiales de desechos del reactor, tales como barras de control gastadas, cámaras de ionización y piezas grandes de equipo que tienen un alto nivel de actividad y contaminación son almacenados en la alberca de combustible gastado. Posterior a su decaimiento, el cual puede ser de varios meses, el material es trasladado en contenedores blindados especialmente diseñados, para su disposición fuera del sitio.

4.3.3.1. Desechos sólidos húmedos

El sistema de desechos sólidos húmedos es una continuación del sistema de desechos líquidos ya que es difícil determinar dónde termina un proceso y dónde se inicia el otro.

El sistema de desechos sólidos se define a partir de los tanques de decantado de lodos, los cuales reciben desechos provenientes de los separadores de fase y de los tanques de resinas gastadas; de los tanques de desechos concentrados, los cuales reciben de los tanques de neutralizadores de concentrados y desechos químicos concentrados.

El tratamiento de desechos sólidos húmedos puede ser dividido en cuatro etapas:

1. Colección de desechos.
2. Pretratamiento de desechos y reducción de volumen.
3. Agentes de solidificación y mezclados.
4. Embidonado, manejo de bidones y almacenamiento.

Colección de desechos húmedos

La etapa de colección de desechos sólidos húmedos cuenta con los siguientes equipos:

- Tanques de decantado de lodos, los cuales reciben aporte del separador de fase del sistema de limpieza de agua del reactor (RWCU), del separador de fase de lodos y del tanque de resinas gastadas.
- Tanques de alimentación de desechos concentrados, los cuales reciben aporte del tanque de concentrados químicos, y del tanque de desechos concentrados.

Los tanques de decantado de lodos y tanques de alimentación de desechos concentrados descargan a través de bombas de transferencia al evaporador, componente que inicia la siguiente etapa (ver Figura IV-17).

Pretratamiento de Desechos y Reducción de Volumen

El proceso de reducción de volumen sirve para minimizar la cantidad de desechos solidificados a disponer fuera de las inmediaciones del sitio.

Generalmente los desechos sólidos húmedos generados en la central contienen grandes volúmenes de agua, por lo cual es necesario utilizar diversos equipos y procesos como decantación y evaporación para generar sólidos con bajo contenido de humedad. El proceso de reducción de volumen se inicia con los tanques de decantado y continúa con el evaporador, el cual cuenta con siete zonas de calentamiento para eliminar la humedad (ver Figura IV-18).

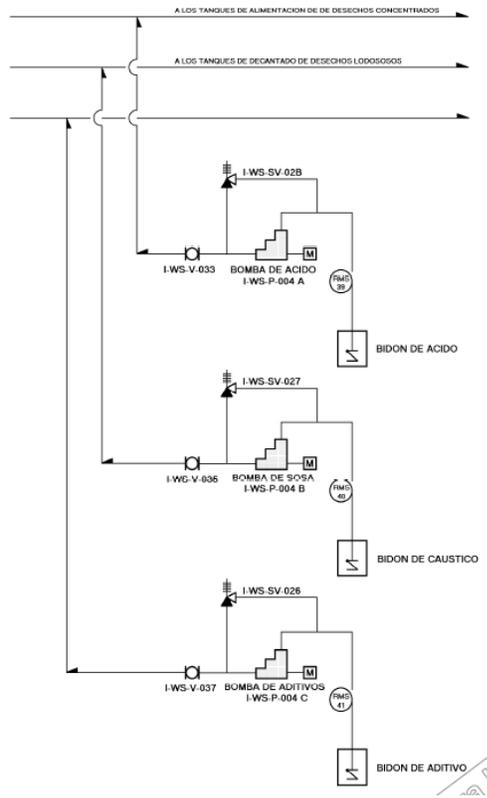


Figura IV-18. Pretratamiento de desechos

Agente de Solidificación y Mezclado

El medio utilizado como agente de solidificación es el concreto, el cual es almacenado en un tanque localizado en área no radiactiva del edificio de desechos, cerca del sistema de solidificación. Este tanque tiene una capacidad de 9,000 galones (ver Figura IV-19).

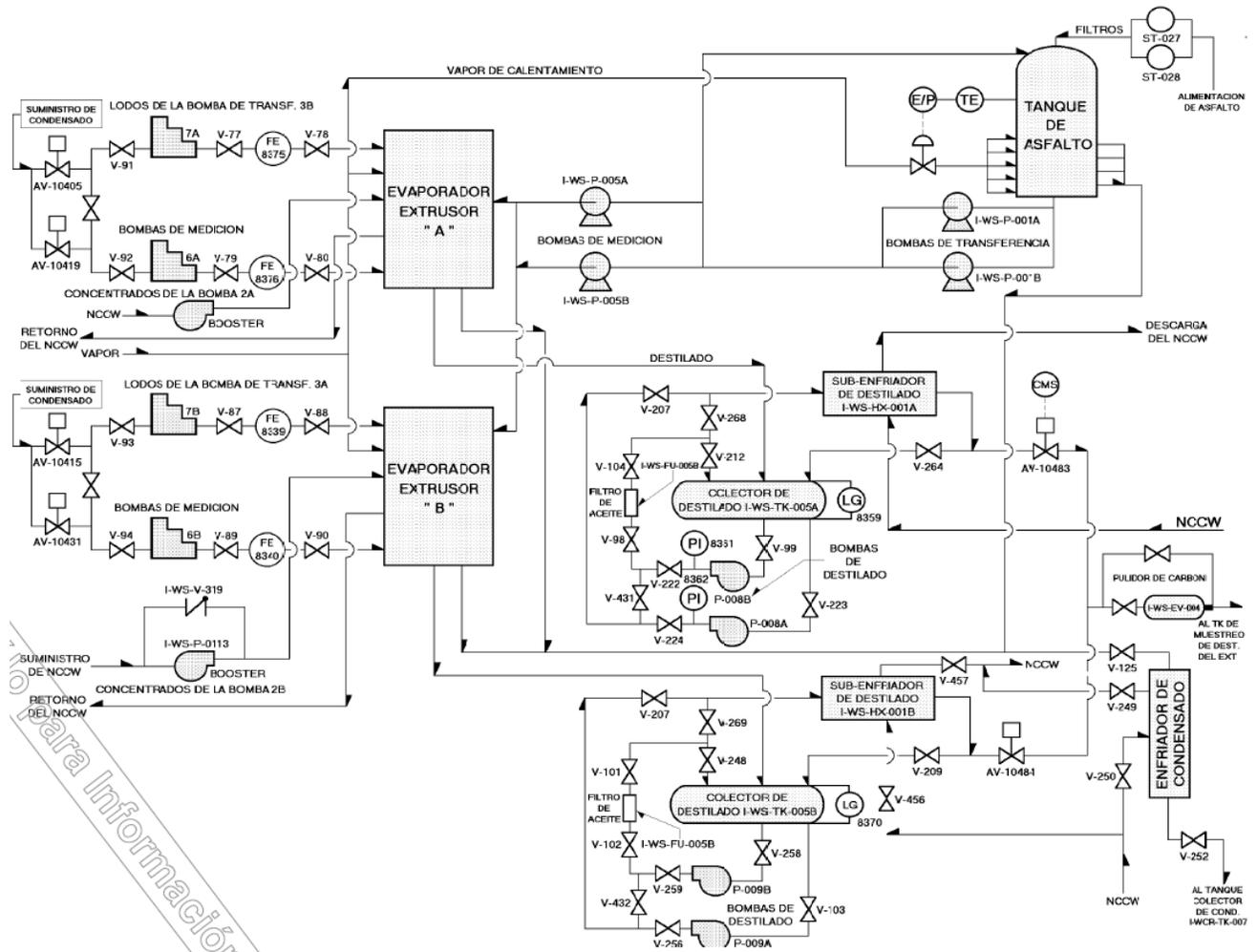


Figura IV-19. Subsistemas de solidificación y mezclado.

Embidonado, Manejo de Bidones, Descontaminación y Almacenamiento

El proceso de embidonado cuenta con una tornamesa a la descarga del evaporador con capacidad para 6 bidones de 55 galones cada uno. Posteriormente los bidones llenos son transferidos por una grúa a control remoto al mecanismo de sellado de bidones; este mecanismo neumático cuenta con un depósito de tapas y rodillos de sellado; se lleva a cabo un monitoreo de radiación después del sellado del bidón; si el nivel de

radiación es aceptable²⁹ el bidón es enviado al almacén de decaimiento para su envío fuera de sitio.

Sistema de Solidificación y Reducción de Volumen.

Los propósitos principales del sistema de solidificación de desechos es: efectuar la mayor reducción de volumen, usar un proceso simple y compatible a la fuente operacional de los desechos, proporcionar una contención que es permanente, segura, fácil almacenamiento y transporte y no evaporable; y efectuar lo anterior lo más económico posible.

En este proceso se utiliza asfalto/concreto como mezclador y blindaje. El uso del asfalto proporciona numerosos beneficios tales como baja evaporación, alta resistencia al ataque por microorganismos, alta resistencia a la radiación y baja corrosión interna de contenedores.

La propiedad de evaporación de la mezcla asfalto/concreto-desechos es del orden de 10^{-4} a 10^{-5} gr/día. El evaporador efectúa una mezcla homogénea final de productos de un tamaño promedio entre 10 y 30 μm .

El sistema de reducción de volumen incluye un sistema de sellado no hermético. El producto solidificado no permite el desarrollo de bacterias o generación de hidrógeno.

En el evento de incendio en el área de los desechos embidonados, la generación de vapor o explosión es casi imposible, debido a que el agua libre en la mezcla no existe. Para temperaturas mayores de 325 °F el asfalto se derrite (sin que exceda de 345 °F), solidificándose nuevamente cuando el bidón se enfría.

²⁹ Valores de radiación por debajo de límites previamente establecidos, adecuados para el manejo del contenedor sin mayor restricción radiológica.

El sistema de solidificación y reducción de volumen utiliza dos extrusores/evaporadores del 100% de capacidad cada uno para proporcionar una etapa de mezclado de desechos con asfalto/concreto y evaporación de toda el agua libre. El producto final da como resultado una pasta de asfalto/concreto. El mayor beneficio de este sistema es la reducción de volumen y solidificación en forma de pasta asfáltica.

El extrusor/evaporador (ver Figura IV-20) consiste de dos tornillos rotativos utilizados para mezclar los productos de desechos con el asfalto. A lo largo del extrusor/evaporador se tienen 7 zonas de calentamiento para evaporar toda el agua liberada en la mezcla. El agua removida de la mezcla se condensa en los domos de vapor de tal manera que el destilado así producido es relativamente de puro que después de ser filtrado y enfriado puede ser retornado al ciclo de vapor. La temperatura en cada una de las zonas de calentamiento es controlada para mantener un funcionamiento óptimo.

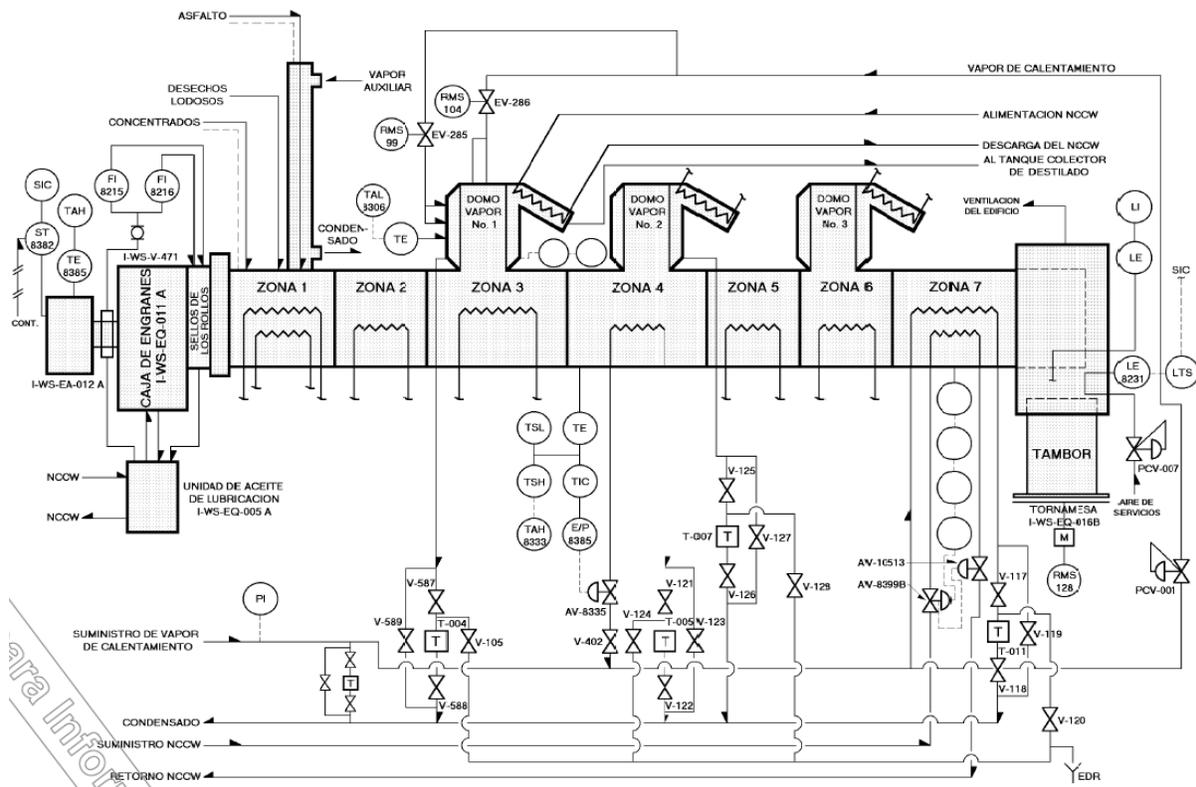


Figura IV-20. Extrusor/Evaporador

Cada domo de vapor está equipado con un condensador y tobera de vapor.

El destilado removido desde el condensador es recogido en un sistema de colección de destilado para retornar al sistema de desechos líquidos. Cada domo de vapor es calentado con vapor auxiliar para reducir la condensación en la superficie del mismo, aguas arriba del condensador integrado el cual es enfriado por el sistema de circuito cerrado de agua enfriamiento (NCCW). Periódicamente se suministra un chorro de vapor a cada domo de vapor para remover el incrustamiento de la mezcla en el extrusor. Adicionalmente puede suministrarse agua desmineralizada a

los domos de vapor la cual es calentada para limpieza del extrusor/evaporador.

Una grúa de 7.5 toneladas de capacidad es utilizada para transportar los bidones llenos al mecanismo de sellado. Este mecanismo cuenta con una estación de monitoreo y un sistema neumático operado automática y manualmente.

El bidón lleno es colocado sobre una base deslizante y giratoria cuando ésta llega a una posición preestablecida, unos brazos mecánicos toman la tapa del depósito de tapas del mismo mecanismo y lo colocan sobre el bidón lleno, el bidón es deslizado y colocado debajo del mecanismo de rolado; el bidón empieza a girar y la tapa se sella al bidón. Todo este proceso puede ser observado a través de cristales blindados así como el movimiento de la grúa.

Una vez que el bidón ha sido sellado y monitoreado éste pasa a la estación de descontaminación siempre y cuando sea necesario.

Estación de descontaminación.

En el evento de contaminación externa de los bidones se cuenta con una estación de descontaminación la cual es operada a control remoto. Estos bidones son transportados con la grúa y bajados dentro del recipiente con capacidad para un sólo bidón el cual cuenta con tobera de agua desmineralizada y vapor auxiliar para lavado a presión, existe un enclavamiento en la operación de lavado el cual opera solamente cuando el recipiente está cerrado; el condensado resultante se drena al sistema de desechos detergentes.

Después del lavado y antes de abrir el recipiente éste debe ser venteado al sistema de ventilación del Edificio del Desechos Radiactivos.

Posteriormente se verifica que el bidón esté completamente libre de agua antes de ser transportado al almacén de decaimiento.

4.3.3.2. Desechos sólidos secos

Estos desechos son colectados en contenedores localizados en zonas apropiadas alrededor de la central según lo requiera el volumen de desechos generados durante la operación y mantenimiento.

Los contenedores llenos son sellados y trasladados al almacén de bidones para su decaimiento y posterior traslado fuera del sitio.

Los desechos comprimibles son compactados en tambores de acero de 208 litros (55 galones) con una prensa hidráulica para reducir su volumen. Este sistema de reducción de volumen incluye una cubierta ventilada alrededor del contenedor de concreto para controlar la liberación de polvos acarreados por aire y que son generados durante el proceso de compactación. Cuenta además con filtros de alta eficiencia para evitar que las partículas sean liberadas al medio ambiente.

Los desechos no compactables son empacados manualmente en tambores similares de acero de 208 litros debido a su baja actividad. Alrededor de 500 lotes de 0.207m^3 (7.3ft^3) cada uno, serán acumulados cada año de operación. La capacidad o tiempo de almacenamiento en el sitio es de 250 tambores ($1,825\text{ft}^3/51.7\text{m}^3$) o seis meses acumulados respectivamente.

4.3.4. Almacenamiento de desechos sólidos

El diseño de un reactor de agua ligera cuenta con un área de almacenamiento de desechos sólidos en el Edificio de Desechos radiactivos equivalente a un año de operación. Con el propósito de operar la central mientras se tiene un área de almacenamiento temporal en el sitio; esta área está provista por el almacén temporal de desechos radiactivos de bajo y medio nivel.

El diseño del almacén temporal cumple con los siguientes objetivos:

1. Un área de almacenamiento para desechos sólidos basado en los siguientes criterios.
 - a. Almacenamiento durante 5 años.
 - b. Almacenamiento durante un máximo de 10 años.
2. La producción de desechos sólidos durante 5 años de operación, considerando tambores de 208 litros (55 galones)

4.3.4.1. Áreas de almacenamiento

Existen dos áreas separadas para el almacenamiento de los desechos sólidos.

1. Área de almacenamiento temporal para desechos radiactivos sólidos de mediano y bajo nivel. Este es un edificio con estructura de concreto reforzado para contener los desechos, producto de la operación del Sistema de Desechos Sólidos.

-
2. Área de almacenamiento de los desechos radiactivo secos activos (DAW). Esta es una estructura de block de concreto para contener los desechos comprimibles (compactados).

Las áreas de almacenamiento actúan como barreras de protección de los desechos para:

- Proteger los contenedores de desechos (tambores) de los efectos ambientales.
- Prevenir una liberación incontrolada de material radiactivo al ambiente.
- Proporcionar un blindaje para la radiación emitida por los desechos.

El almacén temporal incluye provisiones para monitoreo remoto del área de almacenamiento por medio de un circuito cerrado de televisión de forma tal que las condiciones de cualquier tambor almacenado puede ser observado y verificado.

El sistema de almacenamiento temporal incluye un sistema de inventario que permite registrar todos los datos necesarios para cada tambor o de cualquier tipo de contenedor colocado en almacenamiento.

4.3.4.2. Contenedores de desechos

Los contenedores de desechos son almacenados dentro del almacén temporal para protegerlos de las condiciones ambientales externas.

Los contenedores de desechos solidificados son de 208 litros (55 galones) de acero, recubiertos con una pintura epóxica y tapados.

Los contenedores de alta integridad (HIC) están contruidos de polietileno de alta densidad (reforzado) con una capacidad de almacenamiento de desechos de 140 ft³.

4.3.4.3. Almacén temporal

Sólo los desechos solidificados en asfalto, cemento o colocados en HIC's serán almacenados en esta área. Los tambores y HIC's que sean enviados a este almacén son primero inspeccionados y checados superficialmente, para asegurarse que no estén contaminados o dañados.

Para reducir las posibles exposiciones del personal durante las operaciones de inspección y mantenimiento, el almacén cuenta con las siguientes características de diseño:

- Los edificios y equipos están diseñados de forma que no se requieren actividades de mantenimiento en las áreas de almacenamiento de alta radiación.
- No se espera que existan líquidos acumulados, sin embargo, el edificio está previsto con trincheras y drenajes de piso que terminan en un sumidero colector. Existen bombas de sumidero y un tanque colector de líquidos previsto para muestreo y almacenamiento.
- Los tambores son manejados con una grúa a control remoto con cámaras de televisión en un circuito cerrado. La grúa está diseñada para recuperar cualquier tambor que haya caído.
- Un recubrimiento (pintura) descontaminable está prevista sobre pisos y paredes para facilitar su limpieza y descontaminación.
- Un área a prueba de impacto con cristal blindado está previsto para permitir observar las operaciones de manejo de tambores.

-
- La inspección de los tambores almacenados se realiza por medio del circuito cerrado de televisión desde el cuarto de control del almacén temporal.

La estructura del edificio está clasificada como no relacionada con seguridad y no sísmica I³⁰.

4.3.4.4. Blindaje

Los muros exteriores del edificio son de 80 cm de espesor para cumplir con los requerimientos de blindaje, el techo consiste de piezas prefabricadas de concreto reforzado de 35 cm de espesor.

El almacén temporal provoca un efecto de autoblandaje debido al gran número de tambores en el área de almacenamiento. Los muros de concreto proporcionan un blindaje inicial para los tambores almacenados en la periferia del área de almacenamiento.

4.3.4.5. Monitoreo de radiación

El monitoreo de radiación se realiza por medio de equipo portátil, los monitores de radiación de área se encuentran en el cuarto de control y en la bahía de acceso de vehículos, próximo a la entrada del personal. Adicionalmente un monitor de pies y manos se encuentra dentro de las oficinas de acceso para monitoreo del personal.

³⁰ No se requiere asegurar la integridad de esta estructura durante un evento de sismo.

4.3.4.6. Protección contra incendio

El objetivo de este sistema dentro del almacén temporal es detectar y extinguir cualquier incendio en el área de almacenamiento para reducir los daños a los contenedores de desechos y reducir también la liberación de material radiactivo al ambiente.

El sistema de detección está provisto con detectores térmicos (de calor) y detectores de humo que envían señal al panel de control de detección de incendios local y a la estación central de alarmas de la planta.

En el caso de un incendio, los ventiladores (inyección y extracción) pararán automáticamente, el sistema contra incendios puede ser operado indistintamente en forma automática (por el sistema de detección) o en forma manual (por el operador).

Las áreas de almacenamiento cuentan con un sistema de rociadores automáticos tipo multiciclo, que están abastecidos desde una extensión independiente que se deriva del sistema de agua cruda hasta el almacén temporal.

El cuarto de control del almacén y la bahía de acceso de vehículos cuenta con hidrantes y extinguidores portátiles para la protección contra incendios.

4.3.5. Limitaciones en el traslado de desechos radiactivos sólidos

- Los materiales radiactivos no deben ser trasladados fuera de su disposición inicial a menos que sea aprobado por la sección de supervisión de protección radiológica.
- Los desechos radiactivos debe ser empacados, etiquetados y transportados de acuerdo a las Regulaciones Federales contenidas en el título 49 del Código de Regulaciones 170-178.
- Se deberá llevar un registro para cada movimiento al exterior de la planta "Registro de Traslado de Material Radiactivo".
- Después de cargar el vehículo, Protección Radiológica hará pruebas de la dosis de radiación y contaminación y los resultados deberán registrarse en las órdenes de traslado.
- Con el objeto de proteger al personal de la central y al público en general, los límites de manejo de desechos radiactivos estarán dentro de lo permitido por 10CFR20 y 10CFR50

5. Arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos

5.1. Consideraciones generales

En el Capítulo 4 se describieron los sistemas de tratamiento de desechos radiactivos de un reactor de agua ligera, desde el punto de vista de proceso. En este capítulo, se comentará la localización física dentro del edificio de desechos radiactivos de los equipos, sistemas y estructuras asociados con el tratamiento de desechos.

Para la localización y arreglo de los equipos y sistemas de tratamiento de desechos radiactivos se consideran los siguientes lineamientos:

- Los equipos deben ser segregados en zonas de radiación, en otras palabras, el equipo que se espera maneje altos niveles de radiación durante operación normal, debe ser separado del equipo que tendrá bajos niveles de radiación cuando esté en operación.
- Los tanques colectores deben ser localizados en la elevación más baja del edificio de Desechos Radiactivos. Permitiendo la colección de drenajes por gravedad desde equipos y pisos del mismo edificio u otros edificios.
- Los sumideros de drenaje de equipo, piso, químicos, etc., deben ser localizados en la elevación más baja del edificio para permitir la colección de estas corrientes por gravedad.
- Se contará con el blindaje suficiente alrededor del equipo de tratamiento de desechos para cumplir con los requerimientos del 10CFR20, evitando así dosis innecesaria de personal de la central.
- Las válvulas y bombas deben permanecer fuera de los cuartos de equipo para facilitar su operación y mantenimiento. Sin embargo, deben permanecer tan cerca como sea posible a la pared de dicho cuarto.

-
- Los componentes permanentes de equipos, los cuales se espera tengan una frecuencia baja de mantenimiento o reparación, tales como intercambiadores de calor y evaporadores, deben ser suministrados con un gancho fijo y gancho eléctrico para evitar la necesidad de colocación de andamios y escaleras durante su mantenimiento
 - El diseño debe contar con una compuerta de equipo entre las diferentes elevaciones del edificio, o un elevador en la posición central del mismo. La compuerta de equipo no sólo facilitará el movimiento de equipos específicos de los sistemas de gestión de desechos radiactivos, cuando éstos tengan que ser desplazados para mantenimiento o reparación; sino también facilitará y hará más simple el movimiento de material contaminado, equipo y partes, etc., desde otras secciones de la central al edificio de Desechos Radiactivos.
 - Se deberán separar los componentes redundantes del mismo sistema en cuartos independientes, tal que cuando estén bajo mantenimiento, cualquier dosis a personal, estará limitada a un valor considerado tan bajo como razonablemente sea alcanzable.
 - Proporcionar una área libre en las cercanías de los cuartos de equipo mayor, o de ser posible dentro de los mismos. Proporcionar blindaje portátil, si es necesario para llevar a cabo actividades de desmantelamiento o mantenimiento de equipo contaminado o limpieza de derrames de líquidos radiactivos.
 - Se debe contar con el suficiente espacio para el retiro del haz tubular de los intercambiadores de calor, en donde sea que estén localizados.
 - Se debe considerar con especial atención la interface entre los edificios de la central y la operación en modo transferencia del sistema de disposición fuera de sitio de los desechos sólidos. Se debe contar con la capacidad de acomodar vehículos de transporte dentro del edificio de Desechos Radiactivos.

-
- Se debe contar con la capacidad de llenado de tanques de almacenamiento de ácido y sosa; y concreto desde vehículos de abastecimiento localizados en el exterior del edificio. Lo anterior para no afectar el procesamiento de las corrientes de desechos por no contar con estos agentes; además de evitar la contaminación de equipos y sistemas ajenos a la gestión de desechos radiactivos.
 - El cuarto de control de Desechos Radiactivos se debe localizar en una área accesible y de bajo nivel de radiación, desde la cual, el operador de Desechos Radiactivos llevará a cabo todas las operaciones remotas.
 - El cuarto de muestreo, el laboratorio radioquímico y cuartos de conteo deben localizarse en áreas estratégicas para permitir la interface con el operador de Desechos Radiactivos.

5.2. Arreglo general del equipo en el edificio de Desechos Radiactivos

En la Figura V-1 se muestra una vista de planta de una CN de agua en ebullición avanzada (ABWR). En la Figura se muestra la localización del edificio de Desechos Radiactivos respecto a los otros edificios que conforman a la CN.

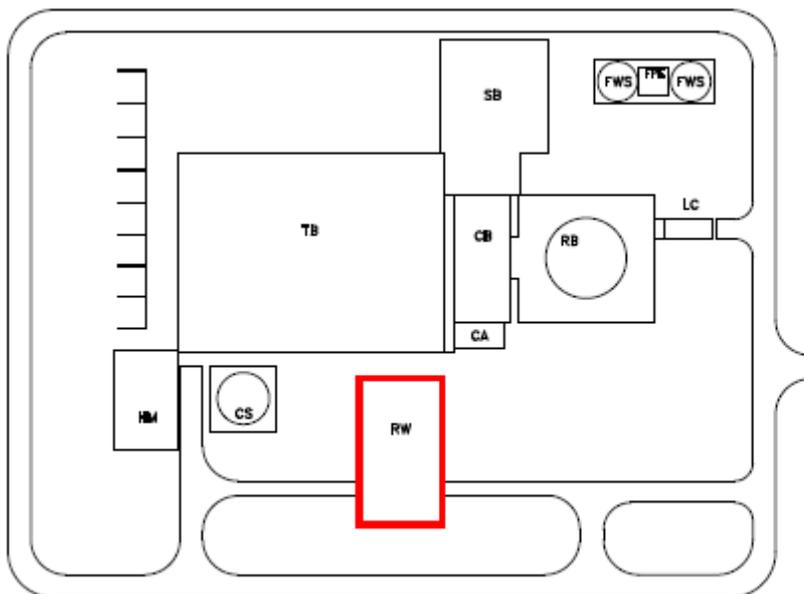


Figura V-1 Vista de planta CN de agua en ebullición avanzada (en rojo se resalta la localización del edificio de Desechos Radiativos)

5.2.1. Diagrama de arreglo general de edificio de Turbina

Se incluyen dos diagramas del edificio de turbina Figura V-2 y Figura V-3, de las elevaciones 1.90 m y 10.15 m, respectivamente. En estos diagramas se puede encontrar el equipo asociado con los dos recombinadores de hidrógeno del sistema off-gas, entre las columnas T_C - T_D y $2T_1$ - $2T_5$. Se hace notar que los recombinadores están localizados en el espacio adyacente a los eyectores de aire del condensador principal, los cuales se encuentran entre las columnas T_D - T_E y $2T_1$ - $2T_5$ en la elevación 1.90 m; minimizando de esta manera las corridas de tuberías entre estos componentes.

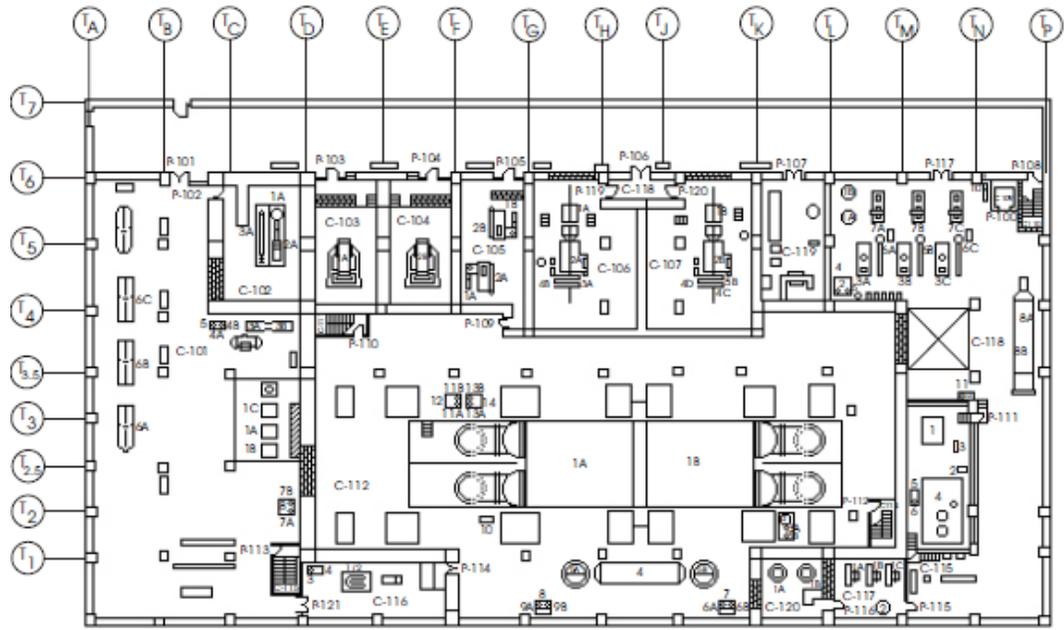


Figura V-2 Edificio de Turbina Elevación 1.90m

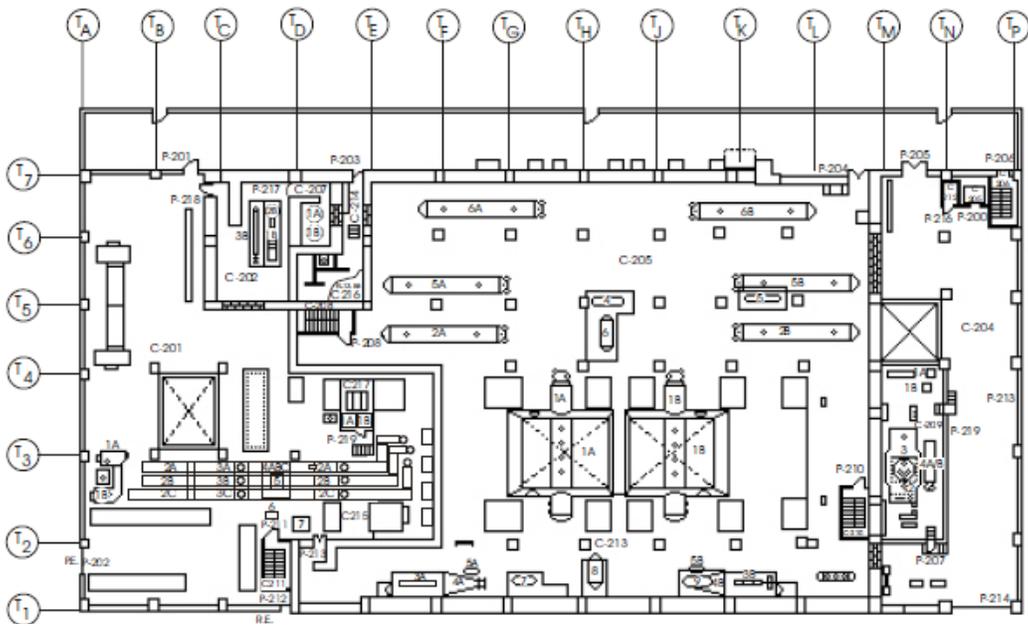


Figura V-3 Edificio de Turbina Elevación 10.15m

5.2.2. Diagrama de arreglo general del edificio Desechos Radiactivos El. -0.55 m

El plano de planta de la elevación -0.55 m se muestra en la Figura V-4. En la sección norte se localiza el equipo de remoción de humedad y remoción de actividad (lechos de carbón activado); el cual ocupa aproximadamente la mitad del espacio de esta elevación. Todos los tanques colectores se localizan en el espacio restante de esta elevación. Los tanques de alta actividad y su equipo asociado se localizan adyacentes a la pared sureste, mientras que los tanques de baja actividad y equipo asociado se localizan adyacentes a la pared oeste. Las galerías de válvulas y bombas están localizadas al exterior de los cuartos de equipo. En la sección intermedia de esta elevación se localiza el elevador (pared Este), mediante el cual se tiene acceso hasta la elevación 18.70 m.

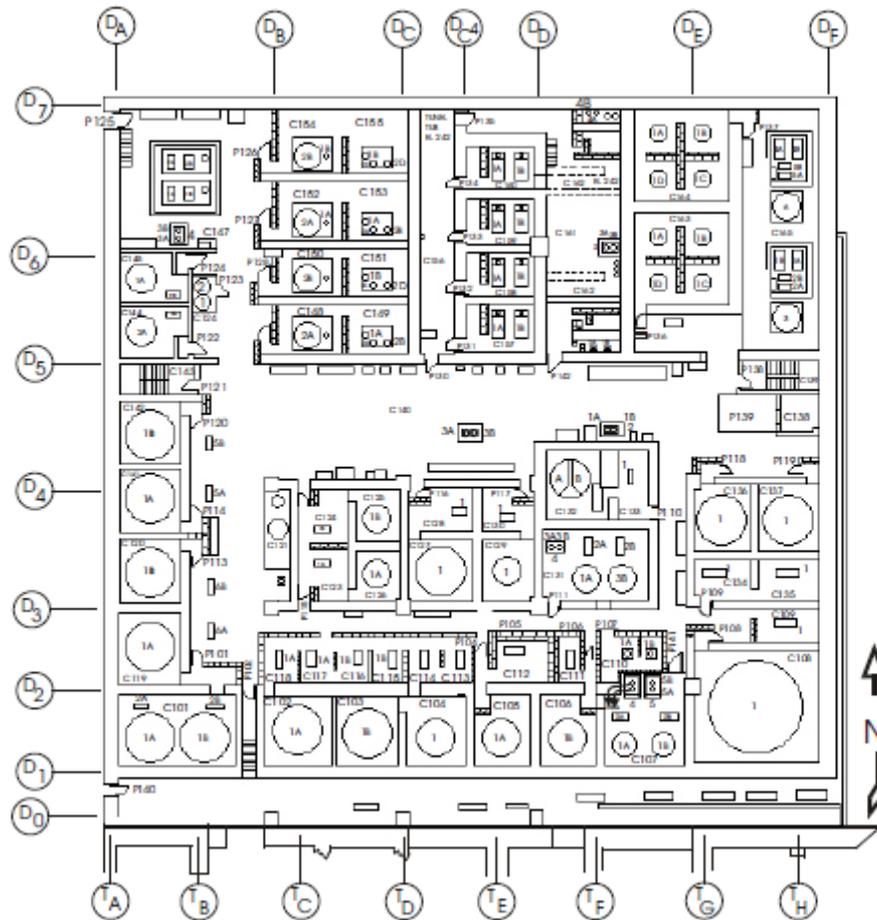


Figura V-4 Edificio de Desechos Radiactivos Elevación -0.55m

5.2.3. Diagrama de arreglo general del edificio Desechos Radiactivos El. 4.0 m / 5.20 m / 6.90 m

En la Figura V-5 se muestra la vista de planta de las elevaciones 4.00, 5.20 y 6.90 m; estas elevaciones corresponden a niveles intermedios, los cuales sirven en su mayoría para corredores de tuberías a diferentes tanques colectores. Se cuenta con accesos adicionales a los cuartos de los tanques colectores desde estas elevaciones. En lo que respecta al sistema off-gas, se cuenta con una grúa para el retiro de los filtros de partículas de alta eficiencia por reemplazo, además

de un monorraíl y un gancho para movilizar los lechos de carbón. La compuerta de equipo se entre las columnas D₂-D₃ y T_B-T_C.

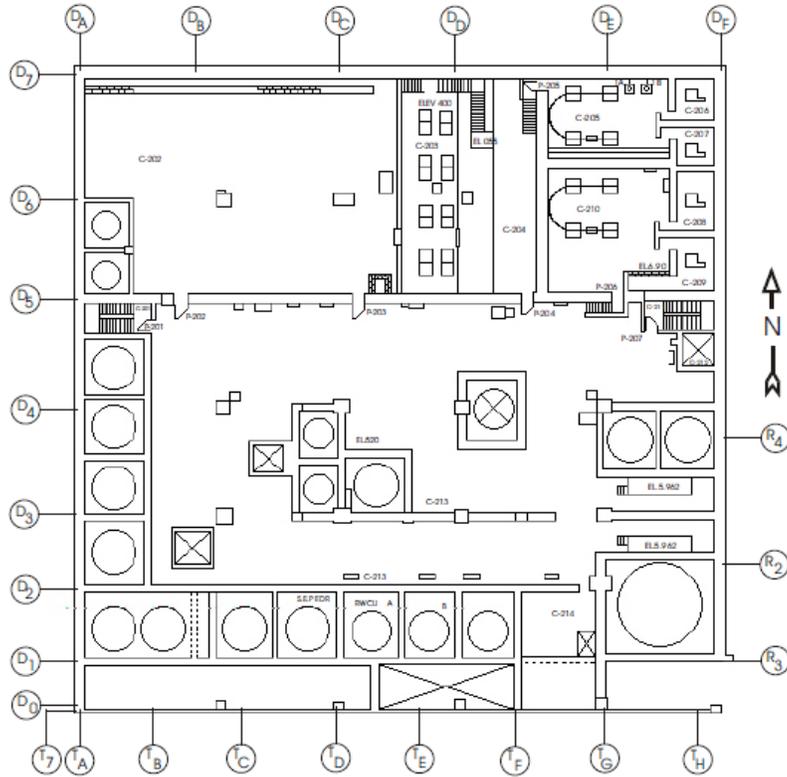


Figura V-5 Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 4.00m/5.20m/6.90m

5.2.4. Diagrama de arreglo general del edificio Desechos Radiactivos El. 10.15 m

El plano de planta de esta elevación se muestra en la Figura V-6. La parte norte de esta elevación está dedicada al sistema de solidificación, incluyendo el área de almacenamiento de contenedores. En este nivel también se cuenta con una bahía de recepción de vehículos y la grúa para movimiento de contenedores. El panel de control del sistema de solidificación cuenta con un cuarto relativamente pequeño, localizado al sur del extrusor/evaporador. En la sección Sur de esta

elevación se localizan los desmineralizadores de condensado, intercambiadores iónicos y el equipo asociado al proceso de regeneración química y limpieza ultrasónica.

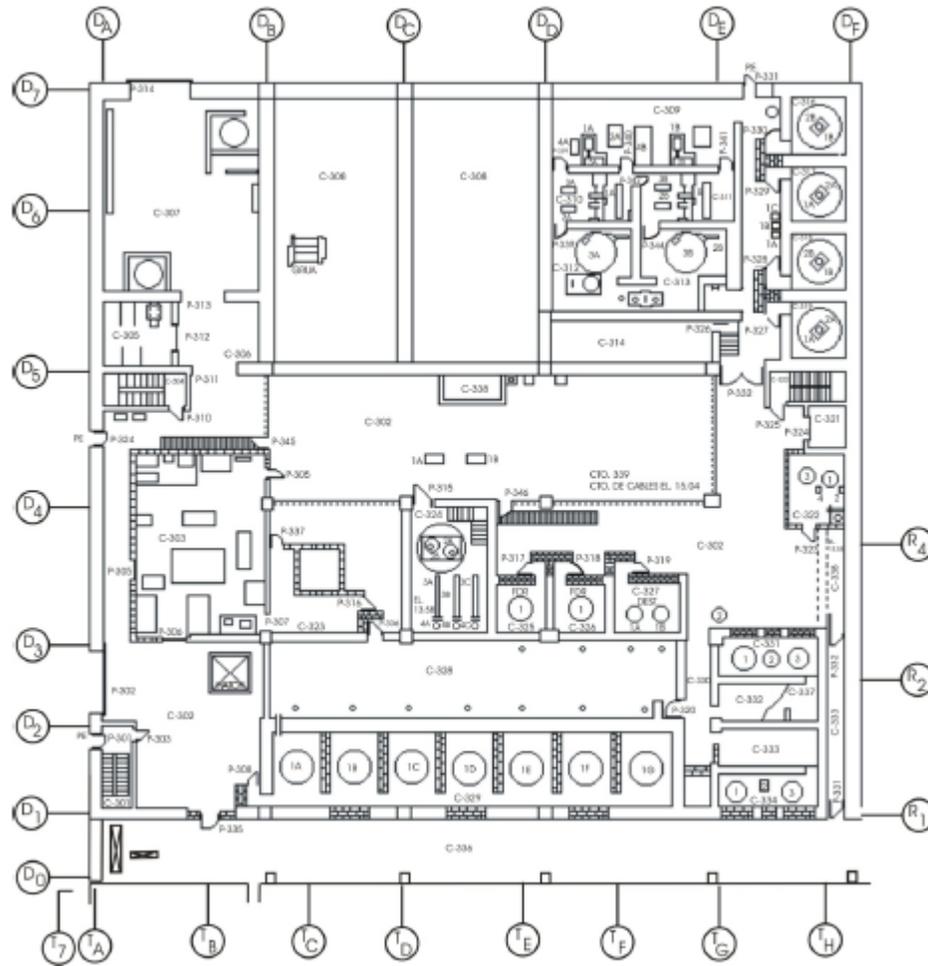


Figura V-6 Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 10.15m

5.2.5. Diagrama de arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos El. 18.70 m

La Figura V-7 muestra el plano de esta elevación. Al sureste se localizan los filtros desmineralizadores, los cuales representan un área de alta radiación durante operación normal. Las válvulas y bombas asociadas a los filtros

desmineralizadores se localizan en cuartos separados, pero adyacentes a los cuartos de los filtros desmineralizadores. El equipo del sistema de pre-capa para los filtros se localiza en la sección noreste, representando un área de baja radiación durante operación. El recalentador y bombas de recirculación de los concentradores se localizan también en esta elevación, en la sección intermedia.

Además del equipo mencionado anteriormente, en este nivel se localizan el cuarto de control de Desechos Radiativos, el cuarto de muestreo, el laboratorio radioquímico y el cuarto de conteo.

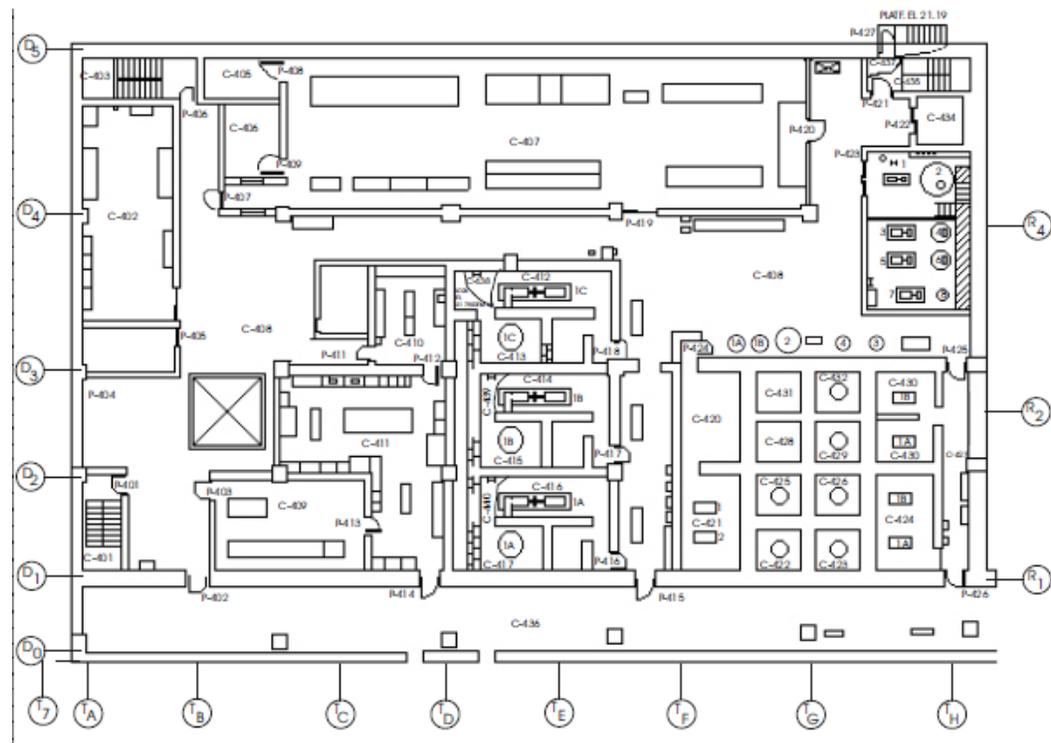


Figura V-7 Edificio de Desechos Radiativos Elevación 18.70m

5.2.6. Diagrama de arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos El. 25.10 m

El equipo existente en esta elevación se muestra en la Figura V-8. Aquí se localiza el equipo asociado a los concentradores y equipo de ventilación y aire acondicionado (VAC). En este nivel se cuenta con accesos a los cuartos de los filtros desmineralizadores mediante compuertas de acceso-hombre.

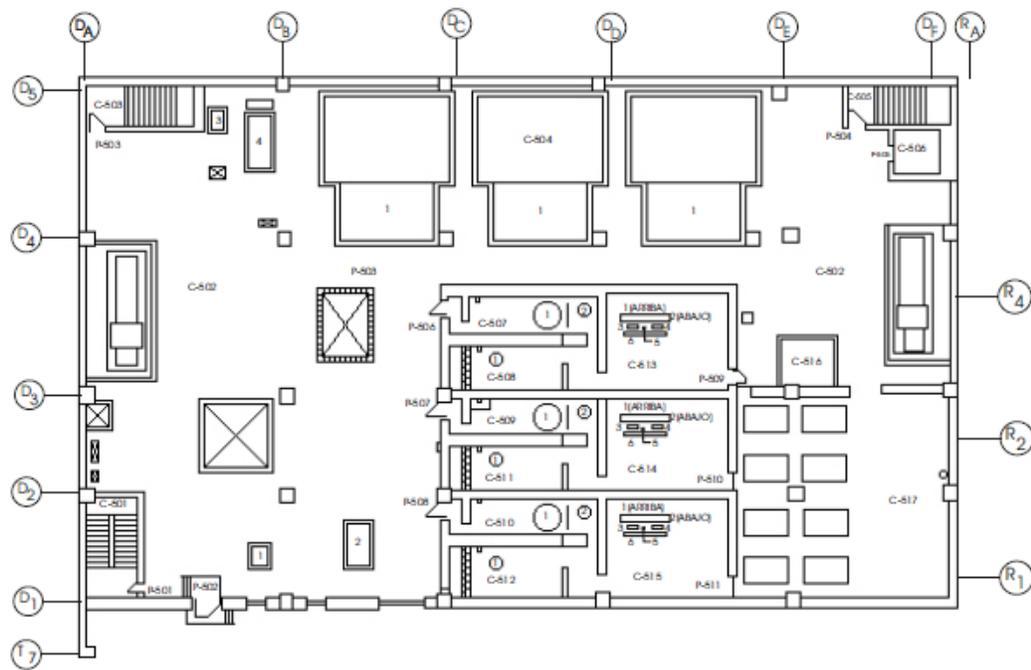


Figura V-8. Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 25.10m

5.2.7. Diagrama de arreglo general del edificio de Desechos Radiactivos El. 33.00 m

El plano de esta elevación se presenta en la Figura V-9. Este nivel cuenta con accesos a los cuerpos de vapor y al haz tubular de los recalentadores, ambos componentes de los concentradores. En este nivel también se localiza el equipo restante de ventilación y aire acondicionado (VAC) del edificio.

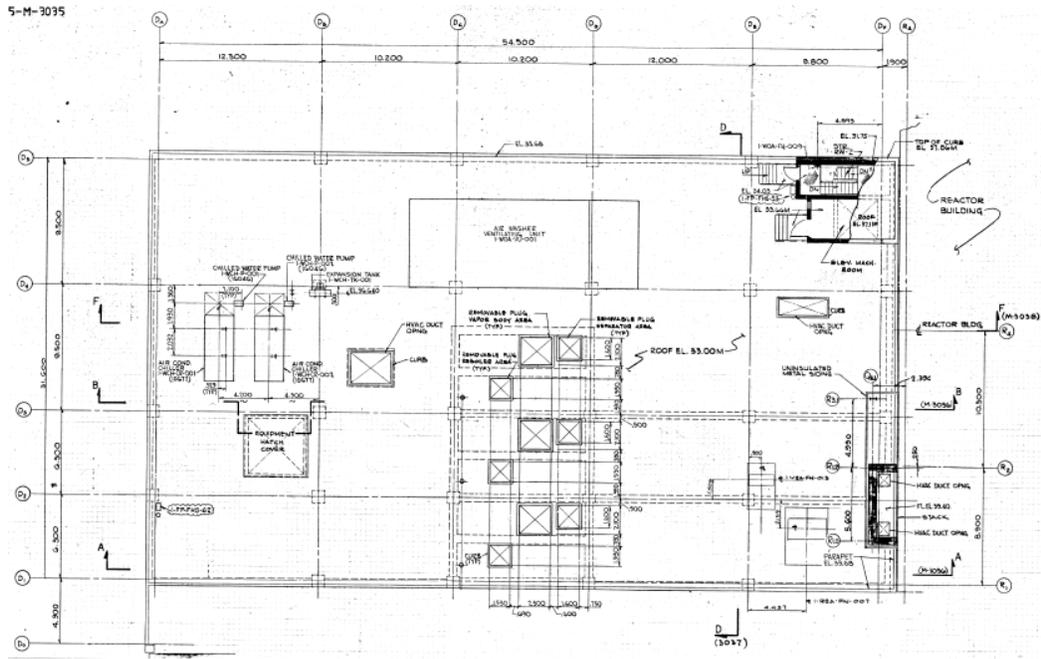


Figura V-9 Edificio de Desechos Radiactivos Elevación 33.00m

6. Administración del conocimiento en las organizaciones que llevan a cabo la gestión de desechos radiactivos

6.1. Introducción

La gestión de DR es un compromiso a largo plazo que comprende diferentes etapas, incluyendo: la generación del desecho, el pretratamiento, el tratamiento, el acondicionamiento, el almacenamiento, el transporte y su disposición. Estas etapas pueden variar de país a país. Sin embargo, son etapas comunes en el ciclo de vida del desecho radiactivo.

Existe un riesgo en que decisiones basadas en un conocimiento incompleto de alguna etapa de la gestión de DR tenga el potencial de afectar negativamente opciones viables en una etapa subsecuente. La administración del conocimiento ayudará a identificar en dónde se tienen interdependencias de largo plazo entre las fases de planeación, el diseño, la construcción, la operación y el cese de operaciones y desmantelamiento de una instalación para la gestión de desechos radiactivos.

A principios del 2006, la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA, en lo sucesivo) desarrolló unos lineamientos en la publicación "Knowledge management of Radioactive Waste Management Organization". Esta publicación forma parte una serie de documentos relacionados con la energía nuclear desarrollados por el Organismo.

El propósito del documento fue proporcionar una guía para los tomadores de decisiones en diferentes aéreas (en ambos sectores, público y privado) de la planeación, implementación y sustentabilidad del conocimiento crítico en energía nuclear, y políticas requeridas para la gestión segura y eficiente de los desechos radiactivos. La guía cubre aspectos importantes de la gestión tácita, implícita y explícita del conocimiento; tanto en formato de documento (registros) como en base a

habilidades y experiencias aplicadas. La guía proporciona directrices en gestión de la información, recursos humanos, gestión de las competencias técnicas, educación de tronco común y especialidad, involucramiento de terceras partes, enfoques y sistemas de gestión, y análisis e integración del conocimiento.

6.2. Retos en la gestión del conocimiento de la energía nuclear en las organizaciones que llevan a cabo la gestión de desechos radiactivos.

Hoy en día, generalmente es aceptado que el objetivo fundamental de la gestión de desechos radiactivos es manejar el desecho teniendo como primera prioridad la protección a la salud del hombre y el ambiente, ahora y en el futuro, sin que esto imponga una carga injustificada a las generaciones futuras. Este objetivo apareció por primera vez en la serie de documentos de seguridad del OIEA en 1995. Los principios en la gestión de DR que rigen este objetivo han sido ya incorporados en un estándar de seguridad genérico nuevo. Una revisión de los diez nuevos principios demuestra claramente la necesidad de adoptar una cultura de trabajo que es extremadamente dependiente del acceso a la información y al conocimiento. Por lo tanto, la administración del conocimiento efectiva puede tener un efecto importante en mantener y mejorar la seguridad nuclear en las actividades de gestión de desechos.

La administración del conocimiento en el entorno de la gestión de DR requiere un proceso definido específicamente y un marco de referencia que debe estar organizado para soportar el registro de la planeación, distribución y transferencia de la información (“gestión colectiva”). La administración del conocimiento en las actividades que involucra la gestión de DR se enfoca principalmente en asegurar que las generaciones actuales y futuras de planeadores, tomadores de decisiones y operarios de las instalaciones tengan acceso a las fuentes de información adecuadas y que el conocimiento generado pueda ser distribuido y transferido de una manera eficiente y

precisa. Esto debe llevarse a cabo de tal manera que, el personal clave de este proceso cuente con las habilidades y competencias necesarias para comprender y hacer uso del conocimiento. Como objetivo final, se debe sostener a largo plazo la operación segura, eficiente y de bajo costo de gestión de las instalaciones y sistemas auxiliares que llevan a cabo la gestión de DR.

La administración o gestión del conocimiento tiene una contribución importante en la retención y registro de la información durante periodos de tiempo prolongados, los cuales son característicos de los procesos de gestión de DR. La retención de personal crítico en mandos superiores y la transferencia del conocimiento a nuevo personal será claramente necesaria – esto se puede alcanzar a través de una sucesión de personal planeada, entrenamiento, adiestramiento, y otros procesos de transferencia del conocimiento.

Entre los beneficios más importantes de implementar la administración del conocimiento como una parte integral de la cultura de negocios y gerencial de una instalación de gestión de DR están: seguridad nuclear, operación eficiente, y bajos costos operativos.

De las tres fuerzas motrices requeridas para implementar la administración del conocimiento en programas de gestión de DR, la más importante tiene su raíz en las oficinas de seguridad nuclear y planeación a largo plazo de una organización. Todos los operadores de instalaciones de tratamiento, almacenamiento y disposición; deben asegurar que el conocimiento y las habilidades críticas relacionadas con la operación segura son obtenidas, mantenidas y transferidas adecuadamente durante el periodo de vida útil de la instalación. Lo anterior puede tener un periodo de varias décadas en instalaciones que llevan actividades de tratamiento y almacenamiento, y varios siglos para instalaciones de disposición definitiva de DR. La administración del conocimiento no es una aplicación genérica que puede ser “instalada” e implementada – las técnicas

usadas serán diferentes dependiendo de la instalación, la organización y la cultura del país. Los desarrolladores, operadores y reguladores de estas instalaciones tienen requerimientos de conocimiento específicos para cumplir con sus responsabilidades respectivas y estas determinarán las técnicas más efectivas a ser utilizadas.

Además de la operación segura, las organizaciones encargadas de la gestión del DR también tienen como prioridad la eficiencia en su operación (u optimización). En donde éste sea el caso, la motivación para adoptar la administración del conocimiento puede ser diferente. Sin embargo, la seguridad y la eficiencia en la operación pueden complementarse, con base en una fuerza de trabajo con habilidades y recursos constantes – un reto importante a considerar cuando se miran los tiempos que la gestión de DR requiere. La pérdida de habilidades y conocimientos debido a una fuerza de trabajo “considerablemente móvil”, además del decremento natural, es un punto muy particular a tener en cuenta.

Las organizaciones gubernamentales a cargo de los fondos para la gestión de desechos tienen que demostrar que están invirtiendo los fondos públicos de manera efectiva. En organizaciones privadas, la eficiencia económica es comúnmente un factor muy importante en su viabilidad a largo plazo. Por lo anterior, el contar con una fuerza de trabajo que pueda tomar decisiones justificadas y bien fundadas puede tener un efecto en la eficiencia económica de una instalación en particular.

Los organismos reguladores necesitan asegurar que las decisiones importantes se toman con bases sólidas y que sus consecuencias son comprendidas y transmitidas de manera precisa. Comunicar los fundamentos de una decisión puede ser muy importante cuando se considera que se tendrá efectos en generaciones futuras viviendo en un ambiente operativo y regulador muy diferente al actual. Lo anterior conlleva a que los registros de la legislación actual deben ser retenidos para que

permita la interpretación y entendimiento de las bases de decisiones históricas a sociedades futuras.

Las instalaciones que llevan a cabo la gestión de DR incluyen la integración de dos tipos principales de conocimiento: uno acerca de la propia instalación; y otro acerca del desecho y cualquier proceso asociado que se lleve a cabo.

Estas dos corrientes del conocimiento, y su información documentada asociada, representaran de manera conjunta el grueso de la información de entrada usada en el proceso de toma de decisiones. Por ejemplo, habrá muchos factores que influenciaran el desarrollo de la estrategia de gestión durante el periodo que el desecho está sujeto a una gestión activa. Estos factores incluyen la revisión y actualización de datos técnicos, cambios en la regulación, consideraciones ambientales, y algunos otros; algunos de ellos asociados con el desecho y algunos de ellos asociados con el desempeño de la instalación. Por lo que, el conocimiento asociado con todas las estrategias de gestión potenciales debe retenerse – incluso si existen muy pocas posibilidades que estas estrategias sean adoptadas. Si información nueva pone en cuestionamiento la validez o completas de una decisión histórica; las políticas nacionales pueden requerir la revisión de las bases de esa decisión en los términos del efecto del conocimiento contemporáneo.

Para poder controlar la consistencia legal de una decisión a largo plazo también se requiere que el conocimiento sea preservado. Mantener las bases de las decisiones, por ejemplo, puede brindar protección al operador de una instalación para la gestión de DR y sus sucesores legales por un periodo de tiempo prolongado en contra de cargos por negligencia en la toma de decisiones relacionadas con la seguridad. Esto también protege los intereses legales del público y del órgano regulador gubernamental.

Los retos en la administración del conocimiento de la energía nuclear que son específicos para las organizaciones que llevan a cabo la gestión de DR son:

- Reto 1. Necesidad de considerar periodos de tiempo prolongados
- Reto 2. Experiencia limitada en instalaciones de gestión de DR en operación
- Reto 3. Integración del conocimiento de fuentes múltiples
- Reto 4. Necesidad de involucrar a terceras partes
- Reto 5. Necesidad de educar y entrenar en la gestión de DR

6.3. Administración del conocimiento en energía nuclear por periodos de tiempo prolongados

El manejo de periodos de tiempo dependerá del tipo de instalación para disposición y del tipo de desecho. A manera de ilustrar los periodos de tiempo típicos, la Tabla VI.1 muestra las diferencias entre Desechos de Alto Nivel incluyendo Combustible Gastado y Desechos de Nivel Bajo y Medio de Vida Larga (HLW/LL-LILW, por sus siglas en inglés), Desechos de Nivel Bajo y Medio de Vida Corta (SL-LILW), y Desechos de nivel Muy Bajo (VLLW) - este tipo de desecho no están definido o reconocido de manera internacional, se usa con el propósito de hacer una comparación simplificada.

Tabla VI-1. Periodos de tiempo típicos para aspectos de varios tipos en sistemas/instalaciones de disposición de DR

Tipo de desecho	HLW/LL-LILW	SL-LILW	VLLW
Tipo de sistema de disposición	Repositorio geológico	Bajo tierra en instalación cerca de la superficie	Bajo tierra en instalación cerca de la superficie
Tiempo de implementación	> 100 años	Varias décadas (típicamente)	Varias décadas (típicamente)
Duración de la existencia de un riesgo potencial	Varios miles a un millón de años	de 100 a 300 años	Décadas
Estado de la tecnología	Prospectiva: en desarrollo	Experiencia operativa	Experiencia operativa

Es necesario considerar que no podemos hacer juicios acerca de la evaluación de, por ejemplo, la tecnología, el conocimiento, los requerimientos regulatorios, la estabilidad de los intereses políticos o la sociedad humana. De manera que, los principios que rigen el sistema de la administración del conocimiento deben ser tales que los sistemas puedan ser implementados para capturar y procesar el conocimiento necesario para la operación segura y efectiva de las instalaciones durante varias fases, incluyendo la fase post-cierre de la misma.

El periodo de tiempo prolongado que involucra el ciclo de vida de una instalación para la disposición de HLW requiere que el proceso de toma de decisiones sea con un enfoque de fases o paso a paso para desarrollar, gestionar y cerrar este tipo de repositorio. Esto sugiere que:

-
- El conocimiento debe ser validado continuamente para la disposición a largo plazo de desechos, mientras que, en contraste en una instalación para la disposición de SL-LILW el mejor enfoque de gestión del conocimiento sería evaluación y mejora continua.
 - El sistema de manejo de gestión del conocimiento para una instalación de disposición de HLW requiere ser evaluado en términos de su relación o importancia potencial con los objetivos principales y el ciclo de vida de los sistemas de gestión de DR (la “gradación” de los aspectos importantes para la seguridad en un enfoque común que ayuda para direccionar los recursos de la manera más efectiva).

6.3.1. El conocimiento de los DR en perspectiva

La información acerca de los DR es generada en todas las fases de su gestión – desde su origen, a través de su procesamiento, almacenamiento y transporte, disposición y el post-cierre de la instalación. Se desconoce cuánto tiempo será necesario extender el monitoreo ambiental y la evaluación del desempeño de las instalaciones de disposición, pudiendo llegar a ser por varias décadas.

Los sistemas para la disposición de DR deben cumplir con un conjunto de estándares mínimos para la protección a largo plazo de la salud del hombre y el ambiente. Estos estándares pueden cambiar durante el tiempo y los sistemas deben ser adecuadamente flexibles y robustos para proporcionar las garantías necesarias a la sociedad. La guía de implementación de los estándares de seguridad en repositorios de HLW del OIEA, establece que la aplicación de un programa de monitoreo a largo plazo sería una expectativa razonable de la sociedad siempre y cuando existan las instituciones adecuadas para llevar a cabo esta tarea. Este monitoreo post-cierre requerirá la disponibilidad de un conocimiento adecuado a cerca de los sitios de disposición por un periodo de tiempo tan largo como los programas en el sitio.

Los acuerdos en la administración del conocimiento no solo se rigen por las necesidades inmediatas del responsable actual de los desechos, sino también por las de la organización que tendrá dicha responsabilidad en el futuro.

La relevancia de la información transferida puede ser menos obvia conforme pase el tiempo, por lo que es de suma importancia también hacer la transferencia de información contextual:

Para hacer posible que las generaciones futuras lean, entiendan e interpreten la información, será importante retener y transmitir información contextual (por ejemplo, políticas en la regulación de desechos, razones de argumentos y decisiones de seguridad, terminología técnica y de lenguaje, entendimiento científico, métodos para coleccionar, analizar e interpretar decisiones), del mismo modo que las registros de datos reales.

Este requerimiento actual significa que, las personas a cargo de instalaciones de gestión de DR necesitan trabajar en equipo con sus similares, y con las autoridades reguladoras, para asegurar que la información correcta es generada y mantenida de manera adecuada en cada paso, durante todo el proceso.

6.3.2. El conocimiento en varias etapas de las gestión de DR

Las principales fuentes de información provienen del generador de los desechos y del encargado de acondicionar/empacar el desecho. La generación del desecho – y consecuentemente la generación de información importante – es comúnmente la etapa predecesora al comienzo de los programas planeados de gestión de DR. Mientras que hay una cantidad considerable de información histórica a ser gestionada, todas las actividades futuras deben reconocer las necesidades de gestión de información. Es esencial para el sistema de administración del conocimiento en la gestión de DR asegurar la adquisición, gestión y procesamiento de la información para llevar a cabo la generación del conocimiento adecuado, además de su transferencia para uso en siguientes etapas del ciclo de vida del desecho y/o ser usado por la siguiente generación de mandos superiores.

6.4. Implementación de la administración del conocimiento en organizaciones que llevan a cabo la gestión de DR

La administración del conocimiento es un concepto de planeación de negocios, el cual se basa en los recursos humanos, las tecnologías de información y el proceso. Por lo que, la administración del conocimiento debe tomar ventaja de, y estar integrada dentro de la cultura de la organización, procesos de negocios, planes estratégicos, estructuras operacionales, tecnologías de información, y en las relaciones con terceras partes de la organización. Esto significa que, cualquier estrategia de administración del conocimiento debe formar parte de la estrategia corporativa y de las políticas de la organización; además de contar con el compromiso claro por parte de los mandos altos de la organización. El grado de éxito en la adopción de la administración del conocimiento debe ser medido contra patrones basados en los mandos superiores y el desempeño de la organización. Los procesos y herramientas específicos que proporcionan beneficios a través de compartir el conocimiento deben ser integrados en la cultura de negocios y en las redes de trabajo sociales e intelectuales donde éstas tengan un efecto en la gestión de desechos radiactivos.

El conocimiento es, por definición, multidisciplinario y esta característica es particularmente aparente en el campo de la gestión de DR. En donde, el propósito del conocimiento específico de un proceso de gestión, generalmente, no es reconocido por lo que es, puede ser necesario resaltarlo y orientarlo, además de sobrellevarlo por un periodo de tiempo. Los lineamientos para establecer y estructurar las prácticas de la gestión del conocimiento dentro de la estructura de una instalación activa de gestión de DR, incluyen:

- La evaluación de las prácticas de administración del conocimiento actuales, y un análisis del inventario de conocimiento

-
- El desarrollo de una estrategia factible, incluyendo la asignación de roles y responsabilidades
 - Estrategias para planes de contingencia en la administración del conocimiento
 - Medidas del desempeño del éxito en la administración del conocimiento en ambos niveles, a nivel mandos superiores y a nivel organizacional.

Por último, los beneficios de la administración del conocimiento serán una realidad únicamente cuando las prácticas se conviertan en parte integral del comportamiento operativo día a día de la instalación. El éxito depende si el pensamiento de los mandos superiores es desde la perspectiva de la administración del conocimiento cuando se diseñen los flujos de trabajo y se mire más allá que solo realizar una tarea manualmente; a considerar como el conocimiento puede ser capturado y compartido tanto ahora como en el futuro. Este cambio fundamental en la perspectiva requerirá del apoyo a alto nivel por parte de los mandos superiores en forma de expectativas claras, recursos adecuados, y reconocimientos a comportamiento y resultados esperados.

La implementación de una estrategia de administración del conocimiento efectiva puede requerir algunos cambios fundamentales a la cultura organizacional de la instalación. A pesar de que algunos beneficios pueden alcanzarse en el corto plazo, los cambios institucionales significativos de esta envergadura pueden llevar varios años para consolidarse. Debido a la importancia y duración de los cambios en el proceso, los cambios activos en la gestión son esenciales para el éxito en la administración del conocimiento. El manejo de los cambios requerirá de una comunicación clara, una alineación organizacional de arriba-abajo y de abajo-arriba, la construcción del momento en el éxito a corto plazo, y lo más importante, liderazgo para dirigir los esfuerzos a largo plazo

6.4.1. Obligaciones de la organización

En un proceso de implementación ideal, todas las entidades que conforman la comunidad de gestión de DR con responsabilidades de preservación de la información, transferencia y creación del conocimiento incorporarían como cumplimiento total, un marco de referencia integrado basado en estándares como base de su sistema de gestión de información.

Las obligaciones específicas de la organización incluirían:

- La creación y preservación de las fuentes de información adecuadas en consistencia con los estándares más importantes
- La gestión de esas fuentes en un sistema que documente y preserve el contexto de su creación y uso
- Poner a disponibilidad de la comunidad de los encargados de gestionar los DR los resúmenes que adopten la información, presentando las entidades del contexto en una forma tal que permita la referencia, formación de redes de trabajo y el intercambio de datos
- Ligar la información importante de contexto con otros sitios u otros grupos específicos en la red extensa de información en la gestión de DR
- La documentación de las fuentes de información del sistema de gestión como parte de los sistemas de proceso para la gestión de la calidad.
- La responsabilidad de la calidad de los datos y de la información de sus sistemas propios
- El compartir cualquier conocimiento, tecnología o sistema desarrollado para facilitar el uso de información contextual
- Financiar esta actividad como parte una práctica operativa estándar

Las entidades que tengan responsabilidades vigentes por estándares, protocolos y programas de entrenamiento que sostienen la comunidad de DR deben tomar la responsabilidad de desarrollar y gestionar los programas que puedan ser requeridos para mantener el uso de redes integradas de trabajo sobre el tiempo.

6.4.2. Implementación

Si la entidad a cargo de la gestión de DR o cualquier otra entidad que decide implementar un marco de referencia integrado, la primera tarea sería el desarrollar una estrategia de implementación. Los puntos, que una estrategia como ésta debe considerar son:

- Establecer un proyecto piloto para evaluar el enfoque y desarrollo de una estrategia de implementación detallada
- Evaluar los sistemas de gestión de los recursos de información actuales y planear su mejora para incluir las capacidades requeridas. Particularmente, se debe poner atención en los sistemas de registro, gestión de registros y gestión del conocimiento
- Definir el propósito y límites del marco de referencia integrado. Estos pueden ser escalados o gradados para cumplir con necesidades y circunstancias requeridas, según sea el caso
- Poner en marcha el sistema de información contextual para trabajar con los sistemas de información existentes tanto como sea posible sin comprometer su funcionalidad
- Reusar los recursos de información contextual según sea posible para minimizar esfuerzos duplicados
- Identificar y hacer uso de las herramientas adecuadas de gestión de información contextual disponibles o no propietarias

-
- Involucrar a todos los mandos superiores que estén relacionados con la gestión de la información, en particular el responsable directo de los sistemas de gestión, responsables de la gestión del conocimiento, archivistas, líder de registros, bibliotecarios y responsables de la información
 - Entrenar a los mandos superiores, incluyendo altos mandos, y definir nuevas tareas y descripciones de trabajo
 - Mantener el hardware y software requerido para soportar el sistema, incluyendo estrategias de respaldo
 - Establecer un procesos de revisión de la calidad de la información

6.4.3. Beneficios y riesgos

En adición a los beneficios genéricos que vienen con la administración de la información en sistemas de redes de trabajo abiertas, es posible identificar beneficios específicos que pudieran obtenerse a partir de la implementación de marcos de referencia contextuales de información sobre la entidad de gestión de DR. Estos incluirían:

- Facilitar la captura de conocimiento técnico crítico implícito, aprendizaje mutuo, y el compartir experiencias tanto dentro de la organización como con otras organizaciones
- Utilizar conocimiento e información técnico y operacional actual que ha sido acumulado y por lo tanto creado con los recursos existentes en una forma estructurada
- Hacer que todas las terceras partes entiendan el trasfondo, por ende promover la confianza y confidencia en la comunidad

-
- Completar las practicas actuales como están, en una técnica no invasiva que construya marco de referencia que permitan hacer más con la información actual
 - Ayudar a prevenir la toma de decisiones contradictorias en un futuro y mejorar en forma general el proceso de toma de decisiones
 - Establecer los medios para la evaluación y selección informada de los recursos de información para necesidades futuras con base en el compartir la experiencia e información
 - Establecer los medios para llevar a cabo la destrucción de los recursos de información considerados como no validos de una manera informada, confidente, sistemática, responsable y registrada
 - Proporcionar un mecanismo de retroalimentación de la calidad
 - Mejorar la transparencia tanto dentro de la industria como dentro de una comunidad más extensa
 - Facilitar la revisión indirecta del contenido de la información por el organismos reguladores u otros organismos externos

Sin embargo, todas las estrategias y tecnologías tiene riesgos inherentes que requieren ser considerados y evaluados. Los riesgos de este tipo de enfoques pueden incluir:

- *Preocupación en la industria de DR sobre el uso de redes de trabajo abiertas a información de referencia potencialmente sensible a cerca de materiales radiactivos.* Cada organización responsable de la información contextual del marco de referencia decidiría que información primaria debe ser puesta en el dominio público. La mayoría de la información que se requiere para hacer efectivo el marco de referencia es actualmente del dominio público, pero no gestionada de una manera sistemática. Conforme pase el tiempo las implicaciones de seguridad asociadas con

la mayoría de la información, se reducen normalmente; según se convierta en información histórica en lugar de información con valor operativo.

- *Preocupación acerca de la longevidad de las tecnologías de información electrónica.* Es implícito que por concepto se haga uso de tecnologías y experiencias contemporáneas, y es reconocido que existe nerviosismo acerca del uso de tecnologías y redes de trabajo digitales. Sin embargo, la información crítica debe ser respaldada en otros sistemas usando diferentes tecnologías o medios, y esto aplica de igual manera para la información de contexto.
- *Preocupación a que estrategias de este tipo conlleven a incrementos en costos y en cargas de trabajo.* No hay duda de que esta estrategia requerirá de los recursos adecuados. Como estrategia se hará mejor uso de la información que existe actualmente y que el sistema, una vez puesto en marcha, incrementará positivamente la administración y productividad, y por ende habrá una reducción de costos sobre el tiempo
- *Preocupación por consecuencias inesperadas.* Cualquier actividad o tecnología nueva conlleva un riesgo de experimentar consecuencias no esperadas. Las tecnologías de los sistemas de información basadas en diseño web y redes de trabajo están en constante desarrollo y su efecto en la sociedad apenas está siendo evidente. El adoptar este enfoque debe hacerse de una manera medida y consiente para asegurar que no es contraproducente.

Existen también riesgos asociados con la falla en la implementación de una estrategia integrada de gestión de la información. La decisión de no hacer uso de este enfoque sería, por default, deja que la industria continúe adoptando prácticas insostenibles que han demostrado ser inadecuadas. Además se puede argumentar que la industria puede ser vista como negligente si falla en la

implementación de estrategias que han sido codificadas por estándares internacionales de gestión de archivos.

De manera más específica estos riesgos pueden incluir:

- Aumentar el grado de la carga para generaciones futuras
- Críticas de que la industria no está tomando adecuadamente sus responsabilidades
- Aumentar la probabilidad de accidentes
- Críticas por no hacer uso de las mejores herramientas prácticas y conceptos
- Pérdida de información crítica a través de un cambio organizacional pobremente gestionado
- Duplicar trabajos y uso ineficiente de recursos
- Pérdida de conocimiento implícito
- Aumento de la probabilidad de información no precisa lo que conlleva a una influencia mal dirigida a las aptitudes y toma de decisiones políticas de la comunidad

6.5. Herramientas y técnicas de la administración del conocimiento para la gestión de DR

La administración del conocimiento en los procesos de gestión de DR, operativos o regulatorios, está siendo establecida actualmente. Por lo que, las herramientas y técnicas comentadas en esta sección son tomadas de aplicaciones en donde la gestión del conocimiento ha sido implementada exitosamente. Se sugiere que los principios generales puedan ser adaptados para cumplir aspectos particulares de las operaciones de gestión de desechos. Con el tiempo, la experiencia ganada permitirá la revisión de la efectividad de estas técnicas en el entorno de la gestión de DR.

Como lo es para todos aquellos campos en donde ya se han aplicado las técnicas de gestión de conocimiento, esto requiere de la adopción de un proceso robusto de planeación y gestión bien definido dentro del marco de referencia de negocios de la organización. La planeación debe incluir a todas las terceras partes, incluyendo los poseedores y productores del conocimiento, así como los que hacen uso del mismo. El proceso debe estar organizado para soportar la alineación, el compartir, transferir y gestionar los recursos humanos e información relacionada con la gestión de DR. Esto debe llevarse a cabo de tal manera que, la gente no solo tenga acceso a la información, sino también tenga las habilidades y competencias para hacer uso de ella. Las bases del conocimiento y la información actual debe ser la adecuada para soportar la operación segura, eficiente y de bajo costo de las instalaciones de gestión de DR y sus sistemas auxiliares. Dado que este tipo de instalaciones tienen ciclos de vida extensos, es importante mantener el conocimiento por periodos de tiempo largos. Es de igual importancia que el plan de vida de la instalación sea soportado por una sucesión efectiva y planeada de los mandos medios, retención del talento y gestión de las competencias.

6.6. Conclusiones

En años anteriores, se ha vuelto sumamente evidente que administrar el conocimiento sobre la energía nuclear es muy importante para cualquier instalación que haga uso de este tipo de energía. Los programas adecuados de administración del conocimiento sobre la energía nuclear - en términos más generales - pueden contribuir a:

- Alcanzar una operación segura y mantener en buen estado todas las instalaciones nucleares
- Alcanzar ganancias en desempeño operacional y económico a través de una gestión efectiva de los recursos del conocimiento.

-
- Facilitar la innovación para alcanzar mejorías importantes en la seguridad, operación económica de todos los proyectos nuevos de energía nuclear
 - Maximizar el flujo del conocimiento de la energía nuclear de una generación a la siguiente, además de atraer, mantener, y desarrollar un mandos superiores dedicados muy competitivos para sostener la competencias en el campo de la energía nuclear
 - Alcanzar un grado alto de transparencia - regional, nacional e internacional- e intercambiar experiencias operativas para asegurar la seguridad nuclear, mientras que en paralelo de alcanzan los requerimientos de salvaguardias adecuados evitando el uso de información sensible inadecuada.

Los programas de gestión del conocimiento en el campo de la energía nuclear deben ser establecidos también en la gestión de DR, tanto al nivel de las organizaciones de gestión de DR, como en programas nacionales de gestión de DR relacionados.

El establecer e implementar programas de gestión del conocimiento en energía nuclear en el contexto de la gestión de DR representa retos especiales, los cuales son:

- Los largos periodos de tiempo contemplados
- La necesidad de implementar programas con base en limita experiencia obtenida al día de hoy
- La necesidad de conocimiento integrado relevante de diferentes fuentes
- El deseo de involucramiento de terceras partes
- La necesidad de desarrollar programas de educación y entrenamiento para la gestión de DR

7. Conclusiones

Los sistemas de gestión de desechos radiactivos de un reactor de agua en ebullición deben tener la capacidad de procesar los volúmenes de generación de desechos esperados durante la operación normal y transitorio de una central nucleoelectrónica, cumplimiento con los requerimientos impuestos por el órgano regulador en lo que a estos sistemas y procesos refiere.

La operación correcta, y el mantenimiento adecuado juegan un papel primordial para asegurar que cada uno de los requerimientos de procesamiento (requerimientos de diseño) se cumplan a lo largo de la vida útil de la instalación.

La operación de los sistemas de gestión de desechos radiactivos debe ser planeada, en una base periódica de al menos 24 horas, lo que requiere contar con personal entrenado, y que comprenda cada uno de los procesos de gestión que lleva a cabo.

La transferencia del conocimiento en el campo de la energía nuclear, y en específico en el área de la gestión de los desechos radiactivos, representa un reto para la industria internacional; el cual debe ser solucionado de manera sistemática y en cooperación conjunta con los que hacemos uso de la energía nuclear.