

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO DE UN MEDIDOR DE DENSIDAD NO  
INTRUSIVO PARA MEDICIÓN DE PULPA DE MINERAL  
CON CAPACIDAD DE 1000KG/M3 A 2300KG/M3**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

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

**ELABORADO POR:  
FREDY, HUAMAN ROBLES**

**PROMOCIÓN 2 010-II**

**LIMA-PERÚ**

**2014**

## **DEDICATORIA**

Elisa Robles Martínez y Julio Huaman Ccerare a mis hermanos: Marina, Dina, Maruja, Isabel, Vicenta y Margarita y a todas las personas que han contribuido en mi formación personal y profesional.

# ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	1
<b>CAPITULO I INTRODUCCIÓN</b> .....	3
1.1. ANTECEDENTES .....	3
1.2. OBJETIVO GENERAL .....	6
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	6
1.4. JUSTIFICACIÓN .....	7
1.5. ALCANCES .....	7
1.6. LIMITACIONES .....	7
<b>CAPITULO II DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO Y PROCESO</b>	
<b>PRODUCTIVO</b> .....	9
2.1. DESCRIPCIÓN DEL MEDIDOR DE DENSIDAD .....	9
2.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN DE DENSIDAD .....	11
2.2.1 Molino SAG .....	11
2.2.2 Hidrociclones .....	12
2.2.3 Flujometro electromagnético .....	15

<b>CAPITULO III IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO</b>	
<b>DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPITULO IV MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1. DEFINICIONES .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.1 Radiación .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.2 Interacción de la radiación ionizante gamma sobre la materia .....</b>	<b>21</b>
<b>4.1.3 Radiactividad .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.4 Energía .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.5 Decaimiento de radioisótopos .....</b>	<b>26</b>
<b>4.1.6 Dosis absorbida .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.7 Dosis equivalente .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1.8 Tasa de dosis .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.9 Principios de radiación .....</b>	<b>28</b>
<b>4.1.10 Precisión de medición .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.10.1 Parámetros que definen la precisión .....</b>	<b>33</b>
<b>4.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....</b>	<b>36</b>
<b>4.3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN .....</b>	<b>38</b>
<b>4.3.1. Contenedor de Fuente Radioactiva .....</b>	<b>39</b>

<b>4.3.2. Fuente Radioactiva</b> .....	40
<b>4.3.3. Detector</b> .....	41
<b>4.3.3.1 Tubo Centellador</b> .....	42
<b>4.3.3.2 Fotomultiplicador</b> .....	48
<b>4.3.3.3 Electrónica del Detector</b> .....	51
<b>4.3.4. Ensamble de Montaje</b> .....	55
<b>4.3.5. Indicador de Medición</b> .....	56
<b>4.4. PRINCIPIOS DE SEGURIDAD</b> .....	56
<b>4.4.1. Reglas de Protección Radiológica</b> .....	57
<b>4.4.2. Medida de Radiaciones Ionizantes</b> .....	58
<b>CAPITULO V DESARROLLO DE LA SOLUCION DEL PROBLEMA</b> .....	60
<b>5.1. DIMENSIONAMIENTO DEL MEDIDOR DE DENSIDAD</b> .....	61
<b>5.1.1 Determinación de la actividad de la fuente</b> .....	61
<b>5.1.2 Determinación del espesor del contenedor</b> .....	65
<b>5.2. ESPECIFICACIONES DEL CENTELLADOR</b> .....	66
<b>5.3. ESPECIFICACIONES DEL FOTOMULTIPLICADOR</b> .....	68
<b>5.4. ESPECIFICACIONES DE LA ELECTRÓNICA</b> .....	72
<b>CONCLUSIONES</b> .....	76
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	77
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	78
<b>PLANOS</b> .....	80
<b>APÉNDICE</b> .....	83

**INDICE DE FIGURAS**

Fig 1: Medidor de densidad propuesto	4
Fig 2 : Balanza Marcy	4
Fig 3: Medidor de densidad	5
Fig 4: Circuito cerrado de molienda	12
Fig 5 Esquema de medición de porcentaje de sólidos	15
Fig 6: Efecto fotoeléctrico	22
Fig 7: Efecto Compton	22
Fig 8: Producción par electrón positrón	23
Fig 9: Interacción radiación gamma en función de la energía	23
Fig 10: Tiempo de vida media	25
Fig 11: Decaimiento del Cs137	26
Fig 12: Decaimiento del Co60	26
Fig 13: Esquema de medición	27
Fig 14: Esquema de disminución de dosis	29
Fig 15: Esquema de atenuación	30
Fig 16: Esquema de atenuación HVL	31
Fig 17: Esquema de atenuación de dosis	31
Fig 18: Esquema de medición	33
Fig 19: Variación estadística	34
Fig 20: Tiempo de integración	35
Fig 21: Tiempo de integración corto	35
Fig 22: Tiempo de integración largo	36
Fig 23: Esquema de medición de densidad	36
Fig 24: Esquema comparativo	37
Fig 25: Variación densidad con tasa de pulso	37
Fig 26: Sistema de medición	38

Fig 27: Contenedor de fuente radioactiva	39
Fig 28: Fuente radioactiva	40
Fig 29: Esquema de norma C 66646 (ISO 2919)	41
Fig 30: Detector	42
Fig 31: Fluorescencia en un centellador orgánico	44
Fig 32: Secuencia de mecanismos dentro de un centellador plastico ternario	46
Fig 33: La fibra optica colecta WLS	46
Fig 34: Tubo centellador de PVT y NaI.	47
Fig 35: Esquema del fotomultiplicador	48
Fig 36: Fotomultiplicador	51
Fig 37: Pulso de corriente	52
Fig 38: Secuencia de pulsos de corriente	53
Fig 39: Circuito electronico del detector	53
Fig 40: Diagrama de circuito	54
Fig 41: Emsamble de instalación	56
Fig 42: Indicador de proceso	56
Fig 43: Proteccion radiologica	57
Fig 44: Detector de radiación	58
Fig 45: Dosimetro personal	59
Fig 46: Sistema de medición	60
Fig 47: Sistema de medición	66
Fig 48: Contenedor de fuente radiactiva	65
Fig 49: Material PVT	68
Fig 50: Curva de eficiencia	69
Fig 51: Modelo de fotomultiplicador	72
Fig 52: Diagrama de circuito DP5G	73
Fig 53: Circuito integrado DP5G	74

## **INDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Cuadro comparativo	5
Tabla 2 : Tabla de energía	28
Tabla 3: Cuadro de valores	62
Tabla 4: Cuadro de especificaciones centellador	67
Tabla 5 Cuadro de especificaciones fotomultiplicador	70
Tabla 6: Cuadro de especificaciones electrónica	74



## PRÓLOGO

El presente informe trata sobre el diseño de un densímetro no intrusivo para medición de densidad de pulpa de mineral, teniendo como su principal aplicación en la industria minera de cobre, oro, plata, zinc, plomo etc. en donde se tiene la necesidad de conocer y controlar esta variable en diferentes partes del procesamiento del mineral para garantizar la calidad del producto final.

El informe brinda el conocimiento necesario para diseñar un medidor de densidad acorde a la necesidad del sector industrial y requerimientos del usuario, el mismo que está desarrollado en seis capítulos:

**El primer capítulo** realiza una introducción al tema propuesto, detallando los antecedentes del mismo, objetivos generales y específicos, así como la justificación del modelo propuesto enmarcado dentro del alcance y limitaciones.

**El segundo capítulo** trata de la descripción del diseño propuesto así como detalles del proceso productivo que este involucra.

**El tercer capítulo** identifica la necesidad de medición de densidad que hay dentro del proceso productivo, así como el planteamiento de hipótesis de trabajo.

**El cuarto capítulo** trata sobre el fundamento teórico, en el cual se describe con el principio de funcionamiento así como información detallada de las diferentes partes que componen el medidor, para finalmente dar una serie de recomendaciones sobre seguridad en el buen uso de este tipo de equipos, en vista que una parte del sistema tiene una fuente radioactiva.

**El quinto capítulo** corresponde al desarrollo de solución del problema propuesto, diseño de un medidor de densidad para aplicación minera, en el cual se explica desde el dimensionamiento del sistema de medición, teniendo en cuenta las condiciones de proceso y especificaciones requeridas, así se obtienen como información de salida la actividad de la fuente radioactiva, tipo de material y espesor del contenedor de fuente radioactiva, dimensiones del ensamble de montaje y detector.

# **CAPITULO I**

## **INTRODUCCIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES.**

En la industria minera metálica, específicamente en las plantas concentradoras se mide densidad de pulpa como variable de proceso en diferentes etapas del procesamiento del mineral, esto para garantizar la obtención del producto final, la pulpa de mineral está constituida básicamente por agua y mineral molido, los cuales se combinan en diferentes proporciones, esta sustancia es muy abrasiva por el contenido de sólidos que tiene y la velocidad a la cual es transportada a través de tuberías. En la actualidad se usan dos métodos de medición para determinar la densidad de la pulpa:

#### **1.1.1 Balanza Marcy**

Método clásico de medición mediante el cual un operador extrae una muestra de pulpa del proceso en un recipiente de 1 litro de capacidad el cual es pesado en una balanza previamente calibrada determinándose de este modo la densidad de la muestra y el porcentaje de sólidos. Método ampliamente usado por su bajo costo, prácticamente libre de mantenimiento pero susceptible a errores por parte del operador al momento de realizar la medición.

### 1.1.2 Medidor de densidad propuesto

La densidad se determina mediante un sistema de medición, el cual consta de una fuente radiactiva como elemento emisor de radiación ubicado dentro de un contenedor y un receptor llamado detector, el cual realiza el cálculo de densidad en función a la radiación que recibe, estos elementos son instalados mediante accesorios de montaje sobre la tubería en donde se requiere medir la densidad de la pulpa. Tomar en cuenta que este equipo también realiza el cálculo de porcentaje de sólidos al igual que la balanza Marcy.

Así mismo cabe mencionar que existen otros métodos que sacan muestras del proceso para obtener la densidad de la pulpa, pero también constituyen un método intrusivo, el cual es diferente al desarrollado en el presente informe ya que se trata de un medidor no intrusivo y en línea.

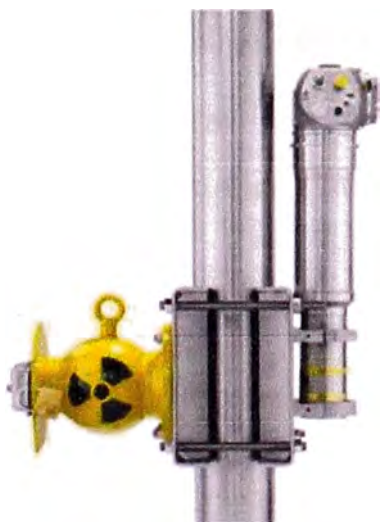


Fig 1: Medidor de densidad propuesto



Fig 2 : Balanza Marcy

A continuación se muestran un cuadro comparativo de los dos métodos de medición usados en la industria minera.

Tabla 1: Cuadro comparativo

	<b>Medidor de densidad</b>	<b>Balanza marcy</b>
<b>Medición en línea</b>	Si	No
<b>Medición intrusiva</b>	No	Si
<b>Monitoreo continuo</b>	Permite monitorear la densidad y llevar un registro del mismo	No
<b>Requisitos</b>	Permiso de importación	Ninguno
	Licencia de operación	
	Licencia individual para el personal	
	Capacitación del personal	
	Autorización de transporte y almacenamiento	
	Uso regulado por la autoridad competente IPEN	
<b>Costo</b>	Alto costo del equipo 15000 USD aprox. no incluye costo de requisitos	Bajo costo 800 USD

Por medición en línea se entiende que la medición de densidad se realiza en forma continua no mediante muestras tomadas del proceso, así mismo no intrusivo significa que para realizar la medición ninguna parte del equipo está en contacto directo con el fluido o pulpa de mineral en este caso.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL.**

Diseñar un densímetro para medición de densidad de pulpa de mineral, el cual permita realizar una medición no intrusiva y en línea. El medidor será capaz de medir densidades desde  $1000\text{kg/m}^3$  que es la densidad del agua hasta una densidad de  $2300\text{ kg/m}^3$ .

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Los objetivos específicos del presente trabajo son:

- Calcular el valor de actividad de la fuente radioactiva
- Calcular el espesor del contenedor de fuente radioactiva
- Especificar el tipo de centellador del detector
- Especificar el tipo de fotomultiplicador del detector
- Especificar el circuito electrónico del detector

#### **1.4 JUSTIFICACIÓN**

El diseño del densímetro propuesto se justifica desde el punto de vista académico, tecnológico y productivo por lo siguiente:

- El aporte académico porque para el diseño usa como bases científicas, leyes y principios físicos ordenados en forma lógica, así también para su utilización en la industria cumple con determinadas normas, regulaciones y estándares.
- El aporte tecnológico porque usa herramientas tecnológicas para mejorar el proceso de medición de densidad, de tal modo que la medición sea no intrusiva y en forma continua.
- El aporte productivo porque mejorando la medición de densidad, permite incrementar la producción tanto cualitativa como cuantitativa.

#### **1.5 ALCANCES**

El trabajo consiste en la determinación de los parámetros de diseño como: actividad de la fuente, espesor del contenedor de fuente radiactiva, así mismo dimensionar los accesorios de montaje y contenedor de fuente. Además de dar las especificaciones del tubo centellador, fotomultiplicador y circuito electrónico de procesamiento de señales del detector.

#### **1.6 LIMITACIONES**

Dentro de las limitaciones para el diseño propuesto tenemos:

- No se realiza el diseño del transmisor del densímetro es decir de la parte de comunicación y procesamiento de información.
- No se realiza diseño o especificaciones del indicador de densidad.

- No se realiza ningún diseño en la fuente radioactiva simplemente se toma los diseños existente en el mercado.



## **CAPITULO II**

### **DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO Y PROCESO PRODUCTIVO**

#### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL MEDIDOR DE DENSIDAD**

El densímetro es un instrumento de medición de densidad, el cual se instala sobre la tubería que transporta el fluido, el cual se desea medir, para ello el instrumento no tiene contacto directo con el fluido por lo que no es necesario cortar la tubería para efectuar la medición, así mismo el valor de densidad ( $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{gr/cm}^3$ ) se mide en forma continua y no en forma interrumpida como lo hacen todos los métodos alternativos que existen para medir la densidad de la pulpa.

En el siguiente esquema Fig 3 se muestra el sistema de medición, en donde el contenedor evita que la radiación de la fuente radiactiva, ubicada en su interior, se propague en todas direcciones, por lo tanto cuando el contenedor está abierto es decir el densímetro en funcionamiento la radiación solamente se emite en dirección hacia el detector, el fluido o pulpa dentro de la tubería absorbe para de la radiación dependiendo de la densidad del fluido, así mientras más denso el fluido más radiación es absorbida por el fluido y a menor densidad menos absorción de radiación.

El detector ubicado al otro lado de la tubería recibe la radiación residual o radiación que no fue absorbida por el fluido y en base a ella realiza el cálculo de densidad.

Con la finalidad de fijar el contenedor y el detector sobre la tubería se usa el accesorio de montaje el cual varía en diseño de acuerdo al diámetro de la tubería.

El equipo puede ser instalado en posición vertical u horizontal siempre y cuando se garantice que la tubería este completamente llena para realizar una correcta medición de densidad.

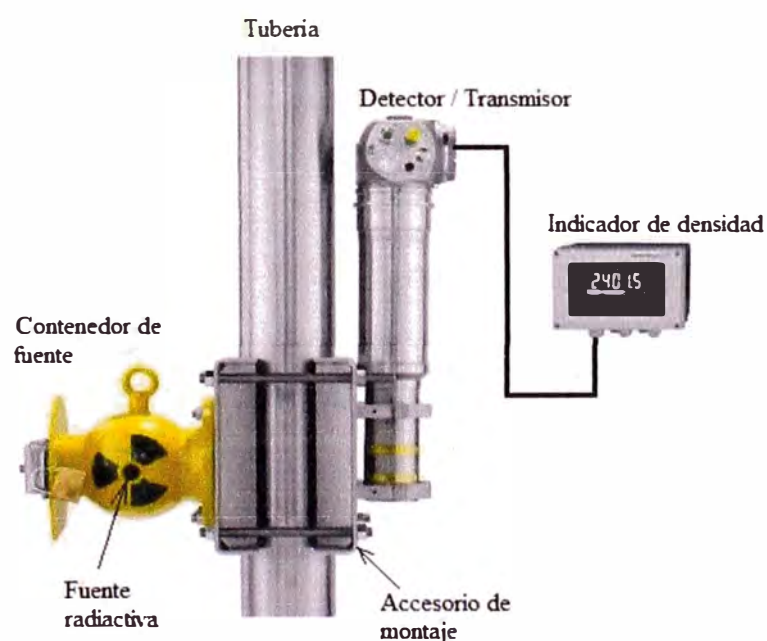


Fig 3: Medidor de densidad

Este sistema se calibra al inicio de operaciones o durante la puesta en marcha, para lo cual se requiere que a través de la tubería pase pulpa y agua en

diferentes instantes, una vez realizada la calibración el sistema trabaja continuamente y solo se requiere realizar verificaciones periódicas que dependen de las condiciones de proceso, en caso exista una desviación o error en la medición se deberá realizar una re calibración.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE MEDICIÓN DE DENSIDAD**

Las plantas concentradoras del sector minero del país son los principales usuarios de los medidores de densidad descritos, ya sea en extracción de cobre, oro, plomo, zinc o plata podemos encontrar varios procesos en donde se requiere el uso de estos equipos siendo el principal de todos ellos la etapa de molienda. El objetivo de la etapa de molienda es moler el mineral lo suficientemente pequeño como para poder liberar las partículas que contienen el mineral rico ya sea oro, plata, cobre u otro de la ganga o roca huésped, una vez que los minerales están libres la siguiente etapa de flotación o lixiviación se encarga de aglomerarlos, tal como muestra el diagrama de molienda Fig 4 podemos distinguir los siguientes elementos:

### **2.2.1 Molino SAG.**

Los minerales se reciben directamente desde el chancador primario con un tamaño de partícula de aprox. 8" mezclándose con agua y cal, el molino contiene bolas de acero en su interior que al girar estas son lanzadas en caída libre logrando un efecto trituración y molienda continua hasta que el mineral sea lo suficientemente pequeño como para escapar a través de la parrilla en el extremo de descarga del molino, de este modo estas partículas son enviadas al

cajón de alimentación, generalmente estas tienen un tamaño de grano menor a 300 micrones dependiendo del diseño del molino, mientras que las partículas de mineral que son todavía grandes para el proceso son devueltas al ingreso del molino SAG para una segunda molienda.

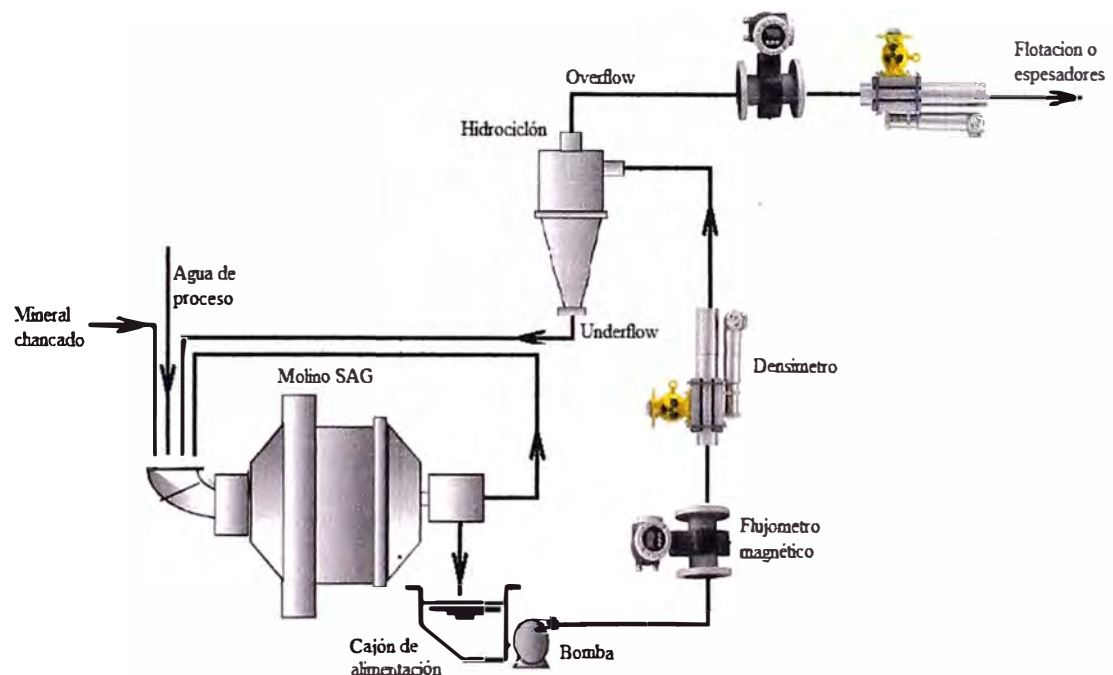


Fig 4: Circuito cerrado de molienda

### 2.2.2 Hidrociclones

Este equipo recibe la pulpa procesada por el molino SAG con una granulometría generalmente menor 300 micrones dependiendo del diseño y su función principal es seleccionar o separar las partículas que son lo suficientemente pequeñas (finos) a través del overflow para su procesamiento

posterior en la etapa de flotación, de aquellas que son demasiado grandes (gruesos) las cuales son devueltas al proceso a través del underflow, por ejemplo si el hidrociclón que está diseñado para un tamaño de corte de 70 micrones idealmente las partículas mayores a este valor devueltas al molino mientras que las partículas menores a esta son enviadas al siguiente proceso.



### 2.2.3 Flujometro electromagnético

Instrumento necesario para calcular el flujo volumétrico de pulpa de mineral tanto al ingreso como a la salida del hidrociclón. Así también en base a la siguiente relación se puede conocer el porcentaje de sólidos en volumen y masa, así como el flujo másico de la pulpa y mineral seca.

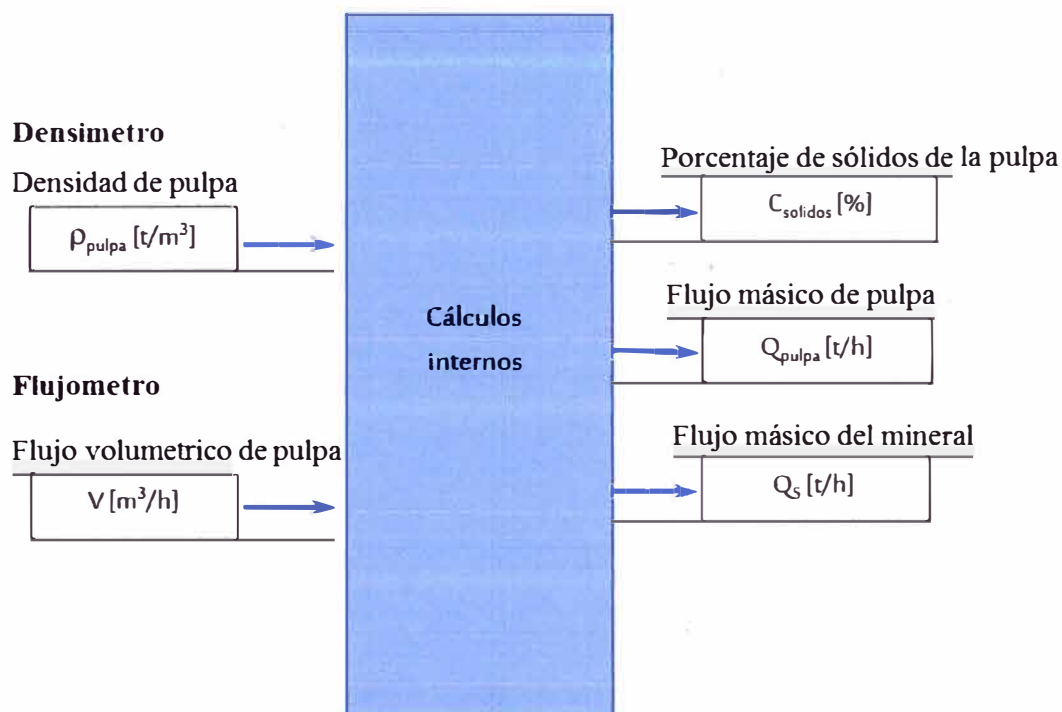


Fig 5 Esquema de medición de porcentaje de sólidos

$$C_{Solidos}[\%V] = \frac{1 - \frac{\rho_{pulpa}}{\rho_C}}{1 - \frac{\rho_S}{\rho_C}} \cdot 100\%$$

$$C_{\text{Solidos}}[\%M] = \frac{1 - \frac{\rho_C}{\rho_S}}{1 - \frac{\rho_C}{\rho_{\text{pulpa}}}} \cdot 100\%$$

$$Q_{\text{pulpa}} = V \cdot \rho_{\text{pulpa}}$$

$$Q_S = V \cdot C_{\text{Solidos}} = V \cdot \frac{\rho_{\text{pulpa}} - \rho_C}{1 - \frac{\rho_C}{\rho_S}}$$

Donde:

$\rho_C$ : Densidad de agua

$\rho_S$ : Densidad del mineral

$\rho_{\text{pulpa}}$ : Densidad de pulpa

Qs caudal másico de mineral también conocido como toneladas de mineral seco

La medición de densidad es importante porque mediante ella se conoce el porcentaje de sólidos en volumen, el cual determina la eficiencia de separación de finos y gruesos en los hidrociclones, así como también es un parámetro necesario para conocer el tamaño de corte D50 (micrones) del hidrociclón, que se define como el tamaño de partícula que tiene 50% de probabilidad de ser evacuado por el underflow.



Por estas razones el porcentaje de sólidos en volumen debe ser monitoreado en forma continua tanto a la entrada de los hidrociclones como a la salida de la misma.

Uno de los fabricantes más conocidos de hidrociclones FLSmidth Krebs por ejemplo tiene la siguiente relación empírica para el dimensionamiento y evaluación del desempeño del tamaño de corte en los hidrociclones que este fábrica:

$$D50C(\text{aplicacion}) = D50C(\text{base}) \cdot C1 \cdot C2 \cdot C3$$

$$D50C = 2.84 \times D^{0.66}$$

$$C1 = \left( \frac{53 - C_{\text{sólidos}} [\%]}{53} \right)^{-1.42}$$

$$C2 = 3.27 \times \Delta P^{-0.28}$$

$$C3 = \left( \frac{1.65}{G_s - G_L} \right)^{0.5}$$

Donde

D50C(base) : Tamaño de partícula bajo condiciones estándar

D50C(aplicación) : Tamaño de partícula de la aplicación

C1 : Factor de corrección por la influencia del % sólidos

C2 : Factor de corrección por la influencia de la caída de presión

C3 : Corrección por la influencia de la gravedad específica

D	: Diámetro de entrada del hidrociclón
$S_{\text{sólidos}}[\%]$	: <b>Porcentaje de sólidos en volumen</b>
Gs	: Gravedad específica de sólidos
GL	: Gravedad específica del agua

## **CAPITULO III**

### **IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO**

#### **3.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Luego de analizar el método clásico de medición de densidad así como el proceso productivo de molienda, donde se requiere monitorear en forma continua la concentración de pulpa para garantizar la eficiencia de separación de sólidos, se reconoce la necesidad de contar con instrumento capaz de realizar mediciones en línea y sin interrumpir el proceso, identificándose de este modo el problema mediante la siguiente pregunta.

¿Se puede diseñar un medidor de densidad no intrusivo para medición de pulpa de mineral con capacidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> hasta 2300 kg/m<sup>3</sup>?

#### **3.2 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS DE TRABAJO**

Considerando que es posible realizar lo siguiente:

- Cálculo de la actividad de la fuente radiactiva
- Cálculo del espesor del contenedor de fuente radiactiva
- Planos del accesorio de montaje del sistema de medición y contenedor de fuente radiactiva
- Especificaciones del centellador

- Especificaciones del fotomultiplicador
- Especificaciones de la electrónica del detector

Se plante la siguiente hipótesis

Es posible diseñar un medidor de densidad no intrusivo para medición de pulpa de mineral con capacidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> hasta 2300 kg/m<sup>3</sup>

## CAPITULO IV

### MARCO TEÓRICO

#### 4.1 DEFINICIONES

##### 4.1.1 Radiación

El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía a través del vacío o algún medio ya sea en forma de ondas electromagnéticas (rayos UV, rayos gamma  $\gamma$ , rayos X, etc) o partículas ( $\alpha$ ,  $\beta$ ). Así mismo una forma de clasificaciones es la siguiente:

- **Radiación ionizante.**- Es aquella que tiene energía suficiente para arrancar electrones de los átomos formando iones, ejemplo radiación gamma  $\gamma$
  
- **Radiación no ionizante.**- No son capaces de producir iones al interactuar con los átomos de un material ejemplo radiación UV, luz visible.

##### 4.1.2 Interacción de la radiación ionizante gamma sobre la materia

- **Efecto fotoeléctrico.**- Mediante este proceso el fotón incidente transfiere toda su energía al electrón de la capa externa del átomo, produciendo un fotoelectrón el cual es expulsado de su posición.

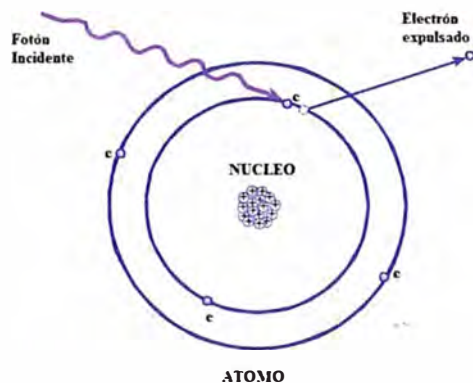


Fig 6: Efecto fotoeléctrico

- **Efecto Compton.**- Este proceso puede interpretarse como una colisión inelástica entre el fotón incidente y el electrón de la capa externa. El fotón incidente transfiere parte de su energía al electrón, expulsándolo de la capa externa y quedando el fotón dispersado con una energía menor a la incidente, así mismo la energía que pierde el fotón pasa al electrón como energía cinética

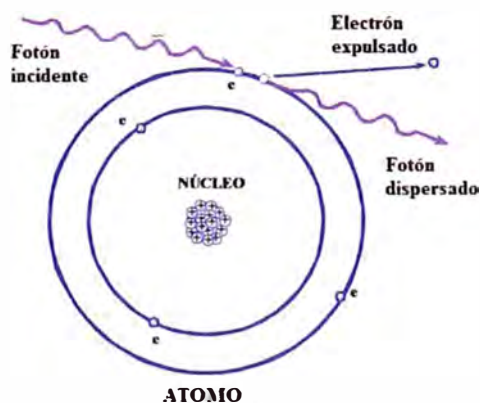


Fig 7: Efecto Compton

- **Producción de pares electrón positrón.**- Proceso mediante el cual un fotón interactúa con el núcleo del átomo, desapareciendo completamente y quedando una partícula antipartícula llamada electrón positrón, luego del cual el positrón se aniquila después de una desaceleración en el medio produciendo dos fotones como producto secundario de la producción de pares.

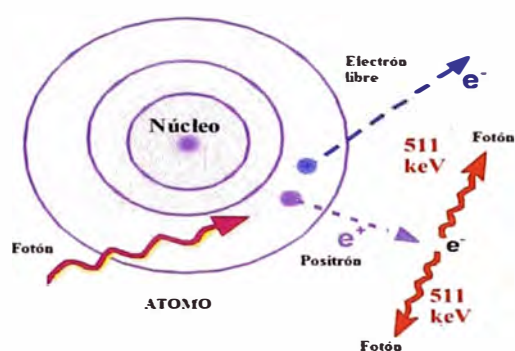


Fig 8: Producción par electrón positrón

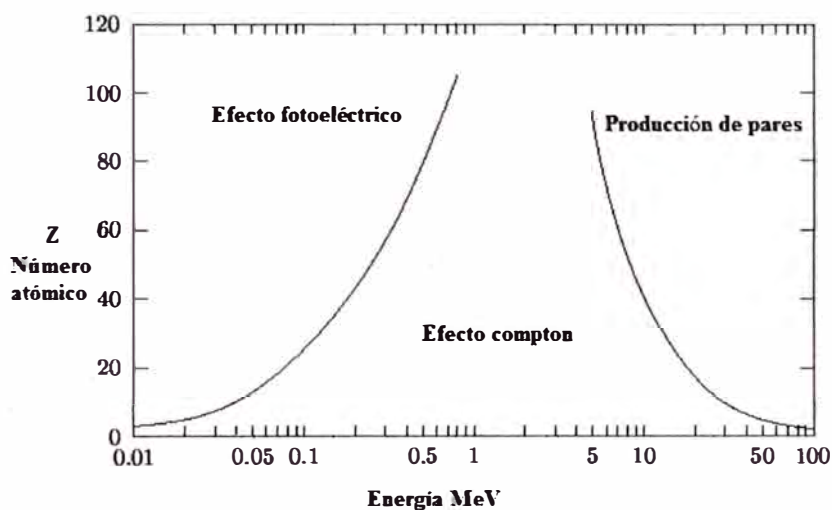


Fig 9: Interacción radiación gamma en función de la energía

**4.1.3. Radioactividad.**- La actividad de un radioisótopo está dada por el número de núcleos que se desintegran por unidad de tiempo

$$P = \left. \frac{dN}{dt} \right|_{\text{decay}} = -\lambda N$$

$$N_{(t)} = N_0 \cdot e^{(-\lambda \cdot t)}$$

$$P_{(t)} = -\frac{dN_{(t)}}{dt}$$

$$P_{(t)} = P_{(0)} \cdot e^{(-\lambda \cdot t)}$$

N: Número de radio nucleídos o núcleos radioactivos

$\lambda$  : Constante de desintegración

P: Actividad

La unidad de medida de la actividad es el Curie ( Ci ) definido como  $3.7 \times 10^{10}$  desintegraciones por segundo, así mismo también se usa el Bq que equivale:

$$1\text{Bq} = 2.703 \times 10^{-11}\text{Ci}$$

Período de semi desintegración es el tiempo en cual la actividad inicial deace a la mitad.



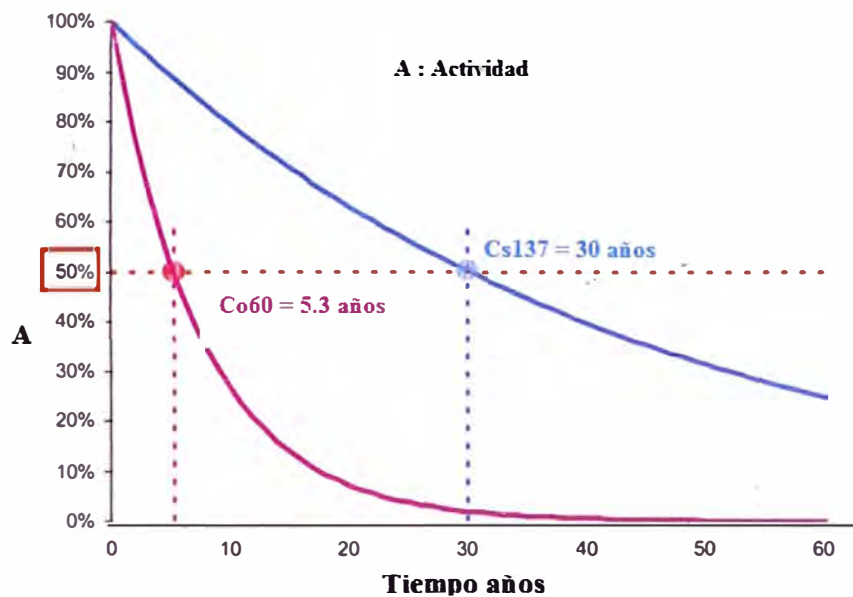


Fig 10: Tiempo de vida media

**4.1.4 Energía.**-La medida tradicional para la energía de radiación es el electrón volt o eV, definida como la energía cinética ganada por un electrón el cual es acelerado a través de una diferencia de potencial de 1 voltio.

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

J: Joule

Así la energía de un fotón está relacionada con la frecuencia de la radiación

$$E = h \cdot \nu$$

h : Constante de Planck =  $4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$  =  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

c =  $\lambda \cdot \nu$

$\nu$  : Frecuencia

$\lambda$  : Longitud de onda

c : Velocidad de la luz

**4.1.5 Decaimiento de radioisótopos .-**En el ámbito industrial y especialmente para los densímetros nucleares se utilizan los radioisótopos Cs137 y Co60, los cuales son obtenidos artificialmente en un reactor nuclear.

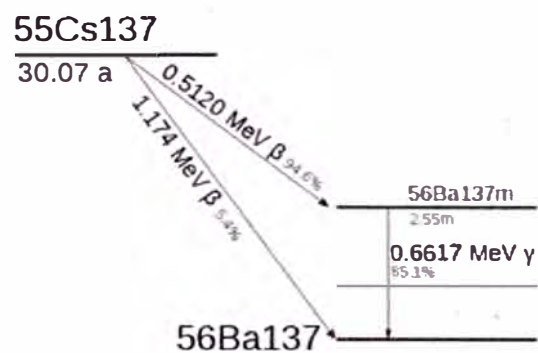


Fig 11: Decaimiento del Cs137

Para el Cs 137 la desintegración de un núcleo viene seguida de  $\beta^-$  y luego un rayo gamma de 0.6617 MeV

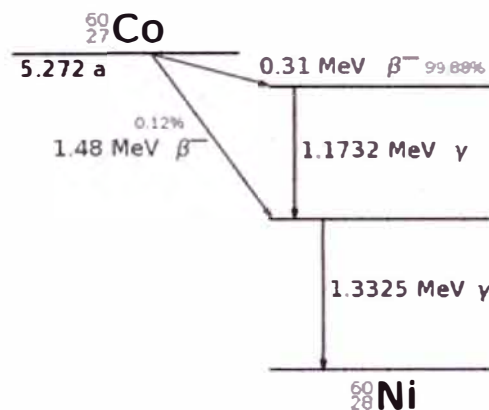


Fig 12: Decaimiento del Co60

$$\lambda_{\text{Cs137}} = 1.9 \cdot 10^{-12} \text{ a}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{Co60}} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

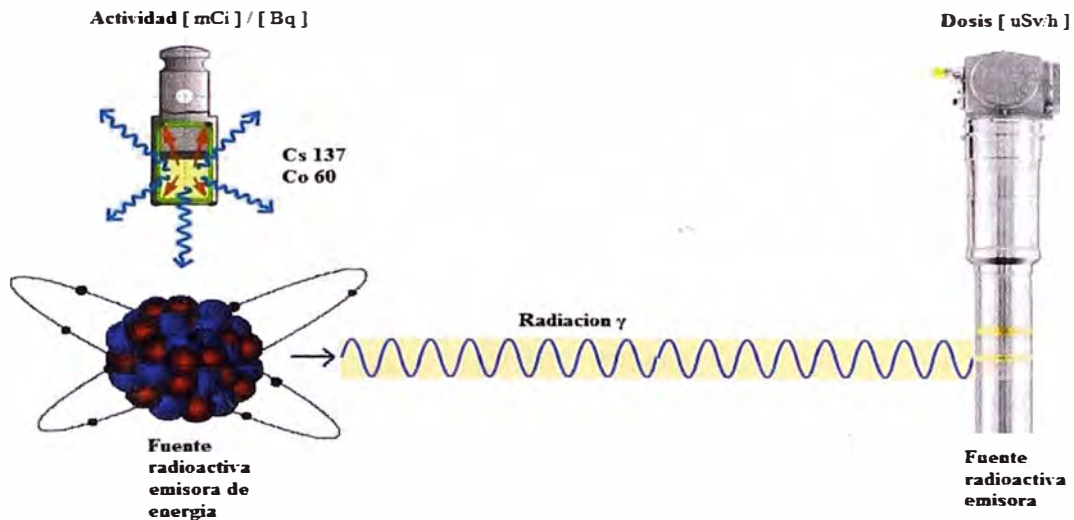


Fig 13: Esquema de medición

Para el cobalto 60 se emite un  $\beta^-$  y dos fotones gamma de 2.505 MeV, de los gráficos Fig 11 y 12 se puede observar que la energía por cada desintegración del cobalto 60 es mayor a la del Cesio 137, pero de la Fig 10, se puede ver el tiempo de vida media del cobalto 60 es mucho menor que el Cesio 137.

**4.1.6 Dosis absorbida ( D ).-** Se usa para medir la cantidad de radiación ionizante recibida por un material, de este modo se tiene como unidades de la dosis absorbida el gray

$$1\text{Gy} = 1 \text{ joule / kg} = 100 \text{ rad}$$

**4.1.7 Dosis equivalente ( h ).-** Es una magnitud física que describe el efecto de los distintos tipos de radiaciones ionizantes sobre los tejidos vivos, su unidad de medida es el sievert y se calcula multiplicando la dosis absorbida ( D ) por un factor de ponderación  $W_R$

$$h = D \cdot W_R$$

Tabla 2 : Tabla de energía

Radiación	Energía	$W_R$
Rayos X Rayos gamma Electrones		1
Neutrones	< 10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protones	> 2 MeV	2
Partículas alfa		20

**4.1.8 Tasa de dosis.-** Las unidades de dosis absorbida y equivalente expresan la cantidad total de radiación recibida, sin embargo para controlar los riesgos de radiación es necesario conocer la rapidez o tasa de dosis

$$H = h / t$$

H: Tasa de dosis en Sievert por hora Sv/h

t : tiempo

#### 4.1.9 Principios de radiación

- **Distancia.** La tasa de dosis decrece con el cuadrada de la distancia en el vacío.

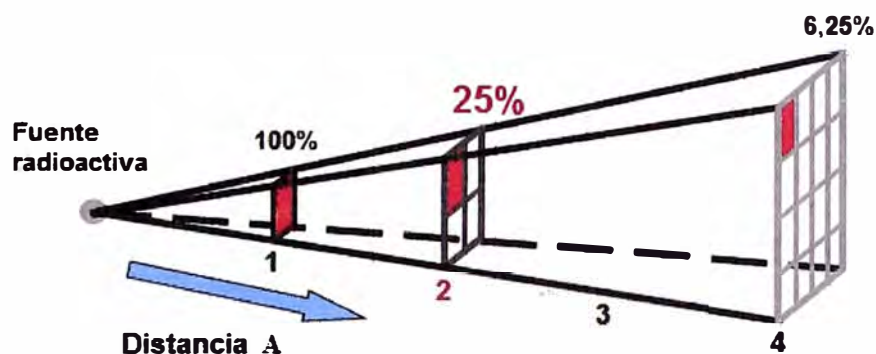


Fig 14: Esquema de disminución de dosis

$$H \approx \frac{1}{A^2} \dots \dots \dots (1)$$

H : tasa de dosis [ $\mu\text{Sv/h}$ ]

$A^2$ : distancia de la fuente

De este modo se tiene por ejemplo, si la tasa de dosis a un 1 m de distancia de la fuente radiactiva es  $4\mu\text{Sv/h}$ , a 2 m de distancia será la cuarta parte es decir  $1\mu\text{Sv/h}$

- **Atenuación.-** Para describir el fenómeno de atenuación de las ondas electromagnéticas gamma  $\gamma$ , utilizamos la ley de Bouger-Lambert que establece lo siguiente

Cuando un haz de radiación electromagnética de Intensidad  $I_0$  lo incide sobre un material de espesor  $x$ , el haz se atenúa y la intensidad de la radiación a la salida viene dada por:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{(-\mu \cdot x)}$$

$x$ : Espesor del material

$\mu$ : Coeficiente de absorción lineal

$I$  : Intensidad de radiación en electrón volt ( eV )

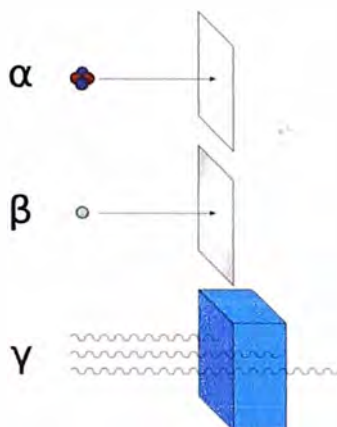


Fig 15: Esquema de atenuación

Conforme al gráfico se puede observar que las partículas  $\alpha$  se pueden detener con un hoja de papel, mientras que la radiación  $\beta$  no puede atravesar una capa de pocos milímetros de aluminio, pero la radiación  $\gamma$  es capaz de penetrar cualquier material hasta el plomo, pero siempre existe una atenuación que depende del espesor y densidad del material.

Capa de valor medio (HVL), es aquella que reduce la tasa de dosis a la mitad de su valor.

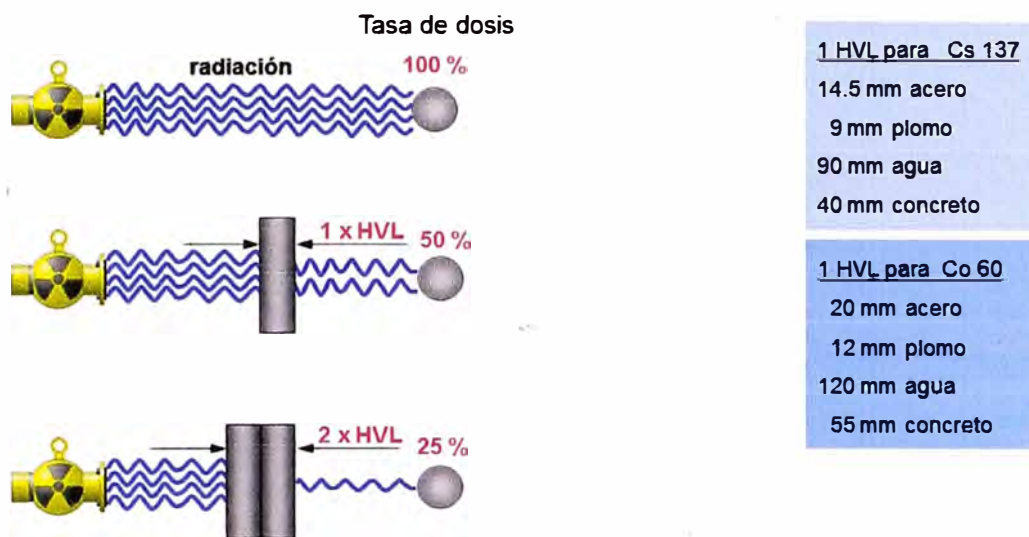


Fig 16: Esquema de atenuación HVL

Absorción del Cs 137 en acero y aluminio

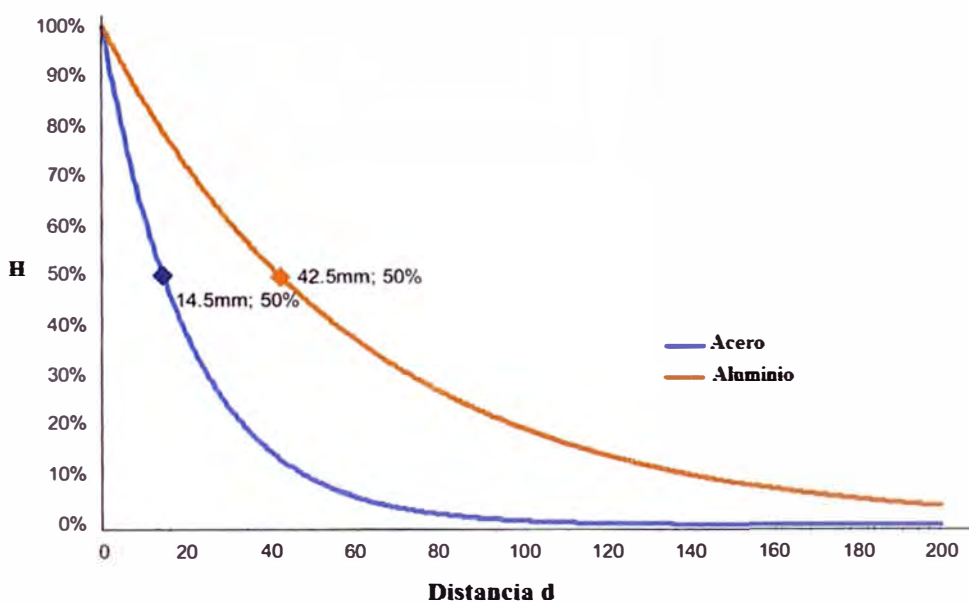


Fig 17: Esquema de atenuación de dosis

$$H \approx e^{-\mu \cdot d} \dots\dots\dots(2)$$

De las ecuaciones 1 y 2 se tiene:

$$H \approx e^{-\mu \cdot d} \cdot \frac{1}{A^2}$$

Finalmente se obtiene:

$$H = k \cdot e^{-\mu \cdot d} \cdot \frac{1}{A^2}$$

Donde k depende de la actividad de la fuente P y la constante del radioisótopo  $\Gamma_H$

$$H = \Gamma_H \cdot P \cdot e^{-\mu \cdot d} \cdot \frac{1}{A^2}$$

$$P = \frac{A^2 \cdot H \cdot e^{-\mu \cdot d}}{\Gamma_H} \dots \dots \dots (3)$$

#### 4.1.10 Precisión de medición

La precisión del densímetro depende para cada aplicación de:

- Diámetro de tubería
- Rango de densidad
- Actividad de la fuente



- Constante de tiempo

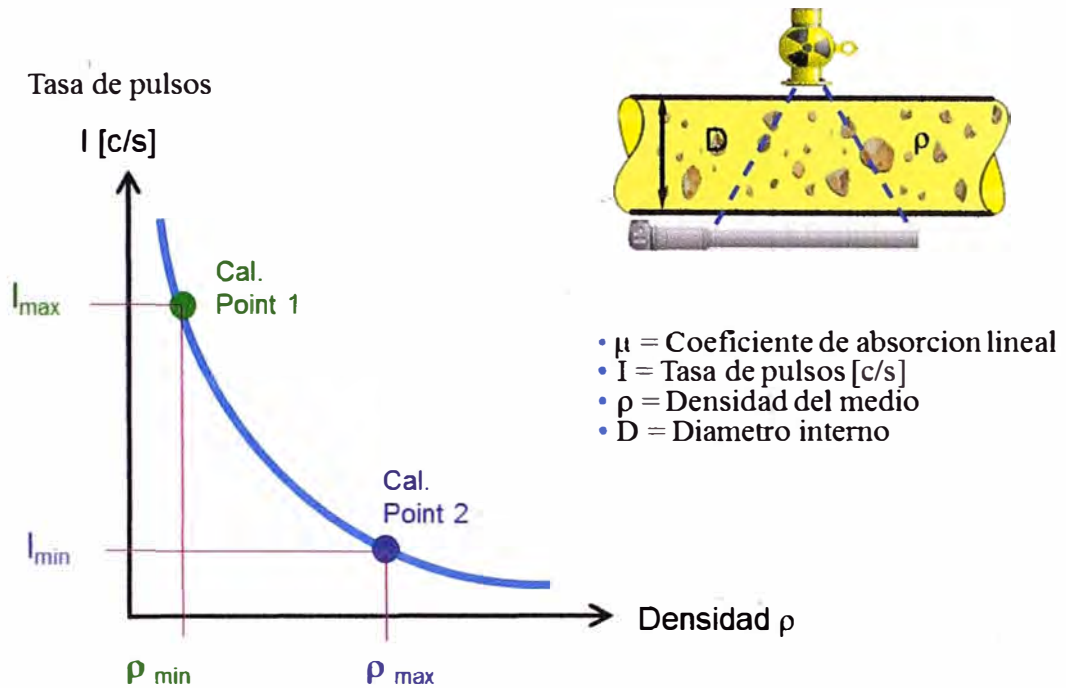


Fig 18: Esquema de medición

Tasa de pulsos (cuentas por segundo o cps ) representa la cantidad de radiación que llega al detector el cual es inversamente proporcional a la densidad de la pulpa, ya que a mayor densidad menos tasa de pulsos y viceversa

#### 4.1.10.1 Parámetros que definen la precisión

- **Variación estadística.**-Esta puede ser reducida incrementando el tiempo de integración  $\tau$  , o alargando la longitud de detección incremento de  $\Delta l$

$$\pm 2\sigma_{rel} = \pm \frac{2 \cdot \sqrt{I_N}}{\sqrt{\tau} \cdot \Delta l}$$

### Variación estadística [%]

$I_N$  : Tasa de pulso promedio

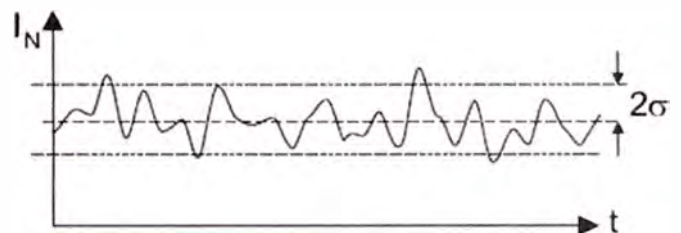
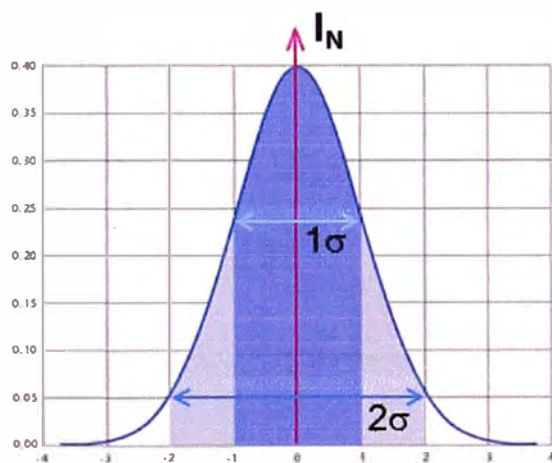
$\tau$  : Tiempo de integración

$\Delta I$  :  $I_{\max} - I_{\min}$

- **Estabilidad.-** Se puede incrementar la estabilidad incrementando la longitud de detección del detector

Stability [%]:

$$\frac{\pm 0.1\% \cdot I_N}{\Delta I}$$



$$\pm 1\sigma = \pm 1 \cdot \sqrt{I_N} = 68.28\%$$

$$\pm 2\sigma = \pm 2 \cdot \sqrt{I_N} = 95.45\%$$

$$\pm 3\sigma = \pm 3 \cdot \sqrt{I_N} = 99.74\%$$

Fig 19: Variación estadística

Tiempo de integración es usado para reducir el efecto de las variaciones o ruidos, después de un repentino cambio en la medición toma  $5\tau$  antes de alcanzar el nuevo valor medido

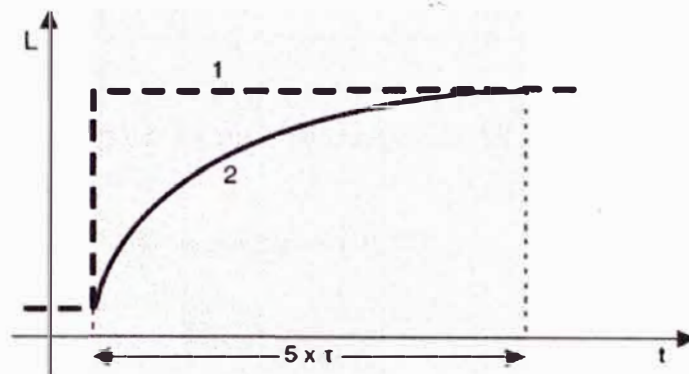


Fig 20: Tiempo de integración

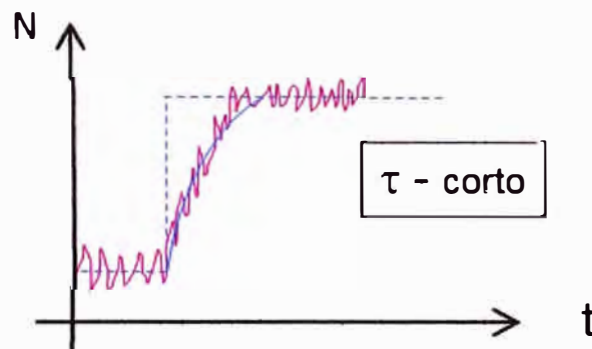


Fig 21: Tiempo de integración corto

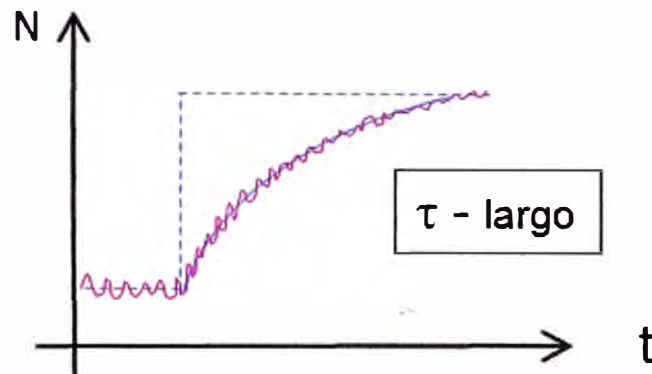


Fig 22: Tiempo de integración largo

#### 4.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

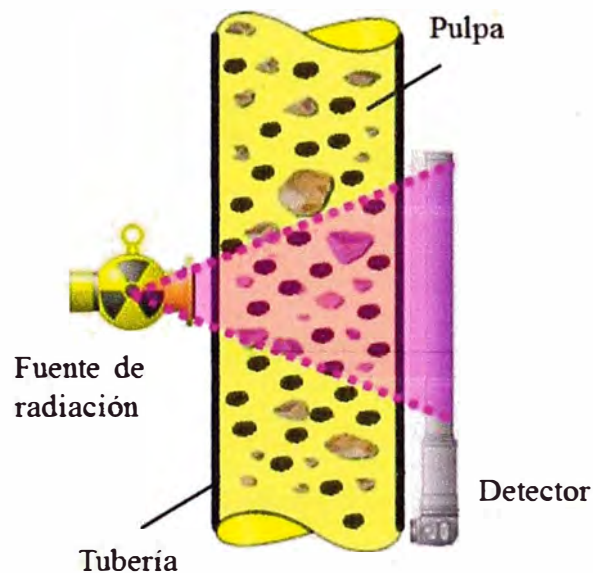


Fig 23: Esquema de medición de densidad

El medidor de densidad propuesto basa su principio en la absorción de radiación por parte del medio por donde atraviesa en este caso la pulpa principalmente, la fuente radioactiva emite radiación gamma en forma continua de este modo cada fotón de esta interactúa con las partículas de mineral y el agua en el interior de la tubería, experimentando de este modo el

efecto fotoeléctrico, compton y producción de pares, por lo tanto parte de la radiación es absorbida completamente por la pulpa y la otra atraviesa el diámetro de la tubería llegando al detector, de este modo la cantidad radiación que recibe el detector es inversamente proporcional a la densidad de la pulpa, es decir a mayor radiación en el detector menor la densidad del fluido y viceversa. El detector se encarga de procesar y contabilizar la radiación recibida en forma de pulsos para dar un valor de densidad en el indicador.

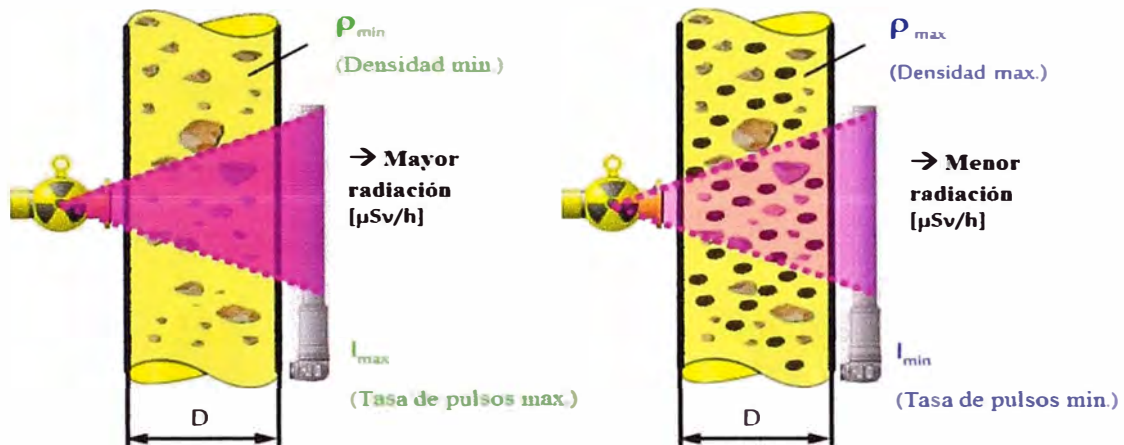


Fig 24: Esquema comparativo

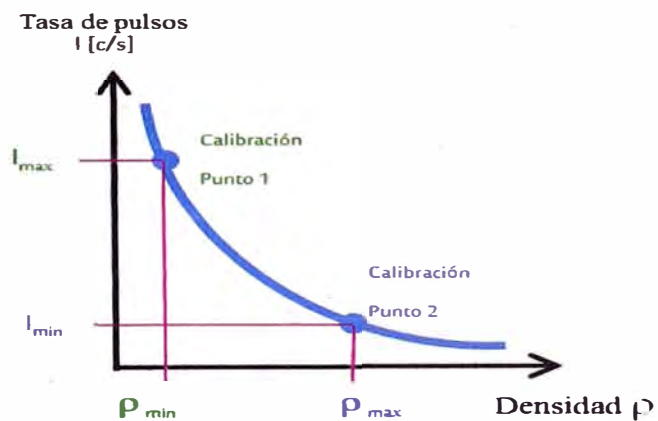


Fig 25: Variación densidad con tasa de pulso

Donde

$\rho$  : Densidad

I : Intensidad de radiación

#### 4.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición de densidad está formado por los siguientes componentes

- Contenedor de fuente radioactiva
- Fuente radioactiva
- Detector
- Ensamble de montaje
- Indicador de medición



Fig 26: Sistema de medición

### 4.3.1 Contenedor de Fuente Radioactiva

El contenedor es un recinto de almacenamiento y seguridad de la fuente radiactiva, esta blindado internamente de plomo y una capa de acero en el exterior para evitar la corrosion del ambiente, el espesor del mismo depende la actividad de la fuente radiactiva en su interior , por lo tanto a mayor actividad de la fuente radiactiva, mayor sera es espesor y tamaño del contenedor.

Cuando el contenedor esta cerrado la tasa de dosis en el exterior es mínima con valores dentro de los rangos permitidos pero cuando el contenedor se abre la posición de la fuente radiactiva en el interior del contendor cambia de tal modo que queda en la via del canal donde la radiación fluye al exterior libremente, para asegurar la los estados de abierto o cerrado se usa un candado el cual fija el estado que se requiera.

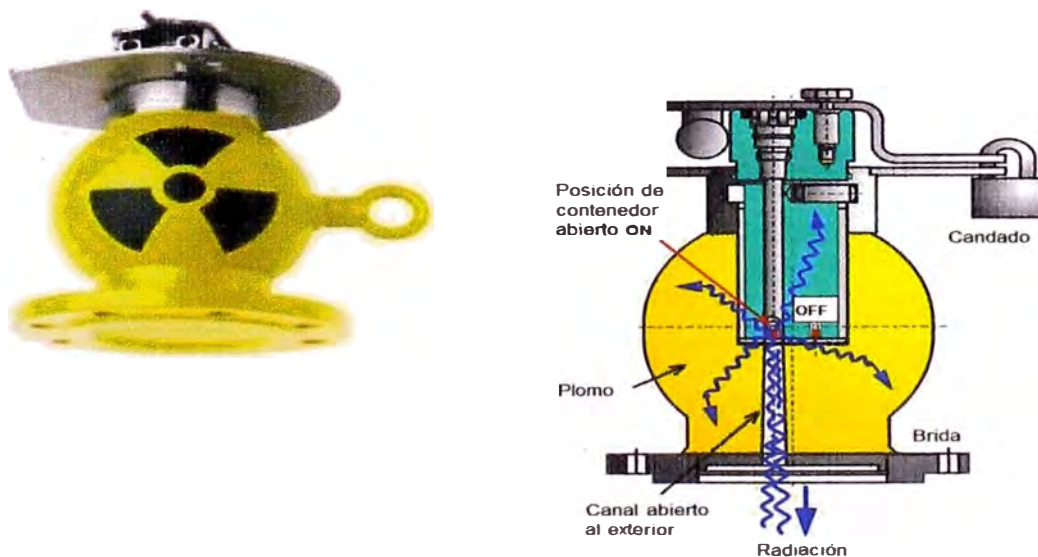


Fig 27: Contendor de fuente radiactiva

Basicamente para el tema de diseño del presente informe se calcula el espesor que el contenedor de fuente radiactiva debe tener para mantener los niveles de radiación dentro de los rangos permisibles conforme a normas de seguridad radiológica.

#### 4.3.2 Fuente Radioactiva

La fuente radiactiva es la cápsula ya sea de Cesio 137 o Cobalto 60 la cual esta emitiendo continuamente radiación del tipo gamma ubicada dentro de la contenedor de fuente radiactiva anteriormente descrito, tal como se muestra en la figura siguiente, emite radiación en todas la direcciones y viene encapsulada en una cubierta de acero inoxidable.

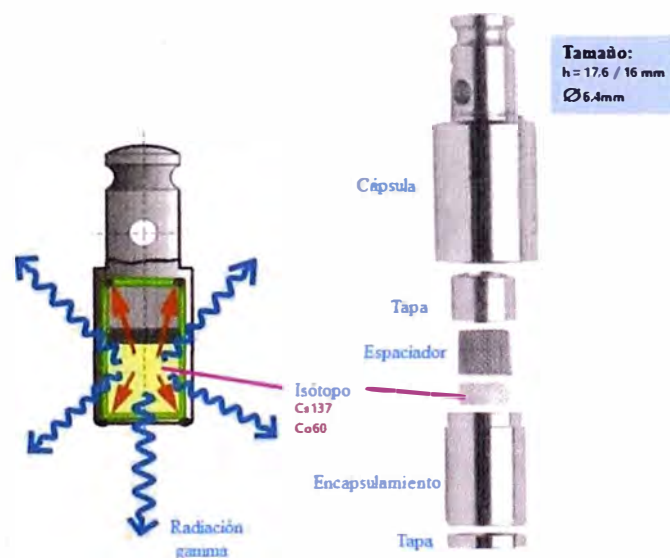


Fig 28: Fuente radiactiva

El encapsulamiento de la fuente radiactiva para seguridad y protección de la misma es garantizado bajo la norma internacional C 66646 (ISO 2919) el cual establece las pruebas para el sello de fuentes radiactivas de uso industrial y medicina.



Prueba	1	2	3	4	5	6
Temperatura						 + 800 °C 1h    - 40 °C 20 min    800 °C choque térmico a 20°C
Presión externa						1700 bar
Impacto	NO TEST					 20 kg    1 m
Vibraciones				3x30 min 25 - 80 Hz y 80 - 2000Hz a 20 g		
Punción						 1 kg    1 m

Fig 29: Esquema de norma C 66646 (ISO 2919)

Para el diseño del medidor de densidad solo se requiere calcular la actividad de la fuente radiactiva y determinar el tipo de isótopo, ya que en el mercado se encuentran varios fabricantes que suministran estas fuentes conforme a las normas.

#### 4.3.3 Detector

El detector es la parte del sistema que recibe la radiación proveniente de la fuente, la cual no fue absorbida por la pulpa, esta radiación es inversamente proporcional a la densidad del fluido, la misma es convertida en señales eléctricas que luego se traducen en un valor específico de densidad a través de la electrónica.

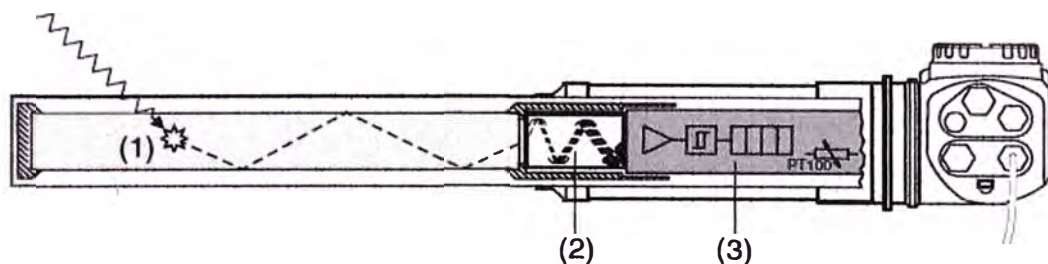


Fig 30: Detector

Las partes de este son las siguientes:

- 1 Tubo centellador
- 2 Fotomultiplicador
- 3 Electrónica

#### 4.3.3.1 Tubo Centellador

Los centelladores del tipo orgánico son ampliamente usados en detectores de partículas, lo cuales se pueden encontrar en estado sólido, líquido o gaseoso, hecho por el cual los vuelve muy atractivos por su posibilidad de adaptación a determinadas especificaciones de diseño

- **Mecanismo de centelleo.** El mecanismo básico de centelleo en los centelladores orgánicos es la fluorescencia. En la figura 1.3 se observa el diagrama de niveles de energía característico de los centelladores orgánicos. La radiación incidente transfiere energía al medio generando transiciones electrónicas del estado fundamental  $S_0$  a diferentes niveles vibracionales del singlete  $S_1$ .

Los tiempos característicos de los estados vibracionales son del orden de  $10^{-12}$  s, mucho menores que los que caracterizan a las transiciones radiactivas

( $\sim 10^{-8}$  a  $10^{-9}$  s), por lo que las moléculas alcanzan el equilibrio térmico antes de la emisión, las transiciones radiativas se dan del S1 al S0. Para la mayoría de los materiales centelladores estas emisiones son en el ultravioleta o en el visible. Durante las transiciones entre los niveles vibracionales y el fundamental del estado S1, los electrones pierden parte de la energía que absorbieron para ser promovidos desde el estado fundamental S0.

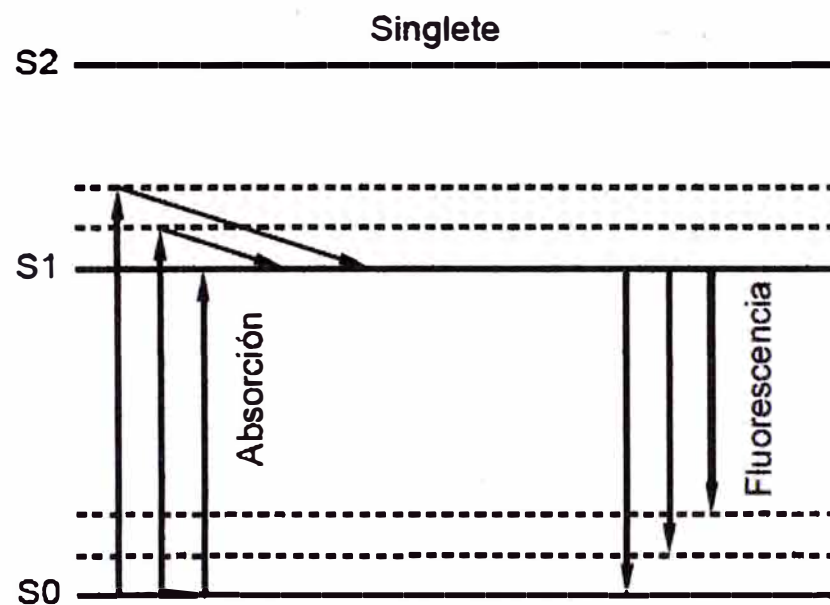
Consecuentemente, los espectros de absorción y de emisión no coinciden, lo que desfavorece la reabsorción de los fotones de fluorescencia. El desplazamiento entre el pico del espectro de emisión y el de absorción se conoce como Stoke's Shift, es un parametro importante a la hora de seleccionar al centellador adecuado para cada aplicacion.

- **Centelladores plasticos** .-La fabricación de los centelladores plásticos es un proceso complejo en el que se polimeriza una solución formada por una mezcla homogénea de un compuesto centellador con una base. En general, se utiliza polivinil tolueno (PVT) para la base. La concentración de centellador en la mezcla es en general del 1% del peso, lo que alcanza para lograr un material con un alto light yield (número de fotones de fluorescencia por unidad de energía depositada en el material, es del orden de 1000 / MeV o superior). En general, a la mezcla se la dopa con un segundo material centellador en menor concentración.

La base plástica absorbe la energía de las partículas incidentes y emite fotones en el ultravioleta, de no existir otros materiales en el polímero, esta

emisión se atenuaran en milímetros. El primer dopante se introduce en la mezcla para mejorar esta situación, tiene la capacidad de emitir fotones ultravioletas pero con mayor longitud de atenuación.

Sin embargo, el plástico no es transparente para estos fotones, por lo que se introduce al segundo dopante que tiene como función absorber los fotones ultravioletas y emitir fotones en el visible, se lo denomina Wavelength Shifter. La emisión de los centelladores plásticos es general color azul. En la Fig 31 se ilustra la secuencia de procesos , además de indicarse la



concentración típica de dopantes.

Fig 31: Fluorescencia en un centellador orgánico. Los electrones absorben energía de la radiación incidente y son promovidos del estado fundamental S0 al singlete S1 y a sus niveles vibracionales (líneas a trazos).

La relajación del sistema al estado fundamental y a sus niveles vibracionales ocurre en nanosegundos, es acompañada por la emisión de fotones de fluorescencia en el espectro ultravioleta o visible.

Los centelladores plásticos utilizados en nuestro detector están basados en el diseño de MINOS los cuales son extruidos, se componen de una base de PVT de calidad comercial sin aditivos, el primer dopante es PPO al 1% del peso, y el segundo es POPOP al 0,03% del peso. Con la excepción del surco en la cara superior para la fibra óptica, los centelladores se encuentran recubiertos de una capa reflectora de 0.25mm de PVT con un 12% de TiO<sub>2</sub>, que disminuye la probabilidad de que los fotones se escapen del material. Su pico de emisión es en 420 nm y su longitud de atenuación es menor a 30 cm.

- **Fibra Óptica WLS.-**Vimos cómo se genera luz a partir de la incidencia de una partícula en los centelladores plásticos. Lo que es necesario para completar la detección, es la colección de la luz emitida para que el fotomultiplicador que se encargue de transformarla en una señal eléctrica para la adquisición. Una manera de lograrlo es acoplar directamente el fotomultiplicador al centellador. Pero en general, el área del centellador es mucho más grande que la del fotomultiplicador, la eficiencia de colección estará limitada por el Teorema de Liouville.

No puede violarse la conservación del volumen en el espacio de fase. Esta significa que el flujo de fotones por unidad de área y por unidad de ángulo sólido debe mantenerse constante.

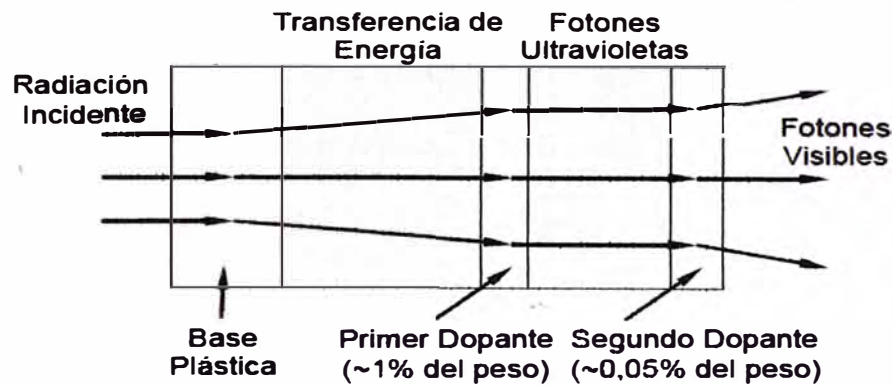


Fig 32: Secuencia de mecanismos dentro de un centellador plástico ternario, dos dopantes mezclados homogéneamente en una base de plástico

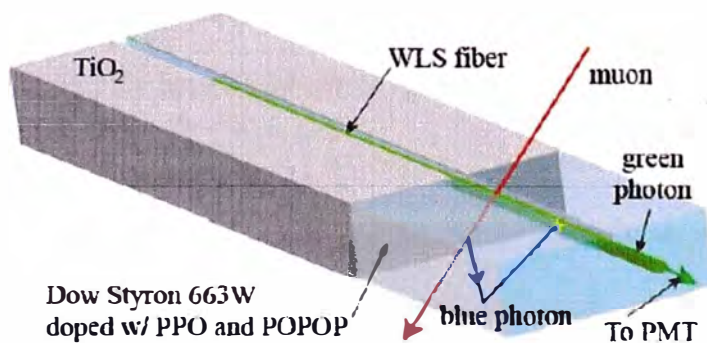


Fig 33: La fibra óptica colecta WLS colecta la luz y reemite fotones verdes los cuales guían al fotomultiplicador PMT consecuencia directa, no existe un acoplamiento óptico que, solo basado en la reflexión o en la difracción, puede transmitir a los fotones desde una fuente más grande a una más pequeña con eficiencia total . Una manera de evadir este inconveniente, es utilizar una fibra óptica que absorba la luz del centellador y emita fotones de una longitud de onda mayor (redefiniendo el espacio de fase).

Las fibras Wavelength Shifters cumplen precisamente esta función, con un radio  $\sim 1$  mm, se acoplan con cemento óptico en la cara superior de las barras

centelladoras. Absorben los fotones azules y reemite fotones verdes de 500 nm (figura 1.5), con tiempos de decaimiento típicos entre 3 a 10 ns. De esta manera la luz puede transportarse varios metros hasta ser colectada por el fotodetector.

Las fibras WLS empleadas están formadas por un núcleo dopado con un fluoroforo, y recubierto por una película transparente delgada (2 a 5  $\mu\text{m}$ ) de PMMA con un índice de refracción menor al del núcleo. La reflexión interna total en la interfaz entre el núcleo y el recubrimiento posibilita el transporte de la luz por varios metros. Valores típicos para el índice de refracción del núcleo y de la película que lo recubre son 1.59 y 1.49 respectivamente, lo que implica una eficiencia para atrapar a los fotones emitidos del  $\sim 6\%$ . También se fabrican fibras con dos (o más) recubrimientos, lo que aumenta la eficiencia para atrapar los fotones, utilizando un segundo recubrimiento de MMA con índice de refracción de 1.42 la eficiencia aumenta a  $\sim 10\%$ .



Fig 34: Tubo centellador de PVT y NaI.

### 4.3.3.2 Fotomultiplicador

Este dispositivo convierte las señales de luz que típicamente consisten en unos cientos de fotones en pulsos de corriente que luego serán procesados convenientemente en el circuito electrónico.

El modelo simplificado de este dispositivo se muestra en la siguiente Fig 35 el vidrio envolvente sirve como barrera de presión que mantiene el vacío dentro del tubo necesario para que los fotoelectrones de baja energía puedan ser acelerados eficientemente por campos eléctricos internos, así mismo los electrodos de enfoque direccionan las trayectorias de los fotoelectrones evitando de este modo la pérdida de estos.

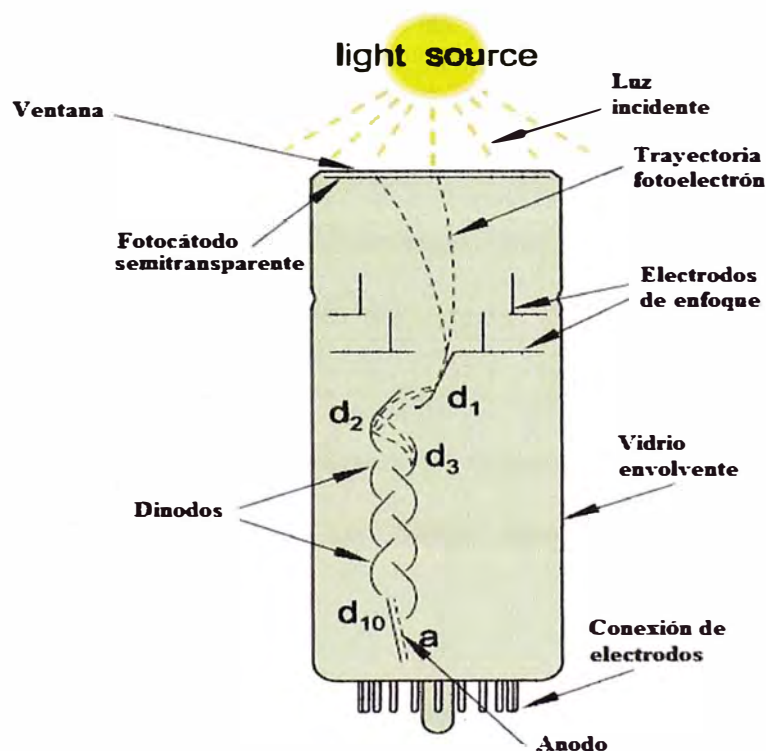


Fig 35: Esquema del fotomultiplicador.



## **El fotocátodo**

**Proceso de fotoemisión.**- El primer paso a realizar por el fotomultiplicador es la conversión del haz de fotones incidentes ( luz ) en electrones, este proceso de fotoemisión ocurre en tres procesos

- Absorción del fotón incidente y transferencia de energía al electrón dentro del material o fotocátodo.
- Migración de los fotoelectrones a la superficie del material
- Escape de los electrones de la superficie del fotocátodo

La energía que puede ser transferida del fotón al fotoelectrón en el primer paso es dado por el cuanto de energía del fotón  $h\nu$  para muchos centelladores este valor es aproximadamente 3 eV, en el paso dos parte de esa energía será perdida en la colisión interna del electron-electron cuando este se moviliza en el interior del fotocátodo. Finalmente en el paso tres el electrón debe tener energía suficiente para superar el potencial de barrera que siempre existe como interface entre el material y el vacío, este potencial es llamado función de trabajo y su valor es normalmente mayor a 3 ó 4 Ev para varios metales pero puede tener un menor valor como 1.5 a 2 eV para ciertos semiconductores.

El potencial de barrera finito indicado en el paso tres impone un mínimo de energía para el fotón entrante, por lo tanto todo fotocátodo se caracteriza por un larga longitud de onda o una baja frecuencia de corte que usualmente está

cerca de la porción del espectro infrarrojo, aun para fotones de alta energía el potencial de barrera debe ser lo mínimo posible para maximizar el número de electrones que escaparan la superficie del material.

Con el fin de que el fotón de luz sea absorbido por el material su energía debe ser mayor a la energía de banda brecha ( band gap  $E_g$  ) del fotocátodo, el cual representa la energía mínima requerida por un electrón para pasar a ser un electrón libre. Por lo tanto el proceso de absorción se simplifica a elevar el electrón de la banda de valencia a la banda de conducción

**Dinodos.-** El proceso multiplicador del fotomultiplicador está basado en el fenómeno de emisión secundaria de electrones, mediante el cual los fotoelectrones emitidos por el fotocátodo son acelerados y chocan con los electrodos llamados dinodos. Este proceso es similar al descrito anteriormente con el fotocátodo, sin embargo, los electrones dentro del material del dinodo son excitados por los mismos electrones entrantes en lugar de fotones de luz como el caso del fotocátodo.

Para alcanzar una ganancia de electrones por el orden de  $10^6$ , los fotomultiplicadores deben emplear múltiples dinodos, electrones que dejan el fotocátodo son atraídos por el primer dinodo y producen  $\delta$  electrones por cada fotoelectrón incidente.

$\delta = \text{Numero de electrones emitidos} / \text{Numero de electrones incidentes}$

Los fotoelectrones producidos en la superficie del primer dinodo nuevamente tienen baja energía de alrededor de eV, por lo tanto ellos requieren de un campo eléctrico entre el primer y segundo dinodo. Este proceso se repite muchas veces hasta alcanzar el número de electrones deseados.

Si se tiene N etapas en el fotomultiplicador la ganancia total del equipo será:

$$\text{Ganancia} = \alpha \cdot \delta^N$$

$\alpha$  : Es aprox. 1 para fotomultiplicadores bien diseñados

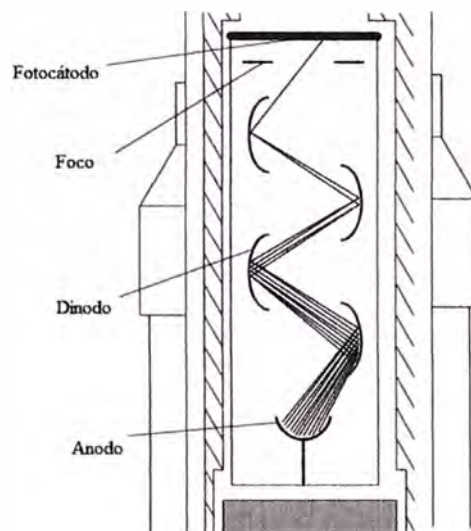


Fig 36: Fotomultiplicador

#### 4.3.3.3 Electrónica del detector

**Modelo simplificado del detector.-** Empecemos con caso hipotético del detector que irradiado por cierto tipo de radiación gamma, centramos nuestra atención en la interacción de un fotón gamma como representación de toda la

radiación que recibe el detector, la misma que al interactuar con la materia experimenta los efectos descritos en el capítulo anterior con duración de pocos picosegundos, para casos prácticos diríamos instantáneo.

El resultado de la interacción es la aparición de una carga eléctrica en el detector, nuestro modelo de detector asume que la carga  $Q$  aparece en el equipo en un tiempo  $t = 0$  como resultado de la interacción de un fotón gamma, luego esta carga debe ser colectada para formar una señal eléctrica, típicamente la colección de la carga es realizada a través de campos eléctricos en el detector. Por lo tanto empesamos nuestro modelo de detector cuya respuesta a la interacción de un fotón gamma sera un flujo de corriente que dura el mismo tiempo que la carga colectada.

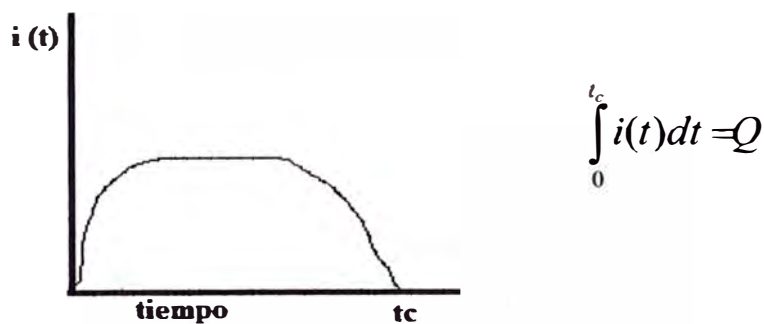


Fig 37: Pulso de corriente

La integral de la señal de corriente representa la carga, en una situación real varios fotos interactúan con el detector en un período de tiempo y como resultado se tendrá una serie de pulsos de corriente cuya magnitud y duración variarán dependiendo del tipo de interacción, así mismo para este caso se asume que el período de cada pulso de corriente es muy corto de modo que no existe traslape uno con otro.

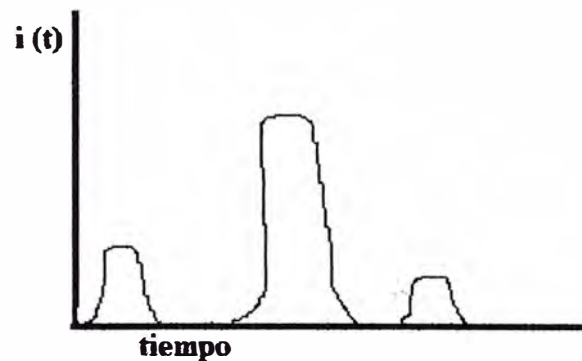


Fig 38: Secuencia de pulsos de corriente

Es importante recalcar que la llegada de fotones al detector es un fenómeno aleatorio gobernado por la estadística de Poisson, así mismo el intervalo de tiempo entre pulsos es de distribución aleatoria.

**Modo de operación de la electrónica.-** Buena cantidad de detectores operan bajo el modo pulso, mediante este se puede recolectar información valiosa de la amplitud y duración de los pulsos producidos por la interacción de cada cuanto o fotón gamma

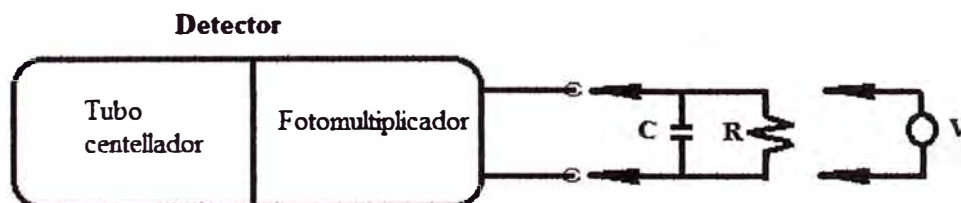


Fig 39: Circuito electrónico del detector

La naturaleza de la señal de pulso producida por cada interacción depende de las características de entrada del circuito al cual el detector es conectada, usualmente un preamplificador, la figura 39 muestra el esquema básico del

circuito, donde  $R$  representa la resistencia del circuito y  $C$  la capacitancia equivalente del detector y del circuito de medición. El voltaje base de operación del modo pulso viene dado por  $V$ , por lo tanto la constante de tiempo  $\tau = R.C$

**Procesamiento de pulsos.**-En el diagrama mostrado a continuación se puede ver que un rayo gamma incide sobre el tubo centellador del detector este libera una carga  $Q$ , la misma que es proporcional a la energía depositada y luego enviada como corriente transitoria en forma de pulsos ( $i_{sig}(t)$ ), los cuales varían en amplitud y tiempo de duración de uno respecto del otro. Estos pulsos de corriente son integrados en la etapa de preamplificador produciendo pulsos de voltaje  $\Delta V = Q / C_F$ , la resistencia  $R_F$

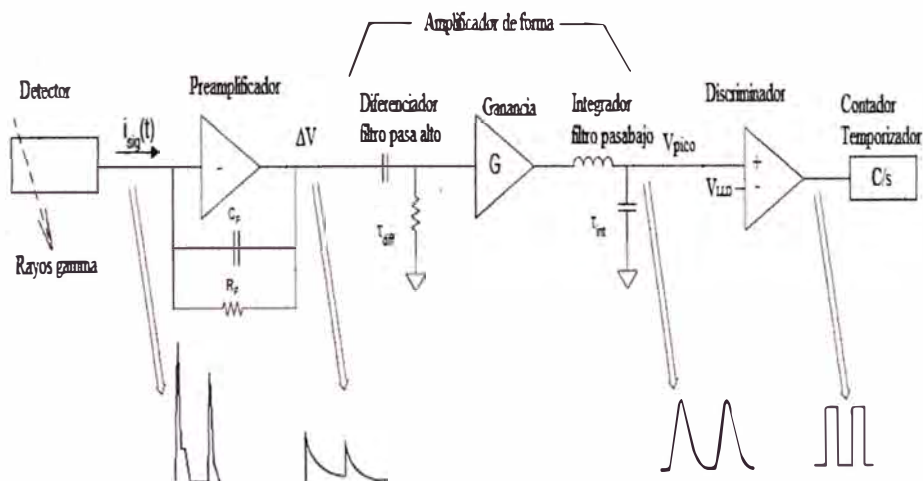


Fig 40: Diagrama de circuito

restaura la señal de entrada a tierra con una constante de tiempo  $R_F C_F$ , como resultado se tiene una salida de pulsos de voltaje que en algunos casos se superponen una con otra.

Dada la superposición de pulsos en la etapa anterior es necesario un circuito pasa alto o diferenciador como entrada de la etapa de amplificación de forma, esta etapa deja pasar los flancos de subida de pulsos de voltaje retornando inmediatamente la señal a la línea base o referencia antes del siguiente flanco de subida del pulso siguiente, de este modo se separa convenientemente los pulsos para un mejor procesamiento de señal en la etapa que viene. Así mismo estos pulsos separados son amplificados antes de pasar al circuito integrador o pasa bajo, donde se mejora el ratio de señal a ruido así como se da las condiciones para poder medir el voltaje pico de cada pulso.

Posteriormente se muestra la etapa de discriminación, en el cual se obtiene salidas de voltaje lógicas cuando las entradas de pulso superan el umbral que se configura en el discriminador

Finalmente se tiene la etapa de conteo y temporización mediante el cual se cuenta la cantidad de pulsos lógicos en un tiempo determinado.

#### **4.3.4 Ensamble de montaje**

Es la parte mecánica del sistema de medición de densidad, soporta al contenedor de fuente radiactiva por un lado y por el otro al detector, sus dimensiones varían de acuerdo al diámetro de tubería.

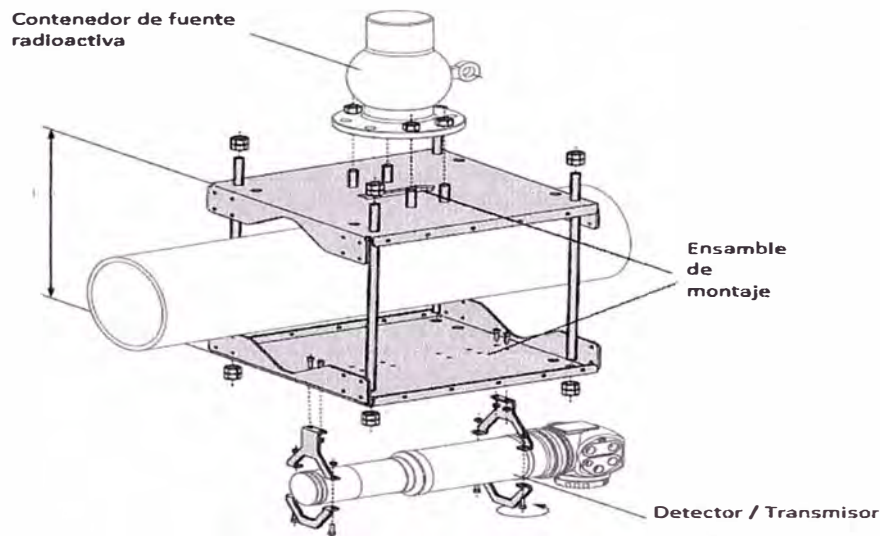


Fig 41: Emsamble de instalación

**4.3.5 Indicador de Medición.-** Este dispositivo se usa para visualizar los valores de densidad así como para realizar la configuración y calibración del medidor de densidad, a través de sus teclas.

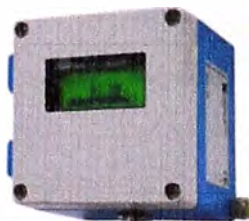


Fig 42: Indicador de proceso

#### 4.4 PRINCIPIOS DE SEGURIDAD RADIOLÓGICA

En vista que el densímetro materia de estudio tiene un componente peligroso como es la fuente radioactiva, se requiere dar unas pautas de protección radiológica cuya disciplina estudia los efectos de las dosis producidas por las radiaciones ionizantes y los procedimientos para proteger al personal que manipula estas fuentes.



#### 4.4.1 Reglas de Protección Radiológica

Las tres reglas fundamentales de protección para evitar los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes son los siguientes:

1. **Distancia:** Alejarse de la fuente de radiación disminuirá notablemente la tasa dosis [ $\mu\text{S/h}$ ], como regla se tiene que el valor de la dosis decrece con el cuadrado de la distancia del objeto a la fuente.
2. **Blindaje:** La tasa de dosis es atenuada por objetos que se encuentran entre la fuente y el objeto en función a la densidad del objeto, por ejemplo se puede usar una pared de concreto, láminas de plomo o simplemente agua.
3. **Tiempo:** Disminuir la duración de exposición a una fuente radiactiva disminuirá la tasa de dosis [ $\mu\text{S/h}$ ].

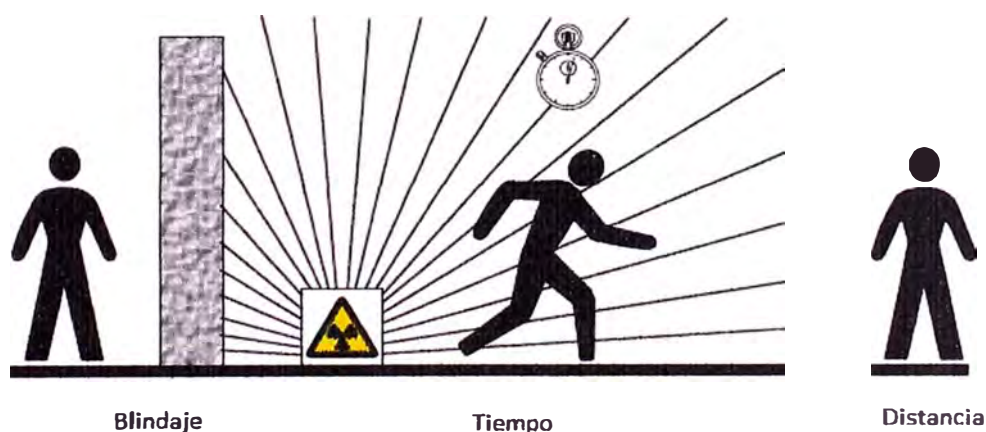


Fig 43: Protección radiológica

#### 4.4.2 Medida de Radiaciones Ionizantes

Los aparatos de detección y medida de radiaciones ionizantes destinados a protección radiológica son el detector y el dosímetro personal.

##### **Detectores de radiación**

Son instrumentos de lectura directa, generalmente portátiles, que indican la tasa de radiación, es decir la dosis por unidad de tiempo. Estos instrumentos son útiles para la medida de radioactividad ambiental o contaminación. La mayoría de estos medidores de radiación ionizante se basan en alguno de los fenómenos: ionización de gases, excitación por luminiscencia o detectores semiconductores.



Fig 44: Detector de radiación

##### **Dosímetros**

Son medidores de radiación diseñados para medir la radiación acumulada durante un periodo de tiempo y normalmente se usa para medir la dosis a que está expuesto el personal que trabaja, o que permanece en zonas en la que existe riesgo de radiación. De acuerdo con el principio de funcionamiento pueden ser: De cámara de ionización de película fotográfica o

termoluminiscencia. Estos últimos son los más utilizados, ya que permiten leer la dosis recibida y acumulada en un periodo largo de tiempo, normalmente un mes.



Fig 45: Dosímetro personal

## **CAPITULO V**

### **DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA**

#### **5.1 DIMENSIONAMIENTO DEL MEDIDOR DE DENSIDAD**

##### **5.1.1 Determinación de la actividad de la fuente**

Dado el siguiente sistema se tiene que determinar la actividad de la fuente radioactiva teniendo como datos de proceso:

$d_i$ : diámetro interno de la tubería

S: Espesor de la tubería

$\rho$ : Densidad mínima y máxima de la pulpa

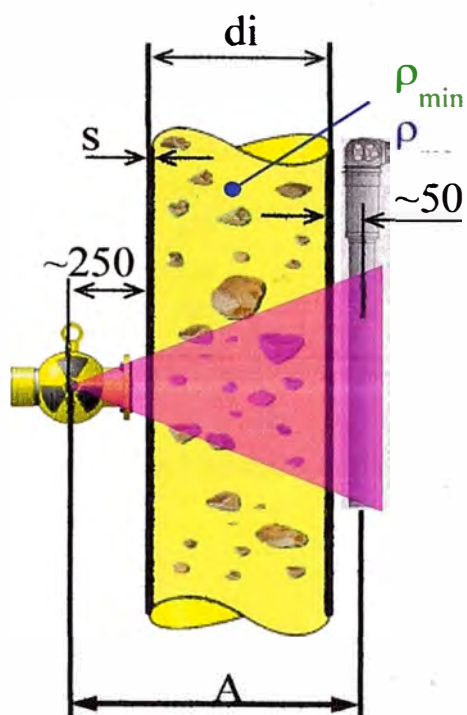


Fig 46: Sistema de medición

De la relación se tiene lo siguiente

$$P = \frac{A^2 \cdot H \cdot e^{-\mu \cdot d}}{\Gamma_H} \dots \dots \dots (3)$$

$$P = \frac{Fa \cdot Fi \cdot Fs}{K}$$

P: Actividad de la fuente [mCi]

Fa: Factor distancia fuente [m<sup>2</sup>]

Fs:  $e^{-\mu \cdot d}$  Atenuación

Fi: H tasa de dosis en el detector [ $\mu$ Sv/h]

K:  $\Gamma_H$  constante depende del isótopo de la fuente radiactiva

Fa =  $A^2 = (2 \cdot S + di + 0.25m + 0.05m)^2$

A: Distancia total entre fuente y detector

Tabla 3: Cuadro de valores

Isótopo	*Constante [K] uSv.m2/h.mCi	Longitud centellador [mm]	Tasa mínima de dosis	
			Fi [μSv/h]	Counts/s [C/s]
Cesio 137	3.29	200	0.5	1000
		400	0.25	1000
Co 60	14.06	200	2	2000
		400	1	2000

\*Valores tomados de la publicación Exposure rate constants and lead shielding values

$$F_s = e^{\mu \cdot deq}$$

$\mu$  : Factor de atenuación del acero

Factor	isotopo	Valor (1/mm)
$\mu$	Cesio 137	0.048
	Co 60	0.034

deq: Distancia equivalente para el acero (mm)

$$deq = 5 + 2S \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{st}} + di \cdot \frac{\rho_i}{\rho_{st}}$$

$\rho_s$  : Densidad de la tubería

$\rho_i$  : Densidad máxima de la pulpa

$\rho_{min}$  : Densidad mínima de la pulpa

$\rho_{st}$  : Densidad del acero = 7890kg/m3

Se adiciona 5mm de espesor por la plancha de acero que tiene el accesorio de montaje.

### **Ejemplo de aplicación**

Se desea medir la densidad de pulpa que varia entre  $1000$  a  $2300\text{kg/m}^3$  en una tuberia de acero al carboo de 16 in, Sch 20 (espesor de tuberia 7.9mm) asi mismo la tuberia esta revestida en su interior con goma natural de 12.5mm.

¿Calcular la actividad de la fuente a usar para este caso?

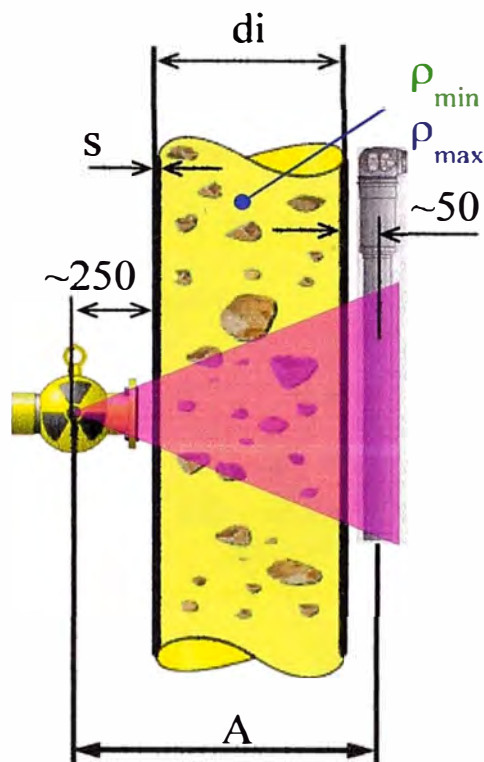


Fig 47: Sistema de medicion

$$F_a = (2 \times 7.9 + 2 \times 12.5 + 365.6 + 250 + 50)^2 = 0.5 \text{ m}^2$$

$$d_{eq} = 5 + 2 \times 7.9 + 2 \times 12.5 \times 1.4 / 7.89 + 365.6 \times 2.3 / 7.89 = 131.78 \text{ mm}$$

$$F_s = 558.53$$

Se fija un valor mínimo de tasa de dosis de modo que el detector pueda detectar, esto cuando el valor de densidad alcanza su máximo valor.

$$F_i = 0.25 \text{ } \mu\text{Sv/h}$$

$$P = 21.22 \text{ mCi}$$

Dado que el valor de 21.22 mCi no es comercial se selecciona un valor mayor por ejemplo 30 o 50 mCi de cesio



### 5.1.2 Determinación del espesor del contenedor

El espesor del contenedor se diseña en base a la tasa límite de dosis  $3 \mu\text{Sv/h}$  (Europa) y  $7 \mu\text{Sv/h}$  ( resto del mundo ) por lo tanto este valor debe ser capaz de reducir la tasa de dosis en las inmediaciones del contenedor a estos valores, por seguridad del personal.

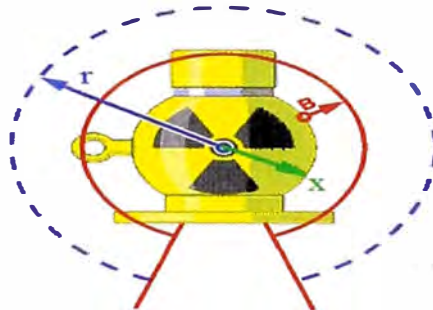


Fig 48: Contenedor de fuente radiactiva

Dada la siguiente ecuación

$$P = \frac{Fa.Fs.Fi}{K}$$

Despejando se tiene

$$Fi = \frac{K.P}{Fa.Fs} \Rightarrow$$

$$Fa = r^2 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$Fs = e^{1000\mu.X}$$

$$Fi = \frac{K.P}{r^2.e^{1000\mu.X}} \dots\dots\dots(4)$$

Fi: Tasa de dosis (  $\mu\text{Sv/h}$  )

X: espesor de plomo en metros

r : Distancia de control de seguridad al cual la tasa de dosis no debe superar los 3  $\mu\text{Sv/h}$  o 7  $\mu\text{Sv/h}$  dependiendo del lugar de utilización de la fuente.

Para el ejemplo anterior

Cuando  $r = X$  se puede hallar el espesor de acero necesario para atenuar la radiación de la fuente de cesio de actividad 30mCi a un valor permisible de 3 $\mu\text{Sv/h}$

Reemplazando en la ecuación 4 se tiene

$$F_i = 3\mu\text{Sv/h}$$

$$F_a = X^2$$

$$\mu = 0.048$$

$$P = 30\text{mCi}$$

$$X = 15.144 \text{ cm}$$

## 5.2 ESPECIFICACIONES DEL CENTELLADOR

Para la correcta selección del tubo centellador se debe tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Eficiencia de centelleo.- Es decir alto grado de conversión entre la radiación gamma incidente y la cantidad de luz producida
- Relación lineal.- Entre la energía depositada y la luz producida
- Tiempo de decaimiento.- La luminiscencia inducida en el centellador por la radiación debe ser bien corta en tiempo.
- Índice de refracción.- Debe tener el índice cercano al vidrio para permitir un eficiente acoplamiento del centellador al fotomultiplicador

- Costo de fabricación y versatilidad

Para el medidor de densidad propuesto el material que mejor cumple los requisitos es el poliviniltolueno, el cual es un centellador orgánico de plástico. Este material es sencillo de fabricar y se le puede mecanizar en la forma y tamaño deseado a un excelente costo en comparación con los otros tipos de centelladores, lo cual lo hace idóneo para aplicaciones de medición de densidad por lo que se requiere un centellador de longitud variable conforme al tamaño de tubería y rango de densidad. Así mismo por su carácter de centellador orgánico su tiempo de decaimiento es uno de los más bajos menor a 20 ns, pero la desventaja es la eficiencia de centelleo pues estos producen menor cantidad de luz que los centelladores inorgánicos.

Tabla 4: Cuadro de especificaciones centellador

<b>ESPECIFICACIONES TECNICAS CENTELLADOR EJ-200</b>	
<b>Manufacturer</b>	<b>Eljen Technology</b>
<b>Polymer Base</b>	<b>Polyvinyltoluene ( PVT )</b>
<b>Light Output, % Anthracene</b>	64
<b>Scintillation Efficiency, photons/1 MeV e-</b>	10000
<b>Wavelength of Max. Emission, nm</b>	425
<b>Rise Time, ns</b>	0.9
<b>Decay Time, ns</b>	2.1
<b>Pulse Width, FWHM, ns</b>	~ 2.5
<b>No. of H Atoms per cm<sup>3</sup>, x 10<sup>22</sup></b>	5.17
<b>No. of C Atoms per cm<sup>3</sup>, x 10<sup>22</sup></b>	4.69
<b>No. of Electrons per cm<sup>3</sup>, x 10<sup>23</sup></b>	3.33
<b>Density, g/cc:</b>	10.23
<b>Refractive Index</b>	1.58
<b>Vapor Pressure</b>	Is vacuum-compatible
<b>Coefficient of Linear Expansion</b>	7.8 x 10 <sup>-5</sup> below +67°C



Fig 49: Material PVT

### 5.3 ESPECIFICACIONES DEL FOTOMULTIPLICADOR

Para la elección del fotomultiplicador se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Eficiencia cuántica del fotocátodo.- Parámetro que está en función de la longitud de onda de la luz incidente, para nuestro caso como el centellador de polivinilo o PVT genera una luz con una longitud de onda máxima de 423 nm, se debe seleccionar el fotomultiplicador con fotocátodo de mejor eficiencia el cual viene a ser el material Bialkali ver gráfico

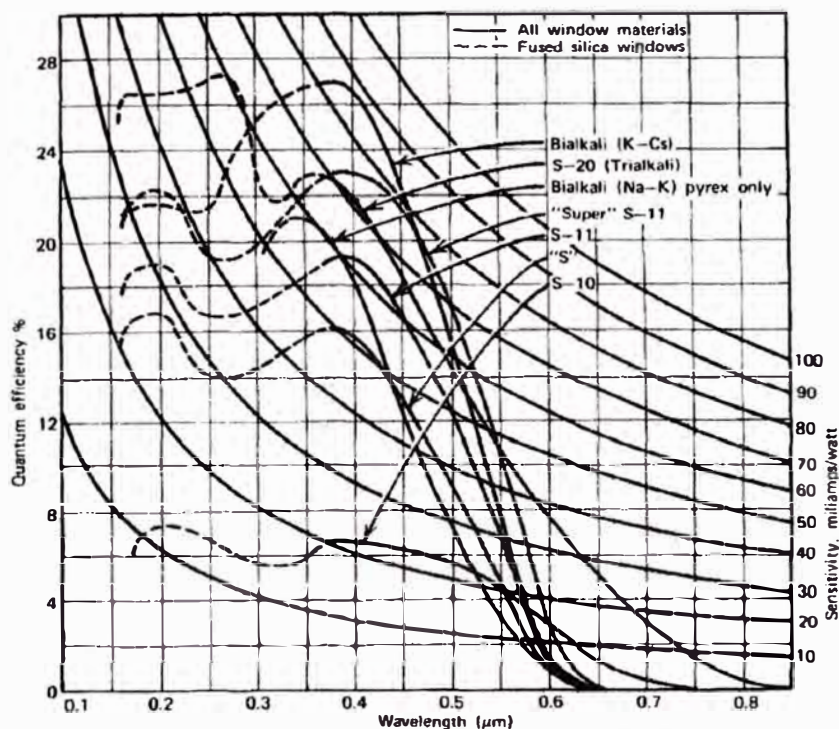


Fig 50: Curva de eficiencia

$$QE = \frac{\text{Numero de fotoelectrones emitidos}}{\text{Numero de fotones incidentes}}$$

- Corriente oscura (pA).- Normalmente especificada en salida de corriente del ánodo cuando al fotocátodo no le llega nada de luz.
- Sensibilidad luminosa total ( $\mu\text{A/lm}$ ).-Definida como la tasa de corriente medida en el ánodo entre la cantidad luz (lumen) cuando una fuente de tungsteno incide sobre el fotocátodo a determinada temperatura
- Sensibilidad luminosa en el cátodo( $\mu\text{A/lm}$ ).-Definida como la tasa de corriente medida a la salida del fotocátodo entre la cantidad de luz (lumen) cuando una fuente de tungsteno incide sobre el fotocátodo a determinada temperatura

- Sensibilidad radiante total (mA/W).-Se define como la tasa de corriente en el ánodo entre la energía radiante a determinada longitud de onda incidente el fotocátodo
- Sensibilidad radiante en el fotocátodo (mA/W).-Se define como la tasa de corriente en el fotocátodo entre la energía radiante a determinada longitud de onda incidente en el fotocátodo
- Tiempo de pulso incremental en el ánodo (ns).-Definido como el tiempo tomado por la salida de pulso en alcanzar del 10 al 90% del pico, cuando el fotocátodo es iluminado por un flash de luz de muy corta duración.
- Ancho de pulso en el ánodo.- Definido como el periodo de salida de pulso medido a mitad de la máxima amplitud, cuando el fotocátodo es iluminado por un flash de luz de muy corta duración.
- Ganancia.- Dependiendo de la cantidad de dinodos y material de estos se puede obtiene una ganancia total.

Tabla 5 Cuadro de especificaciones fotomultiplicador

<b>ESPECIFICACIONES FOTOMULTIPLICADOR 9266QKSB</b>	
<b>Manufacturer</b>	ET Enterprises Ltd
<b>Photocathode</b>	
Material	bialkali ( SbKCs )
Active diameter	48mm
Quantum efficiency at peak	30%
Luminous sensitivity	70 $\mu$ A/lm
<b>Dynodes</b>	
Material	SbCs
<b>Windows</b>	
Material	Quartz (fused silica )
Spectral range	160 - 630 nm
Refractive index	1.46
<b>Anode sensitivity in divider</b>	

Nominal anode sensitivity	50 A/lm
Max. rated anode sensitivity	500 A/lm
Overall V for nominal A/lm	850 -1100 V
Overall V for max. rated A/lm	1150 V
Gain at nominal A/lm	$0.6 \times 10^6$
<b>Dark current at 20 °C</b>	
dc at nominal A/lm	1.5 - 0.3 nA
dc at max. rated A/lm	3 nA
Dark count rate	$300 \text{ S}^{-1}$
<b>Pulsed linearity (-5% deviation)</b>	
Divider	30 mA
<b>Magnetic field sensitivity</b>	
the field for which the output decreases by 50 % most sensitive direction	$1.3 \times 10^{-4} \text{ T}$
Weight	100 g
<b>Maximum ratings</b>	
Anode current	100 $\mu\text{A}$
Cathode current	100 nA
Gain	$7 \times 10^6$
Sensitivity	500 A/lm
Tempertaure	-30 a 60 °C
Ambient pressure (absolute)	202 KPa
Voltage (photocathode-anode)	2000 V
Voltage (photocathode-dynode 1)	300 V
Voltage (dynode-dynode)	300V

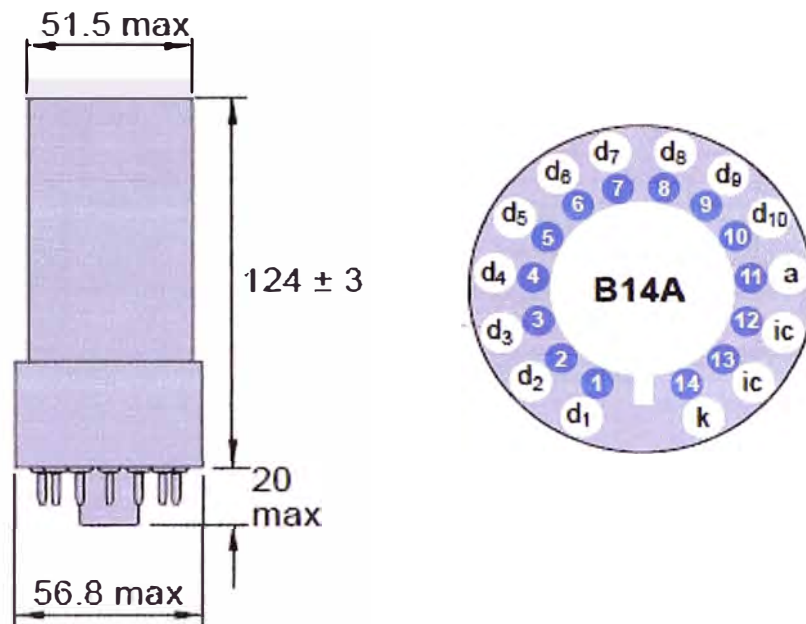


Fig 51: Modelo de fotomultiplicador

#### 5.4 ESPECIFICACIONES DE LA ELECTRÓNICA

El circuito electrónico es la que se encarga de procesar las señales que el fotomultiplicador envía para luego transformarlas en señales de pulso estándar los cuales representan la densidad del fluido a medir.



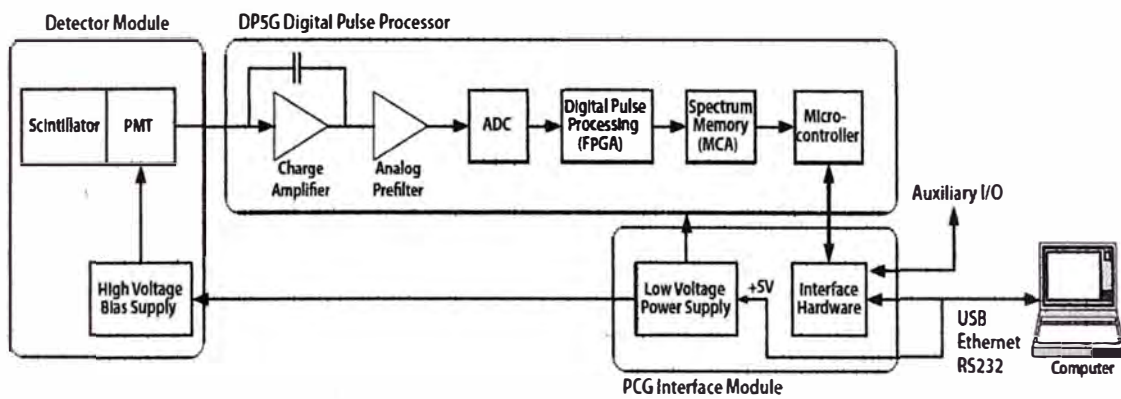


Fig 52: Diagrama de circuito DP5G

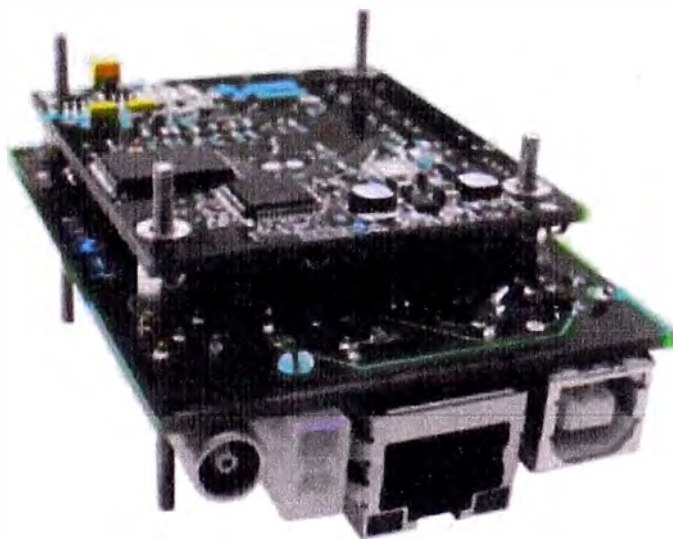


Fig 53: Circuito integrado DP5G

Tabla 6: Cuadro de especificaciones electrónica

<b>ESPECIFICACIONES PROCESADOR DE PULSO DIGITAL DP5G</b>	
<b>Manufacturer</b>	Amptek Inc
<b>Gain</b>	Combination of coarse and fine gain yields overall gain continuously adjustable from x1.2 to x8.1.
<b>Coarse Gain</b>	1.6, 2.6, 4.1, 6.5
<b>Fine Gain</b>	Adjustable between 0.75 and 1.25.
<b>ADC Clock Rate</b>	20 or 80 MHz, 12 bit ADC
<b>Pulse Shape - Trapezoidal</b>	Semi-Gaussian amplifier with shaping time $\tau$ has a peaking time of $2.2 \tau$ and is comparable in performance with the trapezoidal shape of the same peaking time.
<b>Peaking Times</b>	Software selectable peaking times between 0.05 and 102 $\mu$ s, corresponding to semi-Gaussian shaping times of 0.8 to 45 $\mu$ s.
<b>Flat Top Times</b>	63 software selectable values for each peaking time (depends on the peaking time), >0.05 $\mu$ s.
<b>Max Count Rate</b>	With a peaking time of 0.2 $\mu$ s, 4 MHz periodic signal can be acquired.
<b>Dead Time Per Pulse</b>	1.05x peaking time. No conversion time.
<b>Fast Channel Pulse Pair Resolving Time</b>	60, 120 ns @ 80 MHz 240, 480 ns @ 20 MHz
<b>Pile-Up Reject</b>	Pulses separated by more than the fast channel resolving time, and less than 1.05x peaking time are rejected.
<b>Baseline Restoration - Asymmetric</b>	16 software selectable slew rate settings.
<b>MCA Performance</b>	
<b>Number of channels</b>	Commandable to 256, 512, 1024, 2048, 4096, or 8192 channels, MCA or MCS.
<b>Bytes per channel</b>	3 bytes (24 bits), 16.7 M counts.
<b>Preset Acquisition Time</b>	10 ms to 466 days.
<b>Data Transfer Time</b>	USB: 1k channels in 6 ms RS-232: 280 ms
<b>Conversion Time</b>	None
<b>Presets</b>	Time, total counts, counts in an ROI, counts in a channel.
<b>MCS Timebase</b>	10 ms/channel to 300 s/channel
<b>External MCA Controls - Gate Input</b>	Pulses accepted only when gated on by external logic. Input can be active high or active low.
<b>Counters</b>	Slow channel events accepted by MCA. Incoming counts (fast channel counts above threshold), event rejected by selection logic, and external event counter.
<b>Hardware</b>	

Microprocessor	Silicon Labs 8051F340 8051-compatible core.
External Memory	512 kb low-power SRAM
Firmware	Signal processing is programmed via firmware, can be upgraded in the field.
<b>Communications</b>	
RS-232	Standard serial interface @ 115 Kbaud.
USB	Standard 2.0 full speed (12 Mbps).
Ethernet	Standard 10base-T. (UDP)
<b>Connections</b>	
Analog Input	The output from a PMT, the anode, is connected to the analog input of the DP5G. The first stage of the DP5G is a charge amplifier with a conversion gain of 0.15 mV/pC (CF=6.8 nF). The input connector is a MMCX jack.
Power	+3.3 VDC.
DAC Output	Used in oscilloscope mode to view the shaped pulse and other diagnostic signals. Range: 0 to 1 V.
<b>Power</b>	
+3.3 V	20 MHz clock: 180 mA typical 80 MHz clock: 240 mA typical
Input Range	3.3 ± 0.1V

## CONCLUSIONES

1. El medidor de densidad propuesto tiene mayores beneficios respecto del clásico sistema de medición por extracción de muestras, por ejemplo no requiere de personal dedicado en el lugar donde se realiza la medición, no interrumpe el proceso, no hay riesgo de accidente para los operadores y permite visualización de la variable de densidad desde una sala de control.
2. Las relaciones utilizadas para el cálculo de actividad de la fuente radioactiva como para el espesor de contenedor son las mismas que usan los proveedores de densímetros nucleares como es el caso de Endress+Hauser.
3. El material propuesto para el tubo centellador de plástico PVT es el más apropiado en la fabricación de medidores nucleares de densidad, dado que se tiene tuberías de diferentes diámetros por lo tanto se requiere un material que se puede maquinar de distintos tamaños a un bajo precio.
4. El mantenimiento de este tipo de medidores es mínimo en comparación con los sistemas de extracción de muestras, al no tener partes en contacto con el fluido y no interrumpir en ningún momento el proceso no ocasiona gastos en piezas de reemplazo y horas hombre por parte de los operadores.

## RECOMENDACIONES

1. Dado que el sistema de medición tiene una fuente radiactiva, es recomendable que el personal que realiza cualquier trabajo con el medidor nuclear tenga conocimiento y sepa seguir las reglas de seguridad radiológica basadas en tiempo, blindaje y distancia durante la exposición a la fuente radioactiva.
2. Es recomendable realizar una verificación periódica, es decir una comparación de la densidad medida del instrumento con un patrón que puede ser de laboratorio, este periodo depende de las condiciones de proceso pero generalmente son meses de tal modo que si existe alguna desviación en la medición realizar el ajuste o re calibración respectiva en el equipo. Así mismo precisar que la calibración se realiza durante la puesta en marcha del equipo y generalmente se dan dos puntos una calibración con agua y otra con la densidad de operación.
3. En caso se requiera una mejor precisión de medición de densidad es recomendable usar un centellador de cristal de Yoduro de Sodio NAI en lugar de PVT polivil tolueno, pero el costo del cristal es mucho mayor lo que lo hace no adecuado para tuberías de gran diámetro donde se requiere que el centellador tenga mayor área de recepción de radiación.

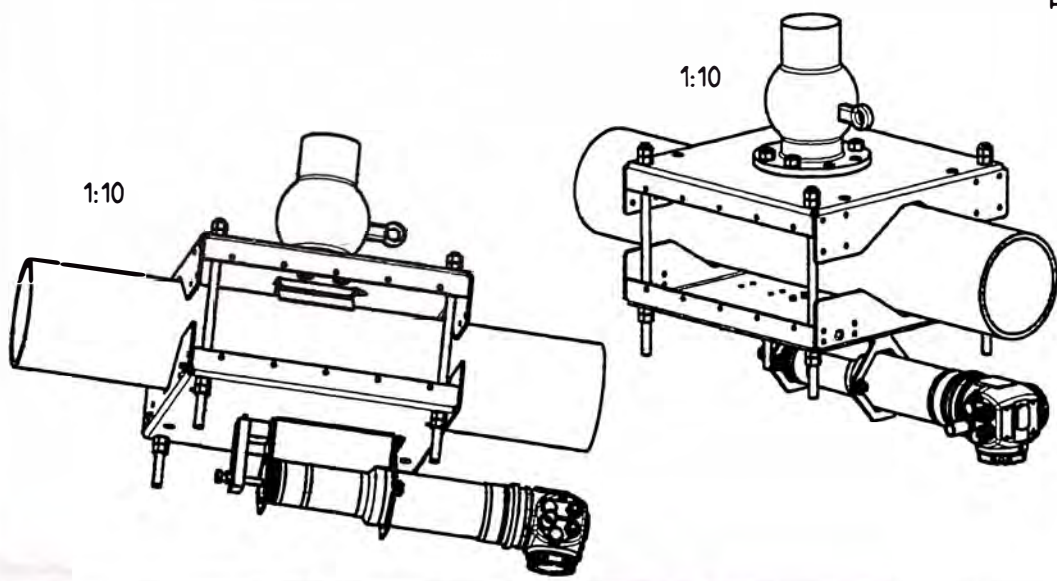
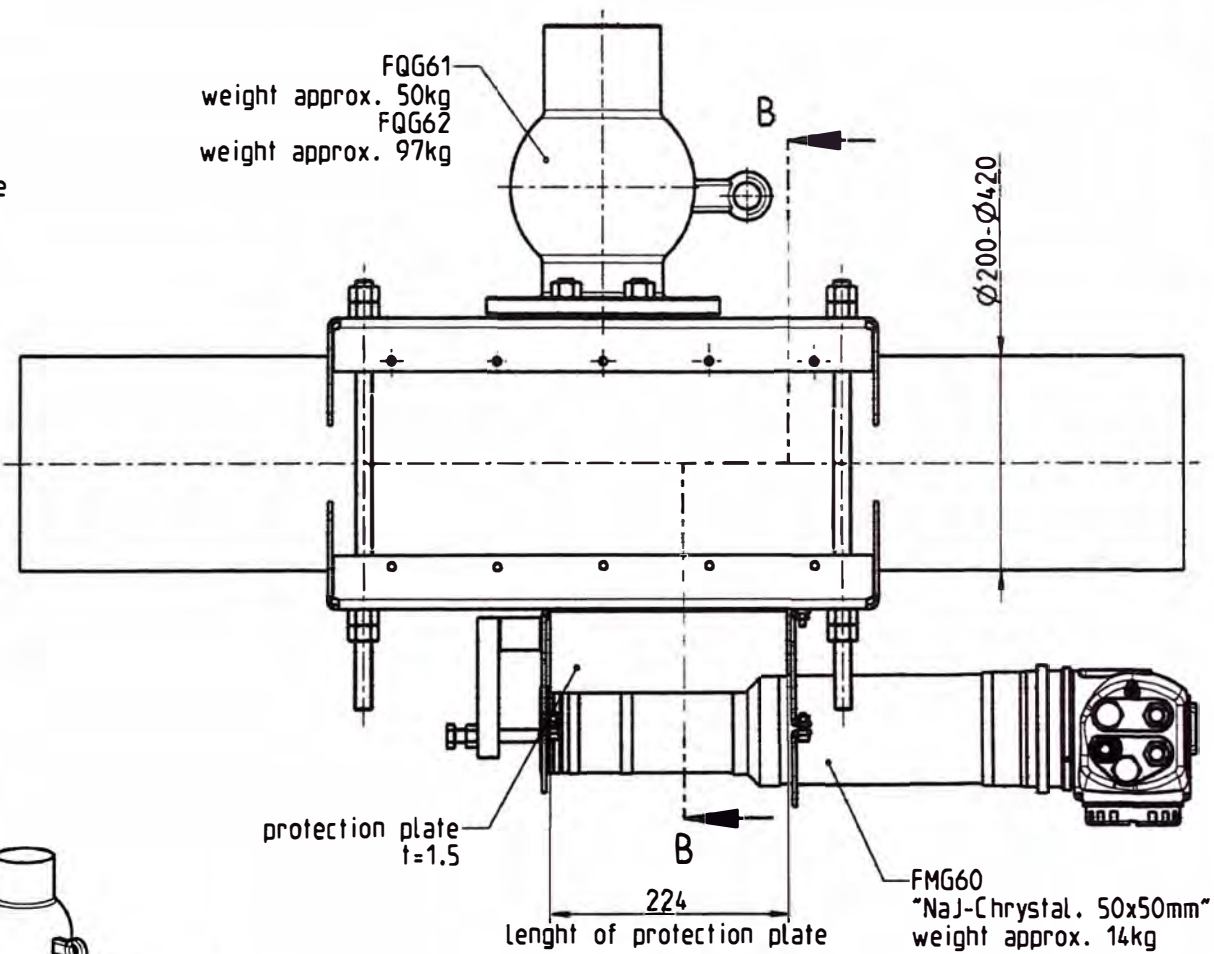
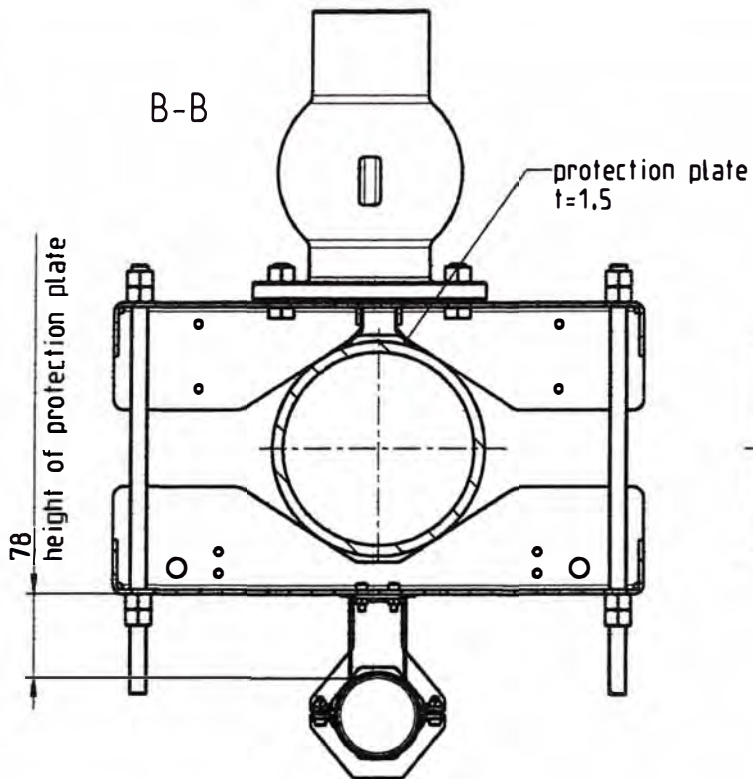
## **BIBLIOGRAFÍA**



1. Radiation Detection and Measurement, Fourth Edition , Glenn F. Knoll
2. SME Mining Engineering Handbook, Thrid Edition edited by Peter Darling
3. The Sizing and Selection of Hidrocyclones by Richard A. Arterburn, Krebs Engineers, FLSmidth
4. Handbook Understanding Photomultipliers, ET Enterprises Limited
5. Technical Information Gamapilot FMG60, Endress + Hauser Instrument International AG
6. Gamma Fundamentals, e-learning ENDRESS+HAUSER
7. Technical Information DP5G, Digital Pulse Processor for Scintillation Detectors, Amptek Inc.
8. Technical information EJ-200 Organic Scintillator, Eljen Technology
9. Paper Expose Rate Constants and Lead Shielding values for over 1100 Radionuclides, David S. Smith and Michael G. Stabin
10. Product information, Industrial Radiation Sources, Eckert & Ziegler

11. Introduction to Health and Physics, Herman Cember and Thomas E.  
Johnson

## **PLANOS**

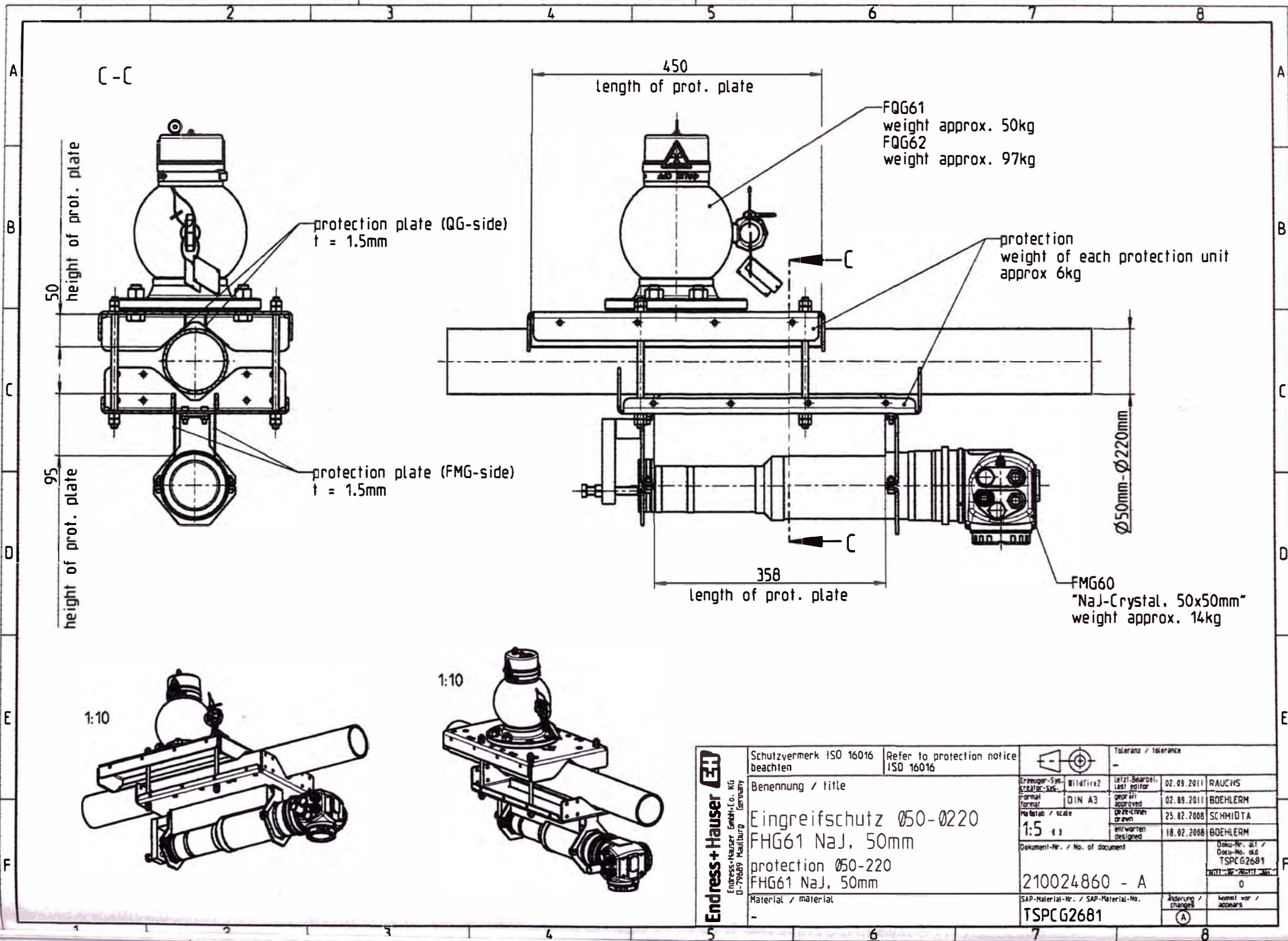




 Endress+Hauser GmbH & Co. KG D-79189 Maulburg Germany	Schutzvermerk ISO 16016 beachten	Refer to protection notice ISO 16016	 Toleranz / tolerance <b>ISO2768-mK</b>
	Benennung / title BV kpl. 200-420 FHG61 NaJ.50 ass. compl. 200-420 FHG61 NaJ.50		Erzeuger-Sys. Hersteller-Info UIN A3 Material / scale <b>1:5</b>
	Material / material -		SAP-Material-Nr. / SAP-Material-No. <b>TSPCG4651</b>
	Dokument-Nr. / No. of document <b>210104866 - -</b>		Dokument-Nr. / No. of document 18.01.2012 18.01.2012 16.01.2011 18.01.2012 16.01.2011
	MAASV BUEMLKMP MAASV MAASV		MAASV MAASV MAASV

METRICAL TOLERANCE ING  
 DIM ISO 2001  
 UNITS TEXTURE  
 DIM ISO 1302  
 MET OF WORKING PARTS  
 DIM ISO 13715

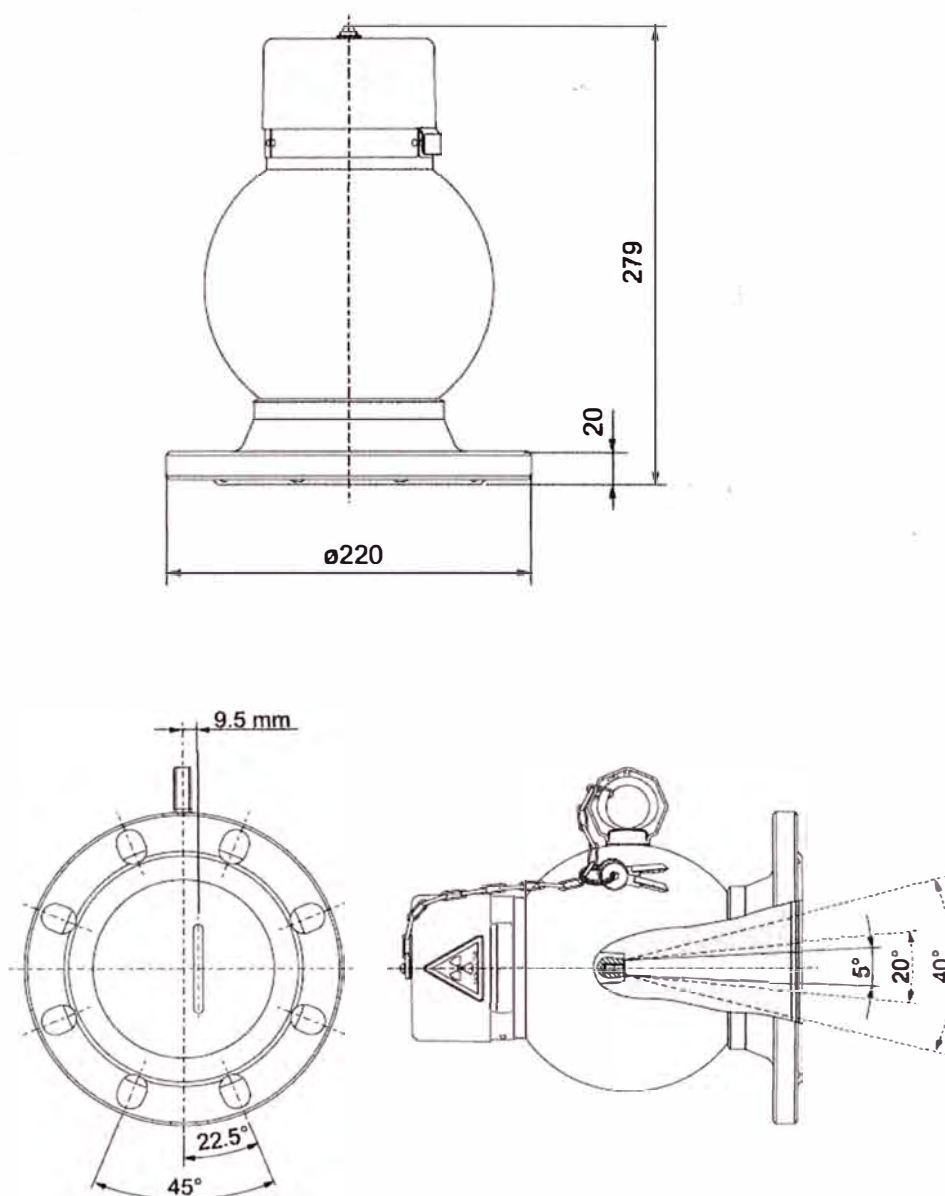
METEORICAL TOLERANCE: DIN ISO 1502  
 DIMENSIONS: DIN ISO 1302  
 FITS OF WORKING PARTS: DIN ISO 13715



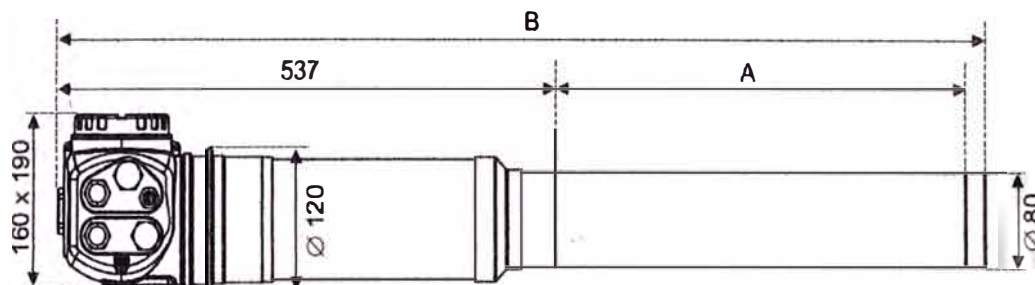
 <b>Endress+Hauser</b> GmbH & Co. KG D-73684 Heilbrunn Germany	Schutzvermerk ISO 16016 beachten	Refer to protection notice ISO 16016	Toleranz / tolerance -		
	Benennung / title Eingreifschutz Ø50-Ø220 FHG61 NaJ, 50mm protection Ø50-220 FHG61 NaJ, 50mm		Erzeuger-Sym. CREATOC-Sys.	Wildfire2 last editor 02.09.2011	RAUCHS
			Format DIN A3	approved 02.09.2011	BOEHLERM
			Maßstab / scale 1:5	approved 25.02.2008	SCHMIDTA
			Material / material -	verantwortl. designed 18.02.2008	BOEHLERM
			Dokument-Nr. / No. of document 210024860 - A	Dok.-Nr. alt / Docu-No. old TSPCG2681	
			SAP-Material-Nr. / SAP-Material-No. TSPCG2681	Änderung / changes (A)	
				kommt vor / appears	

## APÉNDICE

## 1. Dimensiones contenedor de fuente radioactiva

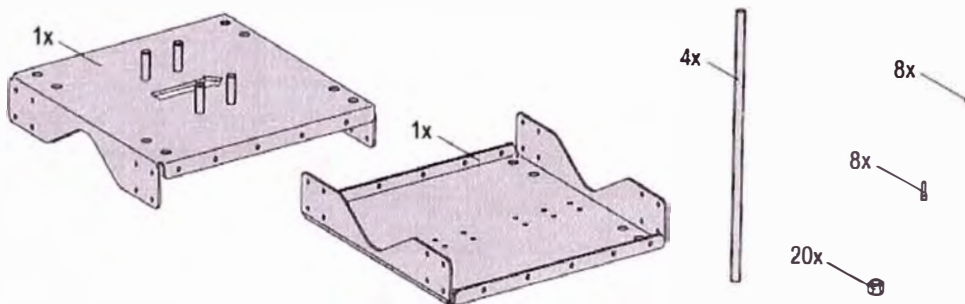
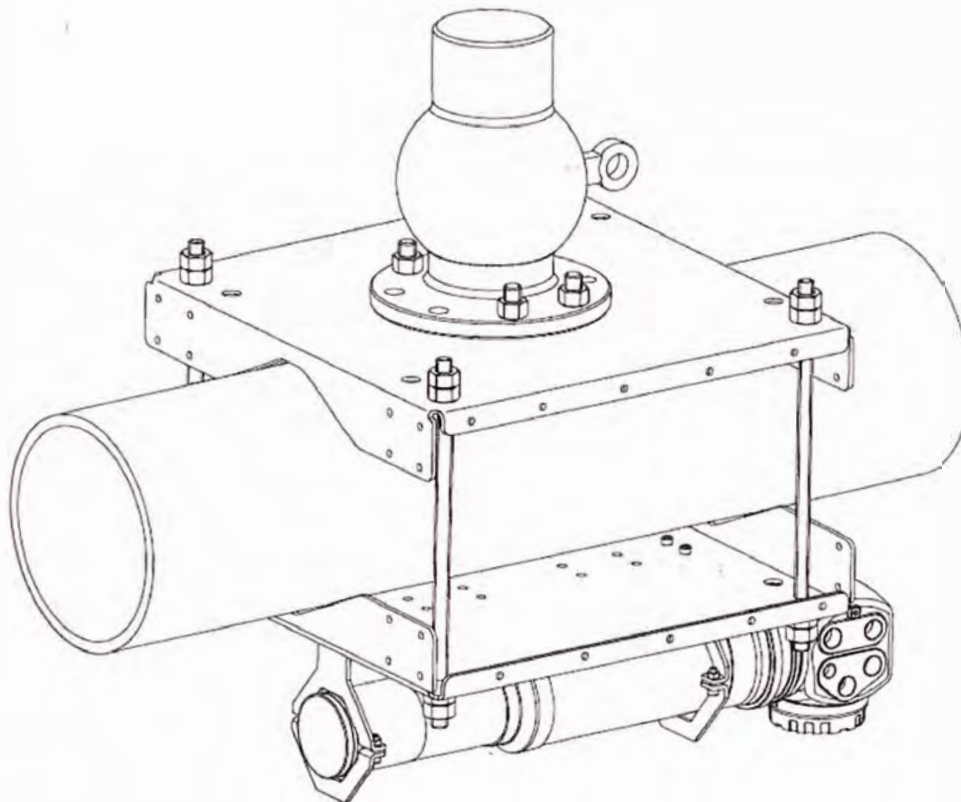


## 2. Dimensiones detector



Type	Measuring length A [mm]		
		Overall length B [mm]	Weight [kg]
PVT	200	780	15
PVT	400	980	16
PVT	800	1380	20
PVT	1200	1780	24
PVT	1600	2180	28
PVT	2000	2580	31

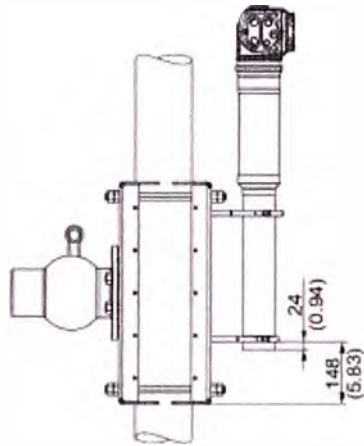
### 3. Dimensiones ensamble de montaje



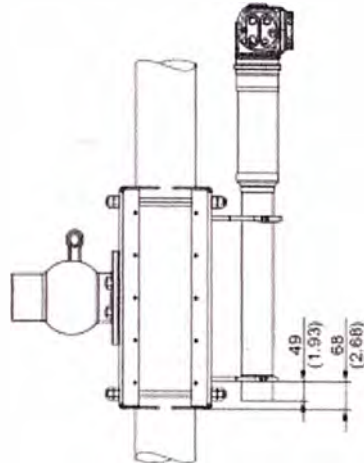
Je nach Ausführung des FMG60, siehe KA258F / depending on the version of the FMG60, see KA258F



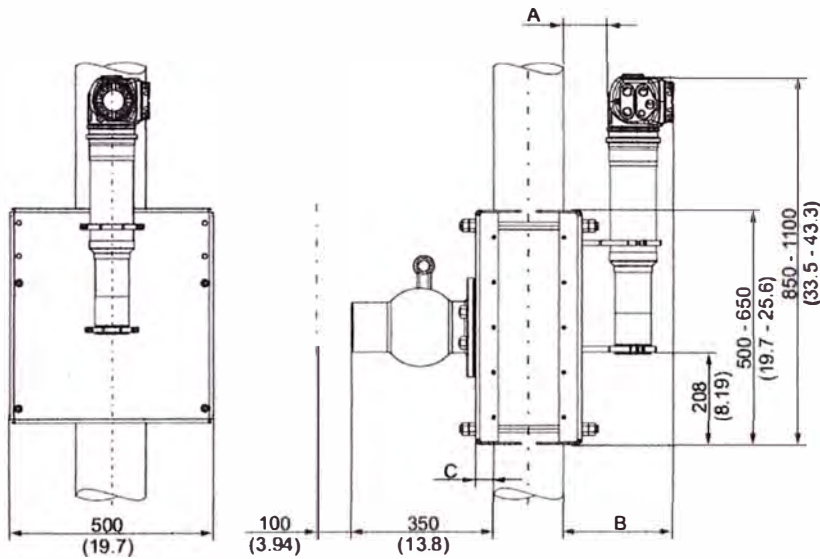
Szintillator 200 mm /  
Scintillator 200 mm



Szintillator 400 mm /  
Scintillator 400 mm



Hauptabmessungen /  
Main dimension

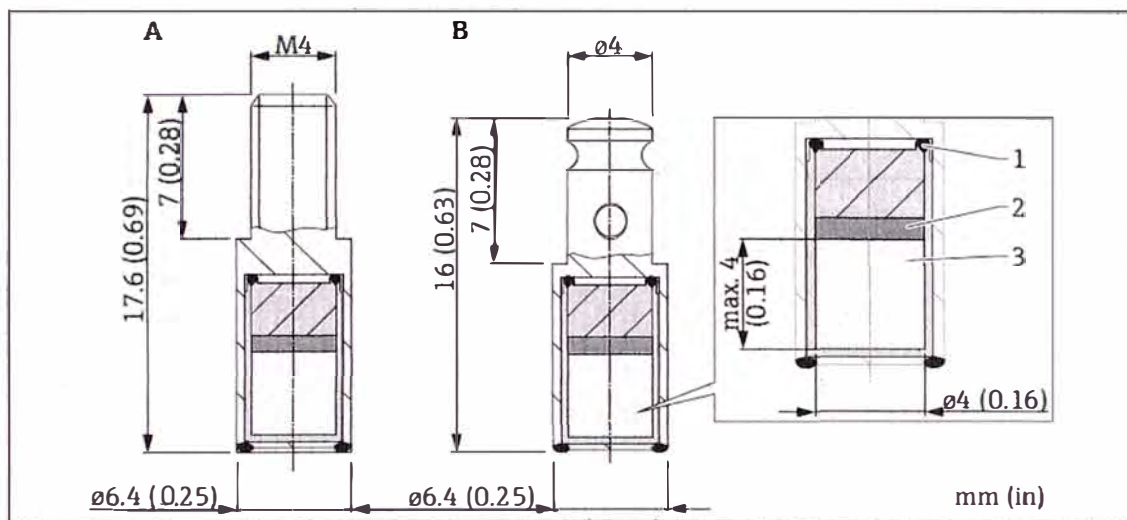


Rohr / pipe Ø	A	B	C
200 (7.87)	95 (3.74)	255 (10.0)	35 (1.38)
250 (9.84)	100 (3.94)	260 (10.2)	40 (1.57)
300 (11.8)	100 (3.94)	260 (10.2)	45 (1.77)
350 (13.8)	110 (4.33)	270 (10.6)	50 (1.97)
400 (15.7)	110 (4.33)	270 (10.6)	55 (2.17)

Abmessungen in mm (inch) /  
dimensions in mm (inch)

Werkstoffe:  
Schrauben und Muttern: A4,  
alle anderen Bauteile: 316L (1.4404) /  
Materials:  
screws and nuts: A4,  
all other parts: 316L (1.4404)

#### 4. Dimensiones fuente encapsulamiento fuente radiactiva



##### Examples

A VZ1508-001 (CDC.P4), VZ1486-001 (CKC.P4)

B VZ79-001 (CDC.P4), VZ64-001 (CKC.P4)

1 Argon-arc welded  
2 Void volume filled with stainless steel spacer  
3  $^{60}\text{Co}$  as metal or  $^{137}\text{Cs}$  as ceramic

- Weight: approx. 0.005 kg
- Encapsulation: double-walled, welded stainless steel
- Performance class typically C66646 to ISO 2919
- Protection: IP68