

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN
DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN Y
FRACCIONAMIENTO DE I-131, UTILIZANDO
ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO ELECTRONICO**

PRESENTADO POR:

SEGUNDO JOSE YSMAEL PAEZ APOLINARIO

**PROMOCION
1980-II**

**LIMA – PERÚ
2006**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN
DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN Y
FRACCIONAMIENTO DE I-131, UTILIZANDO
ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO**

A mis queridos
Padres, hermanos,
Esposa e hijo

SUMARIO

El presente trabajo muestra el diseño y la simulación de un sistema de control utilizando estrategias avanzadas en una Celda de producción de I-131.

El proceso a ser controlado en este trabajo es el control de temperatura del horno de fusión ya que con este proceso se inicia la producción de I-131, hay que tener en cuenta que en la celda de producción se produce un proceso dinámico donde se manejan alrededor de 42 variables ya sea de salida y de control pero para simplificar este trabajo se ha tomado la parte inicial del proceso.

El control de este proceso si fuera en forma automática sería muy importante por la gran cantidad de radiación que existe en el medio ya que el I-131 es un elemento radiactivo.

En el proceso de producción además de producirse radiaciones gamma se producen radiaciones beta como aerosoles, por ello la celda es hermética con una depresión que se genera por medio de bombas de vacío duplicadas, siempre una en stand by para actuar en el momento que la otra salga fuera de servicio por algún percance, este tipo de procedimiento se denomina lógica dos de uno.

El modelo dinámico que se quiere implementar es un modelo único en su género ya que en América Latina existen solamente dos Celdas de producción de I-131 de iguales características una en Argentina y la otra en nuestro Centro Nuclear de Investigaciones del Perú, esta ha sido rediseñada por personal peruano y argentino.

Los tiempos muertos que aparecen en el sistema de producción se realiza porque el operador realiza un proceso secuencial.

Se ha realizado experimentalmente las tomas de temperatura y tiempo para poder hallar la función de transferencia.

INDICE

PROLOGO	1
CAPITULO I	
FUNDAMENTOS DE FISICA NUCLEAR Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA	
1.1 Introducción	2
1.2 Radiactividad	4
1.3 Interacción de la radiación gamma con la materia	8
1.4 Cadena de Medición de la Radiación Nuclear.	13
1.5 Principios de protección radiológica.	14
CAPITULO II	
PRODUCCIÓN DE I-131	
2.1. Propiedades del I-131	17
2.1.1 Propiedades nucleares	17
2.1.2 Producción y Reacciones nucleares	18
2.1.3 Protección radiológica	19
2.1.4 Métodos de producción	20
2.2. Procedimiento Experimental del método de Vía Seca	21
2.3. Características de la solución de I-131	24
CAPITULO III	
ESTRUCTURA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE I-131 y	
MODELADO	
3.1 Estructura del proceso en la Celda de Producción de I-131	26
3.2 Definición del grado de requerimiento de automatización e identificación de procesos críticos de la Celda de producción de I-131.	38
3.3 Modelado del proceso de control de temperatura en la Celda de producción de I-131.	39
3.4 Modelo en espacio de estado del proceso de control de temperatura en la Celda de producción de I-131.	40
3.5 Análisis de la respuesta a una entrada escalón	42

CAPITULO IV**ESTRATEGIAS DE CONTROL CLÁSICO**

4.1	Introducción	45
4.2	Sistemas de Control PID, diseño y simulación	46
4.3	Dispositivos sensores, indicadores y controladores	48

CAPITULO V**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL OPTIMO DE TEMPERATURA
EN LA CELDA DE PRODUCCIÓN DE I-131**

5.1	Introducción	52
5.2	Diseño del controlador óptimo proporcional integral en la Celda de Producción de I-131.	52
5.3	Diseño del controlador óptimo cuadrático.	55

CONCLUSIONES	58
---------------------	----

ANEXO

ANEXO A: DISPOSITIVOS DE CONTROL	59
----------------------------------	----

BIBLIOGRAFIA	70
---------------------	----

PROLOGO

El presente estudio trata de un sistema de control adaptivo aplicado al control de temperatura del Horno de fusión de la Celda de Producción de I-131

El control óptimo comprende el modelado del proceso, el diseño del controlador óptimo integral , diseño del observador y simulación del control optimo de temperatura.

El capitulo I presenta los fundamentos de la Física Nuclear y Seguridad Radiológica.

El capitulo II trata sobre la producción de I-131

El capitulo III abarca la estructura del proceso de producción de I-131 y el modelado

El capitulo IV muestra las estrategias de control clásico

El capitulo V presenta el diseño del sistema de control de temperatura en la celda de producción de I-131

En las conclusiones y recomendaciones se sintetizan los resultados obtenidos y la proyección de este trabajo en el beneficio del operador de la celda de producción de I-131

En los anexos se tiene el listado de programas utilizados en el proceso de simulación

En la última parte se presenta la bibliografía utilizada.

CAPITULO I

FUNDAMENTOS DE FISICA NUCLEAR Y SEGURIDAD RADIOLÓGICA

1.1 Introducción

El siglo pasado ha sido testigo de grandes progresos en las ciencias. Entre estos, los logros obtenidos en el conocimiento del átomo y del núcleo nos conducen a conocer su uso tanto como medio de destrucción como de aplicación para el bienestar de la humanidad.

Los fenómenos radiactivos fueron descubiertos por Becquerel antes que el núcleo atómico y el estudio de la radiactividad y su descubrimiento este relacionado directamente con los rayos X descubiertos en 1895 por Roentgen y atribuido en primera instancia a la fluorescencia del tubo de descarga utilizado durante las experiencias.

En efecto, Becquerel trabajaba sobre los fenómenos de fluorescencia cuando en 1896 descubrió la radiactividad del uranio, y así a través de esta investigación, se descubría un nuevo fenómeno: *la radiactividad*.

Muy pronto se descubrió que eran tres tipos de radiación las que son emitidas por las sustancias radiactivas. Estas radiaciones se distinguen entre sí por:

- Su aptitud de pasar a través de cierto espesor de materia
- Por la curvatura de su trayectoria cuando pasan en un medio sometido a un campo magnético o eléctrico.

Constitución del Átomo

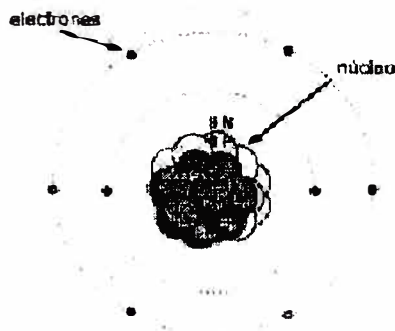


Fig. 1.1 Elementos constitutivos del átomo

Los átomos están formados por un núcleo, de carga positiva, y una corteza electrónica. Las partículas que componen los átomos son: el protón, el neutrón y el electrón. El protón y el neutrón se denominan nucleones. En la tabla 1 damos las características principales de estas partículas. El núcleo contiene los protones y los neutrones, mientras que los electrones forman la corteza electrónica.

Tabla 1.1: Principales características de las partículas que componen el átomo

Partícula	Símbolo	Carga (C)	Masa (uma)
Electrón	e^-	$1.6 \cdot 10^{-19}$	$5.48579 \cdot 10^{-4}$
Protón	p	$1.6 \cdot 10^{-19}$	1.00727
Neutrón	n	0	1.00866

El número de protones se representa por Z, El número de neutrones se representa por N. La suma del número de protones Z y de neutrones N es igual al número de masa A

$$A=Z+N \quad (1.1)$$

Las propiedades químicas de un elemento están determinadas por su número atómico. En efecto, son los electrones los que le dan el carácter químico a un elemento. Se conocen 107 elementos químicos diferenciados por el número atómico Z. De estos, 91 se encuentran en la naturaleza y los demás se obtienen artificialmente.

Nucleidos, Isótopos, Isóbaros, Isótonos

En física nuclear una especie de núcleo se denomina nucleido, Un nucleido se caracteriza por su número atómico Z y su número másico A. Así un nucleido M, donde M es el símbolo químico del elemento, se representa por:

$${}^A_Z M \quad (1.2)$$

Por ejemplo el nucleido I-131 se representa por:

$${}^{131}_{53} I \quad (1.3)$$

Los núcleos que permanecen inalterados con el tiempo se denominan estables y los que sufren transformaciones espontáneas se denominan inestables o radionucleidos.

Aquellos nucleidos que poseen igual Z se denominan isótopos; por ejemplo el potasio tiene 3 isótopos naturales, uno de los cuales el ^{40}K es radioactivo, es un radioisótopo. Aquellos nucleidos que tienen igual A se denominan isóbaros y aquellos que tienen igual N se denominan isótonos.

1.2 Radiactividad

Cuando un núcleo inestable sufre una transformación espontánea decimos que el mismo sufre una desintegración. En este proceso el núcleo emite diferentes tipos de partículas y/o fotones y el núcleo formado recibe el nombre de núcleo residual.

A este fenómeno se lo denomina radiactividad, una sustancia es radiactiva cuando los núcleos que la componen sufren desintegraciones.

a) Radiactividad natural

En la naturaleza existen átomos compuestos de un núcleo estable por ejemplo el Na^{23} , el Al^{27} que se encuentran en la naturaleza y fueron producidos durante la génesis de los elementos, éstos están presentes en la tierra, en los materiales de construcción, en el aire, en los alimentos, en el agua, y los rayos cósmicos.

b) Radiactividad artificial

Los átomos compuestos de núcleo inestable, para alcanzar su estabilidad emiten radiaciones, hoy día es posible, por medios artificiales (sea por medio de un reactor nuclear o de un acelerador de partículas) obtener una gran variedad de nucleidos, alterando el estado físico de los átomos en los que incide, haciéndolos quedar ionizado, muchos de los cuales tienen aplicaciones en la industria, en la medicina, en la biología, en la agronomía, etc.

En la actualidad, se conocen aproximadamente 1600 nucleidos. De estos 272 son estables y el resto son inestables.

Ley del decaimiento

La desintegración de un átomo de un elemento radiactivo es un proceso que tarde o temprano tendrá lugar. Sin embargo, es muy difícil predecir en que momento un átomo se desintegrará. Esto puede ocurrir dentro de 1 segundo, un minuto, una semana, una mes, un año, un siglo o más. El proceso está sometido a las leyes de la estadística.

Experimentalmente se observa que si en un instante dado se tiene un número N_0 de un nucleido radiactivo, podemos afirmar que el proceso esta caracterizado por un tiempo T

denominado periodo de semi-desintegración y que corresponde al tiempo necesario para que el número inicial de cierto nucleido radioactivo disminuya a la mitad.

La ecuación que permite calcular el número de nucleido presente al transcurrir un tiempo t es

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.4)$$

Donde:

$N(t)$ es el número de desintegraciones en un tiempo t

N_0 es el número de desintegraciones en el tiempo t_0

λ se denomina constante de decaimiento y es igual a $\ln 2/T$.

La actividad A de una sustancia se define como el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo. La relación entre la actividad y el número de nucleidos presente en el tiempo t es:

$$A = N\lambda \quad (1.5)$$

A es el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo

N es el número de desintegraciones en el tiempo

λ se denomina constante de decaimiento y es igual a $\ln 2/T$.

A partir de las expresiones (1.4) y (1.5) obtenemos

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \quad (1.6)$$

$A(t)$ es el número de núcleos que se desintegran en un tiempo t

A_0 es el número de núcleos que se desintegran en el tiempo t_0

Periodo y Actividad

El periodo es un factor importante cuando se considera la actividad de una sustancia. En efecto, cuando mayor sea el periodo de un nucleido mayor será el tiempo que una sustancia radiactiva tarda en decaer. Existen nucleidos de periodo relativamente cortos como el ^{131}I y el ^{60}Co y otros de periodo relativamente largo como el ^{137}Cs y el ^{241}Am . Algunos nucleidos utilizados más frecuentemente son:

Tabla 1.2: Ejemplos de períodos de decaimiento

Nucleído	Periodo	Aplicaciones
^{131}I	8.04 días	En medicina para tratamiento y diagnóstico
^{60}Co	5.27 años	En medicina, para fuentes de radioterapia (bombas de cobalto) y en gammagrafía
^{241}Am	451 años	Algunas aplicaciones industriales

Unidades de medida de la Radiactividad

En el Sistema Internacional de unidades de medida, la actividad se mide en becquerelio, abreviado Bq, y es igual a una desintegración por segundo (d.s⁻¹). Una unidad aún muy usada es el curie Ci, siendo:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ d.s}^{-1} \quad (1.7)$$

La relación entre el curie y el becquerelio es:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} \quad (1.8)$$

Generalmente se emplean múltiplos de estas unidades, así hablamos de microcurie o milicuri, lo que se representa por μCi y mCi respectivamente siendo:

$$1\mu = 1. 10^{-6} \quad (1.9)$$

$$1\text{m} = 1. 10^{-3} \quad (1.10)$$

Tipos de radiactividad

Las sustancias radiactivas emiten diferentes tipos de radiaciones observándose la emisión de partículas cargadas como:

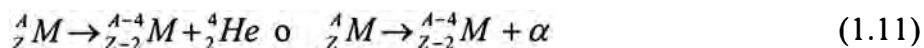
- el núcleo de helio,
- electrón
- positrón (electrón con carga positiva),
- protón y,
- fotón, partículas sin cargas.

Describimos a continuación las emisiones más frecuentes.

Radiactividad alfa

En este caso la partícula emitida por el núcleo es un núcleo de helio, es decir un átomo de helio al que le falta dos electrones. La partícula alfa se simboliza por la letra α .

La desintegración se representa por



Por ejemplo



La partícula α emitida tiene una energía bien definida, y sus características son:

- Tiene un alcance limitado
- Es detenida con una hoja de papel
- Puede ser desviada por un campo magnético intenso
- Cuando pasa a través de la materia produce gran cantidad de iones.

Radiactividad Beta

En este tipo de desintegración pueden ocurrir dos fenómenos que describimos a continuación.

Radiactividad β^-

En este caso la partícula emitida es un electrón. La desintegración se esquematiza de la siguiente forma:



ν es una partícula que aparece en este tipo de desintegración, se la denomina el neutrino. Detallar este fenómeno rebasaría los fines de esta exposición.

Como ejemplo de esta desintegración tenemos



Radiactividad β^+

En este caso la partícula emitida es un positrón (un electrón positivo). La desintegración se esquematiza según:



Como ejemplo de este tipo de radioactividad tenemos:



En ambos casos las betas emitidas tienen energías comprendidas entre 0 y un valor máximo denominado energía máxima. Por ejemplo el ${}^{131}\text{I}$ emite β^+ con una energía máxima de 806 keV.

Captura Electrónica

Existe otro fenómeno, que produce el mismo núcleo que en el de la radioactividad β^+ , denominado captura electrónica (CE) y esquematizada según la ecuación:



En este proceso un electrón de una capa electrónica interna es capturado por el núcleo. De este modo se produce una vacante en una capa interna del átomo, capa K por ejemplo y en consecuencia existe una emisión de rayos X debido a la reorganización de la corteza electrónica.

Sus características son:

- Es detenida por una hoja de aluminio pero atraviesa una hoja de papel
- Puede ser desviada por un campo magnético y el sentido de la desviación sugiere una carga negativa.

- Cuando pasa a través de la materia produce iones pero en menor proporción que las radiaciones alfa

Radiación Gamma (γ)

En cualquier proceso de radiactividad el núcleo residual puede quedar en un estado excitado, es decir con un exceso de energía. El núcleo al desexcitarse emite uno o más fotones. Por ejemplo el cobalto 60, emite dos rayos γ de 1.33 MeV y 1.17 MeV.

Sus características son:

- Tiene un alto poder de penetración y la intensidad de la radiación es disminuida por un espesor apreciable de plomo.
- No es desviada por un campo magnético y se desplaza en línea recta.
- Cuando pasa a través de la materia produce iones, pero en menor proporción que las radiaciones alfa y beta

1.3 Interacción de la Radiación con la materia

Conceptos generales

Al pasar por la materia, la radiación ionizante puede interactuar con los átomos, con los núcleos, con los nucleones, o con los electrones de la misma. Las radiaciones son llamadas incidentes y las partículas con las cuales interactúa son llamadas partículas blanco. Las aplicaciones nucleares médicas están basadas en las interacciones de la radiación incidente con los electrones o núcleos de los átomos de la materia que atraviesa y dan lugar a los procesos de absorción y dispersión.

En el proceso de absorción, la partícula o radiación incidente es completamente absorbida por la partícula blanco. En el caso de absorción de fotones por átomos, un electrón orbital puede tomar energía del fotón incidente, dando lugar a un átomo excitado o bien el electrón puede tomar energía suficiente para liberarse de su átomo dando lugar a la ionización del mismo. Si un núcleo absorbe energía de un fotón incidente es llevado a un estado excitado y posteriormente se transforma, mediante una transición isomérica, emitiendo nuevos fotones y desintegrándose en varios productos de la interacción. La absorción de partículas ocurre únicamente por núcleos blanco, en cuyo caso se forma un nuevo nucleido, ya que tanto la masa como la energía de la partícula incidente son absorbidas.

En los procesos de dispersión, la partícula blanco, a la cual entrega energía y desplaza de su posición original, y la partícula o radiación incidente son dispersadas en una nueva dirección con una energía reducida. La Dispersión Elástica es un proceso en el que se conserva la energía cinética de la interacción, y en la Dispersión Inelástica parte de la energía cinética del proyectil se convierte en energía de excitación de un átomo o de un núcleo.

Reacciones Nucleares

Las interacciones en las que los núcleos son las partículas blanco son llamadas reacciones nucleares y se representan por una ecuación con la forma general:



Donde x denota la radiación o partícula incidente, X es la partícula blanco, y es la partícula resultante e Y es el núcleo resultante.

En las reacciones de absorción se forma un sistema intermedio llamado Núcleo Compuesto, representado por X^* , y la ecuación correspondiente es:



El núcleo compuesto, que contiene al núcleo original y a la partícula proyectil, tiene una vida promedio de un pico segundo aproximadamente. Durante este tiempo, la energía de la partícula proyectil se reparte en todo el núcleo y la partícula pierde su identidad, el núcleo compuesto se desintegra de acuerdo a la energía en exceso contenida.

En el caso que el núcleo compuesto X^* sea estable, la reacción nuclear termina en este estado. Si el núcleo compuesto X^* es un radionucleido, éste decae dando lugar al nuevo núcleo Y , y a la partícula resultante, y_2 de acuerdo a la ley de decaimiento radiactivo. También el núcleo compuesto X^* puede tener una duración tan breve que de lugar a los productos de la reacción de una manera inmediata. El primero de los tres procesos anteriores se denomina Transmutación, el segundo se llama Activación y el tercero tiene el nombre genérico de Reacción Nuclear

Interacción de partículas alfa con la materia

Una partícula alfa que se mueve a través de la materia pierde su energía cinética por interacciones electromagnéticas sucesivas entre los átomos del Material absorbente. En una interacción un electrón puede adquirir suficiente energía para desprenderse de su átomo, en cuyo caso la interacción se llama ionización, o bien puede adquirir una energía menor y permanecer dentro del átomo, dando lugar a la excitación.

La partícula alfa viaja en una trayectoria prácticamente recta perdiendo continuamente
continuamente pequeñas cantidades de energía y dejando átomos ionizados y excitados a su paso.

El alcance de las partículas alfa en un material se define como la distancia que viaja en el mismo hasta que su energía cinética sea cero

Interacción de partículas beta con la materia

Los procesos por los cuales las partículas beta o electrones pierden su energía al atravesar la materia son más complicados que los correspondientes a las partículas alfa por las siguientes razones:

1) Debido a su pequeña masa y alta velocidad, es necesario considerar efectos relativistas para el estudio de la interacción de los electrones con la materia.

2) A diferencia de las partículas alfa, un electrón puede perder una gran fracción de su energía cinética en una sola colisión, lo que causa mayor dispersión y hace más difícil distinguir el electrón incidente del electrón blanco. Al electrón que tiene mayor energía después de la colisión se le llama incidente.

3) Las colisiones entre los electrones incidentes y los átomos del material, en las que los primeros son detectados sin pérdida de energía son muy frecuentes, y causan dispersión múltiple, que a su vez hacen difícil las mediciones de pérdida de energía.

4) A muy altas velocidades los electrones pueden acercarse a los núcleos de los átomos, cuyos intensos campos eléctricos provocan un cambio en la dirección de la trayectoria de los electrones, los cuales pierden energía cinética emitiendo energía electromagnética en forma de rayos X. Este fenómeno, llamado Radiación de frenado *Bremsstrahlung*, no es importante si la energía de los electrones es pequeña o el número atómico del material absorbente, Z , es bajo. Sin embargo, para electrones con energías altas y materiales absorbentes con número atómico alto, la pérdida de energía por radiación de frenado llega a ser muy importante.

La absorción de partículas beta es prácticamente independiente del número atómico del material absorbente pero sí es una función de su densidad.

La Intensidad de las partículas beta transmitidas a través del absorbedor puede ser determinada experimentalmente interponiendo diferentes espesores de un absorbedor entre una fuente de partículas beta y un detector adecuado.

Se obtiene el conteo para cada espesor durante tiempos iguales de medición y se grafica el logaritmo de los conteos contra el espesor en mg/cm^2 . En la gráfica se observa que los conteos decrecen rápidamente para espesores pequeños y lentamente para espesores mayores. Eventualmente, todas las partículas beta son paradas a partir de cierto espesor del absorbedor y el contador registrará solamente la radiación de fondo ambiental.

Interacción de la Radiación gamma con la materia

La radiación gamma interacciona con la materia mediante varios procesos, en los cuales pierde energía. La probabilidad de ocurrencia de cada uno de estos procesos depende de la energía de la radiación gamma y de las características del material. La radiación gamma emitida por los radionucleidos interacciona con la materia mediante algunos de los tres procesos: efecto fotoeléctrico, efecto Compton o producción de pares. Estos procesos son dominantes en diferentes intervalos de energía, el efecto fotoeléctrico se manifiesta preferentemente en el intervalo de 0.01 Mev a 0.5 Mev, el efecto Compton en el intervalo de 0.1 Mev a 10 Mev, y la producción de pares se inicia en 1.02 Mev y aumenta con la energía. Los tres procesos son independientes entre sí y colaboran con la atenuación global del haz de radiación con su probabilidad propia

a) Efecto fotoeléctrico

Este efecto ocurre a más bajas energías. El rayo gamma incidente es absorbido por uno de los electrones del átomo, este rayo desaparece y el electrón es expulsado del átomo con una energía E_c dada por

$$E_c = h\nu - I_A \quad (1.20)$$

Donde I_A es la energía de enlace del electrón orbital. Este proceso no puede ocurrir con un electrón libre porque no habría conservación de momento y energía, pero en el caso de electrones ligados, los principios de conservación se cumplen ya que el átomo toma una pequeña energía debido a su gran masa.

El efecto fotoeléctrico depende fuertemente de la energía de la radiación incidente y del número atómico del material. Este efecto predomina para bajas energías de la radiación gamma y es absorbida fuertemente por materiales de número atómico alto.

b) Efecto Compton

En este proceso, el rayo gamma incidente interacciona con electrón débilmente ligado al átomo. La energía de enlace de este electrón es muy pequeña, por lo que la interacción se puede considerar como una colisión elástica semejante a la observada para colisiones entre partículas. El rayo gamma incidente cede parte de su energía al electrón,

reteniendo el resto de ésta y cambia de dirección en la interacción. Después de esta interacción, el rayo gamma dispersado puede sufrir otra interacción de tipo fotoeléctrico o una segunda interacción Compton, o bien puede escapar del material.

El electrón entrega su energía al material mediante procesos de ionización y excitación. Cuando la radiación gamma interacciona con la materia a través del efecto Compton, se produce la absorción y dispersión parcial de la energía que transporta

c) Producción de pares

Este efecto ocurre cuando el rayo gamma incidente tiene suficiente energía e interacciona con el campo eléctrico del núcleo. El rayo gamma incidente es absorbido, parte de su energía se emplea en la producción del par electrón-positrón y la energía restante es entregada a este par de partículas. Cada una de las partículas posee una masa cuyo equivalente energético es de 0.51 MeV para dar lugar a la formación del par.

De acuerdo con el principio de conservación de la carga eléctrica, una de las cargas debe ser positiva y la otra negativa, y también hay conservación de momento entre el par de partículas y el núcleo atómico; sin embargo, como la masa del núcleo es muy grande comparada con la de las partículas, la energía suministrada al núcleo es insuficiente. La energía del rayo gamma en exceso de 1.02 MeV es tomada por el electrón y el positrón como energía cinética y estas partículas ionizan y excitan a los átomos del material en su trayectoria.

Una vez que el electrón ha perdido su energía cinética, se incorpora a la población de electrones del material. El positrón, al perder su energía, se asocia con un electrón del material y se aniquila el par dando lugar a dos rayos gamma de 0.51 MeV, que son emitidos en direcciones opuestas.

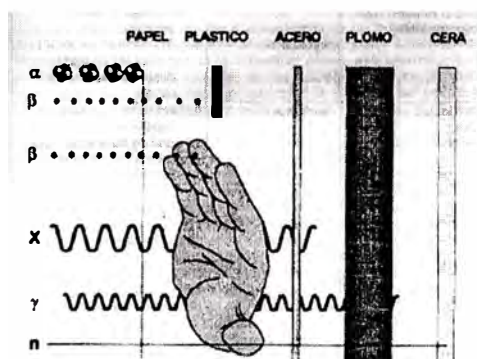


Fig. 1.2 Propiedades de penetración de las partículas ionizantes

1.4 Cadena de Medición de la Radiación Nuclear de Alta Resolución

El núcleo de un radioisótopo emite radiación gamma cuya medición nos suministra una precisa identificación del elemento pero al no poseer carga, es necesario convertir tal energía en una señal o pulso electrónico adecuado. Un detector tipo semiconductor capta la radiación gamma emitida colectando la carga Q producida directamente proporcional a la energía impartida por la radiación. La amplitud de la señal originada es directamente proporcional a la carga generada por el detector y cuyo procesamiento en una primera etapa lo realiza el preamplificador.

Luego, el preamplificador entrega amplitudes proporcionales a $-Q/C$, donde Q es la carga depositada por una interacción y C es la capacidad de carga del circuito equivalente, la señal posteriormente es amplificada y conformada en el amplificador a valores de altura de pulso entre 0.1V y 10V y períodos de tiempo entre 0.1 μ s y 10 μ s.

Mediante analizadores multicanales, los pulsos de entrada son clasificados según su amplitud en diferentes niveles denominados canales en donde se acumulan en forma independiente obteniendo finalmente el espectro energético del radioisótopo producido.

Su operación se basa en el principio de conversión de una señal analógica en una digital equivalente mediante el dispositivo ADC. Los datos a la salida del ADC son almacenados en una memoria digital, la cual posee tantos lugares de memoria como el número máximo de canales en los cuales el espectro almacenado puede ser subdividido.

En los sistemas de espectrometría gamma es frecuente emplear ADC con memoria de 4096 canales lo suficiente para obtener una resolución adecuada.

Tales sistemas incluyen funciones de evaluación espectral como también parámetros de ajuste y calibración. De igual modo poseen interfaces de comunicación para entrada y/o salida siendo frecuente encontrar programas que automatizen sus funciones.

Toda la información resultante es transferida a un sistema de cómputo en donde se evalúa los espectros obtenidos mediante algoritmos indicados.

Las condiciones ambientales de trabajo influyen en la estabilidad del sistema de medición fundamentalmente en la ganancia de amplificación generando deformación de los pulsos con detrimento de la resolución, en especial para tiempos de conteo largos. Se establece que la variación por factor de temperatura no debe sobrepasar al 0,001% por °C.

El siguiente esquema nos permitirá conocer el funcionamiento básico de una cadena de medición de radiación nuclear de alta resolución.

SISTEMA DE ESPECTROMETRIA GAMMA DE ALTA RESOLUCION

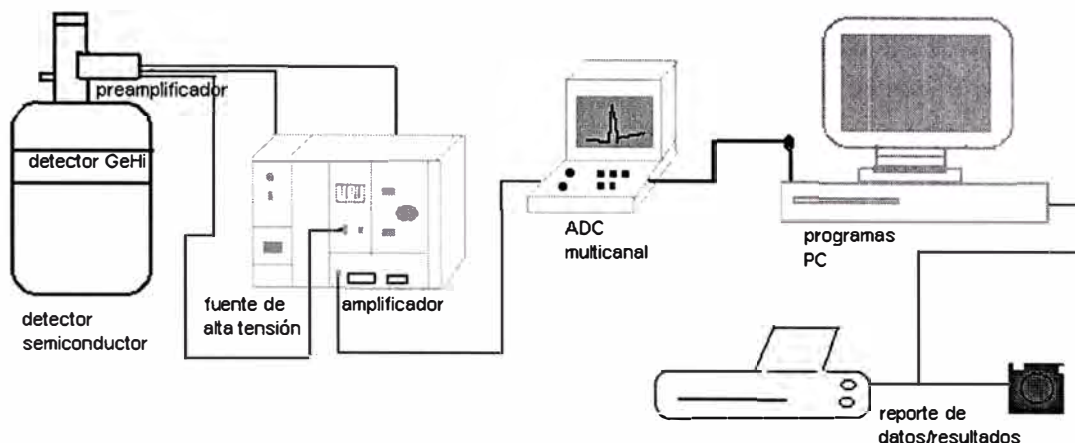


Fig. 1.3 Cadena de Medición para Espectrometría Gamma

1.5 Protección radiológica

El estudio del efecto biológico de las radiaciones ionizantes comenzó prácticamente al unísono con el descubrimiento en 1895 de los rayos X. Los primeros hallazgos y estudios fueron de carácter cualitativo, pues se realizaron cuando aún no se poseían medios para cuantificar las dosis de radiación suministradas. A comienzos de siglo se detectaron efectos dañinos de las radiaciones en el hombre y en animales de experimentación en momentos en que no existían normas de protección radiológica, y se poseía poca información sobre los efectos de las radiaciones. Los estudios cuantitativos que se comenzaron a efectuar en la radiobiología experimental en la década del veinte del presente siglo, junto con los estudios epidemiológicos en los sobrevivientes de los bombardeos atómicos y en pacientes expuestos a tratamientos radioterapéuticos permiten en la actualidad poseer una información voluminosa sobre el efecto biológico de las radiaciones que fundamentan el establecimiento de normas que garantizan la seguridad del trabajador ocupacionalmente expuesto a las radiaciones.

Los efectos biológicos de las radiaciones se producen como consecuencia de la ionización de los átomos que conforman las biomoléculas produciendo cambios químicos que alteran o erradican las funciones que ellas desempeñan. Los cambios que se producen se manifiestan a escala celular, tisular y así sucesivamente hasta el nivel de organismo, de manera inmediata o a largo plazo.

Cuando los daños no pueden ser reparados se produce la muerte celular. La muerte celular puede ser definida como la pérdida de una función específica para las células diferenciadas que no proliferan, tales como las nerviosas, musculares o secretorias. La muerte celular es la pérdida de la capacidad de proliferación sostenida o la pérdida de la integridad reproductora.

Todos los materiales radiactivos y la radiación ionizante son potencialmente peligrosos y pueden dar lugar a exposiciones externas del cuerpo o de parte de él. Pueden producir la irradiación de ciertos órganos cuando hay contaminación interna. Es por lo tanto muy importante el definir para los usuarios de la radiación y de materiales radiactivos, los métodos necesarios para la prevención y el control de estos peligros.

La evidencia demuestra que exposiciones limitadas a radiación externa o a la contaminación interna con pequeñas cantidades de material radiactivo, están asociadas con probabilidades extremadamente bajas de daños somáticos severos o daño genético.

Esto ha guiado al concepto de niveles máximos permisibles de exposición para el personal que trabaja con material radiactivo o con fuentes radiactivas.

Adicionalmente existe la posibilidad de exposición para el público en general, por lo que el encargado de la protección radiológica debe tener dos elementos en mente:

- a) Protección de los trabajadores ocupacionalmente expuestos
- b) Protección del público en general.

La enorme cantidad de recursos y de personas involucradas así como las dificultades que surgen para realizar una supervisión médica en caso de accidentes, hacen más crítica la protección para el público en general que la protección para trabajadores ocupacionalmente expuestos.

Existen tres principios que deben ser aplicados para prevenir o controlar la exposición del personal a los peligros de la radiación:

- a) Remover el peligro
- b) Vigilar el peligro
- c) Vigilar al trabajador

Estos principios deben ser aplicados en el orden anterior. El segundo principio involucra el apropiado diseño de lugares de trabajo y el aprovisionamiento de equipamiento apropiado y de blindajes para asegurar la máxima protección.

El tercer principio se refiere a las mediciones requeridas para realizar una vigilancia periódica de los controles, de las medidas de protección al personal y de los equipos.

CAPITULO II

PRODUCCIÓN DE I-131

2.1 Propiedades del I-131

2.1.1 Propiedades Nucleares

Vida Media: 8,05 días.

Valores recientes: $8,073 \pm 0,008$ d.

$8,070 \pm 0,009$ d.

Tipo de decaimiento y Energía (MeV)

Beta (β^-)	0,25 (1,6%)	Gamma	0,080 (5,0%) IC (ek/y 1,7)
	0,33 (6,9%)		0,177 (0,2%)
	0,47 (0,5%)		0,284 (5,0%)
	0,608 (90,4%)		0,325 (0,2%)
	0,81 (0,6%)		0,364 (85,5%)
			0,503 (0,3%)
			0,637 (6,9%)
			0,723 (1,6%)
			0,164 (0,6%) (ek/y 29)
			Vía 11,8 d. ^{131m}Xe .

Esquema de decaimiento

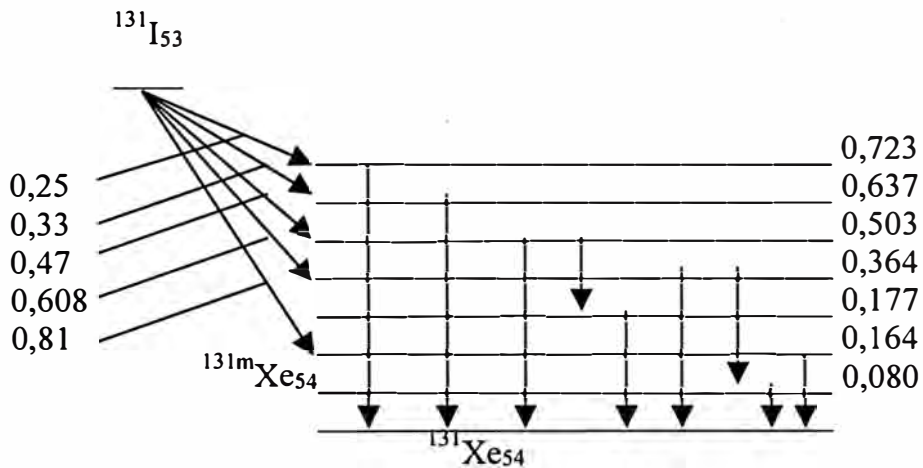


Fig. 2.1 Esquema de Decaimiento

Actividad de ^{131}I a procesarse es de 3 Ci., se debe considerar la actividad de los telurios irradiados que se desechan : Te-112, Te-123m, Te-125m, Te-127, Te-127m, Te-129, Te-129m.

Flujo integrado de irradiación : $2,6 \times 10^{19}$ n/cm².
 Actividad específica irradiando con $\phi 10^{12}$ n/cm².seg. :
 24 hr. : 0,8 mCi/gr.
 7 d. : 4,4 mCi/gr.
 Saturación : 9,6 mCi/gr.

2.1.2 Producción y Reacciones Nucleares

REACCION	ABUNDANCIA DEL NUCLEÍDO EN EL BLANCO	SECCION EFECTIVA (barn)	ACTIVIDAD DEL ELEMENTO A 10^{13} n/cm ² .seg (mCi/gr)			MARGENES DE REACCION Y VIDA MEDIA DE LOS NUCLEIDOS FORMADOS
			24h.	7 d.	Sat.	
$^{130}\text{Te}(n,y)^{131\text{m}}\text{Te}$	34,49	0,04	1,4	7,9	17,5	$^{120}\text{Te}(n,y)^{121}\text{Te}$ $T_{1/2}=17\text{d.}$ Ab.Isotópica 0,089% $Q = 0,3$ barn. $^{120}\text{Te}(n,y)^{121\text{m}}\text{Te}$ $T_{1/2}=154\text{d.}$ $Q = 2,0$ barn. $^{122}\text{Te}(n,y)^{123\text{m}}\text{Te}$ $T_{1/2}=117\text{d.}$ Ab.Isotóp. 2,460% $Q = 1,0$ barn. $^{124}\text{Te}(n,y)^{125\text{m}}\text{Te}$ Ab.Isotópica 4,61% $Q = 5,0$ barn. $^{126}\text{Te}(n,y)^{127}\text{Te}$
$^{130}\text{Te}(n,y)^{131}\text{Te}$	34,49	0,2	7,2	40,0	89,0	$T_{1/2}=9,4\text{h.}$ Ab.Isotóp. 18,71% $Q = 0,9$ barn. $^{126}\text{Te}(n,y)^{127\text{m}}\text{Te}$ $T_{1/2}=109\text{d.}$ $Q = 0,1$ barn. $^{128}\text{Te}(n,y)^{129}\text{Te}$ $T_{1/2}=68,7\text{m.}$ Ab.Isot. 31,79% $Q = 0,14$ barn. $^{128}\text{Te}(n,y)^{129\text{m}}\text{Te}$ $T_{1/2}=34,1\text{d.}$ $Q = 0,017$ barn.

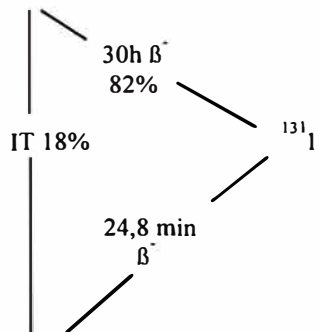
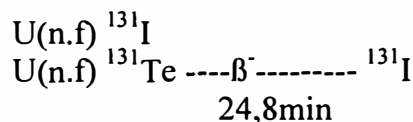
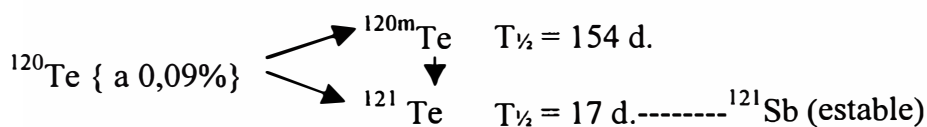


Fig. 2.2 Reacción del Teluro

El I-131 también puede ser extraído de productos de fisión :



El producto total de fusión para ^{131}I es 2,9%.



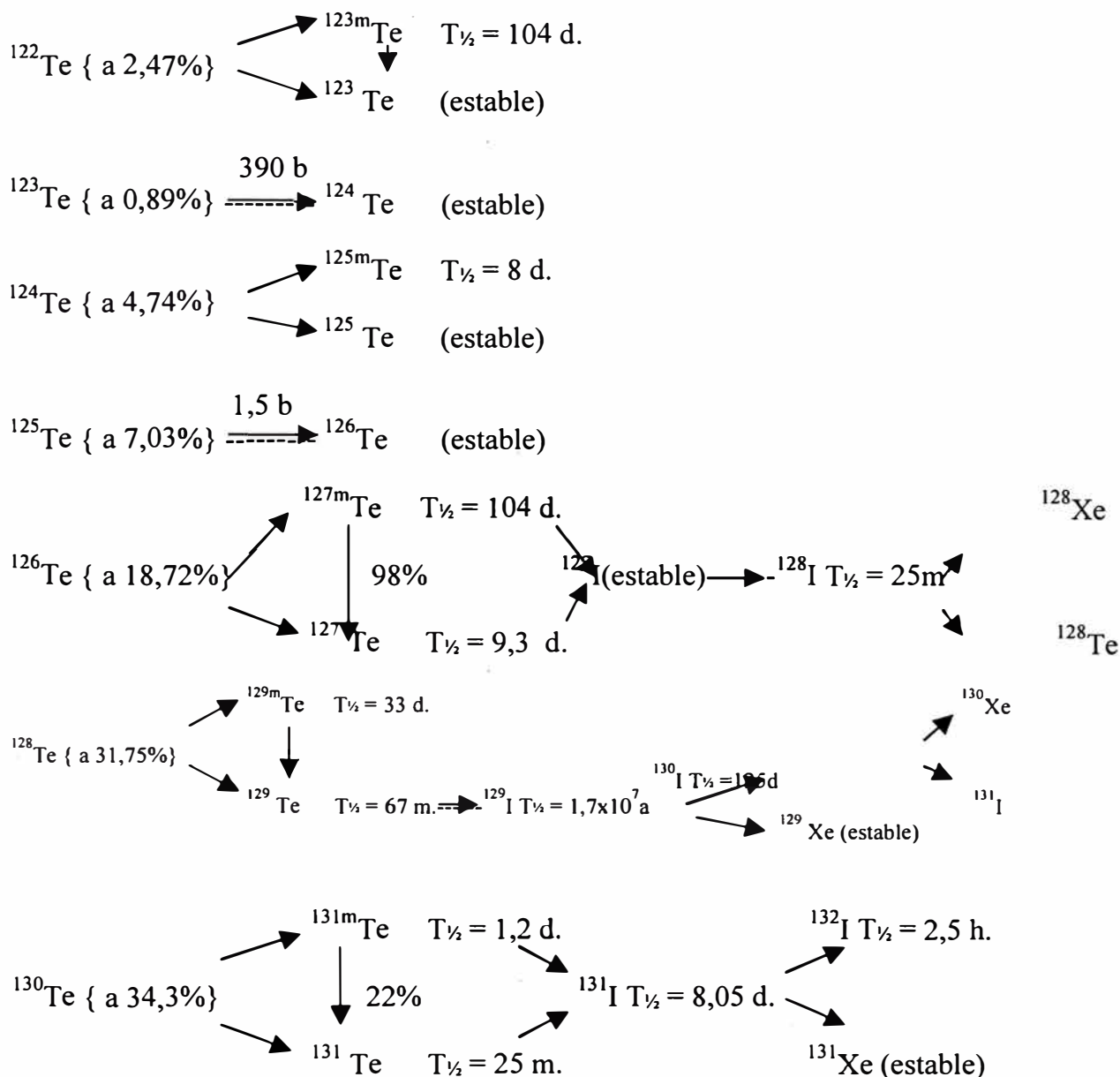


Fig. 2.3 Productos de fisión del Telurio

2.1.3 Protección Radiológica en la producción de I-131

Irradiación Externa.

Alcance β^- del I-131 en el aire 310 mg/cm^2 . El semiespesor del Pb. Correspondiente para la energía gamma a 0,364 y 0,639 MeV es de 0,37 y 0,75 cm. respectivamente.

Nivel de exposición causado por una fuente de 1 Ci. de I-131 a 1 mt. es de 300 mR/h.

Contaminación Interna.

Clasificado como un nucleido de clase 2 (alta toxicidad), período efectivo referido a todo el organismo 7,6 días. El Órgano crítico es la glándula tiroides. Manejo riesgoso debido a su alta volatilidad, se deber tener una ventilación adecuada.

Descontaminación.

Fácilmente eliminado de las superficies, vestido y piel con soluciones muy acuosas. Para evitar la formación de Yodo libre debe añadirse agentes reductores (Sulfito ó tiosulfato) a la solución descontaminante.

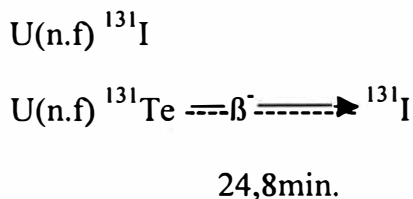
Con soluciones de ácidos fuertes (por ejemplo Ac. Nítrico 2-5% y HF 2%) utilizar recinto estanco adecuado.

Es necesario la filtración del aire de salida, el carbón activado y el cobre metálico suministran una buena eficiencia a la filtración, el uso de resinas de intercambio aniónico es también factible. Los filtros también pueden combinarse lavando el gas de salida con una solución acidificada de sales de mercurio.

La descontaminación de desechos activos es mejor realizado empleando materiales de intercambio iónico o carbón activado.

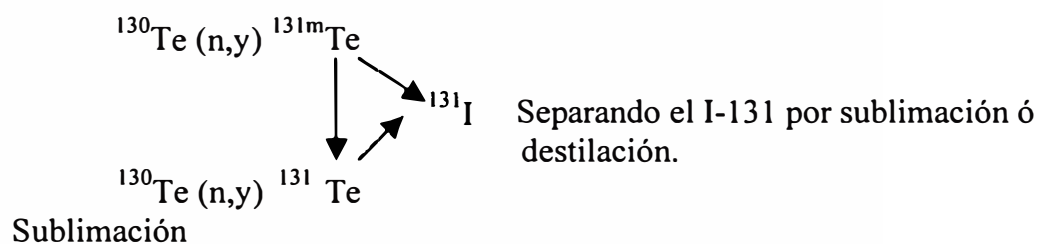
2.1.4 Métodos de producción

Separarlo como producto de fisión del Uranio.



Rendimiento total de fisión para el I-131 es de 2,9%.

Separación del Teluro Irradiado



Se irradia Te o TeO₂ que es calentado a 750 °C. Por un flujo de aire en un horno apropiado, el vapor de I₂ desprendido es recogido sobre un buffer CO₃⁼ / HCO₃⁻, se le adiciona Na₂S₂O₃ para evitar el paso de Ioduro a iodato.

Destilación

De acuerdo al metal o compuesto de telurio utilizado, así tenemos:

- * Se irradia Te metálico, luego se disuelve en mezcla sulfocrómica, posteriormente se oxida el Te y el I formado a Ac. Telúrico e Iódico, luego se reduce el Ac. Iódico a Yodo elemental el que es separado por destilación.
- * Se irradia Ac. Telúrico, se solubiliza y el Ac. Formado es separado de dicha solución por destilación con corriente de nitrógeno.
- Se irradia TeO_2 y el I-131 formado se separa por destilación. Este es el método utilizado por la CNEA-Argentina.

2.2 Procedimiento Experimental del método de Vía Seca

Preparación del Blanco

El blanco a ser irradiado es el Dióxido de Teluro (TeO_2) : Merck de 99,9 % de pureza y/o Jhonson Matthey 99,9 % de pureza.

El blanco es fundido a 830°C ., en un tubo de cuarzo (30 mm. de diámetro, 190 mm. de longitud) utilizando para ello un horno pequeño NEY; una vez fundido el Dióxido de Teluro se vierte en un molde de acero inoxidable (diámetro exterior 58 mm., diámetro interior 20 mm., longitud 80 mm.).

Una vez solidificado y enfriado el TeO_2 se retira del molde y se coloca seguidamente en la Cápsula de Aluminio (23 mm. de diámetro, 70 mm. de longitud), se llena el espacio vacío que pueda existir entre la cápsula y el blanco solidificado con polvo fino de TeO_2 . La cantidad de blanco a cargar en cada Cápsula de Aluminio es de 100 gramos.

Se procede a sellar la Cápsula en una selladora a una presión de 750 lb/in^2 . (62 Kg./cm^2 .), colocando la respectiva tapa de Aluminio.

Se realiza seguidamente la prueba de estanqueidad de la Cápsula para determinar que la soldadura sea hermética, para ello se sumerge la Cápsula en Nitrógeno Líquido por 5 minutos y seguidamente se le coloca en agua fría (temperatura del ambiente); no debiendo presentar ningún tipo de burbujeo en la unión cápsula-tapa.

Se procede a codificar la Cápsula con el uso de un pantógrafo (la codificación se realiza sobre la tapa de la cápsula). Se llena la solicitud de irradiación en donde se anota las características del blanco (impurezas, porcentaje, peso), la actividad requerida y se envía al reactor RP-10 para su irradiación.

Irradiación del Blanco

El Dióxido de Teluro (100 gr.) es irradiado a un flujo de $1,2 \times 10^{14}$ a $1,3 \times 10^{14}$ neutrones/cm².seg., en dos períodos de irradiación consecutivos de 8 horas diarias.

La actividad a procesarse es de 4,5 a 5,5 Curies (129,5 a 166,5 Gbq) de Te¹³¹/I¹³¹ por Cápsula.

Procedimiento: Método de destilación por vía Seca

Ingresar al recinto de producción (antes que el material irradiado) los viales previamente rotulados y pesados (producción, control calidad, lavado y fraccionamiento).

Cargar los frascos colectores adyacentes a la cámara de ionización con 10 ml. De solución de NaHCO₃ al 5% p/v, vía el intermediario externo.

Cargar el frasco que hace de trampa de seguridad con NaOH al 5% p/v, vía el frasco intermediario externo.

Abrir el agua de refrigeración del Sistema Lavador de Gases y cargar el frasco lavador adyacente al horno de fusión con 35 a 45 ml. de H₂SO₄ al 90 %, vía el intermediario externo.

Posicionar el tubo de cuarzo en U de tal manera que conecte perfectamente el crisol del horno con el frasco lavador de gas, luego girar el dispositivo para retirar la tapa del Crisol.

Retirar las tapas metálicas del horno, desplazar el contenedor del crisol hacia arriba y con la pinza adecuada retirar la tapa hacia el dispositivo (soporte sobre el horno).

Recepcionar el material radiactivo, el cual ha sido previamente calibrado (actividad total incluida del cartucho, y el peso respectivo); luego abrir los cartuchos con la abridora.

Verter el material radiactivo en el crisol del horno (esta operación se puede realizar cuando el crisol este dentro del horno o para tener más facilidad en la manipulación se puede retirar el crisol del horno).

Retirar los cartuchos con sus respectivas tapas y enviarlas a calibración (actividad del cartucho y sus pesos).

Colocar el crisol dentro del horno con su respectiva tapa y posicionarlo adecuadamente hacia abajo. Colocar seguidamente las tapas metálicas.

Posicionar el tubo de cuarzo en U de tal manera que encaje en la tapa del crisol por un lado y por el otro en el lavador de gases.

Arrancar el Horno Eléctrico desde su control externo, prefijar la temperatura a 760 °C y ajustar en 0.000 el display de control de la cámara de ionización y encender el registrador.

Abrir la válvula de Vacío en forma controlada lográndose que el burbujeo sea en forma regular en todo el conjunto de los colectores, trampas y lavador; de preferencia debe ser homogéneo en el frasco colector principal de I-131, el primer colector. El burbujeo no debe realizarse con demasiado vacío.

Después de aproximadamente 30 a 40 minutos se observará un incremento en los valores del display del control de la cámara de ionización, esto indica que el I-131 esta siendo ya colectado; entonces incrementar el vacío en forma moderada haciendo que el burbujeo sea más enérgico.

Interrumpir la destilación luego de aproximadamente una hora treinta minutos, cuando se compruebe que el valor del display sea constante así como la gráfica del registrador llegue a ser constante luego de haber incrementado su pendiente.

Cerrar el vacío del sistema de destilación y proceder a descargar la solución de NaI^{131} del primer colector en su respectivo vial tipo penicilina evitando que el goteo no sea hacia afuera del vial. Sellar el vial con su tapón y precinto.

Lavar el frasco colector con aproximadamente 10 ml. De solución de bicarbonato para recuperar la solución de I-131 remanente que queda atrapada, recibir en un vial respectivo y luego cerrarlo. Ambos viales (producción y lavado) se envían a calibraciones.

Desconectar el tubo de cuarzo en U que conecta el horno y el lavador de gases y apagar el graficador.

Apagar el horno eléctrico desde su control exterior e inmediatamente después proceder a verter el TeO_2 fundido en un recipiente de acero que esta dentro del recinto y dejar que se solidifique. Para realizar esta operación se tiene que retirar el crisol del horno.

Una vez calibrado el producto se procede a diluir con solución de bicarbonato de sodio al 5% o con agua bidestilada, en el frasco colector respectivo, el cual se encuentra unido a una bureta. Homogenizar utilizando la jeringa respectiva que conecta exteriormente con la bureta.

Tomar una alícuota (1 ml.) En el vial respectivo para control de calidad y remitirla para sus respectivos controles.

Proceder a fraccionar el producto de acuerdo a los pedidos, siendo el volumen mínimo de fraccionamiento de 5 ml., en caso de que este muy concentrada la solución principal se toma la alícuota respectiva y se lleva a 5 ml. Con agua bidestilada apirógena y estéril.

NOTA :

La depresión interna del recinto de producción deberá permanecer en aproximadamente 6 - 10 mm Columna de Agua.

Una vez finalizado el proceso descartar la solución del lavador de gases , el H_2SO_4 al 90%, dejar con agua bidestilada tanto el frasco como su balón intermediario, también descartar las soluciones de los otros dos frascos y llenarlos con agua bidestilada. El tubo de cuarzo después de cada proceso se debe lavar con aproximadamente 10 ml. de solución de NaOH 1M.

Al verter el Dióxido de telurio fundido se debe realizar con el sistema de ventilación-extracción encendidos, para evitar contaminar la bandeja y pinzas de manipulación.

Generalmente la dilución de la solución de NaI^{131} se lleva a cabo para tener una concentración entre 60 a 80 mCi/ml. Y esta se efectúa con agua bidestilada recién preparada estéril y apirógena.

Las soluciones que se usan en la producción de Yodo-131 son preparadas con agua bidestilada apirógena.

Una vez concluida la producción y distribuido el I-131 al recinto se debe hacer una limpieza general con lejía y agua bidestilada, para mantener dicho recinto listo para el siguiente proceso.

La esterilización de la solución de NaI^{131} se lleva a cabo en autoclave a una temperatura de 120°C. Por una hora y a una presión de 14,7 lb/in².

Se realizan dos ensayos de Control de calidad para el producto:

Pureza del radionucleido determinado por espectrometría gamma.

Pureza radioquímica determinado por cromatografía ascendente en alcohol metílico y agua (3:1).

2.3 Características de la Solución de I-131

FORMA QUIMICA	:	NaI^{131}
FORMA FISICA	:	Solución Tamponada.
PH	:	7 a 9,5
PUREZA RADIOQUIMICA	:	> 96 %.

PUREZA RADIONUCLEIDICA	:	$\geq 99,9 \%$
ESTERILIDAD	:	ATOXICA Y ESTERIL.
TELURO	:	≤ 10 ppm.
CONCENTRACION DE ACTIVIDAD	:	de 2,0 A 350 mCi/ml.

NOTA : También se pueden hacer diluciones con las siguientes sustancias:

A) SOLUCION DE DILUCION DE I¹³¹ CON PORTADOR

Na ₂ CO ₃	130 mgr.
NaHCO ₃	840 mgr.
Na ₂ S ₂ O ₅ .5H ₂ O	1,1769 mgr.
NaI	25 mgr.
pH	8,08

Volumen : 500 ml de Agua Bidestilada Apirógena.

B) SOLUCION FOSFATO-TIOSULFATO

Fosfato Monosódico	: 420 mgr.
Cloruro de Sodio	: 650 mgr.
Tiosulfato de sodio pentahidratado	: 248 mgr.
pH	7,0

Volumen : 100 ml. de Agua Bidestilada Apirógena.

C) SOLUCION CON ESTABILIZADOR

Bisulfito de sodio 0,1 %	: 100 mgr.
EDTA Sódico 0,2 %	: 200 mgr.
Volumen de Agua bidestilada	: 100 ml

CAPITULO III

ESTRUCTURA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE I-131 Y MODELADO

3.1 Estructura del Proceso en la Celda de Producción de I-131

La Planta de Producción de Radisótopos (PPR) del Instituto Peruano de Energía Nuclear produce una variedad de radioisótopos y radiofármacos de aplicación en la Industria y en la medicina, entre ellos se produce el Radioisótopo I-131.

Por ser un material radiactivo, este producto se produce en una celda especial que consiste en un recinto cerrado cuya estructura es de plomo y el interior esta a presión negativa para evitar fuga de material radiactivo al exterior ya que en el proceso de producción se produce aerosoles como el Xenón radiactivo.

Esta celda especial dispone de facilidades para el desarrollo del proceso, así como la manipulación de soluciones y muestras radiactivas.

El proceso de producción se inicia una vez que se tenga disponible el “blanco” (muestra irradiada), el cual será introducido en la celda cumpliendo siempre en todo momento con las normas de seguridad radiológica.

Para obtener el “blanco”, el IPEN cuenta con un reactor nuclear de 10 Mw de potencia que tiene facilidades de irradiación de muestras.

Entre los sub-sistemas que conforman una celda de producción de I-131 se pueden mencionar:

- Sub-sistema de Ventilación de Aire.
- Sub-sistema de Depresión de Vacío
- Sub-sistema de Refrigeración de Agua
- Sub-sistema de Vidrio conformado por: Frascos, tubos , jeringas y cubetas.
- Sub-sistemas de Tubería para interconectar los componentes del sistema de vidrio.
- Sub-sistema de Desechos Radiactivos Sólidos.
- Sub-sistema de Desechos Radiactivos Líquidos.

- Sub-sistema Mecánico-Neumático para abrir, y sellar viales.
- Sub-sistema Mecánico-Neumático para abrir canes.
- Sub-sistema de Sensores de temperatura, Depresión y medición de actividad de radiación
- Sub-sistema Neumático de Apertura y Cierre de puertas posteriores.
- Sub-sistema de Filtros de Aire.
- Sub-sistema Mecánico de Pinzas.
- Sub-sistema de Horno de Fundición.
- Sub-sistema de Fraccionamiento de Yodo-131.
- Sub-sistema de Medición de PH.
- Sub-sistema de Válvulas de Control de Flujo de Soluciones en Sistema de Vidrio

La mayoría de los sub-sistemas son posibles de automatizar, algunos de ellos funcionan permanentemente en todo el proceso de producción, en la siguiente vista se muestra la vista frontal y posterior de la celda de Yodo, así mismo el diagrama de flujo del proceso de producción.

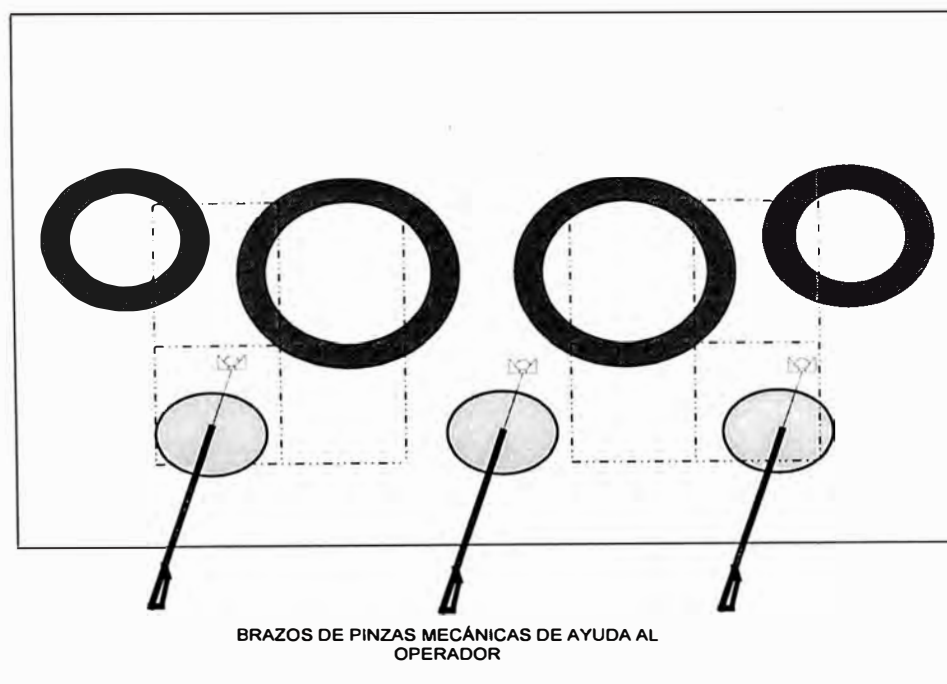


Fig. 3.1 Vista Frontal de la Celda de I-131

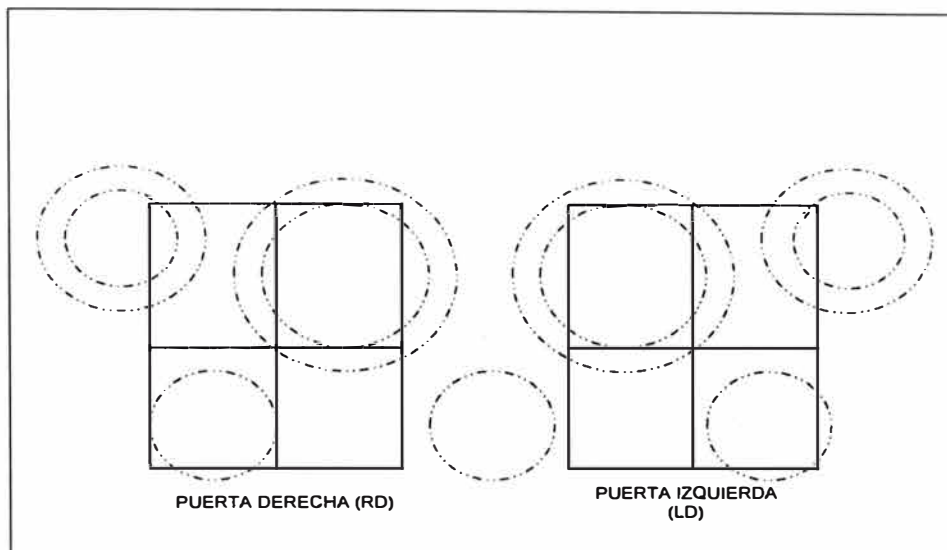


Fig. 3.2 Vista Posterior de la Celda de I-131

MÉTODO: DESTILACIÓN POR VIA SECA

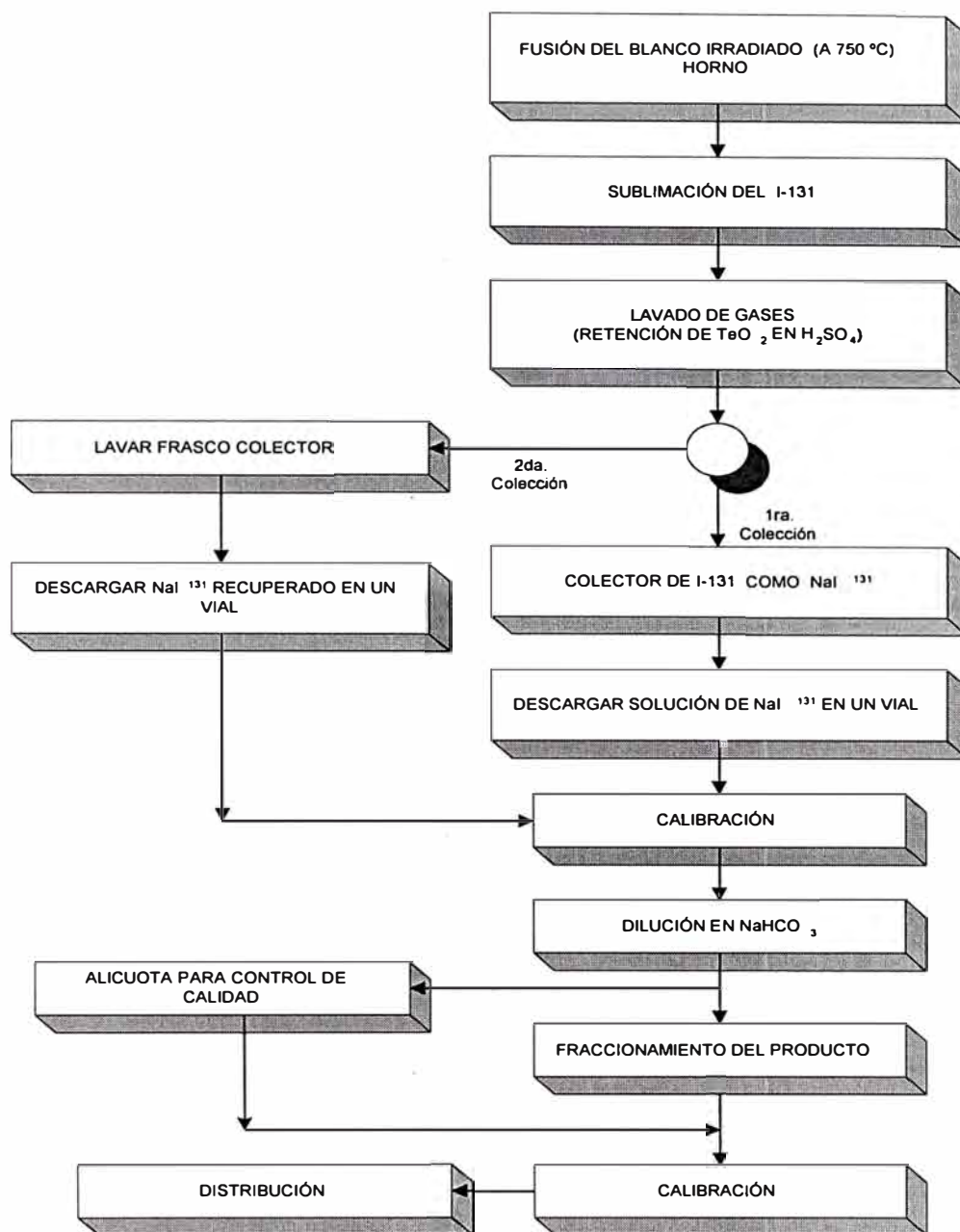


Fig. 3.3 Diagrama de Flujo de la Producción de I-131

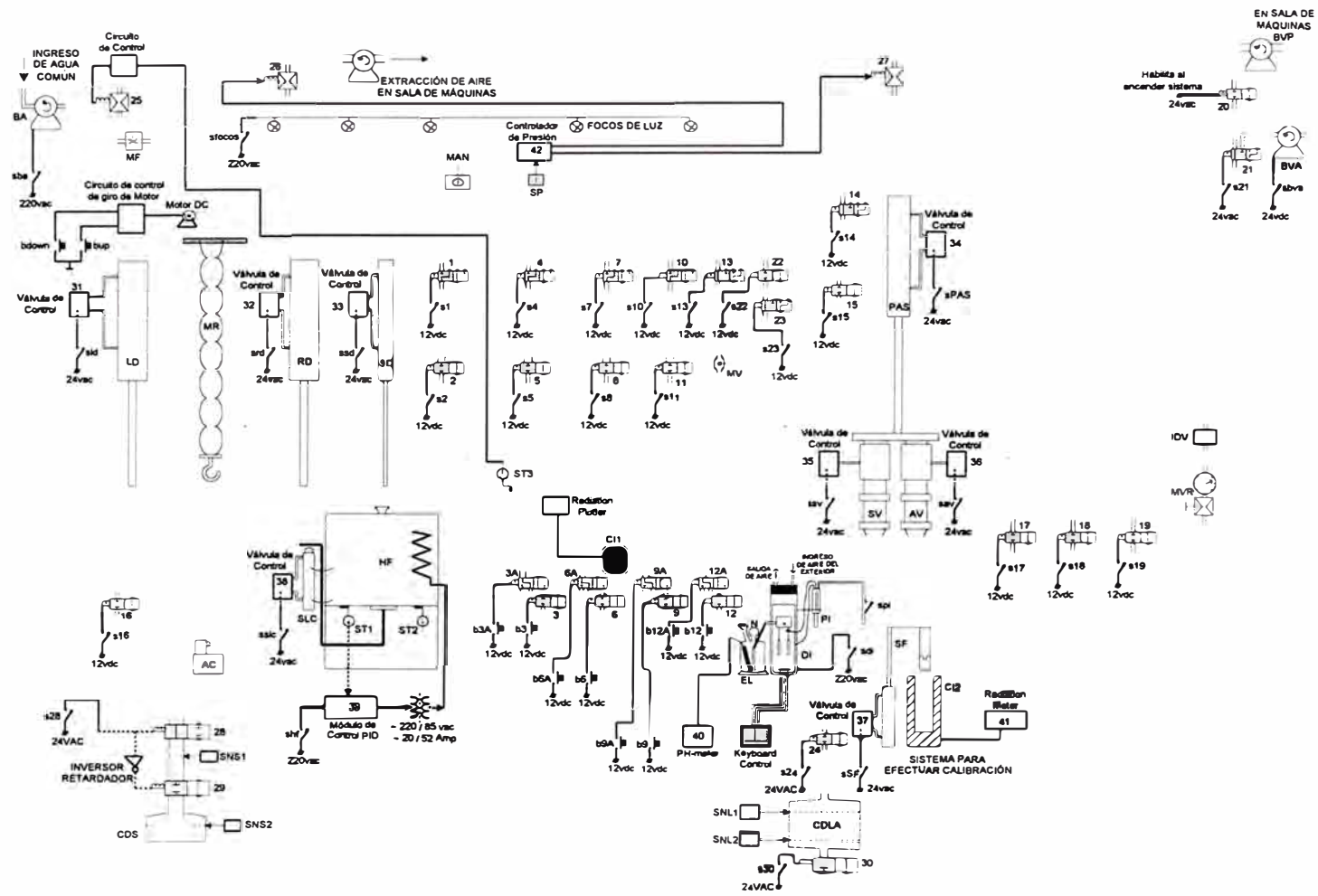


Fig. 3.4 Nueva Celda de Producción de I-131 Esquema del Sistema de Control

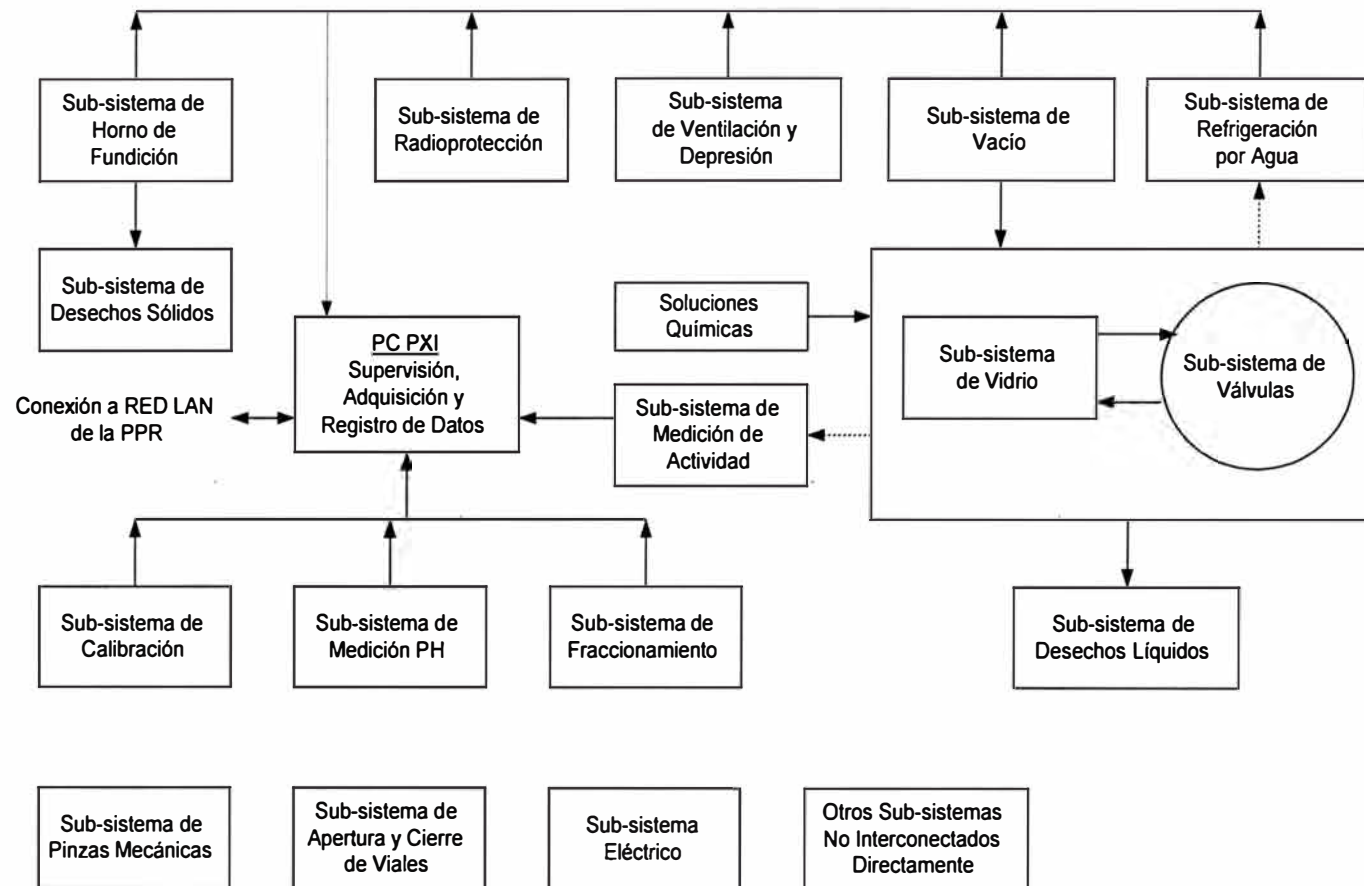


Fig. 3.5 Diagrama de Bloques de interconexión de subsistemas

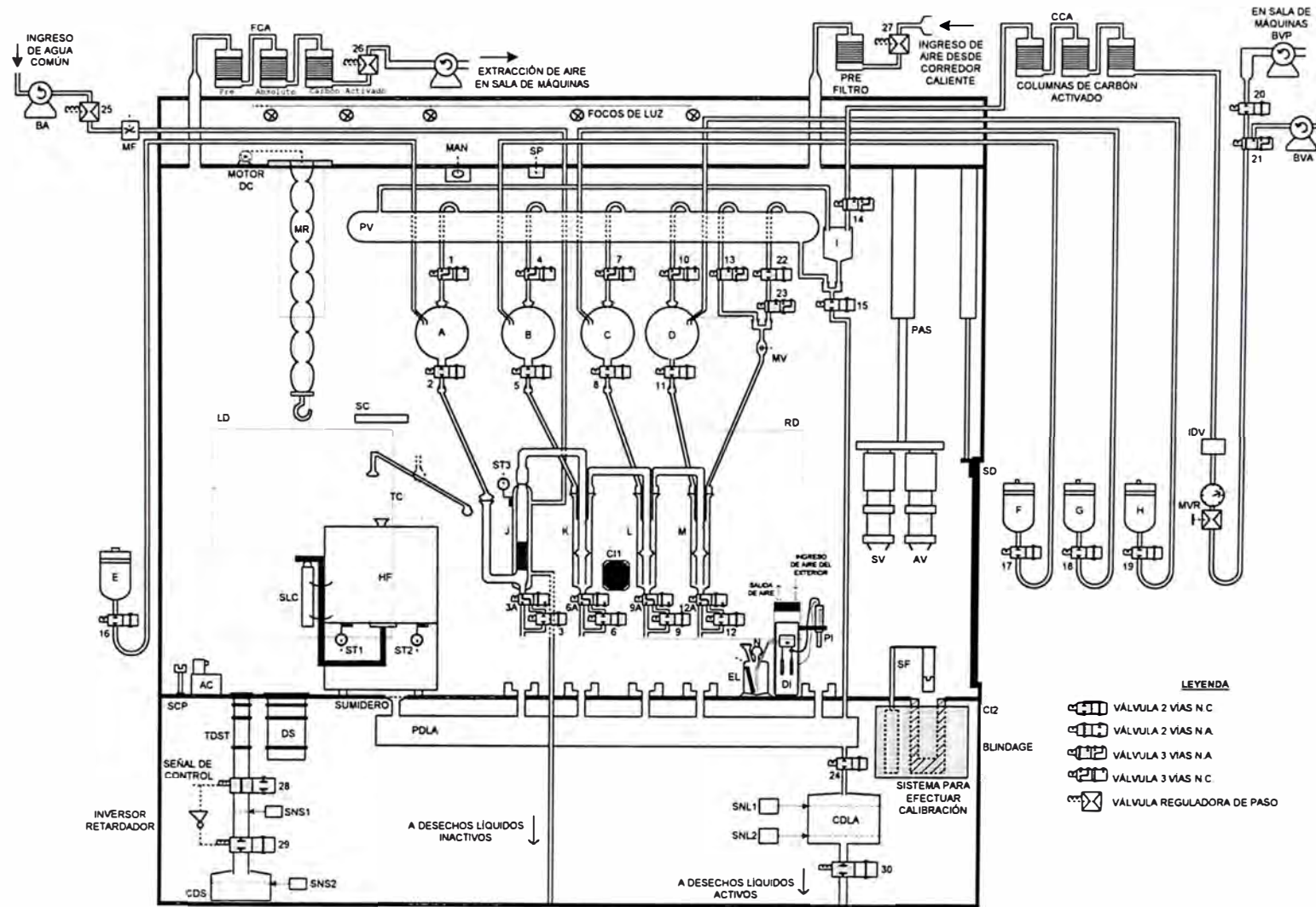
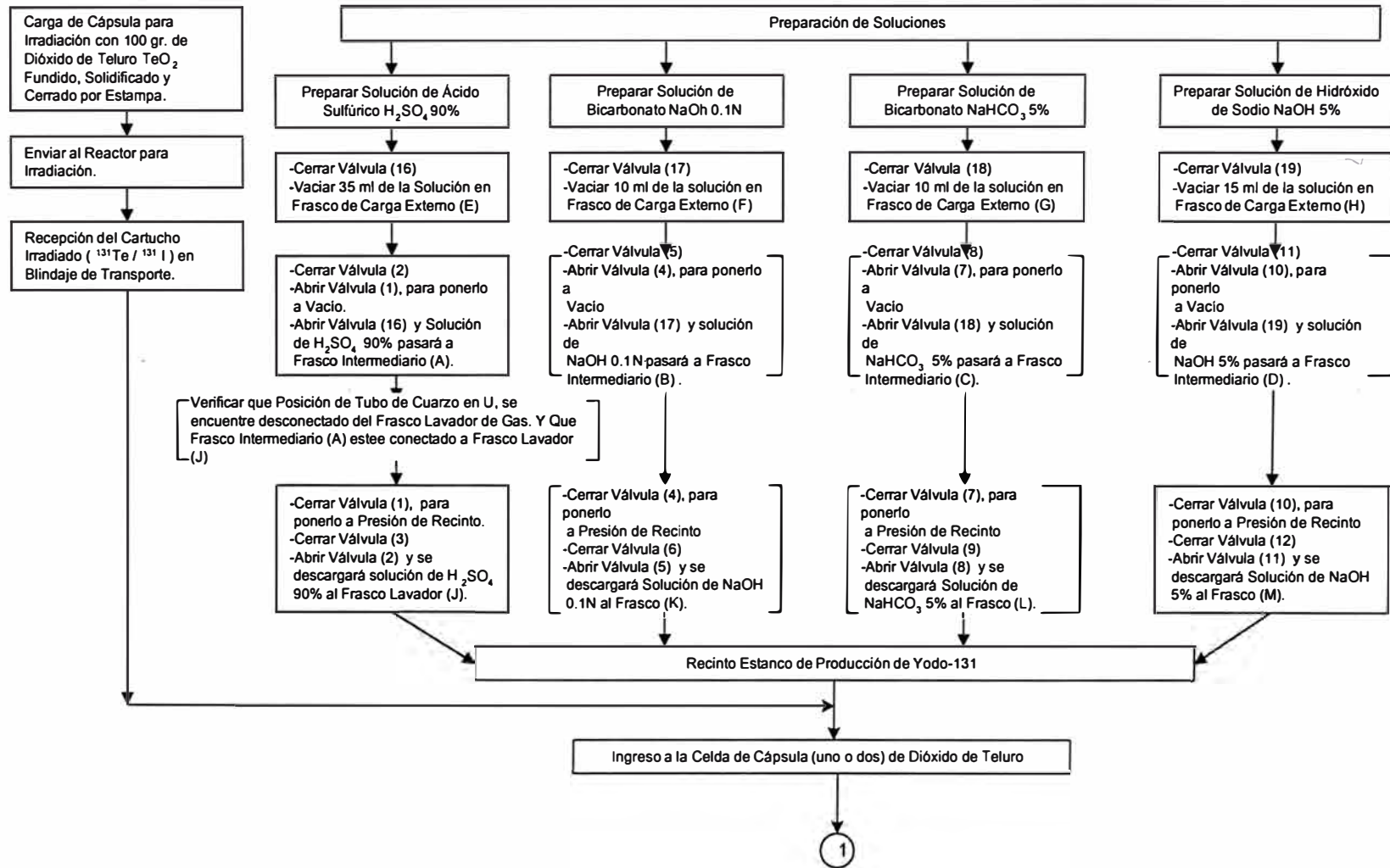
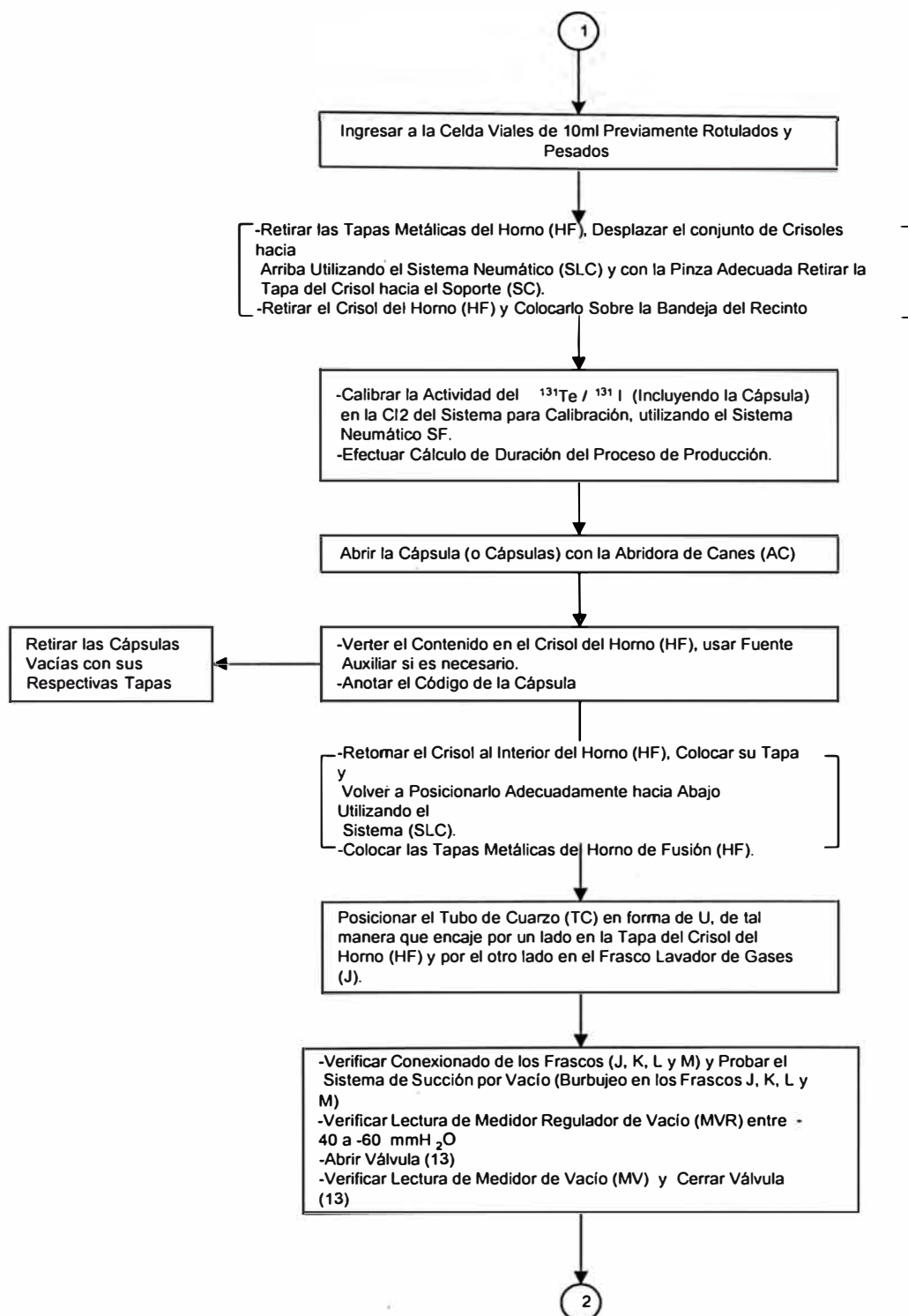


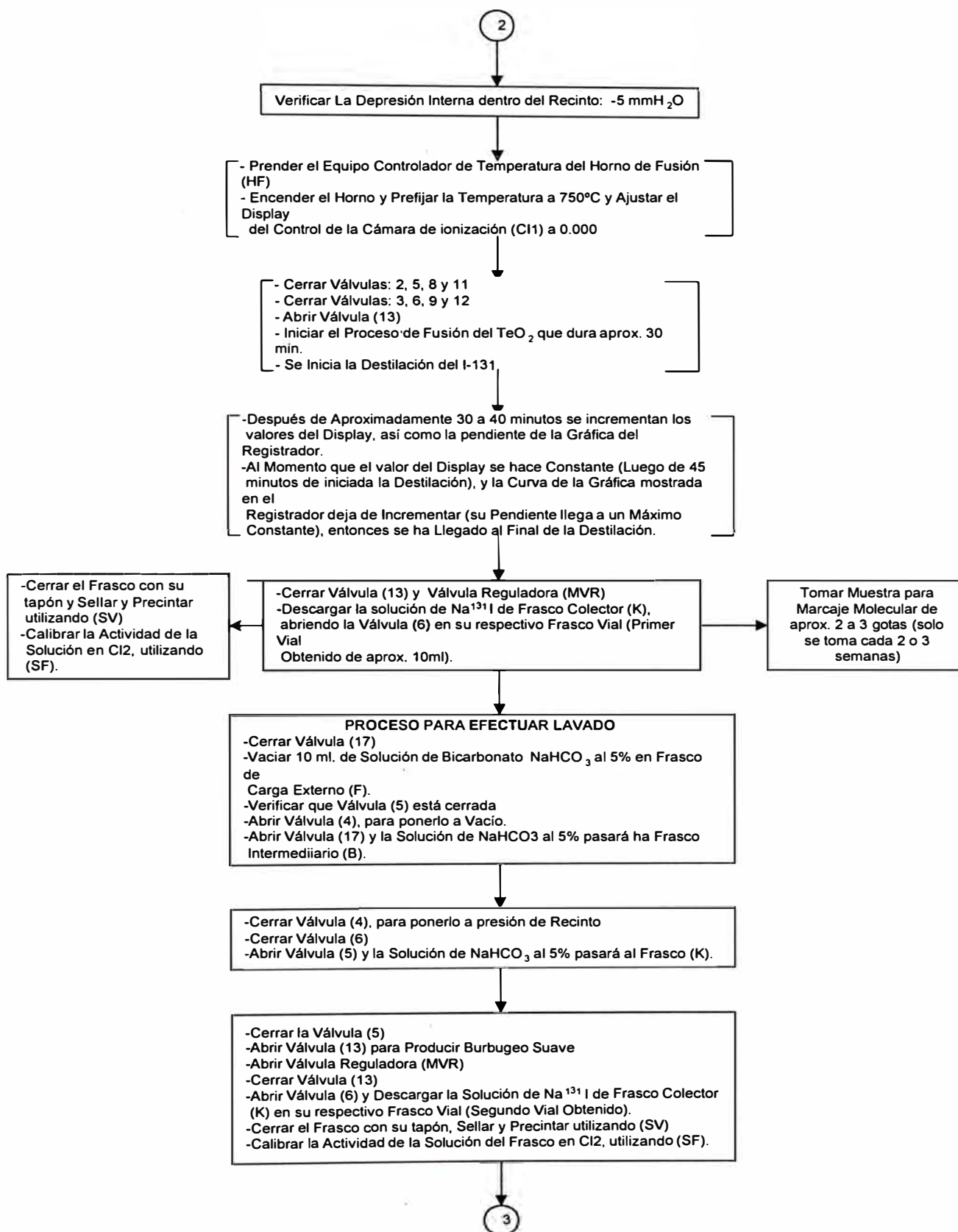
Fig. 3.6 Nueva Celda de Producción de I-131 Esquema de Sistema de Proceso Químico

En el esquema anterior se muestran los componentes de la Celda de Producción de I-131, los principales componentes y equipos se identifican según el etiquetado que a continuación se muestra:

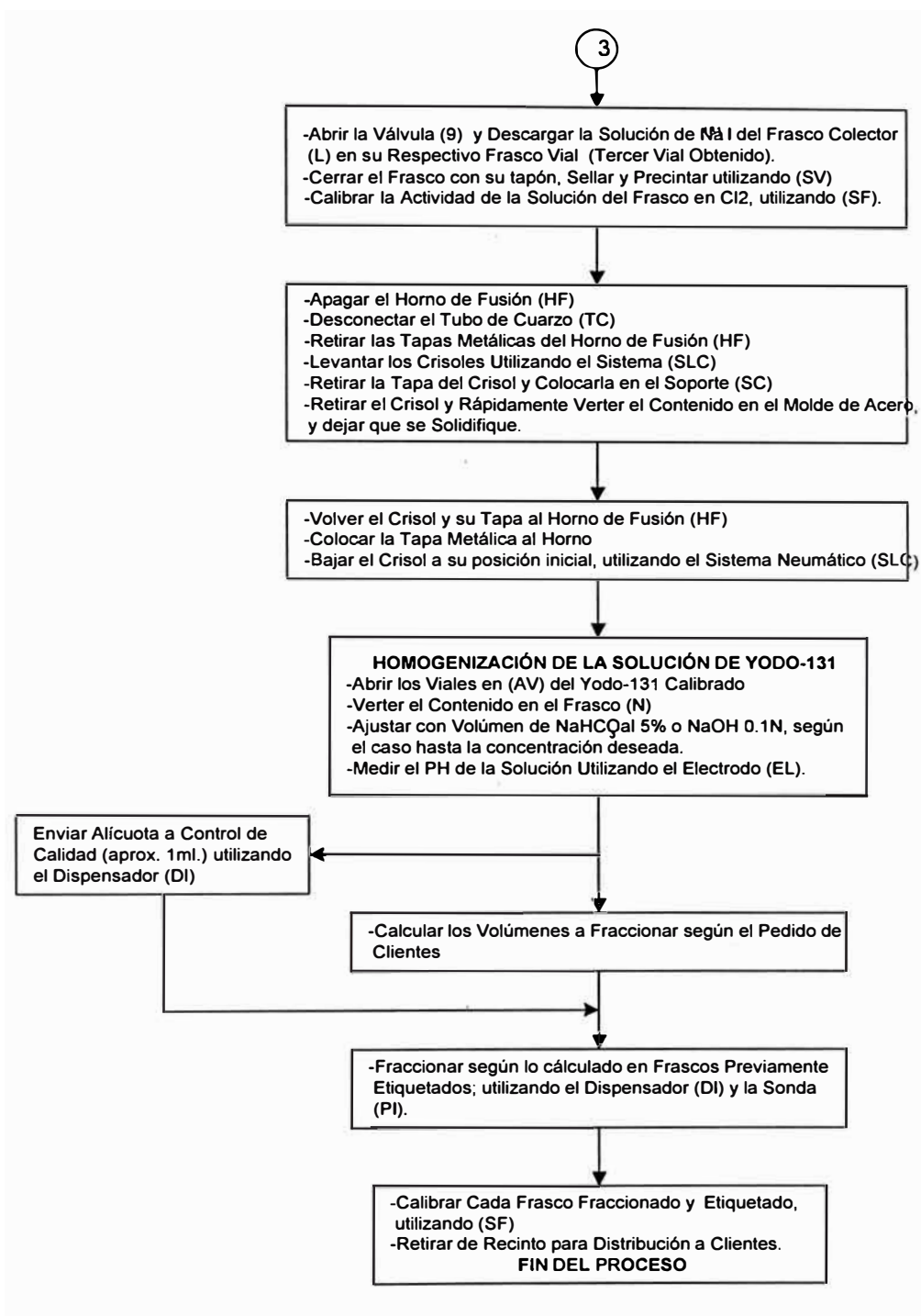
- HF: Horno de fusión con recipiente de crisol al interior
- E, F, G y H: Tubos de vidrio de vidrio externo (fuera de la celda) con soluciones químicas S1, S2, S3 y S4.
- A, B, C y D: Tubos de vidrio internos para almacenamiento temporal de las soluciones s1, s2, s3 y s4.
- J, K, L y M: Tubo de vidrio donde se produce la mezcla de las soluciones s1, s2, s3 y s4. con el gas radiactivo emitido desde el Horno de Fusión.
- TC: Tubo de cuarzo en U
- ST1: Sensor de temperatura del Horno de fusión
- OST2: Sensor duplicado de temperatura opcional.
- ST3: Sensor de temperatura del lavador de gases J
- MV: Medidor de vacío.
- MVR: Medidor de vacío con regulador manual e indicador de reloj.
- Válvulas: de flujo de aire y líquidos.
- SP: Sensor de depresión del recinto de la Celda de Producción de I-131.
- BVP: Bomba de vacío principal de la sala de máquinas
- BVA: Bomba de vacío auxiliar.
- MAN: Manómetro, medidor de presión dentro de celda
- PV: Peine de vacío
- PDLA: Peine de desechos líquidos activos.







**DIAGRAMA DE OPERACIONES DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE IODO-131
POR EL MÉTODO DE DESTILACIÓN POR VIA SECA (CONTINUACIÓN 3)**



**Fig. 3.7 Diagrama de operaciones del Proceso de producción de I-131
por el método de destilación por vía seca**

3.2 Definición del grado de requerimiento de automatización e identificación de procesos críticos de la celda de producción de I-131

El Proceso de producción de I-131 en la Celda es del tipo secuencial, según el diagrama de flujo mostrado en el párrafo anterior.

En el control clásico las secuencias son independientes unas a otras pero para proceso más complejos como el de la Celda de Producción de I-131 deben emplearse estrategias de control multivariable; o sea la estrategia de control debe tomar en cuenta la interconectividad entre las entradas y salidas seleccionadas que realmente existen en un proceso dinámico normal, por ello el algoritmo matemático debe tener en cuenta esa interconectividad.

La matriz clásica de transferencia es diagonal y nos informa el carácter independiente de los controladores; es decir la entrada u_1 controla la salida y_1 , la entrada u_2 controla la salida y_2 y así sucesivamente, la desventaja de esta estrategia es que no se toma en cuenta la interrelación que existen entre todas las entradas y todas las salidas, en este caso emplearemos una matriz de transferencia no diagonal porque se toman en cuenta las interrelaciones entre las variables de entrada y salida de la Celda de Producción de I-131 por ello emplearemos una estrategia de control avanzado según la secuencia dada a continuación.

Primero se preparan las soluciones que deben interactuar con el gas que se genera al fundir el dióxido de teluro, para ello se ingresa las soluciones líquidas: s_1 , s_2 , s_3 y s_4 a los tubos temporales A, B, C y D, se abren las válvulas correspondientes y las soluciones pasan a los tubos de ensayo J, K, L y M, esta parte del proceso puede ser automatizado solamente haciendo un manejo secuencial de las válvulas correspondientes, cabe indicar que esta parte del proceso no se esta utilizando material radiactivo por lo que el personal que opera la celda no se esta irradiando.

Por otra parte el "blanco" que ya a sido irradiado en el Reactor Nuclear se traslada a la celda de producción de I-131, la cápsula es abierta y se vierte el "blanco" en el crisol del horno de fusión, se energiza el horno y se prefija la temperatura de trabajo del horno de fusión a $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es controlada por un módulo PID que acciona los calefactores, el sensor de temperatura del Horno de Fusión es ST1, asimismo el sistema tiene otro sensor duplicado ST2; al llegar a la temperatura prefijada se emite gases del crisol del horno de fusión, lo que se mezcla con S_1 en el tubo de ensayo J, dando como resultado una reacción química que emite un gas con Yodo de cierta impureza, cabe agregar que en este tubo de

ensayo J la temperatura no debe exceder de 10 °C para ello se controla el flujo con una válvula de ingreso del refrigerante que en este caso es agua desmineralizada, el gas de Yodo emitido se mezcla con S2 para producir al final un gas de Yodo de mejor pureza y así se va mezclando con S2 y S4, los líquidos depositados en los tubos de ensayo K, L y M son Yodo 131 y serán depositados en viales abriendo las válvulas correspondientes, esto se hace en forma secuencial, este proceso concluye cuando la cámara de ionización CI1 da una lectura constante, permitiendo que ya no se puede extraer más Yodo radiactivo, este proceso de destilación dura 45 minutos aproximadamente, posteriormente a ello se apagan el horno de fusión y las bombas de vacío, después se vacía el líquido que esta en el tubo de ensayo J como desecho liquido inactivo; cabe indicar que durante este proceso se esta monitoreando la depresión del recinto de la celda con el sensor de presión SP que actúa sobre las válvulas de extracción e ingreso de aire al recinto de la celda de producción de I-131.

Todo este proceso es muy importante porque el material con la cual se esta procesando es radiactivo y además se genera gases radiactivos como el Xenón; por ello los operadores deberán protegerse radiológicamente.

Todo este proceso maneja 42 señales entre entradas y salidas resultando muy complejo el modelo dinámico del proceso por ello este informe servirá para modelar la temperatura del Horno de fusión solamente, dejando al criterio de un trabajo más específico para modelar todas las señales que podría ser un tema de tesis de un alumno de pre-grado, por se tomará como variable:

- Temperatura del Horno de fusión (T1)

3.3 Modelado del proceso de control de automatización en la celda de producción de I-131

En el control clásico de sistemas secuenciales se puede controlar cada variable independientemente y después asociarla para hacer un control más complejo, en este proceso se está tomando solamente la variable del control de temperatura del Horno de Fusión a ser controlada, también se pueden emplear configuraciones multilazo, tales como cascada que son utilizables en regímenes secuenciales en procesos donde se tomen más señales de control.

En sistemas de este tipo además de usar los lazos mencionados es necesario controlar en forma independiente la temperatura en el horno de fusión, lo cual es nuestro caso, pero

también se pueden controlar la temperatura en el tubo de ensayo J y la depresión en el recinto, en la actualidad todo este procedimiento se realiza en forma manual y por medio de la observación, teniendo el problema de recibir altas dosis de radiación al estar casi todo el tiempo de producción en la celda de I-131.

El control de este sistema se puede mejorar utilizando estrategias de control multivariable, ya que esta estrategia de control debe incluir un algoritmo matemático que tiene en cuenta la interrelación entre las entradas y salidas seleccionadas en nuestro caso se ha tomado solamente el control de la temperatura del horno de fusión, pero se pueden incluir las demás salidas y entradas haciendo más complejo el control y esto podría considerarse un trabajo de tesis para alumnos de pre-grado.

La variable a controlar en la celda de producción de I-131 es:

- Temperatura del Horno de fusión (y_1)

Como variable de control manipulada:

- Control del calefactor en el Horno de fusión (u_1)

3.4 Modelo en espacio de estado del proceso de control de temperatura en la celda de producción de I-131

El proceso de producción de I-131 empieza con la colación del “blanco” en el Horno de fusión, este “blanco” ha sido irradiado en el Reactor, se cierra la celda de producción y empieza el proceso con la elevación de la temperatura en el horno de fusión, experimentalmente para alcanzar la temperatura prefijada demora 30 minutos siguiendo una curva exponencial, este aumento de temperatura es regulado por el controlador PID interno del Horno de fusión y tiene una indicación digital en display para esta fase experimental se ha tomado los tiempos con un cronómetro versus la temperatura hasta que llegue a su régimen estacionario y el control permite que esa temperatura se mantenga en todo el proceso de producción.

En este proceso dinámico se pueden determinar curvas experimentales de respuesta a un escalón, a partir de esas curvas experimentales es posible encontrar funciones de transferencia que reproduzcan en forma aproximada las curvas reales.

Se realizó la experimentación con un proceso estándar tomando como referencia una cápsula que contiene 100 gr. de dióxido de telurio que ha sido irradiado en el reactor esto nos da una actividad radiactiva a procesarse de 4.5 a 5.5 curies.

Al empezar la etapa de producción de I-131 el control de temperatura interno del Horno de fusión regula la corriente eléctrica al calefactor llevando la temperatura $i_{(t)}$ al valor de fusión del dióxido de telurio que es fijada en $i_{(0)}=750\text{ }^{\circ}\text{C}$, después de 30 minutos entra a su régimen, desplazamos el control de temperatura interno de la planta a $755\text{ }^{\circ}\text{C}$ y tomamos la temperatura cada 5 minutos, la planta a controlar al ser constituida por un sistema térmico de calefacción posee una dinámica eso es una ventaja para ver la evolución del comportamiento de la regulación, lógicamente los tiempos serán largos, se registro la evolución de la temperatura hasta que se estabilice en un valor de $i_{(0)} + i_{(\infty)}$; llegando a que $i_{(\infty)}= 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El sistema de calefacción esta constituida por una resistencia calefactora de 10 ohmios cada 50 vatios; según las características de fábrica de la resistencia térmica es que por cada 300 mV la temperatura aumenta $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, como se realizó la simulación hasta $755\text{ }^{\circ}\text{C}$ entonces se aumento en 1500 mV ó sea 1.5 V para generar un sobre-impulso no superando el 10% para llegar a la temperatura prefijada.

La resistencia térmica es de $0.3\text{ V/ }^{\circ}\text{C}$, entonces $u_{(0)}=225\text{ V}$ en la temperatura prefijada inicial y después de llegar a $755\text{ }^{\circ}\text{C}$ el $u_{(\infty)}= 1.5\text{ V}$.

Del proceso experimental se obtienen los siguientes datos:

Tabla 3.1: Datos experimentales de Tiempo y Temperatura primer experimento

PASOS	TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)
1	0	750
2	5	752.9
3	10	754.3
4	15	754.7
5	20	754.8
6	25	754.9
7	30	755

3.5 Análisis de la respuesta a una entrada a un escalón

Con los datos obtenidos en el experimento anterior podemos hallar una curva $i(t)$ que representa la evolución de la temperatura en el tiempo. A partir de la figura 3.1 se puede asumir una función de transferencia de primer orden para un proceso estándar, según los datos experimentales se asume que $i(\infty) = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $u(\infty) = 1.5 \text{ V}$, por lo tanto $K_p = 3.33 \text{ }^{\circ}\text{C/V}$, el valor aproximado será de $\tau = 5.95$, es decir:

$$\frac{i(s)}{u(s)} = \frac{K(p)}{\tau S + 1} \quad k(p) = \frac{i(\infty)}{u(\infty)} \quad (3.1)$$

donde S es la variable de Laplace, la solución de 3.1 es conocida:

$$i(t) = K_p (1 - e^{-t/\tau}) u(t) \quad (3.2)$$

Como nosotros hemos considerado una función de transferencia de primer orden que es la que más se aproxima a nuestra simulación, lógicamente las pequeñas variaciones se deben a la toma de datos a partir de la curva experimental.

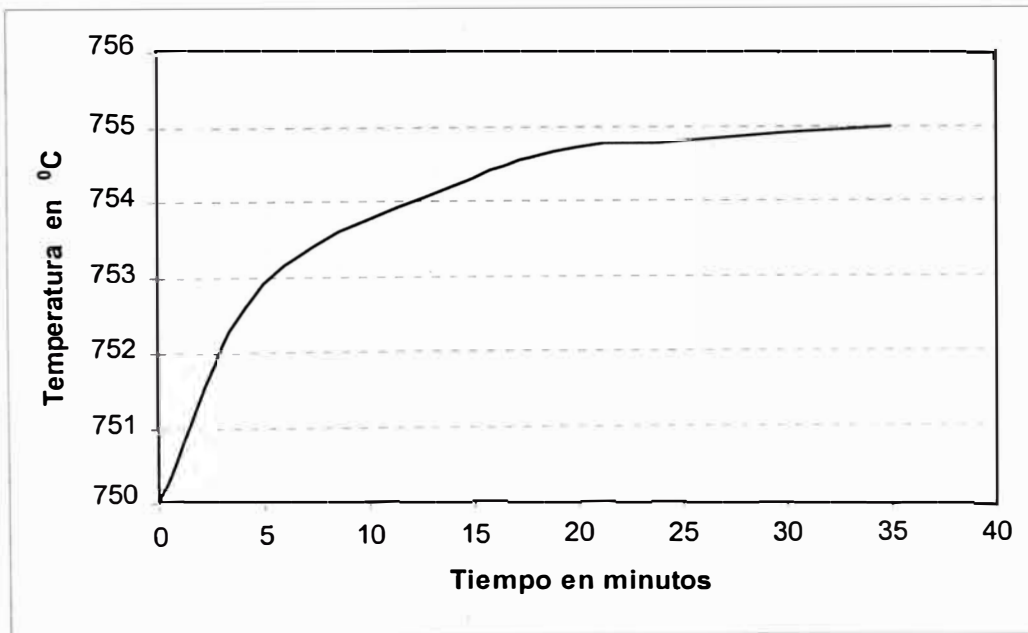


Figura 3.1 Curva de temperatura correspondiente al primer experimento

Para una segunda simulación con las mismas condiciones y similar al primero consideramos los valores: $i_{(\infty)} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ que sería el valor final de la temperatura hasta $760\text{ }^{\circ}\text{C}$, el valor inicial antes de generar el escalón sigue siendo $i_{(0)} = 750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Los nuevos datos obtenidos en forma experimental nos da:

Tabla 3.2: Datos experimentales de Tiempo y Temperatura segundo experimento

PASOS	TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)
1	0	750
2	3	751.9
3	6	755
4	9	757.5
5	12	758.6
6	15	759.4
7	18	759.7
8	21	759.8
9	24	759.9
10	27	760

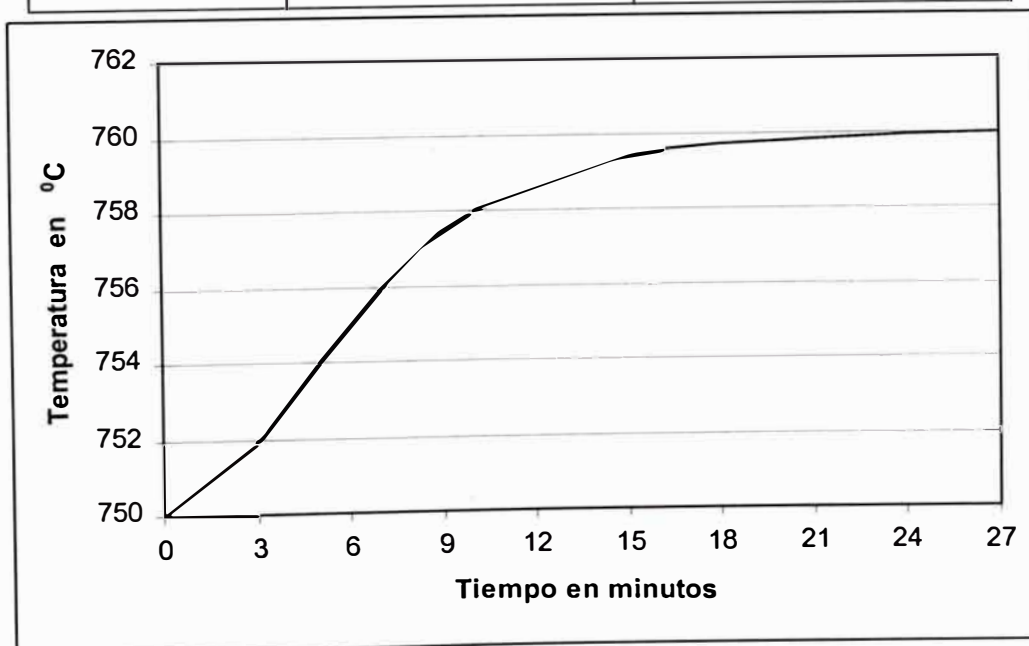


Figura 3.2 Curva de temperatura correspondiente al segundo experimento

Con los datos obtenidos en el segundo experimento podemos hallar una curva $i(t)$ que representa la evolución de la temperatura en el tiempo, tomando como tiempo de estabilidad de 27 minutos. A partir de la figura 3.2 se puede asumir una función de transferencia de segundo orden, tomando como punto de partida la información de la función de transferencia del primer experimento, asumiendo valores del gráfico podemos hallar los datos experimentales $i(\infty) = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; $u(\infty) = 3 \text{ V}$, por lo tanto $K(p) = 3.33 \times 3.33 = 11.08 \text{ }^\circ\text{C/V}$, el valor aproximado será de $\tau_2 = 1.44$, en el primer experimento $\tau_1 = 5.95$, entonces:

$$\frac{i(s)}{u(s)} = \frac{K(p)}{(\tau_1 S + 1)(\tau_2 S + 1)} \quad k(p) = \frac{i(\infty)}{u(\infty)} \quad (3.3)$$

Por lo tanto la función de transferencia es:

$$\frac{i(s)}{u(s)} = \frac{11.08}{(5.95 S + 1)(1.44 S + 1)} \quad (3.4)$$

CAPITULO IV

ESTRATEGIAS DE CONTROL CLÁSICO

4.1 Introducción

Cuando se pretende llevar a cabo un control clásico se encuentran dos dificultades: encontrar un modelo matemático de la planta que presente cierta exactitud y probar el o los controladores diseñados con la planta físicamente disponible. En este trabajo se realiza el control analógico de temperatura de un sistema, desde su fase inicial de identificación hasta la fase de comprobación, según sea el caso se puede apoyar en el toolbox Real-Time Windows Target de MATLAB para realizar las simulaciones en tiempo real.

El proceso de producción de I-131 en la Celda de Producción es un sistema de lazo cerrado de control de temperatura, las demás variables que no se han tomado en cuenta en este caso por la complejidad del sistema son algunas de lazo abierto y otras de lazo cerrado; en este caso solamente se ha habilitado el control de temperatura del Horno de Fusión interno, hay dos bombas de vacío en el sistema una principal y otra auxiliar la depresión debe estar en 6 –10 mm de columna de agua, en este sistema no existe control de lazo cerrado para la depresión pero si baja de acuerdo a lo prefijado entonces manualmente se incrementa o decrementa la presión, esto va a suceder en el proceso por los cambios de temperatura en el recinto, esto es sensado en varias etapas del proceso, para nuestro caso solamente se controlará la temperatura del Horno de Fusión, estos datos los podemos ver en un display, anteriormente se leía en un indicador analógico.

El control de temperatura interno se habilita al inicio del proceso para que llegue a su régimen de trabajo, este controlador de temperatura para fase inicial tiene incorporado un algoritmo de control PID.

Las variaciones que existen actualmente son perturbaciones que se realizan en el proceso de producción, estas distintas variaciones hacen que el producto que se obtiene no tenga la concentración y volumen adecuado ya que este material va a ser inyectado a los pacientes para realizarles los estudios Gammagráficos o las terapias respectivas.

4.2 Sistemas de Control PID, diseño y simulación

En las estrategias de control clásico se encuentran el sistema de control PID, este controlador incorpora las ventajas que proporcionan cada una de las tres acciones individuales de los sistemas de control proporcional, del control proporcional integral y del sistema de control proporcional derivativo.

A continuación se muestra el diagrama estándar de bloques del sistema con este tipo de controlador:

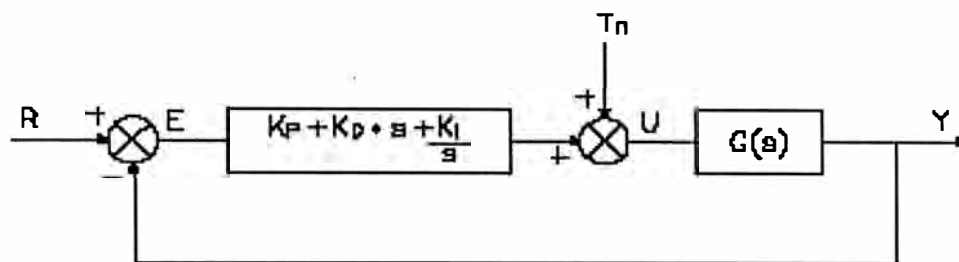


Fig. 4.1 Sistema de control PID

Diseñaremos un controlador PID para el proceso de producción de la Celda de I-131, la función de transferencia de primer orden y mediante el método del tanteo probaremos con diferentes valores los parámetros de sintonización tomando como referencia los del actual controlador que son: $P = 3.5$, $I = 0$ podemos adecuar un controlador proporcional integral PI según el esquema:

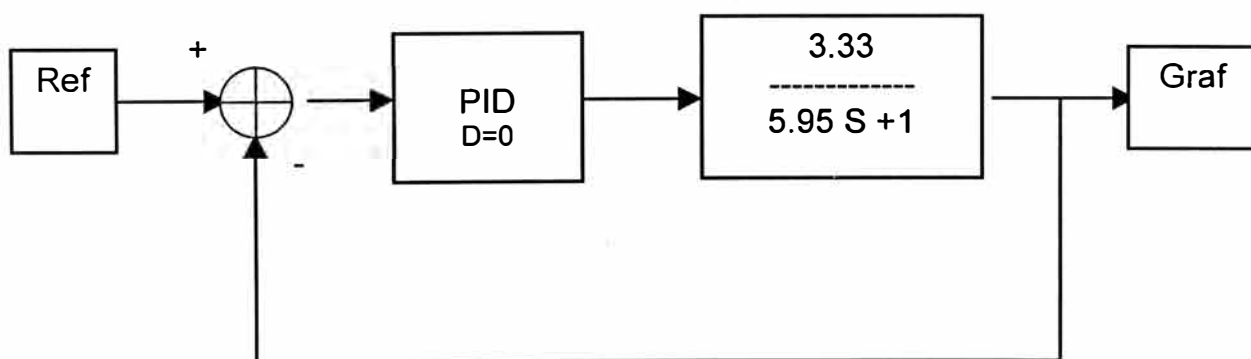


Fig. 4.2 Diseño del controlador PI

La figura 4.2 muestra el esquema donde determinamos los parámetros del controlador PI $P = 3.0$, $I = 0.8$ y $D = 0$.

Usando el PID actual podemos simular en tiempo real la curva de temperatura a un escalón de 10°C .

Tabla 4.1: Datos experimentales de Tiempo y Temperatura PID actual

PASOS	TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA (°C)
1	0	750
2	3	758
3	6	762.5
4	9	758.5
5	12	760.2
6	15	759.7
7	18	759.8
8	21	759.9
9	24	759.9
10	27	760

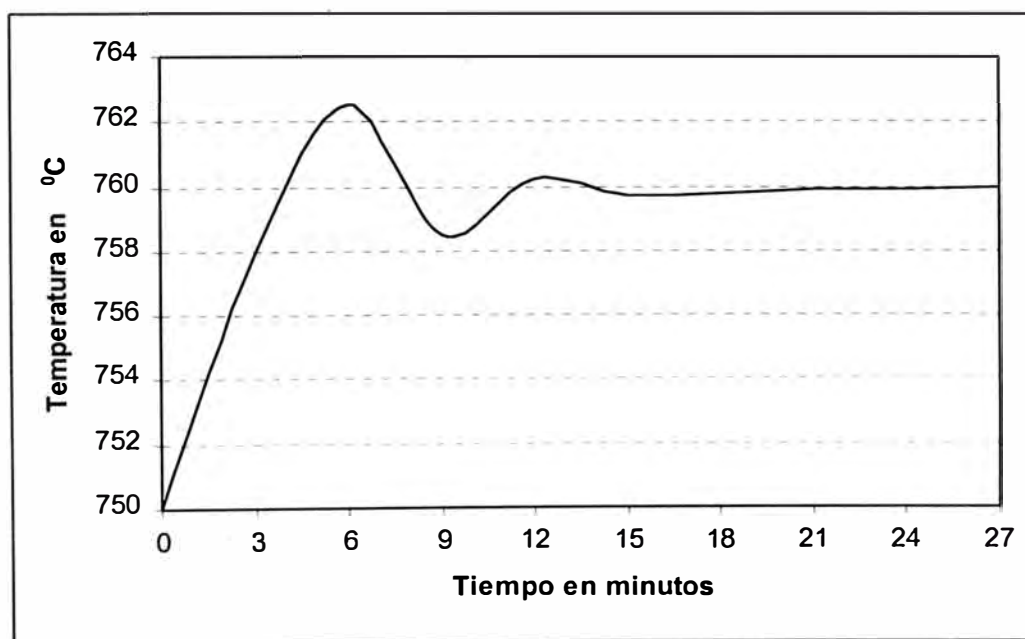


Fig. 4.3 Curva de temperatura correspondiente al PID actual

Como se podrá observar el sistema se estabiliza en 21 minutos aproximadamente.

4.3 Dispositivos Sensores, Indicadores y Controladores

CONTROLADOR DE TEMPERATURA (Honeywell® UDC 1000 1/16 DIN Process Controllers).-



Fig. 4.4 Control de temperatura

Controlador basado en microprocesador, compacto y fácil de configurar. Es perfecto para aplicaciones industriales en: plásticos, ventiladores, esterilizadores, horno y empaquetaduras. Dispone de pre sintonizado/auto sintonizado, conmutación de auto/manual, rampa para pre fijación de puntos y alarma dual con protección de fundición por calor. Un código de seguridad de cuatro dígitos previene cambios no autorizados.

Memoria EEPROM no volatil asegura la integridad de datos durante pérdida de energía.

Display de cuatro dígitos dual.

Especificaciones técnicas:

Input ranges

Type J: 32 to 1402°F (0 to 761°C)

Type T: -328 to 504°F (-200 to 262°C)

Type K: 32 to 2503°F (0 to 1373°C)

Type R: 32 to 3002°F (0 to 1650°C)

Type S: 32 to 3000°F (0 to 1649°C)

Type L: 32 to 1404°F (0 to 762°C)

Type B: 212 to 3315°F (100 to 1824°C)

mA DC: 4 to 20 mA, 0 to 20 mA

Accuracy: $\pm 0.25\%$ of span ± 1 LSD

Control type: on/off, PID

Operating temperature:

32 to 131°F (0 to 55°C)

Control output

SSRD: isolated at 4.3 VDC at 250 ½ minimum

Relay: SPDT rated at 2 A at 120 or 240 V, resistive load

mA DC: 4 to 20 mA at 250 ½

Display: four-digit dual-line LED

Power: 90 to 264 VAC, 50/60 Hz

Dimensions

Overall: 1.89"W x 1.89"H x 4.33"D

Panel cutout: 1.77"W x 1.77"H

Shpg wt: 1 lb (0.5 kg)

Se usará el controlador: **U-89551-30**

Tabla 4.2 Tipos de Termocuplas

Catalog number	Input type	Control output 1	Control output 2
U-89551-00	Thermocouple types J, T, K, R, S, L, B	SSRD	—
U-89551-10		Relay	—
U-89551-30		SSRD	Relay
U-89551-40		Relay	Relay
U-89552-00	mA DC linear	Relay	—
U-89552-10		Relay	Relay
U-89552-20		mA DC	Relay

REGULADOR DE VACÍO (Regulator).-

Regulador para monitorear y controlar niveles de presión y vacío.

Viene con un medidor con indicación de aguja.

Se usará el regulador de vacío **U-00910-10**

Especificaciones Técnicas:

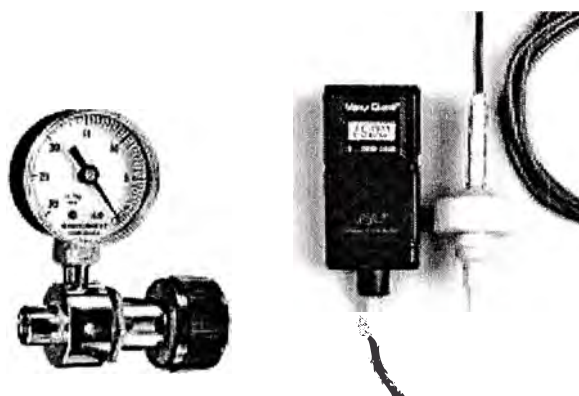


Fig. 4.5 Reguladores de presión

Tabla 4.3 Tipos de reguladores de vacío

Catalog number	Range	Capacity	Ports inlet: outlet	Wetted parts	Price
Vacuum regulators					
U-07061-30	0 to 30" Hg	2 cfm	1/4" NPT(M); 1/4" hose barb	Aluminum, brass	
U-00910-10	0 to 29" Hg	2.47 cfm	1/8" NPT(F); 1/8" NPT(F)	Brass	

MEDIDOR DIGITAL DE VACÍO (Digital Vacuum Gauge).-

Mide vacío de 0 a 1500 mbar.

Sensor cerámico durable, encerrado en polyethyletherketone (PEEK) para ofrecer excelente compatibilidad química y servicio confiable.

Sensor desmontable, cable de extensión opcional para tomar lecturas remotas de hasta 16 pies (5 metros) del medidor.

La capa exterior de plástico ABS es resistente a soluciones químicas.

El medidor de vacío viene con una batería recargable de NiCd, adaptador recargador de batería de 115VAC, y adaptador de puntas de manguera.

Especificaciones Técnicas:

Rango: 0 a 1500 mbar

Resolución: 1 mbar

Precisión: $\pm 2\%$ full-scale

Temperatura de Operación: 32 a 122°F (0 a 50°C)

Rango de Temperature (compensado): -67 a 257°F (-55 a 125°C)

Proceso de conexión: 1.4" a 3.8" OD tubing (incluido adaptador de punta de manguera)

Power: batería recargable NiCd (incluido)

Compatibilidad con medios: compatible con líquidos o gases con PEEK

Display: 31.2-dígitos LCD

Dimensiones: 13.4"W x 51.2"H x 3.4"D

Peso de envío: 2 lb (1.0 kg)



Fig. 4.6 Medidor digital de vacío

CAPITULO V

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL OPTIMO DE TEMPERATURA EN LA CELDA DE PRODUCCIÓN DE I-131

5.1 Introducción

La arquitectura del sistema es un servosistema de una entrada y una salida con el controlador en cascada con la Celda de Producción de I-131, como se muestra en el diagrama:

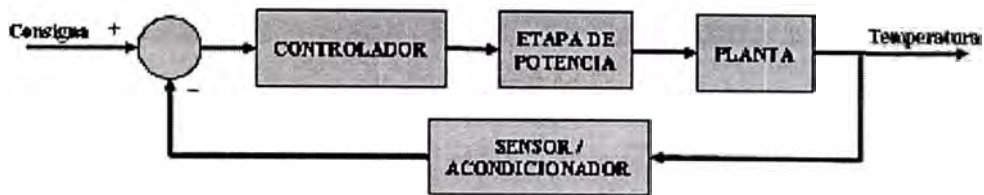


Fig. 5.1 Estructura de un Sistema de control de temperatura

La Celda de Producción de I-131 con el horno de fusión posee una dinámica lenta, siendo una ventaja a la hora de realizar las pruebas de simulación pero activa tiempos muertos que deben ser tomados en cuenta.

5.2 Diseño del Controlador óptimo proporcional integral en la celda de producción de I-131.

Identificación de la Planta.

Una fase importante en el diseño es la identificación que tiene como objetivo obtener un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso, como se ha hecho en el capítulo anterior en forma experimental.

De la exactitud del modelo obtenido dependerá posteriormente el buen comportamiento del controlador diseñado.

Existen dos métodos básicos de identificación: identificación analítica (modelado) e identificación experimental (identificación clásica). Para el modelado se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, mientras que para la

identificación clásica (que es el método más directo) se requiere aplicar al proceso señales especiales como escalones, rampas, impulsos, sinusoides o señales pseudoaleatorias.

Para el tipo de planta que se ha de controlar es suficiente una identificación clásica, utilizando el escalón como señal de prueba. La función escalón es la señal que más se ha aplicado en la práctica convencional del control automático, obteniéndose con ella modelos sencillos suficientemente exactos. La respuesta de un proceso tecnológico a la señal escalón puede aproximarse mediante: un modelo de primer orden con o sin retardo, un modelo de segundo orden aperiódico con o sin retardo, un modelo de segundo orden sub-amortiguado con o sin retardo. La elección de uno de los modelos anteriores depende de la forma de la respuesta transitoria y del grado de precisión que se desee en el ajuste. El modelo de primer orden se puede utilizar en procesos simples o en otros más complejos si no se requiere mucha exactitud.

Para la planta de producción de radioisótopos se ha propuesto el siguiente modelo, puesto que como se sabe los sistemas térmicos tienden a ofrecer una respuesta monótona creciente sin oscilaciones. La expresión matemática para este tipo de modelo es:

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{\tau s + 1} \quad (5.1)$$

El controlador óptimo proporcional integral que emplearemos en esta simulación se ha añadido una acción integral en el sistema de control vía un integrador con la señal de salida $v(k)$ y una ganancia integral K_I .

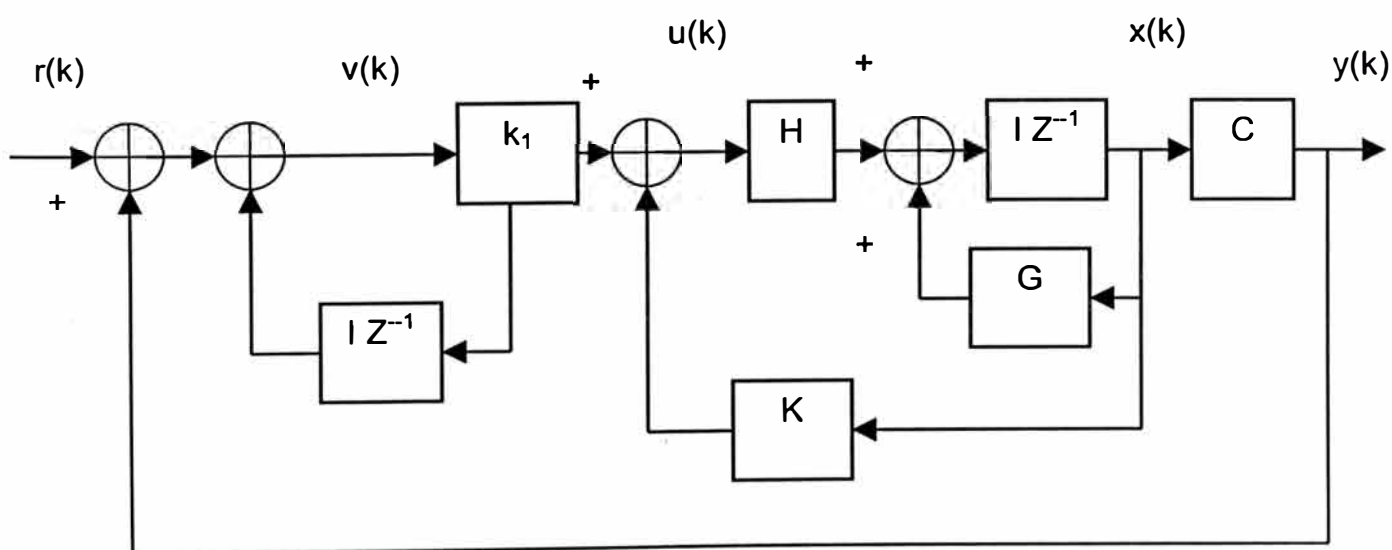


Fig. 5.2 El controlador Optimo Integral

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) \quad y(k) = Cx(k) \quad (5.2)$$

Donde la señal de control $u(k)$ es de la forma:

$$u(k) = -Kx(k) + K_1 v(k) \quad (5.3)$$

y la matriz de ganancia del controlador se expresa como:

$$K = [K_1 \ K_2 \ \dots K_n] \quad (5.4)$$

.....

La ecuación del integrador es:

$$v(k) = v(k-1) + r(k) - y(k) \quad (5.5)$$

Para el tiempo $v(k+1)$ podemos deducir:

$$\begin{aligned} v(k+1) &= v(k) + r(k+1) - y(k+1) \\ &= v(k) + r(k+1) - C[Gx(k) + Hu(k)] \\ &= (1 - CHK_1) v(k) + (-CG + CHK)x(k) + r(k+1) \end{aligned} \quad (5.6)$$

De las ecuaciones (5.1) y (5.2) podemos obtener:

$$x(k+1) = (G - HK) x(k) + HK_1 v(k) \quad (5.7)$$

De las ecuaciones (5.5) y (5.6) se determina:

$$\begin{bmatrix} X(k+1) \\ V(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G-HK & HK_1 \\ -CG+CHK & 1-CHK_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(k) \\ V(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r(k+1) \quad (5.8)$$

$$y(k) = [C \ 0] \begin{bmatrix} x(k) \\ v(k) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

En el estado de equilibrio (cuando k tiende a infinito), las variables $x(k)$, $u(k)$ y $v(k)$ toman los valores estacionarios en el infinito y así podemos definir las siguientes variables incrementales:

$$x(k) - x(\infty) = x_e(k) \quad (5.10)$$

$$v(k) - v(\infty) = v_e(k) \quad (5.11)$$

La inclusión de un integrador en el sistema de control aumenta en uno el orden del sistema; es decir mientras que el vector de estado $x(k)$ del sistema original posee dimensión n , el vector de estado $\xi(k)$ del sistema de control proporcional integral posee dimensión $(n+1)$, como consecuencia de este hecho, la función de costo para el sistema de control proporcional integral toma la forma:

$$J = \frac{1}{2} \sum [\xi(k)^T Q \xi(k) + w^2(k) R] \quad (5.12)$$

En lugar de K , ahora debemos de calcular la matriz K que minimice la función de costo en la ecuación (5.11).

La ecuación de Riccati y la ecuación de ganancia del controlador K resultan:

$$P = Q + G^T P G - G^T P H [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad (5.13)$$

$$K = [R + H^T P H]^{-1} H^T P G \quad (5.14)$$

El observador óptimo de estados:

Un observador que posee la siguiente ecuación de observación:

$$x(k+1) = Gx(k) + Hu(k) + K_0^T(k) [y(k) - Cx(k)] \quad (5.15)$$

Puede ser empleado para calcular el vector de estado estimado $x(k)$ en la ecuación (5.13), la matriz de ganancia $K_0(k)$ se calcula de:

$$K_0(k) = [R_0 + CP_0(k)C^T]^{-1} C P_0(k)G^T \quad (5.16)$$

Donde $P_0(k)$ es una matriz simétrica definida positiva, solución única de la siguiente ecuación de RICCATI:

$$P_0(k+1) = Q_0 + GP_0(k)G^T - G P_0(k)C^T [R_0 + CP_0(k)C^T]^{-1} C P_0(k)G^T \quad (5.17)$$

Donde Q_0 y R_0 son matrices de covarianza definidas positivas y asociada a disturbios estocásticos que pueden afectar los estados y la salida del sistema.

5.3 Diseño y simulación del Controlador Optimo Cuadrático

Primero diseñaremos el controlador óptimo cuadrático proporcional integral para el proceso de producción de I-131.

Tomando en cuenta la ley descrita en la sección anterior, no se emplea el observador de estados por tener el proceso una función de transferencia de primer orden, en el cual la salida de temperatura es medible, la señal de referencia se ha fijado en 10°C que es el salto de temperatura luego que termina la etapa de estabilización y empieza la etapa de producción de I-131.

Simulamos el proceso tomando como referencia curvas estandarizadas:

Tabla 5.1: Datos experimentales de Tiempo y Temperatura en producción

PASOS	TIEMPO (minutos)	TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)
1	0	750
2	3	751.9
3	6	755
4	9	757.5
5	12	759.5
6	15	760.3
7	18	760
8	21	759.9
9	24	759.9
10	27	760

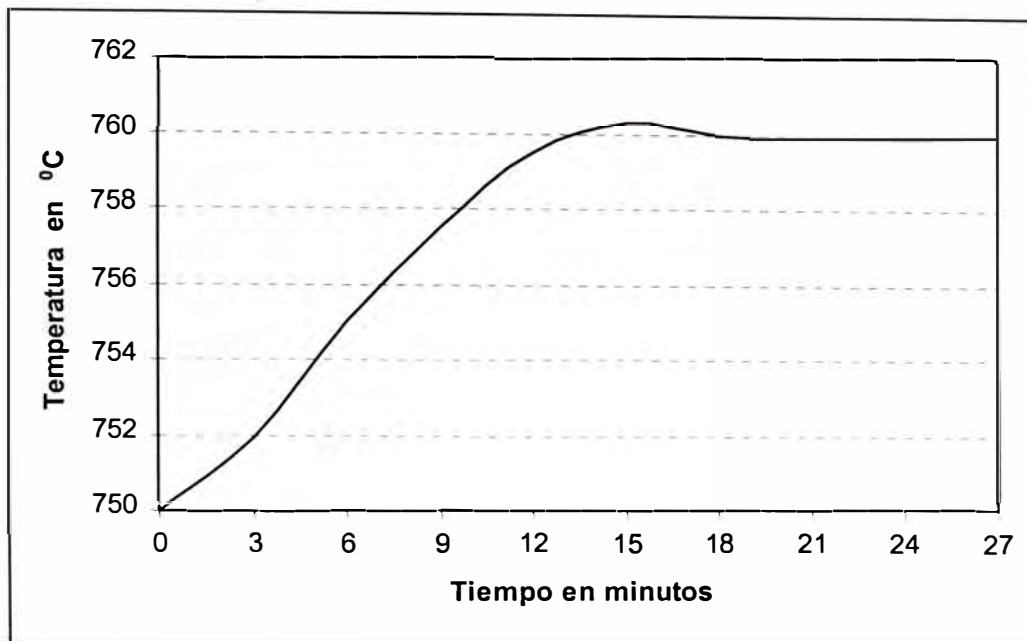


Figura 5.3 Curva de tiempo y temperatura en producción

Con este proceso damos por finalizado el presente informe tomando como referencia el proceso de simulación que podría ser optimizado utilizando los programas de simulación.

CONCLUSIONES

1. La función de transferencia fue hallada en forma experimental trabajando con tiempos reales, de hecho esto hace que las amortiguaciones y oscilaciones se tomen en cuenta ya que el proceso de estabilización es lento, a partir de estas curvas experimentales hemos encontrado la función de transferencia que reproduce en forma aproximada las mismas curvas.
2. Podemos concluir que el sistema del control de la temperatura del horno se estabiliza después de 30 minutos, siendo esto una ventaja para poder obtener el máximo rendimiento de Producción de I-131 en la Celda de Producción..
3. El tener estable la temperatura del horno de fusión, hace que el operador esté menos tiempo operando la Celda de Producción de I-131 por ende recibirá menos Dosis de Radiación, mejorando la protección radiológica, lo óptimo sería que el sistema sea totalmente automática sin la intervención del operador.
4. En este caso podemos plantear que una desventaja de utilizar dinámicas lentas como en este proceso experimental es el tiempo empleado en los diferentes pasos para el diseño del controlador.
5. Si bien es cierto, solamente hemos tratado una variable de entrada y otra de control, debemos pensar que esté trabajo es un punto inicial para realizar una tesis mucho más elaborada con alumnos de pre-grado.
6. Actualmente la Celda de Producción de I-131 esta en un proceso de mejoramiento para lo cual existe un proyecto para realizar el up-grade de dicha celda utilizando microsensores que se esta mostrando en el anexo respectivo.
7. Por último, con la simulación final se ha tratado de determinar que el sistema de control de temperatura de la Celda de Producción es un sistema controlable y permitirá realizar la secuencia respectiva con las otras variables que puedan ser controladas en la celda de producción de I-131.

ANEXO A

DISPOSITIVOS DE CONTROL

VÁLVULA SOLENOIDE DE APERTURA DIRECTA

(Direct Lift Solenoid Valve).-

Se usarán válvulas de tres tipos:

- Válvula de dos vías Normalmente Cerrada **U-98300-60**
- Válvula de dos vías Normalmente Abierta **U-98300-61**
- Válvula de tres vías (1/2) **U-98300-62**

Ideal para Fluidos corrosivos y de alta pureza

Cero pérdida de volumen; eliminando los problemas de trampa de líquidos.

Clasificado para vacío de 26" Hg.

Temperatura máxima del fluido 158°F (70°C).

Terminales de Cables de 12".

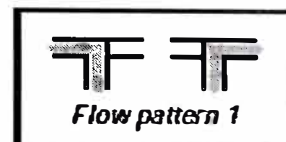
Todas las partes húmedas están hechas de TEFLON® PTFE.

Para prevenir daño a la bobina, reducir el voltaje a 67% cuando es energizado por más de 30 minutos.

Están especificadas para bajas velocidades en flujo de aire.

Especificaciones técnicas:

Ports	Orifice size	Max flow* at max psi	Max psi	Response time	Watts	12 VDC	
						Cat. no.	Price
Two-way normally closed valves							
¼-28	1/16"	16 Lpm	30	15 ms	1.5	U-01367-70	
¼-28	1/16"	45 Lpm	100	20 ms	6.2	U-98300-60	
¼-28	3/32"	31 Lpm	30	20 ms	4.2	U-98300-00	
1/8"	5/32"	62 Lpm	30	30 ms	7.2	U-98300-30	
Two-way normally open valves							
¼-28	1/16"	16 Lpm	30	15 ms	1.5	U-01367-71	
¼-28	1/16"	45 Lpm	100	20 ms	6.2	U-98300-61	
¼-28	3/32"	31 Lpm	30	20 ms	4.2	U-98300-01	
1/8"	5/32"	62 Lpm	30	30 ms	7.2	U-98300-31	
Three-way valves (follow flow pattern 1: see diagram above)							
¼-28	1/16"	16 Lpm	30	15 ms	1.5	U-01367-72	
¼-28	1/16"	45 Lpm	100	20 ms	6.2	U-98300-62	
¼-28	3/32"	31 Lpm	30	20 ms	4.2	U-98300-02	
1/8"	5/32"	62 Lpm	30	30 ms	7.2	U-98300-32	



ELECTRODO PARA PH (ACCUMET ACCUTUPH rugged, combination glass-body pH electrodes).-

Son extremadamente resistentes a rotura. Tienen una bombilla de vidrio que es hasta 40 veces más durable que un electrodo normal de PH.

Hay modelos disponibles de una sola unión, doble unión, ACCUTUPH+, y media celda.

El modelo ACCUTUPH+ tiene celdas de referencia interna y externa equidistante que da mediciones rápidas y precisas dentro de ± 0.01 unidades de pH en 15 segundos.

Se usará el modelo **U-55502-00**

Especificaciones Técnicas:

Key	Application	Description	Maximum temperature	L x dia (mm)	Reference cell type	BNC cat. no.
Accumet® AccuTupH® rugged, combination glass-body pH electrodes						
<input checked="" type="checkbox"/>	Rugged, general-purpose	Refillable, single-junction	212°F (100°C)	140 x 10	Ag/AgCl	U-55502-00
<input checked="" type="checkbox"/>	Rugged, general-purpose	Refillable, double-junction	212°F (100°C)	140 x 10	Sat. KCl	U-55502-02
<input checked="" type="checkbox"/>	Rugged, unstable environments	Refillable, AccuTupH®+, fast response	212°F (100°C)	140 x 10	Sat. KCl	U-55502-04
<input checked="" type="checkbox"/>	Rugged, half-cell only	pH indicating half-cell	212°F (100°C)	140 x 10	—	U-55502-06

RELÉ DE ESTADO SÓLIDO (Solid State Relays).-

La acción del relé es SPST, normalmente abierto.

El relé ha utilizar es el **U-89850-04**

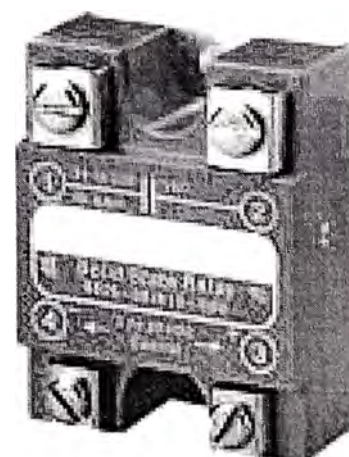
El relé cierra con una señal del controlador. No produce ruido eléctrico.

Escoger un relé de entrada DC para el controlador que tiene un voltaje de salida pulsante. Escoger un relé de entrada AC para el controlador de temperatura que tiene salida mecánica de relé.

Montar verticalmente los relés sobre los disipadores de calor para disipar el calor generado cuando los relés son usados en su salida nominal.

Los relés deben estar debajo de su valor nominal si son usados sin disipador de calor o a elevadas temperaturas.

Los relés no vienen con protección contra sobrecargas, cablear siempre un fusible en el circuito de carga.

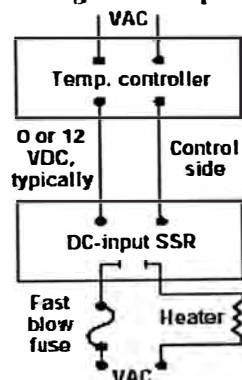


Las especificaciones técnicas son:

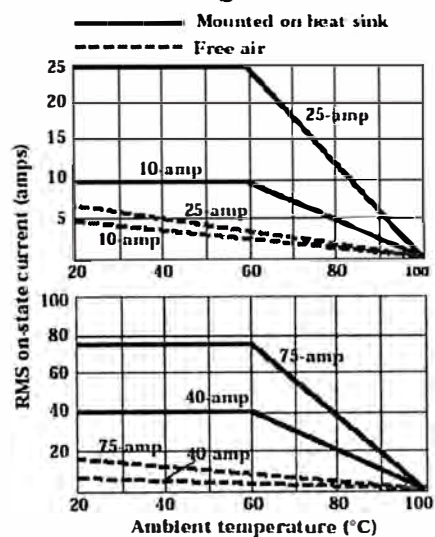
Voltage drop at rated current:	1.5 V
Voltage range:	24 a 330 VAC
Overvoltage rating:	600 PIV
Frequency range:	47 a 63 Hz
Operating ambient:	-40 a 220°F (-40 a 100°C)
Off-state leakage at rated voltage:	8 mA
Dimensions:	2.25"L x 1.75"W x 0.9"H, con 1.88" mounting screw centers

Catalog number	Output (resistive)	Input impedance	Maximum turn-on voltage	Minimum turn-off voltage	Shpg wt lb (kg)
Solid-state relays with 3 to 32 VDC control input					
U-89850-00	10 amps	1.5 k Ω	3 VDC	1 VDC	0.2 (0.1)
U-89850-02	25 amps	1.5 k Ω	3 VDC	1 VDC	0.2 (0.1)
U-89850-04	40 amps	1.5 k Ω	3 VDC	1 VDC	0.3 (0.2)
U-89850-06	75 amps	1.5 k Ω	3 VDC	1 VDC	0.3 (0.2)

DC-input relay used with temperature controller with DC voltage SSR output.



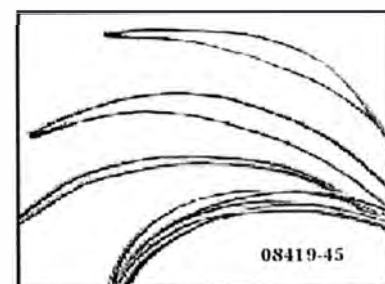
Derating Curves



TERMOCUPLA - SONDA DE CABLE PELADO (Fine Gauge – Bare Wire Probe).-

Sonda de cable pelado y medición fina con diámetros de 0.005" y 0.010" provee rápida medición de temperatura (constante de tiempo típica de menos de 0.3 segundos).

Sondas más grandes con diámetros de 0.020", y 0.032" aseguran larga durabilidad pero tiempo de respuesta más lento (típica constante de tiempo 1.5 segundos o menos).



La sonda se caracteriza por uniones collarizadas y puntas de 12". La Punta negativa es escasamente más corto que la punta positiva para su identificación.

Sonda ha utilizar es de tipo K

U-08419-05

Especificaciones técnicas:

Catalog number	Dia	Resistance at 68°F (20°C)	Time constant	Response time
Type J¹ ; temp range is 32 to 900°F (0 to 482°C)				
U-08419-06	0.005"	14.20 Ω	0.10 sec	0.5 sec
U-08419-07	0.010"	3.551 Ω	0.15 sec	0.8 sec
U-08419-09	0.020"	0.878 Ω	0.3 sec	1.5 sec
U-08419-10	0.032"	0.357 Ω	0.6 sec	3.0 sec
Type K ; temp range is -328 to 1800°F (-200 to 982°C)				
U-08419-01	0.005"	24.08 Ω	0.10 sec	0.5 sec
U-08419-02	0.010"	5.984 Ω	0.15 sec	0.8 sec
U-08419-04	0.020"	1.490 Ω	0.3 sec	1.5 sec
U-08419-05	0.032"	0.568 Ω	0.6 sec	3.0 sec
Type T ; temp range is -418 to 750°F (-250 to 399°C)				
U-08419-41	0.005"	12.22 Ω	0.10 sec	0.5 sec
U-08419-42	0.010"	3.043 Ω	0.15 sec	0.8 sec
U-08419-44	0.020"	0.754 Ω	0.3 sec	1.5 sec
U-08419-45	0.032"	0.297 Ω	0.6 sec	3.0 sec

TERMOCUPLA - SONDA DE PROPÓSITO GENERAL (General Purpose Probe).-

Se usará la sonda de tipo K

U-08439-62

Son de característica liviana lo que protege contra daño debido a repetido doblaje y estiramiento.

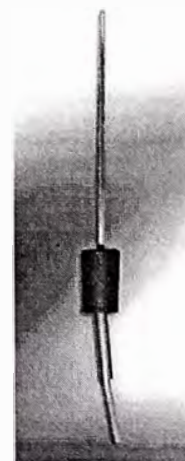
El polypropylene normal llenado con vidrio, maneja medidas de 5.5"L.

La fórmula para el cálculo del tiempo de respuesta es:

Constante de Tiempo x 5 = Tiempo de Respuesta

Las especificaciones técnicas son:

Catalog number	Type	Temperature range °F (°C)	Features
Low-cost probes , 4.5"L; for use with liquids, gases, and semisolids. Include 5-ft coiled cable.			
U-08439-60	J	-310 to 1400 (-190 to 760)	Junction: grounded Time constant: 6 sec (liquids) Response time: 30 sec (liquids) 304 SS sheath; Miniconnector; Glass-filled polypropylene handle
U-08439-62	K	-418 to 1650 (-250 to 899)	
U-08439-64	T	-418 to 752 (-250 to 400)	



MEDIDOR DE PH (Oakton® 1/8 DIN pH/ORP Controllers with Password Protection).-

Controlador que mide pH u ORP a 0.1 pH o 10 mV.

Calibración del controlador en 1 a 3 valores de PH 4.0, 7.0 o 10.0.

Dispone de dos relés con puntos de prefijación alto y bajo ajustable de 0.0 a 14.0 pH o a ± 1250 mV — activa una alarma, bomba, u otro dispositivo.

El Modelo 35100-10 se caracteriza por una salida proporcional de espaciamento fijo de 4 a 20 mA — que conecta el controlador a un registrador de gráfico.

El procedimiento de programación y calibración guía al usuario paso a paso.

Un display de LED's y cinco LED's anunciadores permite monitorear el estado del controlador a distancia.

Un password de seguridad protege la configuración de cambios accidentales.

El Controlador acepta electrodos con conector BNC y elementos de 100 Ω Pt RTD ATC.

Para cargas que exceden 6 amp. resistivo en 120 VAC o 3 amp. resistivo en 240 VAC, se debe ordenar relés de estado sólido por separado.



Especificaciones Técnicas:

	Range	Resolution	Accuracy
pH	0.0 to 14.0 pH	0.1 pH	± 0.1 pH
mV	-1250 to 1250 mV*	10 mV (as 0.01 V)	± 10 mV (as 0.01 V)
°C	0 to 100°C	1°C	± 1 °C

Control type	on/off
Calibration	hasta 3 puntos (pH 4.0, 7.0, 10.0)
Temp. Compensation	Automático / Manual (0 a 100.0 °C)
Temperature sensor	100 $\frac{1}{2}$ Platinum RTD (PT 100)
Output:	
Control	2 SPDT nonpowered relays; 6A @ 110 VAC, 250 VAC maximum
Current	(WD-35100-10 only) nonisolated 4-20 mA ; 200 $\frac{1}{2}$ maximum load
Display	LED, 3 digits
Inputs	BNC, screw terminals
Recommended Input:	
Cable Length	Less than 5 meters
Hysteresis Bands	One high and one low band; adjustable from 0.2 pH to 2 pH or 20 mV to 200 mV
Power Requirements	110 VAC or 220 VAC
Environmental Requirements:	

Operating	0 to 50°C
Storage	-10 to 60°C
Humidity Limits	10 to 95% RH (non condensing)
Storage Temperature Range	0 to 50°C
Dimensions	18 DIN size

CONTROLADOR DE PRESIÓN (Room Pressure Monitor Model RPM-1).-

El Modus Room Pressure monitor utiliza tecnología probada para monitorear, alarma y/o control crítico de ambientes para presiones diferenciales. Es muy confiable en presiones bajas.

Puede monitorear presiones positivas o negativas.

Aplicaciones típicas en salas de hospital como salas de operaciones y salas aisladas para pacientes contagiosos.

Otras aplicaciones son: cubiertas con emanaciones de gas o vapor, salas de computadoras, etc.



Especificaciones Técnicas:

General

Resolución a 0.001 pulgadas de agua

Diseño seguro de estado sólido

Contenedor robusto NEMA 13

Performance

Precisión de lectura: $\pm 1\%$ F.S.

Precisión de salida de alarma: $\pm 1\%$ de setpoint (luz y relé)

Rango Estándar: ± 0.1 pulgadas de agua (o ± 25 Pascal)

Resolución: 0.001" de agua (o 0.1 Pascal)

Panel indicador de luz: uno rojo y uno verde LED

Display: LCD 3 dígitos 0.5" altura del dígito

Salida de Alarma: SPDT relé de contacto en rango de 5A a 30 VDC o 120 VAC 4ª en 240 VAC resistivo

Deadband: preset en 5% de rango, campo ajustable de 1 a 20%

Salidas analógicas: 0 - 5Vdc, 2.5V en presión cero 2 mA max,

0 - 10Vdc, 5V en presión cero 2 mA max

fuelle de 4 - 20mA, 12mA en presión cero, máx resistencia de lazo es 580 Ohms

Requerimientos de Potencia 95-135/190-270 VAC 50/60 Hz o 19.5 a 30Vac50/60 Hz

Máx consumo de potencia: 5 Watts

Conexiones Eléctricas

Faja Terminal de 3/4" con # 6 tornillos

Medio de Operación: aire o gas no-corrosivo no-explosivo

Límite de Presión máxima momentánea: ± 6.0 pulgadas de agua (± 1.5 kPa)

Medio Ambiente

Temperatura de Operación: 0°C a 50°C (32°F a 120°F)

Temperatura de Almacenamiento: -30°C a 70°C (-20°F a 160°F)

Efecto de la Temperatura sobre la lectura: $\pm 0.05\%/^{\circ}\text{C}$

Rango de humedad de operación: 10% a 90% R.H.

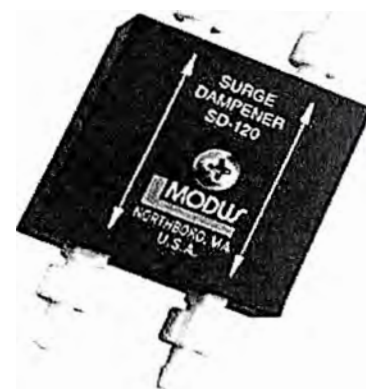
P = Power
A - 120/240 Vac 50/60Hz
B - 24Vac, 50/60Hz

Pressure Code	Pressure Range	Resolution w.c./ Pa
01E	0.1 to +0.1" w.c. (-25 to +25 Pa)	0.001" (0.1 Pa)
04E	0.5 to +0.5" w.c. (-125 to +125 Pa)	0.001" (1 Pa)
05E	1.0 to +1.0" w.c. (-250 to +250 Pa)	0.01" (1 Pa)

ESTABILIZADOR DE PRESIÓN DE AIRE (Surge Damper).-

Cuando es utilizado con el transmisor de presión capacitivo MODUS, absorbe rápidas fluctuaciones de presión en líneas de presión altas o bajas y estabiliza la señal de salida.

Se dispone de tres modelos con diferentes tiempos de retardo: 15, 30 y 60 segundos (se asume que ambos puertos alto y bajo del transmisor están conectados al surge damper; y que la longitud de la tubería entre el damper y el instrumento de medición es de 1 pie). Se define el tiempo de retardo como el tiempo que demora la salida en alcanzar el 90% del valor estable después de un cambio en la presión de un paso de 0.1 pulgadas de agua en la línea de presión alta o baja.



Cada Surge Damper tiene dos canales independientes.

El uso de un Surge Damper es recomendado cuando la presión es mostrada en un panel digital y el dígito menos significativo debe ser estabilizado.

Cada surge damper incluye un kit conteniendo 3 diferentes tipos de puntas de ajuste para conformar el rango de tubería de 1/8" a 7/32" I.D. (3 a 6 mm I.D.), y un #10x1" lg.

Lámina de metal atornillado para instalación en pared.

Model Number

SD-015 15 second time delay

SD-030 30 second time delay

SD-060 60 second time delay

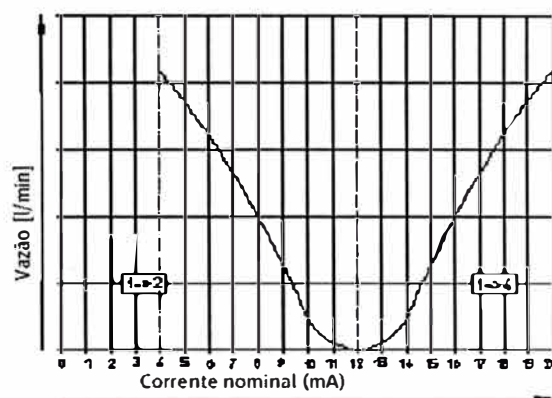
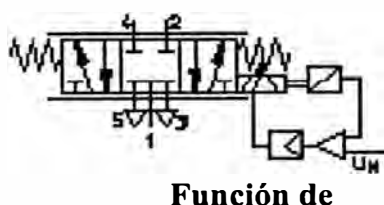
VÁLVULA CONTROLADORA DE VARIACIÓN PROPORCIONAL 5/3 VÍAS (Tipo MPYE-5-1/8-LF-420B).-

Con la Válvula MYPE, la válvula de deslizamiento es controlada proporcionalmente a un punto específico pre-fijado.

La señal de entrada eléctrica analógica produce una variación de la velocidad de flujo. Este control es referido a: la Magnitud y Dirección de la velocidad de flujo.

Es usado para controlar la velocidad y posición de un cilindro:

- Asegura que todos los dispositivos de alta frecuencia sean mantenidos lejos del MYPE.
- Puede ser usado en ambientes industriales, residenciales, negocios y comerciales.



Variación de Vacío con la Corriente

Especificaciones Eléctricas:

Tensión de alimentación $V_b = 24 \text{ V DC} \pm 25\%$

Ondulación residual (ripple) 5% proporcional a la tensión aplicada, conforme DIN 41 775 en V_b

Potencia consumida $P_{max.} = 20 \text{ W}$ a 30 V DC y 100% ED $P = 2 \text{ W}$ con el émbolo en posición central

Valor de la señal de entrada corriente $I_{set} = 4 \dots 20 \text{ mA}$

Histéresis 0,4 % relativo al máximo movimiento de carrera

Clase de protección IP65 conforme DIN 40 050 junto con el socket de conexión

Frecuencia crítica Con el máximo movimiento de carrera MPYE-5-1/8-...-B 100 Hz

Característica de seguridad de conexión de tensión de operación, conexión de protección contra inversión de polaridad.

Especificaciones Neumáticas:

Función Válvula 5/3 vías de actuación directa con control de Posición de émbolo integrado

Conexión variación tamaño nominal

6 bar --> 5 bar

MPYE-5-1/8-LF...-B	G1/8	350 l/min \pm 10%	4 mm
Medio	Aire comprimido filtrado a 5 μ m y no lubricado		
Temperatura del medio	0 - 60 °C, condensación no admitida		
Temperatura ambiente	0 - 50 °C		
Presión de operación	Oper. = 6 bar		
Pmáx. = 10 bar			
Pmín. = 0 bar			

Especificación de Pines de Control:

- Tensión de alimentación (24 Vcc)
- 2 Tensión de alimentación (GND)
- 3 Valor de señal de entrada (4 ~20 mA)
- 4 Valor de señal de entrada (GND)



CALIBRADOR DE DOSIS RADIOISOTÓPICO (CRC-15R Dose Calibrator).-

Una tabla de más de 80 nuclidos seleccionables por teclado alfa numérico, con su vida media.

Tecla para cálculo de Tiempo de decaimiento permite cálculo de actividad para pre y post calibración.

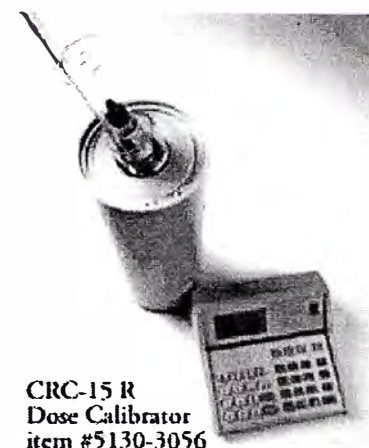
Almacena datos sobre 5 fuentes de referencia con actividad de decaimiento corregido.

Display LCD grande con nombre del nuclido, unidad de actividad de medida, y número de calibración.

Programa conducido por menú para análisis de Mo-99, con standard moly-shield o CAPMAC con cálculo automático.

Incorpora programas de QC y prueba de sistema.

Efectúa ajuste de cero y fondo automáticamente con un programa de prueba diario.



CRC-15 R
Dose Calibrator
item #5130-3056

Cámara de Ionización:

Tipo:	Pared delgada, convenientemente profundo, alta presión.
Dimensiones:	altura 25cm (10") x diámetro 6cm (2.5")
Cableado:	cable de interconexión 1.8 m (6")

Rango de Medición:

Tipo:	Auto rango
Actividad:	250 Gbq (6 Ci) máx.
Resolución:	0.001 MBq (0.01 uCi) máx.

Electrómetro:

Precisión: mejor que $\pm 2\%$

Linealidad: dentro de $\pm 2\%$

Tiempo de Respuesta: Dentro de 2 seg.

Para muy baja actividad de muestra, 4 a 16 seg. (seleccionable por usuario).

Repetibilidad de la medición:

Repetibilidad: Dentro de $\pm 1\%$ dentro de 24 horas, tiempo durante el cual el calibrador esta encendido en todo momento.

Fuente de Datos estándar:

Sistema de memoria: Fuentes estándar Co-57, Co-60, Ba-133, Cs-137

Puertos Opcionales:

Interface: Protocolo RS-232C

Compatibilidad: Sistemas de Administración Estándar de medicina nuclear.

Requerimientos de Potencia:

90-127 VAC (50/60 Hz) 0.1A

180-250 VAC (50/60 Hz) 0.05A

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Sistemas de control en tiempo discreto (2ª edición)*. K. Ogata, Ed. Prentice-Hall, 1996
- [2] *Sistemas controlados por computador*. K.J. Astrom y B. Wittenmark. Ed. Paraninfo, 1990.
- [3] *Digital Control Systems*. R. Isermann, Ed. Springer-Verlag, 1991.
- [4] *Adaptive Control Systems*. K.J. Astrom y B. Wittenmark.
- [5] *Model Predictive Control*. E.F. Camacho y C. Bordons. Ed. Springer-Verlag., 1999
- [6] *Instrumentación y Control de Procesos Químicos*. P.Ollero y E.F. Camacho. Ed. Síntesis, 1998
- [7] *Principles and Practice of Automatic Process Control (2nd Edition)*. C. Smith and A. Corripio. Wiley, 1997
- [8] *Instrumentación Industrial*. A, Creus. Ed. Marcombo, 1989.
- [9] *Control avanzado de procesos. Teoría y práctica*. J. Acedo. Ed. Díaz de Santos, 2003
- [10] *Using Simulink*. © COPYRIGHT 1990 - 2001 by The MathWorks, Inc.
- [11] *Real-Time Windows Target User's Guide*. © COPYRIGHT 1999-2001 by The MathWorks, Inc.
- [12] *Identificación y Control Adaptivo*. Alberto Agua o Behar y Miguel Martínez Iranzo. Prentice-Hall, 2003.
- [13] *Ingeniería y Control Moderna, 4ª edición, 2003*. Katsuhiko Ogata. Prentice Hall.