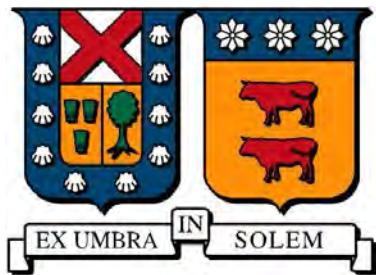


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



**Diseño conceptual de un densímetro nuclear utilizando
dos receptores para medir coincidencias en un ducto de
concentrado de cobre**

Matías Patricio Liz Vargas

**TRABAJO DE TITULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
INDUSTRIAL**

PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. Franco Perazzo

PROFESOR CORRESPONDELENTE: Dr. Ing. Sheila Lascano

Octubre - 2015

*A mis padres
por enseñarme lo que es la perseverancia*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a

Resumen

En la actualidad, los equipos de medidores de densidad

Keywords: densímetro.

Abstract

Currently, densitometer on Chile are not regular in use.

Keywords: densitometer.

Índice general

1	Introducción	1
2	Objetivos generales y específicos	2
3	Marco Teórico	3
3.1	Identificación del problema del diseño	3
3.2	Análisis de soluciones existentes	4
3.3	Descripción del proceso del diseño	4
3.4	Diseño conceptual	5
3.5	Definición del problema	5
4	Estado del arte	6
4.1	Patentes de invención	6
4.2	Investigación especializada a la ciencia del densímetro	9
4.2.1	¿Qué es un evento?	9
4.2.2	Dispersión de la radiación Gamma	10
4.2.3	Medición de la densidad	12
4.2.4	¿Qué es la atenuación?	13
4.2.5	Dosimetría radiactiva y sus riesgos a la salud	14
4.2.6	Frecuencia de eventos	15
5	Etapas del Diseño Conceptual	17
5.1	Listado de atributos	17
5.2	Objetivos, restricciones y funciones	18
5.3	Categorización de objetivos	19
5.4	Jerarquización de objetivos	20
5.5	Listas de objetivos argumentada	21

5.6	Lista de objetivos con pesos ponderados	22
5.7	Análisis funcional	23
5.7.1	Modelo de caja negra densímetro doble	23
5.7.2	Modelo de caja transparente densímetro doble	24
5.8	Análisis de competidores	25
5.8.1	Principales competidores o sustitutos	25
5.8.2	Benchmarking por objetivos	26
5.9	Lista de requerimientos	28
5.10	Matriz requerimientos-objetivos	29
5.11	Despliegue de la función de casa de la calidad(QFD)	30
5.12	Resolución de contradicciones de los requerimientos	31
5.13	Generación de conceptos	32
5.13.1	Análisis de patentes por función	32
5.13.2	Benchmarking por función	33
5.13.3	Brainstorming	34
5.13.4	Carta Morfológica	35
5.13.5	Arquitectura	35
5.13.6	Layout	36
6	Diseño de Realización (o Diseño Básico)	37
6.1	¿Qué es un detector gamma?	37
6.1.1	Como funciona un densímetro común	38
6.1.2	Como funciona un densímetro con etiquetador	39
6.1.3	Como funciona el densímetro doble	41
6.1.4	Modelo de control de flujo de Radiación	44
7	Diseño Detallado	46
7.1	Definición de componentes	46
7.1.1	Isótopo o Fuente Radioactiva	46
7.1.2	Cristal Centelleador	48
7.1.3	Tubo Fotomultiplicador	49
7.1.4	Mu-Metal	50
7.1.5	Colimador	51

8 Diseño de Sub-función: Diseño mecánico conceptual Densímetro con Etiquetador	52
8.1 Diseño de sub-función: Diseño de densímetro común o comercial	53
8.1.1 Análisis Densímetro Systec Modelo SS200	54
8.1.2 Estudio de medidas de densímetro Systec	55
8.1.3 Tipo de abrazadera	56
8.1.4 Tipo de alineación	57
8.2 Diseño de sub-función: Diseño de densímetro con etiquetador	57
8.2.1 Estudio de diseño conceptual de Densímetro con Etiquetador	59
8.2.2 Estudio de cuerpo o abrazaderas	60
8.2.3 Estudio de Etiquetador	61
8.2.4 Ángulos sólidos de colimador etiquetador	63
8.2.5 Modelo de atenuación de plomo	67
8.2.6 Estudio soldadura en etiquetador	70
8.2.7 Estudio de abrazaderas del etiquetador	79
8.2.8 Resultados de simulaciones en Ansys para pernos M10, clase 9.8	84
8.2.9 Resultados de simulaciones en Ansys para pernos M12, grado 9.8	87
8.2.10 Análisis de espárrago M10, clase inferior a 4.6	90
8.2.11 Análisis estático de fuerzas	96
8.3 Diseño de sub-función: Re-diseño de abrazaderas	103
8.4 Diseño de sub-función: Diseño de Litodensitometro	113
9 Conclusiones	116
A Norma ISO 2919:2012	117
B Norma Atex - Protección de explosiones	118
C Los requerimientos ATEX	119
C.1 ¿Cómo se relaciona el Litodensitometro con la norma ATEX?	120
D Protección IP 65	121
E Composición del flujo de concentrado de cobre	122

Índice de Tablas

4.1	Tabla de patentes relacionadas con las partes del densímetro	7
5.1	Jerarquización de objetivos	20
5.2	Listas de objetivos argumentada	21
5.3	Lista de objetivos con pesos ponderados	22
5.4	Principales competidores o sustitutos	25
5.5	Benchmarking de equipos similares	27
5.6	Lista de requerimientos	28
5.7	Principales competidores o sustitutos	31
5.8	Análisis de patentes por función	32
5.9	Análisis de competidores por función	33
5.10	Principales competidores o sustitutos	35
7.1	Distintos tipos de uso industrial para radioisótopos	47
7.2	Ejemplos de cristales centelleadores y sus eficiencias	48
8.1	Parámetros densímetro comercial	53
8.2	Parámetros mecánicos densímetro Systec	54
8.3	Medidas generales densímetro Systec	56
8.4	Valores de diseño para estructuras de acero inoxidable	74
8.5	Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austeníticos [15]	74
8.6	Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austeníticos	75
8.7	Iteraciones en simulación de espárragos con propiedades similares a pernos	83
8.8	Resultados de análisis en pernos M10, clase 9.8	84
8.9	Resultados de análisis en pernos M10, clase 9.8	85
8.10	Deformación plástica M10, clase 9.8	86

8.11 Resultados de análisis en pernos M10 y M12, clase 9.8	87
8.12 Resultados de análisis en pernos M10 y M12, clase 9.8	88
8.13 Deformación plástica M10, clase 9.8	89
8.14 Regla de tres para cálculo de resistencia de prueba de espárrago ASTM193A GR B8	90
8.15 Resultados de análisis en pernos M10, clase inferior a 4.6	92
8.16 Resultados de análisis en pernos M10 y M12, clase inferior a 4.6	93
8.17 Deformación plástica M10, clase inferior a 4.6	94
8.18 Resultados de análisis en pernos M10, clase inferior a 4.6, sobre placas de diseño corregido	108
8.19 Resultados de análisis en pernos M10, clase inferior a 4.6, sobre placas de diseño corregido	110
8.20 Deformación plástica M10, clase 9.8	112
E.1 Tabla de composición de concentrado de cobre	123

Índice de figuras

3.1 Ruta del diseño ingenieril [2]	4
3.2 Acopio de concentrado de cobre [1]	5
4.1 Interacciones de la radiación [5]	9
4.2 Sección eficaz total por cada átomo individual[1]	10
4.3 Atenuación gamma [4]	13
4.4 Coeficiente atenuación total en plomo. [4]	14
4.5 Esquema de desintegración del Sodio-22 [9]	15
4.6 Esquema de desintegración del Cobalto-60 [9]	16
5.1 Modelo de caja negra [1]	23
5.2 Modelo de caja transparente [1]	24
5.3 Fotos Densímetros para Benchmarking	26
5.4 Brainstorming de funciones [1]	34
5.5 Brainstorming de funciones [1]	35
5.6 Brainstorming de funciones [1]	36
6.1 Elementos esenciales de un detector gamma [1]	37
6.2 Esquema densímetro común [1]	38
6.3 Esquema de densímetro con etiquetador [1]	39
6.4 Vista de un etiquetador(Tagger). Fuente(amarillo), cristal centelleador(celeste) y tubo fotomultiplicador(cafe). [1]	40
6.5 Lectura de efecto Compton. [1]	41
6.6 Sección cruzada, donde predomina efecto fotoeléctrico para leer el número atómico [11]	42
6.7 Esquema de densímetro doble. [1]	42
6.8 Espectro gamma suavizado que diferencia distintos materiales. [1]	43

6.9	Ángulo sólido de una esfera [9]	44
6.10	Semejanza de triángulos. [1]	44
6.11	Gráfico Diametro VS Distancia Ángulo Solido. [1]	45
7.1	Corte transversal de un Radioisótopo Na-22 [3]	47
7.2	Vistas de Cristal Centelleador [1]	48
7.3	Vistas de Tubo Fotomultiplicador [1]	49
7.4	Mu-Metal enrollado para envolver al PMT. [1]	50
7.5	Colimador con apertura de 2mm. [1]	51
8.1	Foto densímetro Systec. [12]	54
8.2	Foto densímetro Systec. [12]	55
8.3	Vistas de Tubo Fotomultiplicador [1]	56
8.4	Tipos de inclinación en montaje de abrazaderas [1]	57
8.5	Diseño Densímetro con Etiquetador. [1]	58
8.6	Vista explosionada general de Densímetro con Etiquetador. [1]	59
8.7	Vista explosionada Cuerpo central o Abrazaderas. [1]	60
8.8	Vista real de cuerpo y abrazaderas. [1]	60
8.9	Vistas diseño de Etiquetador [1]	61
8.10	Vista explosionada de Etiquetador. [1]	61
8.11	Vista corte de Detector Gamma. [1]	62
8.12	Vista explosionada de Detector Gamma. [1]	62
8.13	Vista real Detector Gamma. [1]	62
8.14	Vista en corte de Colimador contenedor de fuente radiactiva [1]	63
8.15	Máximos ángulos colimador etiquetador. [1]	64
8.16	Exposición gamma a través de cristal derecho. [1]	65
8.17	Ángulo sólido proyectado desde la fuente. [9]	66
8.18	Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo. [8]	67
8.19	Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo. [8]	69
8.20	Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo. [8]	70
8.21	Soldadura circundante, de filete [14]	71
8.22	Tipos de soldadura. [13]	71
8.23	Tipos de soldadura. [13]	72
8.24	Perfil soldadura [14]	72
8.25	Vistas corte transversal de soldadura. [14]	72

8.26	Vistas de etiquetador, cálculo centro de masa [1]	73
8.27	Metal de aporte marcada en sección gris. [1]	75
8.28	Momento resistente. [1]	76
8.29	Tipos de soldadura. [13]	79
8.30	Tabla de grados de pernos. [14]	80
8.31	Modelo básico. [1]	81
8.32	Caracterización acero 316L dentro de Ansys. [1]	81
8.33	Definición de esfuerzos en Ansys [1]	81
8.34	Descripción gráfica de Área de esfuerzo de tensión [1]	82
8.35	Tabla de áreas de esfuerzo y diámetro. [14]	82
8.36	Ánálisis de estrés M10 con 650[Mpa].[1]	84
8.37	Ánálisis de esfuerzos normales M10 con 650[Mpa]. [1]	85
8.38	Deformación estructural M10 con 650[Mpa]. [1]	86
8.39	Ánálisis de estrés M12 con 650[Mpa].[1]	87
8.40	Ánálisis de esfuerzos normales M12 con 650[Mpa]. [1]	88
8.41	Deformación estructural M12 con 650[Mpa]. [1]	89
8.42	Ánálisis de estrés espárrago M10 con 144[Mpa].[1]	92
8.43	Ánálisis de esfuerzos normales espárrago M10 con 144[Mpa]. [1]	93
8.44	Deformación estructural espárrago M10 con 144[Mpa]. [1]	94
8.45	Momento en que se midieron y cortaron soportes para planchas. [1]	95
8.46	Adjuntando soportes extras para mantener la alineación de planchas. [1]	95
8.47	DCL densímetro con etiquetador. [1]	96
8.48	Vistas de líneas de base de datos de interés.[1]	97
8.49	Ejemplo de creación de base de datos sobre malla.[1]	97
8.50	Base de datos para perfil "V". [1]	98
8.51	Base de datos para tubo minero. [1]	98
8.52	Vistas de gráfico sobre puesto sobre tubo de concentrado, M10 con 144[Mpa].[1]	99
8.53	Método de regresión lineal en dominio 0 - 20(mm)].[1]	100
8.54	Método de regresión lineal en dominio 20 - 233(mm)].[1]	100
8.55	Método de regresión lineal en dominio 233 - 266(mm)].[1]	101
8.56	Modelo para sumatoria de cargas. [1]	102
8.57	Vistas placa sostenedora común.[1]	103
8.58	Vistas placa sostenedora corregida.[1]	104
8.59	División de áreas de sección transversal de placa sostenedora. [14]	105

8.60 Identificación de medidas esenciales. [14]	105
8.61 Análisis de estrés M10 con 144[Mpa].[1]	108
8.62 Vista de máximas cargas de compresión. [1]	109
8.63 Análisis de esfuerzos normales M10 con 144[Mpa]. [1]	110
8.64 Vista de máximas cargas de compresión. [1]	111
8.65 Deformación estructural M10 con 144[Mpa]. [1]	112
8.66 Isometrica de viejo diseño Litodensitometro.[1]	113
8.67 Isométrica de viejo diseño Litodensitometro.[1]	113
8.68 Vista de interfaz de montaje lateral.[1]	114
8.69 Montaje plancha lateral. [14]	114
8.70 Montaje plancha lateral. [14]	115
8.71 Deformación estructural M10 con 144[Mpa]. [1]	115
C.1 Electronica de un densímetro. [1]	120
D.1 Electrónica que necesita ser protegida. [14]	121

Nomenclatura

Mayúsculas

- I — Segundo Momento de Área [m^4].
 I_u — Segundo Momento Unitario de Área [m^3].
 S — Momento resistente [m^3].

Minúsculas

- c — Velocidad de la luz en el vacío (m/s). La velocidad de la radiación electromagnética es independiente de la velocidad del emisor.
 i — Raíz de menos uno (-).

Letras griegas

- α — El principio de todo (-).
 π — Pastel en inglés (-).

Capítulo 1

Introducción

La física nuclear nos trajo el descubrimiento de los radioisótopos y las radiaciones ionizantes. Este suceso abrirá numerosas puertas a estudios prácticos sobre fenómenos que sobrepasaban nuestro conocimiento. También trajo nuevos riesgos, imprudencias y malos usos de una tecnología que puede estudiar lo más pequeño, el efecto fotoeléctrico, o destruir lo más grande, como una bomba de fisión nuclear.

En la ansia de estudiar lo más pequeño, la ciencia ha conseguido importantes hallazgos y estudios, como por ejemplo “**El estudio de la mecánica cuántica por Albert Einstein**” y el fenómeno de la “**Emisión secundaria**”, que finalmente representaron los principales ingredientes para la creación del primer “**Tubo Fotomultiplicador**”. Tecnología que a fines de los de los 30’ se convertirá en un estándar.

La creación del **Tubo Fotomultiplicador (Photomultiplier tube o PMT)** trajo grandes estudios como los ojos electrónicos que miden interrupciones o eventos en un haz de luz. En conjunto con un “**Cristal Centelleador**” trajo maravillas de avances en la medicina, la industria y la minería.

En el enfoque de la minería, el concentrado de los minerales de diversos metales es calculado considerando una serie de variables que no siempre se encuentran a disposición de quienes tienen interés en conocer en profundidad el valor real de tanpreciado producto natural. Estos productos constituyen una mezcla de metales valiosos y que reciben el nombre del metal que se encuentra en mayor proporción, así por ejemplo, un “**concentrado de cobre**” puede contener entre 30% a 50% de cobre y el resto de metales valiosos pueden estar presentes en porcentajes mucho menores, pero son más valiosos que el cobre mismo.

Capítulo 2

Objetivos generales y específicos

- Comprender la composición de un densímetro nuclear y su funcionamiento. Análisis del estado del arte de estos equipos. Capacitarse en el trabajo con elementos radioactivos como isótopos de sodio, cesio, etc...
- Definir las principales características del diseño conceptual, de acuerdo a especificaciones, normas (ATEX y IP66/67) y condiciones ambientales. Definir el problema de diseño en términos de objetivos, restricciones y funciones.
- Desarrollar la estructura funcional y establecer los requerimientos de ingeniería usando la metodología QFD. Generar conceptos basados en búsquedas internas y externas.
- Seleccionar un concepto y desarrollar la arquitectura del equipo.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Identificación del problema del diseño

Existe una situación donde empresas, por fines económicos, solo producen concentrado de cobre. En este concentrado existen ciertos metales preciosos que pueden ser utilizados para generar ganancias en otros tipos de procesos o mercados. La obtención del concentrado y su composición química, también es un aspecto dentro de la serie de interrogantes que se debe hacer a la hora de profundizar sobre este tema ya que el concentrado de un mineral puede tener una simple o muy compleja composición química. Al revisar completamente la metodología de cálculo observamos que hay variables que son volátiles y dependen del negociador.

Una metodología de registro corresponde al densímetro nuclear, el cual puede medir la densidad del flujo irradiado por la fuente radiactiva. La principal ventaja de este equipo a diferencia de otros, radica en que la medición puede efectuarse en un breve lapso de tiempo, sin tener que apartar una muestra de la pulpa o concentrado.

Los concentrados de cobre provienen de las celdas de flotación y son el resultado de la trituración, chancado y molienda de los minerales sulfurados de minas subterráneas. Producto de la flotación y sus repasos, de estos minerales pulverizados se obtiene el concentrado y un residuo que constituyen los relaves. La composición química de los concentrados declarada, se reduce generalmente a cuatro elementos: cobre, oro, plata y molibdeno. Después se informa el contenido porcentual de cobre en el concentrado, mas menos del orden del 30 %, y en [grs/ton] para oro y plata.

3.2 Análisis de soluciones existentes

Es importante recalcar que la composición química de los concentrados suele ser muy distinta de una muestra a otra, ya que el contenido del yacimiento no es homogéneo y por consiguiente los valores resultantes deben ser distintos.

Los tipos de soluciones que se arreglan con respecto al registro de muestras entre zonas de extracción:

- Medir el flujo de masa en un elemento específico, sin la necesidad de generar una muestra externa.
- Cuantificar la concentración de cobre actualizado, en tiempo real.
- Medir con gran precisión, la cantidad de otros metales preciosos dentro de los concentrados de cobre.
- Generar conciencia sobre potenciales perdidas e incentivar la segregación de los productos mineros.
- Promover la industria manufacturera Chilena en otros productos que no sean cobre.

3.3 Descripción del proceso del diseño

Morris Asimow estuvo entre las primeras personas en ofrecer una detallada descripción del completo proceso del diseño, el cual llamó “**La Morfología del Diseño**”. Sus siete fases del diseño se describen a continuación en la **figura 3.1**. En ella se muestran varias actividades que componen las primeras tres fases del diseño: **Diseño Conceptual**, **Diseño de Realización(o Diseño Básico)** y **Diseño Detallado**.

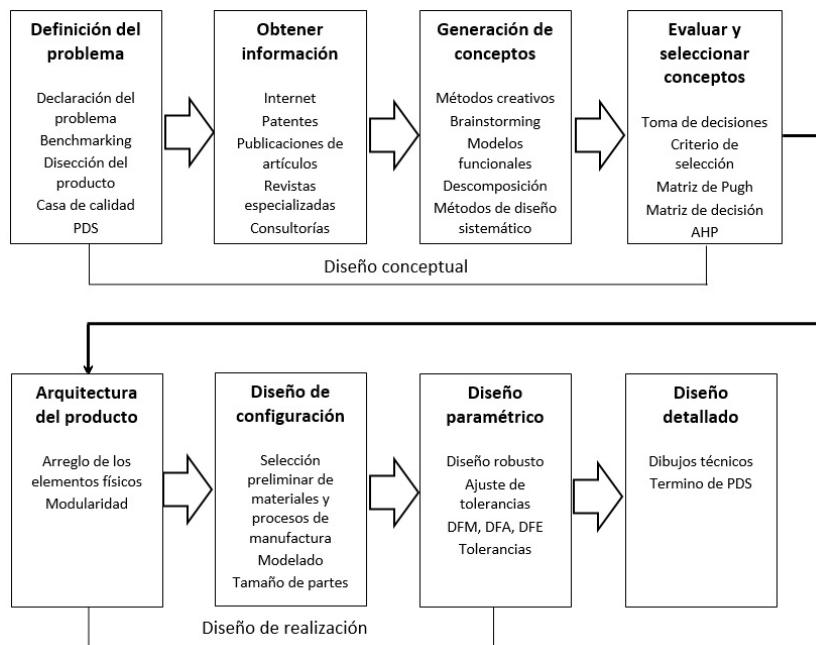


Figura 3.1: Ruta del diseño ingenieril [2]

3.4 Diseño conceptual

El diseño conceptual es la fase inicial que conlleva a crear numerosas soluciones a problemas planteados, las que deben ser acotadas hasta encontrar el mejor concepto. Esto suele ser llamado “**Estudio de Factibilidad**”. Esta fase requiere una gran capacidad creativa, de gran incertidumbre, que requiere una gran coordinación sobre muchas funciones de la organización. dicho esto, los puntos más importantes del diseño conceptual a considerar son:

- **Definición del problema**
- **Búsqueda de información (Estado del arte)**
- **Conceptualización**
- **Evaluuar y seleccionar conceptos**
- **Revisión del diseño**

3.5 Definición del problema

Existen muchas compañías en Chile que se dedican a la minería extractivas, dentro de Chile, las cuales no comercializan productos terminados para su consumo directo. Su producto principal es el concentrado de cobre, siendo este una materia prima semi-elaborada que es vendida y transportada por barco a fundiciones de distintas partes del mundo para ser posteriormente refinada.

Una de las soluciones para saber la ley del cobre de un concentrado de cobre, es la utilización de densímetros. Debido al bajo porcentaje de humedad de estas mezclas de materiales, los diseños de densímetros son acotados a nucleares por sobre los de coriolis.

Existe una gran cantidad de empresas que fabrican densímetros nucleares. Donde sus diseños poseen diferencias que pueden hacer a unos más eficientes que otros, sin embargo estos también comparten muchos elementos en común.

El alumno de la universidad Federico Santa María, **Rene Ríos**. Trabajó en un proyecto de investigación para mejorar el diseño común del actual densímetro nuclear. El cual soluciona problemas como la calibración con agua y tiempo de lectura al momento de tomar mediciones. La idea es crear un dispositivo capaz de competir en el mercado actual, bajo los mismos estándares del mercado nacional, para después expandirlo al mercado internacional.

Por último se mostrara una propuesta de mejora tecnológica del densímetro nuclear. Esta consiste en expandir la capacidad de leer más de un solo tipo de material dentro del flujo de concentrado de cobre. El cual podrá separar, medir y distinguir entre uno de los materiales que componen a este. Esta propuesta es llamada **Litodensitómetro**.



Figura 3.2: Acopio de concentrado
de cobre [1]

Capítulo 4

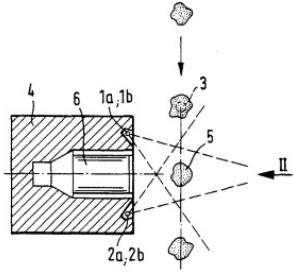
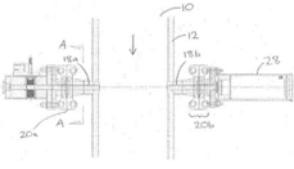
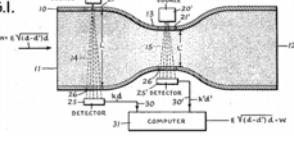
Estado del arte

El estado del arte está basado en una tecnología proveniente desde los 30' donde se consiguieron los primeros avances en tubos fotomultiplicadores y plásticos centelleadores. También se generaron nuevos hallazgos en la ciencia de la radiación ionizante, entre otras, que a mediados de los 70' empezó a mostrar los primeros productos comerciales, tales como densímetros. Si bien el modelo se basa en la identificación de un solo tipo de densidad, este nuevo diseño quiere ir un poco más allá en términos de eficiencia y precisión.

4.1 Patentes de invención

La **tabla 4.1** resume las patentes relacionadas con el densímetro, ya sea sobre la óptica de los Tubos Fotomultiplicadores o los Cristales Centelleadores, el diseño de las abrazaderas, o los tipos de Colimadores (shielding). En esta búsqueda se utilizaron los motores **European Patent Office** y **freepatentonline.com**. De esta forma se pueden relacionar algunos aspectos constructivos y los parámetros de diseño.

Tabla 4.1: Tabla de patentes relacionadas con las partes del densímetro

Nº Patente	Función	Resumen	Año	Figura
U.S.Patent 4,520,267	Método y aparato para analizar oro por radiación gamma	Cada pieza de oro cae en caída libre y es irradiada por dos fuentes de radiación que operan a diferentes niveles de energía. Una con efecto de "scattering" donde el efecto Compton se realiza en un nivel, y la otra fuente trabaja en otro nivel con efecto Compton y Fotoeléctrico.	1980	
U.S.Patent 0,137,808 A1	Aparato para medir densidad	Equipo medidor de densidad aparente de un fluido dentro de un recipiente que contiene una fuente de radiación y al menos un tubo de titanio que traspasa la muralla del recipiente hasta el receptor.	2008	
U.S.Patent 3,787,683	Válvula de radiación para medir densidad de fluidos	Válvula de radiación para medir densidades en fluidos.	1974	
U.S.Patent 2,953,681	Sistema para medir indices de flujos de masas por radiación	Este invento se relaciona a un sistema cuyo flujo de masa se compara con factores de velocidad de flujo.	1954	
U.S.Patent 3,898,463	Aparato contador de centelleo	Un aparato contador de centelleo es puesto a disposición el cual mide crecimientos de centelleo para radiación gamma y beta.	1975	

Nº Patente	Función	Resumen	Año	Figura
U.S.Patent 3,928,127	Método para determinar fluctuaciones rápidas de densidad de líquidos de enfriamiento para reactores nucleares	El líquido enfriador, del reactor nuclear, que fluye por la tubería, es constantemente irradiado. Las señales de eventos son entregadas por numerosos periféricos tales como un amplificador, un discriminador, un analizador multicanal.	1975	
U.S.Patent 4,205,230	Medidor de indice de flujo sólido de materiales	Un flujo de radiación controlado lee una libre caída de material. Donde otro par de sensores conectados a un computador, que miden la densidad del flujo.	1980	
U.S.Patent 5,073,915	Densímetro toma medidas de metales extraños en tierra	Rápidas tomas de medidas de concentraciones en varias soluciones metálicas buscan metales raros en planta de procesado o en plantas de re-procesado de combustibles.	1991	
U.S.Patent 103,185,685	Método y estructura para mejorar precisión de medición de densímetro nuclear	Comparado al estado del arte actual, la medición de flujos en una disposición en forma de U aumenta los canales de medición a dos y se puede calcular la pared de la tubería dos veces.	2013	

4.2 Investigación especializada a la ciencia del densímetro

En esta sección se explicará el funcionamiento del densímetro que actualmente se usa en el mercado. A este diseño le llamaremos “**densímetro común**” y exploraremos sus alcances, ventajas y defectos. También se explicará lo que es el término ”evento”. Después se llegará un paso más allá con una modificación importante en el diseño de este equipo, donde introduciremos el término “**marcador o etiquetador**”. Que impondrá un importante avance en la calibración y eficiencia de lectura de eventos. Finalmente llegaremos al nuevo paso en la tecnología del densímetro, que será un híbrido de los dos anteriores al cual llamaremos por ahora “**densímetro doble**”.

4.2.1 ¿Qué es un evento?

Un evento es la producción de un fotón, en este caso en el cristal cintillador. Esto se produce por la excitación de un electrón a un estado superior, producto de la energía de los rayos gamma. Al volver de su estado superior a su estado de valencia, el electrón produce un fotón de luz.

Un fotón es una partícula portadora o transportadora de las fuerzas que se producen en las etapas intermedias de la excitación del electrón. También es portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo: **Rayos Gamma, Rayos X, Luz Ultravioleta, Luz Visible (Espectro electromagnético), Luz Infrarroja, Microondas, Ondas de Radio.**

De la producción de un fotón, y la absorción de su energía por parte de otro electrón que colisiona con este, se produce el “**Efecto Fotoeléctrico**” (IF) ([figura 4.1](#)), el cual es un proceso dominante para fotones de baja energía. El cambio de cantidad de movimiento, frecuencia y energía que el fotón sufre, después de la colisión, es llamado “**Efecto Compton**” (IC). Por último cuando un fotón se acerca al campo eléctrico de un núcleo puede suceder la “**Producción de Pares**” (CP), donde el fotón se transforma en un par electrón-positrón.

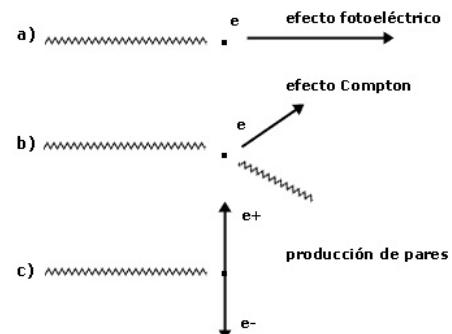


Figura 4.1: Interacciones de la radiación [5]

4.2.2 Dispersión de la radiación Gamma

Para poder entender como se mide la densidad de un flujo, con rayos Gamma. Primero hay que entender que al bombardear un material con un haz gamma, se produce una dispersión de este haz gamma producto de la interacción entre las partículas lanzadas hacia un “Centro Dispensor”.

El objeto que genera la **interacción** de la partícula con el centro de dispersión es llamado “**Blanco**”. Si este centro dispensor es controlado, se puede cuantificar la ocurrencia de esta interacción, por ejemplo se puede tener un centro dispensor que posea un solo “blanco” y este genere una sola interacción. Entonces, si aumento el volumen de la sección de dispersión para aumentar la cantidad de “blancos” y sus interacciones, podemos decir que la dispersión de radiación Gamma depende de la “**densidad de blancos por unidad de volumen**”.

Es bien sabido que todo átomo de la materia posee **Z** electrones. Es posible mostrar la “**Sección Eficaz**” total por átomo individual del material, de la siguiente forma:

$$\sigma = \sigma(IF_{electrico}) + \sigma(IC_{compton}) + \sigma(CP_{pares}) \quad (4.1)$$

Cada sección eficaz ya sea **Efecto Fotoeléctrico (IF)**, **Efecto Compton (EC)**, o **Producción de Pares (CP)**, dependen de la cantidad de electrones presentes en el material. Es por esto que todas las secciones eficaces que producen fotones Gamma estarán de alguna forma relacionadas con el número atómico Z.

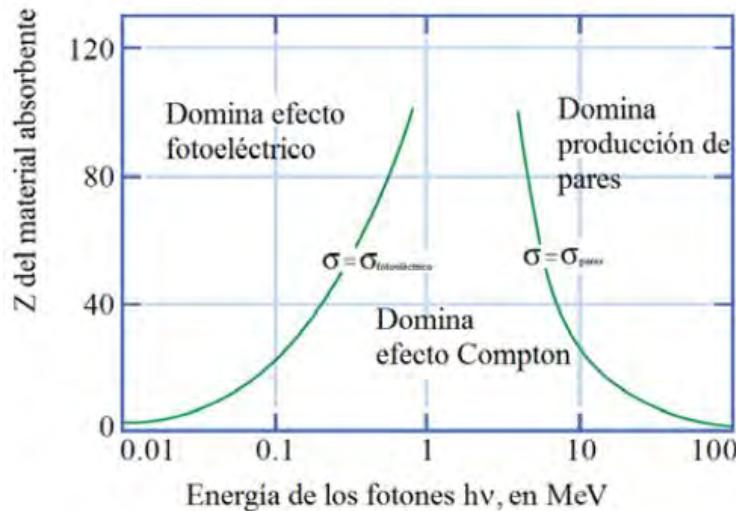


Figura 4.2: Sección eficaz total por cada átomo individual[1]

En la **figura 4.2** se muestran los valores “Z” y la energía Gamma “ $E = h\nu$ ”, donde se aprecia en líneas verdes, las probabilidades de interacción de los dos efectos adyacentes.

El siguiente paso de este cálculo es aumentar el volumen de dispersión para relacionar la “Sección Eficaz” con la

“densidad de blancos por unidad de volumen”. Esto se hace multiplicando la sección eficaz por la densidad de átomos por unidad de volumen:

$$N_{\frac{atom}{vol}} \sigma = N_{\frac{atom}{vol}} \sigma(IF_{electrico}) + N_{\frac{atom}{vol}} \sigma(IC_{compton}) + N_{\frac{atom}{vol}} \sigma(CP_{pares}) \quad (4.2)$$

Para calcular la “densidad de átomos por unidad de volumen” (n), tenemos que recordar que “A” es el número másico de los átomos que conforman el material y “M” es la masa de este material. Entonces multiplicando el número de moles por el número de Avogadro (N_a) tenemos que el número de átomos es:

$$N_{atomos}^o = N_a * n_{moles} = N_a \frac{M}{A} \quad (4.3)$$

Luego, para calcular la densidad de átomos por unidad de volumen (V):

$$\frac{N_{atomos}^o}{V} = N_a \frac{M}{AV} \quad (4.4)$$

Siendo “ ρ ” la cantidad de masa de un cuerpo por unidad de volumen:

$$\frac{N_{atomos}^o}{V} = N_a \frac{\rho}{A} \quad (4.5)$$

Posteriormente, combinando las **ecuaciones 4.2 y 4.5** obtenemos la probabilidad de interacción por unidad de longitud μ :

$$\mu = N_a \frac{\rho}{A} \sigma = N_a \frac{\rho}{A} \sigma(IF_{electrico}) + N_a \frac{\rho}{A} \sigma(IC_{compton}) + N_a \frac{\rho}{A} \sigma(CP_{pares}) \quad (4.6)$$

Esta ecuación es comúnmente conocida como “Coeficiente de absorción total”, sin embargo, usualmente se busca trabajar en la zona donde el efecto Compton (IC) domine por sobre las otras interacciones, debido a que suele presentar resultados mejor definidos y amigables de abordar.

Por lo que la sección eficaz de importancia se verá reducida a la siguiente formula:

$$\sigma \approx \sigma(IC_{compton}) \quad (4.7)$$

$$\mu = N_a \frac{\rho}{A} \sigma \approx N_a \frac{\rho}{A} \sigma(IC_{compton}) \quad (4.8)$$

Existe una formula para representar el número total promedio de fotones dispersados en todos los ángulos posibles (N_{tot}), y el flujo incidente de partículas a la zona de dispersión (ϕ_0):

$$N_{tot} = \frac{\phi_0}{S} S N_{\frac{blancos}{vol}} dx \sigma \quad (4.9)$$

Siendo el número de blancos por unidad de volumen ($N_{\frac{blancos}{vol}}$) la cantidad de partículas que generan interacciones en una sección de dispersión determinada, S el área del material que interactúa con el haz y dx el espesor del material en la misma dirección del haz.

$$\phi = \phi_0 + d\phi \Rightarrow d\phi = \phi - \phi_0 \quad (4.10)$$

Donde ϕ es el flujo de partículas saliente y ϕ_0 es el flujo de partículas incidentes. Siendo $d\phi$ el diferencial del flujo de partículas, esta es igual al número de interacciones por unidad de tiempo N_{tot} , pero el orden es:

$$N_{tot} = \phi_0 - \phi \quad (4.11)$$

Debido a esto, existe un cambio de signo:

$$N_{tot} = -d\phi \quad (4.12)$$

Uniendo la **ecuación 4.9** con **4.12** se obtiene:

$$-d\phi = \frac{\phi_0}{S} SN_{\frac{blancos}{vol}} dx \sigma \quad (4.13)$$

Para aclarar la forma en que ϕ_0 se relaciona con $d\phi$ se debe hacer una suposición que define al espesor del material en la misma dirección de propagación del diferencial. Lo que tiene por consecuencia que la diferencia entre el flujo incidente y el saliente sea también diferencial, por lo que podemos asumir que $\phi \approx \phi_0$, quedando lo siguiente:

$$-d\phi = \frac{\phi}{S} SN_{\frac{blancos}{vol}} dx \sigma \quad (4.14)$$

Finalmente si unimos el resultado de la ecuación 4.8 con la **ecuación 4.14** se obtiene o siguiente:

$$-d\phi = \frac{\phi}{S} N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} S dx \Rightarrow -d\phi = \phi N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} S dx \quad (4.15)$$

Se procede a integrar esta ecuación diferencial, para generalizar el resultado como la suma del efecto de varias capas superpuestas del material de espesor infinitesimal:

$$\int_{\phi_0}^{\phi} \frac{d\phi}{\phi} = -N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} \int_0^x dx \Rightarrow \ln \phi - \ln \phi_0 = -N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} x \quad (4.16)$$

Finalmente se obtiene:

$$\phi = \phi_0 e^{-N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} x} \quad (4.17)$$

4.2.3 Medición de la densidad

Para obtener la formula de medición de densidad se interpreta, desde la **ecuación 4.17**, el flujo saliente de partículas ϕ como “ I ”, y al flujo incidente de partículas ϕ_0 como “ I_0 ”:

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (4.18)$$

Donde $\mu = \frac{1}{\lambda}$ es denominada como el “Coeficiente de absorción” y equivale a la siguiente sección de la **ecuación 4.17**:

$$N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{(IC)} = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4.19)$$

La **ecuación 4.19** es importante para motivos de esta memoria, ya que con ella se pueden calcular espesores de pared de un material específico que atenúen los rayos Gamma hasta un límite deseado. Específicamente hablando, hasta un límite donde estos no sean nocivos para la salud humana o estén bajo el marco que permite la ley local.

4.2.4 ¿Qué es la atenuación?

La atenuación ([figura 4.3](#)) es el producto del paso de los rayos gamma a través de una sustancia o fluido, la cual disminuye la intensidad del flujo de radiación en la formula dada por la **Ley de Beer-Lambert**, que es la misma mostrada en la [ecuación 4.18](#):

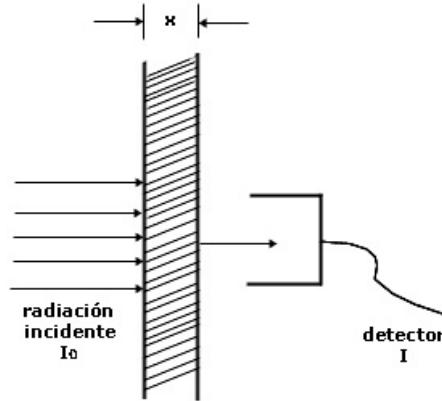


Figura 4.3: Atenuación gamma [4]

$$I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad \wedge \quad N_a \frac{Z}{A} \rho \sigma_{IC} = \mu \quad (4.20)$$

Donde “ I ”, es el número de radiación saliente, fotones por unidad de tiempo “ I_0 ” es el flujo de radiación entrante, fotones por unidad de tiempo, “ x ” es el espesor lineal en la dirección que se realiza la medición del flujo a través del material y “ $\mu = 1/\lambda$ ”([formula 4.19](#)) es el coeficiente de atenuación lineal del material. Este último coeficiente depende de la composición del material y de la frecuencia o energía de los fotones incidentes.

Entonces utilizando los valores medidos de flujo incidente, saliente y las [ecuación 4.20](#) para relacionarlos entre si, obtendremos la el coeficiente de atenuación lineal del material ante radiación gamma:

$$I = I_0 e^{-x/\lambda} \Rightarrow \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\frac{x}{\lambda} \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x} \Rightarrow \mu = \frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x} \quad (4.21)$$

Siendo que la [ecuación 4.21](#) final obtenida es el comienzo de la demostración para identificar la constante de atenuación lineal de un material específico. Esta se puede extraer para detectar mas de un coeficiente de atenuación, dentro de un compuesto, y por ende detectar mas materiales. Sin embargo, en la siguiente figura 4.4 podemos saber el coeficiente de atenuación, para un material previamente elegido como el plomo, a partir de la intersección del dato de la energía de la fuente radiactiva con la curva. Es por esto que no se profundizará mas en el tema del coeficiente de atenuación, ya que para motivos de esta memoria solo basta con saber que material de protección de pared se utilizará y cuanta es la energía de la fuente radiactiva.

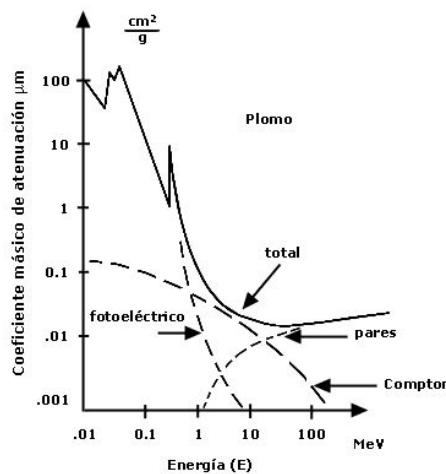


Figura 4.4: Coeficiente atenuación total en plomo. [4]

Saber cuánto se atenuará el haz gamma es importante para el diseño de la protección de pared del densímetro, ya que será esta la que disminuirá la dosimetría que expondrá la salud del personal ante un posible riesgo de salud.

4.2.5 Dosimetría radiactiva y sus riesgos a la salud

El Sievert una unidad derivada del sistema internacional de unidades que mide dosis de radiación absorbida por la materia viva. La cual es muy similar a la unidad de medida de dosis absorbida, llamada Gray, pero el Sievert se basa en el daño biológico.

Síntomas en humanos por radiación acumulada durante un día:

- 0 – 0,25 Sv: No hay daño.
- 0,25 – 1 Sv: Nauseas y perdida de apetito. Posibles daños a médula ósea, ganglios linfáticos y el baso.
- 1 – 3 Sv: Nauseas agudas, perdida de apetito, infección. Daños a médula ósea, ganglios linfáticos y el baso.
- 3 – 6 Sv: Nausea severa, perdida de apetito, hemorragias, infección, diarrea, descamación, esterilidad, y muerte si no se trata.
- 6 – 10 Sv: Mismos síntomas, más deterioro del sistema nervioso central. Muerte probable.
- Más de 10 Sv: Parálisis y muerte.

Síntomas en humanos por radiación acumulada durante un año:

- 2,5 mSv: Radiación media anual global.
- 5,5 – 10,2 mSv: Valores naturales medios en Brasil y en Irán. Sin efectos nocivos.
- 6,9 mSv: Equivalente a escáner CT o TAC.
- 50 mSv: Dosis anual permitida en Chile.
- 50 – 250 mSv: Límite para trabajadores de prevención y emergencia, respectivamente.

4.2.6 Frecuencia de eventos

La frecuencia con que los radioisótopos crean eventos, o emiten fotones en el cristal centelleador, guarda relación con el esquema de desintegración. Este esquema es específico para cada radioisótopo, así como la semivida de este. El esquema de desintegración es una representación de todas las transiciones que ocurren durante el decaimiento de un radioisótopo y sus interrelaciones.

La actividad de una muestra de radioisótopo se define como:

$$A_{(t)} = \lambda_{dec} N_0 e^{-\lambda_{dec} t} \quad (4.22)$$

Donde $A_{(t)}$ es la actividad o tasa de decaimiento en función del tiempo, con unidad de medida "Becquerel" [Bq] o Curios [Ci], que indica el número de decaimientos por segundo. Siendo N_0 , la cantidad inicial de núcleos del radioisótopo presentes y finalmente $1/\lambda_{dec}$ es la constante de tiempo de decaimiento del radioisótopo. También es importante saber la equivalencia de la unidad Curios a Becquerel es la siguiente:

$$1[Ci] = 3,7 \times 10^{10} [Bq] \quad (4.23)$$

Debe ser sabido que la semivida $T_{1/2}$, es el tiempo que transcurre para que la actividad del radioisótopo se reduzca a la mitad de la inicial, que se representa de la siguiente forma:

$$A_0 = \lambda_{dec} N_0 \Rightarrow A_{T_{1/2}} = \lambda_{dec} N_0 / 2 \quad (4.24)$$

De esta forma se puede relacionar la semivida con la constante de tiempo de la siguiente forma:

$$A_{T_{1/2}} = \lambda_{dec} N_0 e^{-\lambda_{dec} T_{1/2}} = \frac{\lambda_{dec} N_0}{2} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{1}{\lambda_{dec}} \ln(2) \quad (4.25)$$

Un ejemplo de lo anteriormente explicado se muestra en el esquema de desintegración de la fuente Sodio-22 que se utilizará en el diseño propuesto de esta memoria.

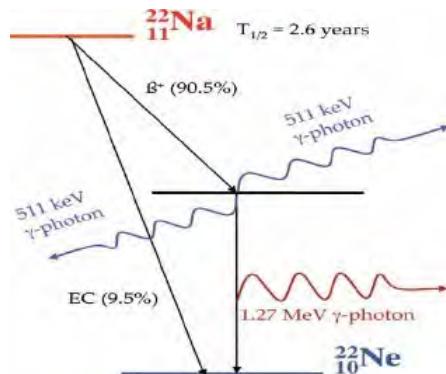


Figura 4.5: Esquema de desintegración del Sodio-22 [9]

El Na-22 tendrá un decaimiento beta-menos, que sucederá con una probabilidad de 90,5 %, produciendo un fotón de 511[keV]. Seguido de este evento emitirá un fotón de energía 1,27[MeV] para llegar a su estado de energía mínima que lo transformara en Neon-22. El segundo caso tiene una probabilidad del 9,5 %, que emite fotón de energía 511[KeV]. Lo mas importante de este decaimiento es que el positrón liberado por el Sodio interactuá con los electrones del material, produciendo un par de rayos gamma de 511[KeV] de energía que viajan en direcciones opuestas. Por último es necesario mencionar que la vida media del Na-22 es de 2,6[años].

Otro ejemplo de desintegración para otra fuente que será utilizada en esta memoria, sera la del Cobalto-60.

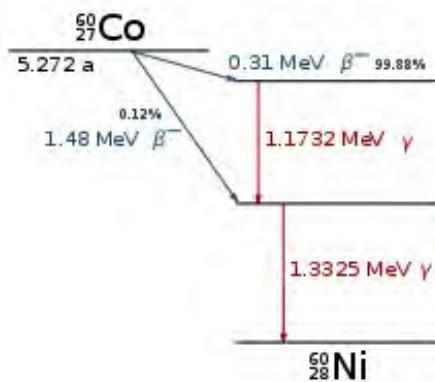


Figura 4.6: Esquema de desintegración del Cobalto-60 [9]

Se puede apreciar que en el 99,88 % de los casos, el Co-60 tendrá un decaimiento beta-menos, produciendo una energía cinética de 310[keV]. Es por esto que el nuevo núcleo de Níquel-60 emitirá dos rayos gamma en cascada, el primero de 1,17[MeV] y el segundo de 1,33[MeV], con lo que conseguirá llegar a su estado de energía mínima. En otro caso del 0,12 %, el Cobalto-60 decaerá directamente al estado intermedio, mediante un decaimiento beta-menos emitiendo 1,48[MeV] de energía cinética. Se destaca que la vida media del Cobalto-60 es de 5,27 [año].

Capítulo 5

Etapas del Diseño Conceptual

5.1 Listado de atributos

Una vez nombrado el problema planteado, se necesita plantear una lista de necesidades que especifiquen cada uno de los requerimientos del diseño. La lista de todas las necesidades que el densímetro debe cumplir:

1. Control a distancia
2. Bajo costo de equipo
3. Bajo costo de operación
4. Bajo costo de mantención
5. Posee un fácil alineamiento
6. Resistente al desgaste y corrosión
7. Acceso fácil para el mantenimiento
8. No cambia la forma al tubo de concentrado
9. Tomar medidas de densidad en tiempo real
10. Protege de contaminación por dispersión de la fuente
11. Medir densidad sin necesidad de extraer muestra
12. El diámetros mínimo de tubería debe ser 6[pulg]
13. El equipo pesa al menos 35[Kg]
14. Temperaturas de operación entre $-10^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$
15. Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina
16. Rápido cambio de los cristales centelleadores y PMT
17. Permite trabajar con varios tipos de flujos
18. Se detiene fácil y rápidamente
19. Enciende y trabaja de forma eficaz
20. Entrega y guarda información automáticamente
21. Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante
22. Irradiar haz gamma en zona controlada y vectorizada por el fabricante
23. Discriminar y medir los componentes del flujo
24. Fácil de ensamblar y desensamblar

5.2 Objetivos, restricciones y funciones

Del listado de atributos antes mencionado, se extraen sus partes y se separan en objetivos, restricciones y funciones de diseño. Donde los objetivos serán las metas que el equipo debe cumplir, las restricciones serán las limitaciones del diseño del densímetro, y las funciones serán las distintas tareas que el equipo debe desarrollar.

Objetivos

1. Control a distancia
2. Bajo costo de equipo
3. Bajo costo de operación
4. Bajo costo de mantención
5. Posee un fácil alineamiento
6. Resistente al desgaste y corrosión
7. Acceso fácil para el mantenimiento
8. No cambia la forma del tubo de concentrado
9. Protege de contaminación por dispersión de la fuente
10. Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina
11. Rápido cambio de cristales centelleadores y PMT
12. Permite trabajar con varios tipos de flujos
13. Se detiene fácil y rápidamente
14. Enciende y trabaja de forma eficaz
15. Entrega y guarda información automáticamente
16. Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante
17. Fácil de ensamblar y desensamblar

Restricciones

1. El diámetros mínimo de tubería es 6[pulg]
2. El equipo pesa al menos 35[Kg]
3. Temperaturas de operación entre $-10^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$

Funciones

1. Tomar medidas de densidad en tiempo real
2. Medir densidad sin necesidad de extraer muestra
3. Irradiar haz gamma en zona controlada y vectorizada por el fabricante
4. Discriminar y medir los componentes del flujo

5.3 Categorización de objetivos

En el párrafo anterior, los puntos abordados en objetivos, serán organizados por grupos que posean similitud entre ellos. Estos serán agrupados en los siguientes tópicos:

Operación

- Control a distancia
- Entrega y guarda información automáticamente
- Enciende y trabaja de forma eficaz
- Se detiene fácil y rápidamente
- Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina

Costos

- Bajo costo de equipo
- Bajo costo de operación
- Bajo costo de mantención

Versatilidad

- Posee un fácil alineamiento
- Acceso fácil para el mantenimiento
- Permite trabajar con varios tipos de flujos
- Fácil de ensamblar y desensamblar
- Rápido cambio cristal Centellador y PMT
- Resistente al desgaste y la corrosión

Seguridad

- Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante
- Protege de contaminación por dispersión de la fuente
- No causa daño al tubo de concentrado

5.4 Jerarquización de objetivos

La **tabla 5.1** muestra los objetivos del diseño que son evaluados por el propio diseñador, y estos son ordenados según su nivel de importancia. Lo cual resaltara los puntos más importantes en los que habrá que enfocarse en el diseño del densímetro:

Tabla 5.1: Jerarquización de objetivos

#	Operación	Versatilidad
1	Enciende y trabaja de forma eficaz	Permite trabajar con varios tipos de flujos
2	Entrega y guarda información automáticamente	Acceso fácil para el mantenimiento
3	Se detiene fácil y rápidamente	Rápido cambio cristal Centelleador y PMT
4	Control a distancia	Posee un fácil alineamiento
5	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	Fácil de ensamblar y desensamblar
6		Resistente al desgaste y la corrosión
#	Seguridad	Costos
1	Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	Bajo costo de equipo
2	Protege de contaminación por dispersión de la fuente	Bajo costo de operación
3	No cambia la forma del tubo de concentrando	Bajo costo de mantención

5.5 Listas de objetivos argumentada

Utilizando la **tabla 5.1**, se le agregan a esta las *restricciones y funciones* que también fueron nombradas anteriormente en el **punto 5.3**. De esta forma, en la **tabla 5.2** se mostrará una mejor idea de cómo se relacionan los objetivos mencionados.

Tabla 5.2: Listas de objetivos argumentada

#	Operación	#	Versatilidad
1	Enciende y trabaja de forma eficaz	1	Permite trabajar con varios tipos de flujos
2	Entrega y guarda información automáticamente	2	Acceso fácil para el mantenimiento
3	Se detiene fácil y rápidamente	3	Rápido cambio cristal Centelleador y PMT
4	Control a distancia	4	Posee un fácil alineamiento
5	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	5	Fácil de ensamblar y desensamblar
6		6	Resistente al desgaste y la corrosión
F.1	Tomar medidas de densidad en tiempo real	F.2	Discriminar y medir componentes del flujo
R.1	Temperaturas de operación entre $-10^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$	R.2	El diámetro mínimo de tubería es 6[pulg]
		R.3	El equipo pesa al menos 35[Kg]
#	Seguridad	#	Costos
1	Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	1	Bajo costo de equipo
2	Protege de contaminación por dispersión de la fuente	2	Bajo costo de operación
3	No cambia la forma del tubo de concentrando	3	Bajo costo de mantención
F.3	Irradiar haz gamma en zona controlada y vectorizada por el fabricante	F.4	Medir densidad sin necesidad de extraer muestra

5.6 Lista de objetivos con pesos ponderados

Con el objetivo de ordenar los objetivos de diseño en base a un método de toma de decisiones, donde no intercede el criterio del diseñador. En la siguiente **tabla 5.3** se calculan los pesos relativos de los grupos y absolutos de los objetivos, para lo cual se utiliza la escala de importancia creada por Saaty(1986), llamada "**Proceso Analítico Jerárquico**". El cual optimiza la toma de decisiones complejas cuando existen múltiples criterios necesarios, para evaluar cual grupo y objetivo es más importante.

Tabla 5.3: Lista de objetivos con pesos ponderados

Operación	Absoluto	Versatilidad	Peso Absoluto
Enciende y trabaja de forma eficaz	0,016	Permite trabajar con varios tipos de flujos	0,073
Entrega y guarda información automáticamente	0,015	Rápido cambio cristal Centelleador y PMT	0,038
Se detiene fácil y rápidamente	0,007	Acceso fácil para el mantenimiento	0,043
Control a distancia	0,003	Posee un fácil alineamiento	0,032
Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	0,002	Fácil de ensamblar y desensamblar	0,008
		Resistente al desgaste y la corrosión	0,006
Peso Absoluto Total	0,043	Peso Absoluto Total	0,200
Seguridad	Peso Absoluto	Costos	Peso Absoluto
Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	0,303	Bajo costo de equipo	0,137
Protege de contaminación por dispersión de la fuente	0,145	Bajo costo de operación	0,103
No cambia la forma del tubo de concentrado	0,031	Bajo costo de mantención	0,038
Peso Absoluto Total	0,479	Peso Absoluto Total	0,278

5.7 Análisis funcional

El diseño conceptual está ligado a términos relacionados al: orden, plan, estructura, sistema, idea, proyecto, programa y estrategia. Todos estos conceptos guardan relación con las actividades que implican la creación de ideas y como implementarlas en el actual proyecto.

Es por esto que definiremos al **"Enfoque creativo"** como el proceso donde ocurre la chispa creativa del autor, y posteriormente definir al **"Enfoque racional"** como el proceso que separa al diseño conceptual en procesos racionales que son completamente explicables, y que deben ser definidos a partir de una estructura ordenada que veremos a continuación.

En los siguientes párrafos estableceremos las funciones del producto a diseñar, donde destacaremos los flujos de entrada y salidas que tendrá el sistema a diseñar. Para esto se utilizan "Enfoques racionales" del proceso de diseño, llamados **"Caja negra"**, **"Caja transparente"**, **"Benchmarking"**, **"Lista de requerimientos"**, **"Matriz requerimientos-Objetivos"** y **"La casa de la calidad(QFD)"**.

5.7.1 Modelo de caja negra densímetro doble

Enfoque que valora la importancia del subconsciente del diseñador en el proceso del diseño. Donde se considera que el diseñador es capaz de producir resultados confiables y que a menudo tienen éxito, pero este no es capaz de explicar como llegó a tal resultado (**Jones, 1976**).

En la siguiente **figura 5.1**, se establecen flujos de entrada que en el caso del densímetro doble serían el concentrado de cobre, la energía necesaria para desarrollar el trabajo, y el control por parte del operario. Como salidas se tienen señales de flujo de partículas relacionadas con las lecturas de tres tubos fotomultiplicadores, de esta forma se identifican perdidas de energía medidas en dos situaciones simultáneamente, más el calibrador del etiquetador, y finalmente el flujo de salida correspondiente al concentrado de cobre irradiado. Se adjunta un esquema de este proceso.

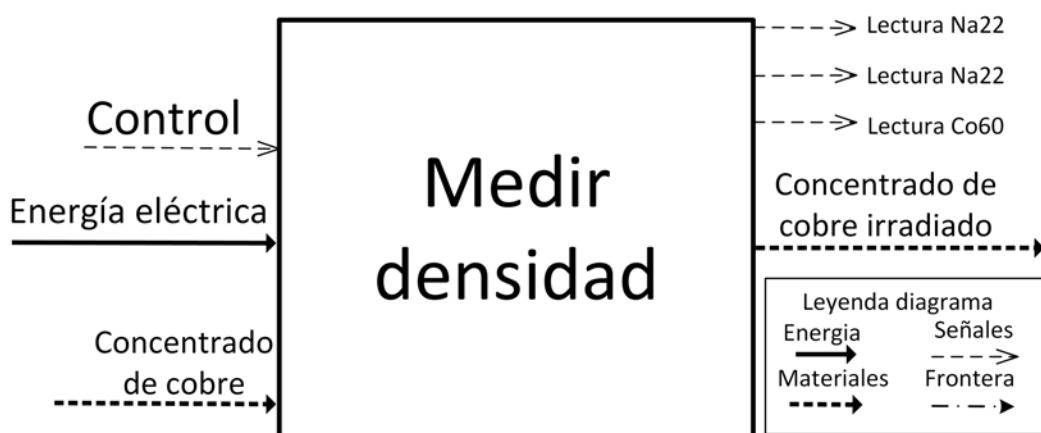


Figura 5.1: Modelo de caja negra [1]

5.7.2 Modelo de caja transparente densímetro doble

Este enfoque consta de tres fases:

1. **Divergencia (Análisis):** Es un análisis de la estabilidad de todo lo que está conectado con el problema, para identificar lo que es susceptible de cambio y lo que se puede considerar como puntos fijos de referencia.
2. **Transformación (Síntesis):** Es la etapa de elaboración de un modelo de carácter general, considerado adecuado pero sin posibilidades de comprobación.
3. **Convergencia (Evaluación):** Es la etapa posterior a la definición del problema, a la identificación de las variables y al acuerdo de los objetivos. El objetivo es alcanzar una reducción progresiva de las incertidumbres secundarias hasta llegar a una solución final.

Para el proceso creativo del densímetro, se mostrarán las sub-funciones que permiten convertir los flujos de entrada en los flujos de salida del modelo mencionado. Estas sub-funciones son mostradas en un esquema(**figura 5.2**) que, a diferencia de la caja negra, se le añaden los dos flujos de partículas de entrada que pertenecen a los isótopos radiactivos, entre otras equipos convertidores de señales, almacenadores de datos, etc:

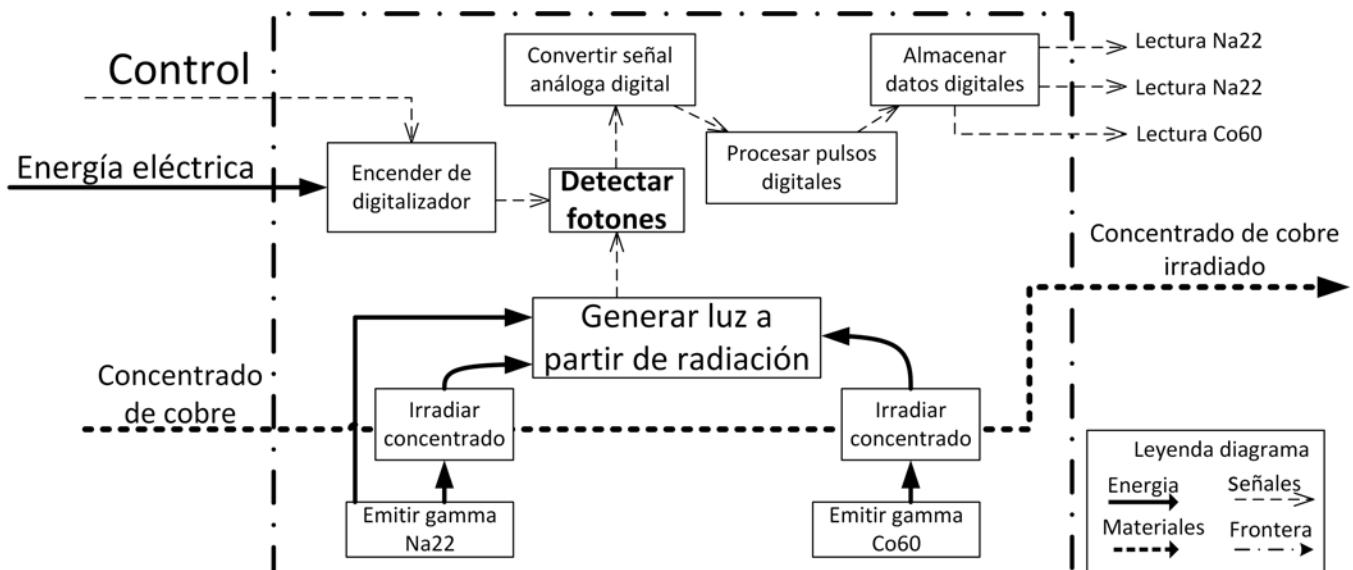


Figura 5.2: Modelo de caja transparente [1]

5.8 Análisis de competidores

5.8.1 Principales competidores o sustitutos

En la **tabla 5.4** se muestra un resumen de los competidores que se tienen en cuenta en este estudio. Todos estos productos evaluados ya tienen trayectoria en el mercado. Algunos poseen especializaciones que se adoptaron en el diseño propuesto, como por ejemplo trabajar con fuentes de baja intensidad.

También se añadirán productos medidores de densidad que no utilizan fuentes radiactivas, pero leen densidad mediante el efecto de coriolis. Lo que conlleva a un diseño mucho más voluminoso y complicado en el control del movimiento de la tubería, pero el producto es mucho más seguro de manipular para el cliente. Aunque no posee la capacidad de trabajar con diversos tipos de fluidos, ni detectar un solo material entre el flujo de diversos contaminantes.

Tabla 5.4: Principales competidores o sustitutos

Empresa	Densímetros Nucleares similares
Ronan	Model X96S
SISTEC	Model SS200
Berthold	Model LB444
Tracerco	Model PRI 121/116
Vega	DSG Gen 2000

Empresa	Productos sustituyentes No nucleares
Krohne	Optimass 3000 Massflow Meter
Honeywell	Versaflow Coriolis Massflow Sensor

5.8.2 Benchmarking por objetivos

En esta sección se realizará una comparación enfocada en las características más fuertes de los principales competidores del diseño estudiado. En la siguiente **tabla 5.5**, se utilizarán los mismos “**Objetivos**” que usamos en la sección “**5.3 Objetivos, restricciones y funciones**”, para hacer esta comparación. La comparación de realizará en base a una escala de puntaje que varía de **1 = Pésimo** a **5 = Excelente**.

Los productos de comparación son cinco (**figura 5.3**): Empezando por el **Modelo X96S** de la marca Ronan (**figura 5.3 (a)**), que se enfoca en trabajar con fuentes de baja intensidad a las que ella misma llama RLL (Radiation Low Level), su aplicación es leer lechadas. Seguido de esta, tenemos el **Modelo SS200** de la marca Sistec (**figura 4.4 (b)**), que trabaja con fuentes de alta intensidad como Cobalto-60, que posee un diseño muy simplista que en este documento llamaremos “densímetro simple”, su aplicación más densa es lodos. Después tenemos el **Modelo LB444**, de la marca Berthold (**figura 4.4 (c)**), el cual es similar al anterior pero más avanzado, ya que admite diversas posiciones para analizar la tubería y la protección a la radiación esta mejor diseñada, su aplicación es la minería. Luego tenemos el **Modelo PRI 121/116** de la marca Tracerco (**figura 4.4 (d)**), el cual permite leer la densidad de líquidos de hasta 3 mezclas a la vez. Su diseño es similar a los anteriores, utiliza una fuente de Cesium-137 y se caracteriza por pesar poco. Finalmente, el último **Modelo DSG Gen2000**, de la marca Vega (**figura 4.4 (e)**), no utiliza fuentes radiactivas, sino que utiliza rayos X para medir densidad. Es muy fácil de ensamblar ya que es una pieza única que posee un peso relativamente bajo de 7[kg], sin embargo está limitada a solo leer densidad en líquidos y lechadas.



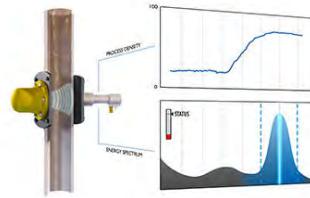
(a) Ronan X96S



(b) Sistec SS200



(c) Berthold LB444



(d) Tracerco PRI 121/116



(e) Vega DSG Gen 2000

Figura 5.3: Fotos Densímetros para Benchmarking

Tabla 5.5: Benchmarking de equipos similares

Objetivos	Densímetro Doble	Ronan M. x96S	SISTEC M. SS200	Berthold M. LB444	Tracerco PRI121/116	Vega DSG Gen 2000
Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante	5	5	4	5	5	5
Protege de contaminación por dispersión de la fuente	5	5	5	5	5	5
Bajo costo de equipo	3	4	4	3	4	5
Bajo costo de operación	5	3	4	3	5	2
Permite trabajar con varios tipos de flujos	5	2	3	2	5	1
Acceso fácil para el mantenimiento	5	2	2	2	5	5
Bajo costo de mantención	4	3	3	3	5	5
Rápido cambio cristal Centelleadores y PMT	5	2	2	2	2	1
Possee un fácil alineamiento	5	3	3	4	5	5
No cambia la forma del tubo de concentrado	5	4	2	4	4	5
Enciende y trabaja de forma eficaz	5	4	5	5	3	4
Entrega y guarda información automáticamente	5	3	5	5	4	5
Fácil de ensamblar y desensamblar	5	3	4	3	4	4
Se detiene fácil y rápidamente	5	5	5	5	5	5
Resistente al desgaste y corrosión	5	5	5	5	5	5
Control a distancia	4	4	4	4	4	4
Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina	2	2	2	2	2	2
Promedio	4.6	3.5	3.6	3.7	4.2	4.0

5.9 Lista de requerimientos

En la siguiente tabla se mostrará una lista de las principales características del diseño, así como los requerimientos que puede pedir el consumidor. Estos requerimientos han sido clasificados en **Obligatorios (D)** y **Deseables (W)**, si es posible, estableciendo un valor de referencia para cada requerimiento visualizado en la siguiente **tabla 5.6**:

Tabla 5.6: Lista de requerimientos

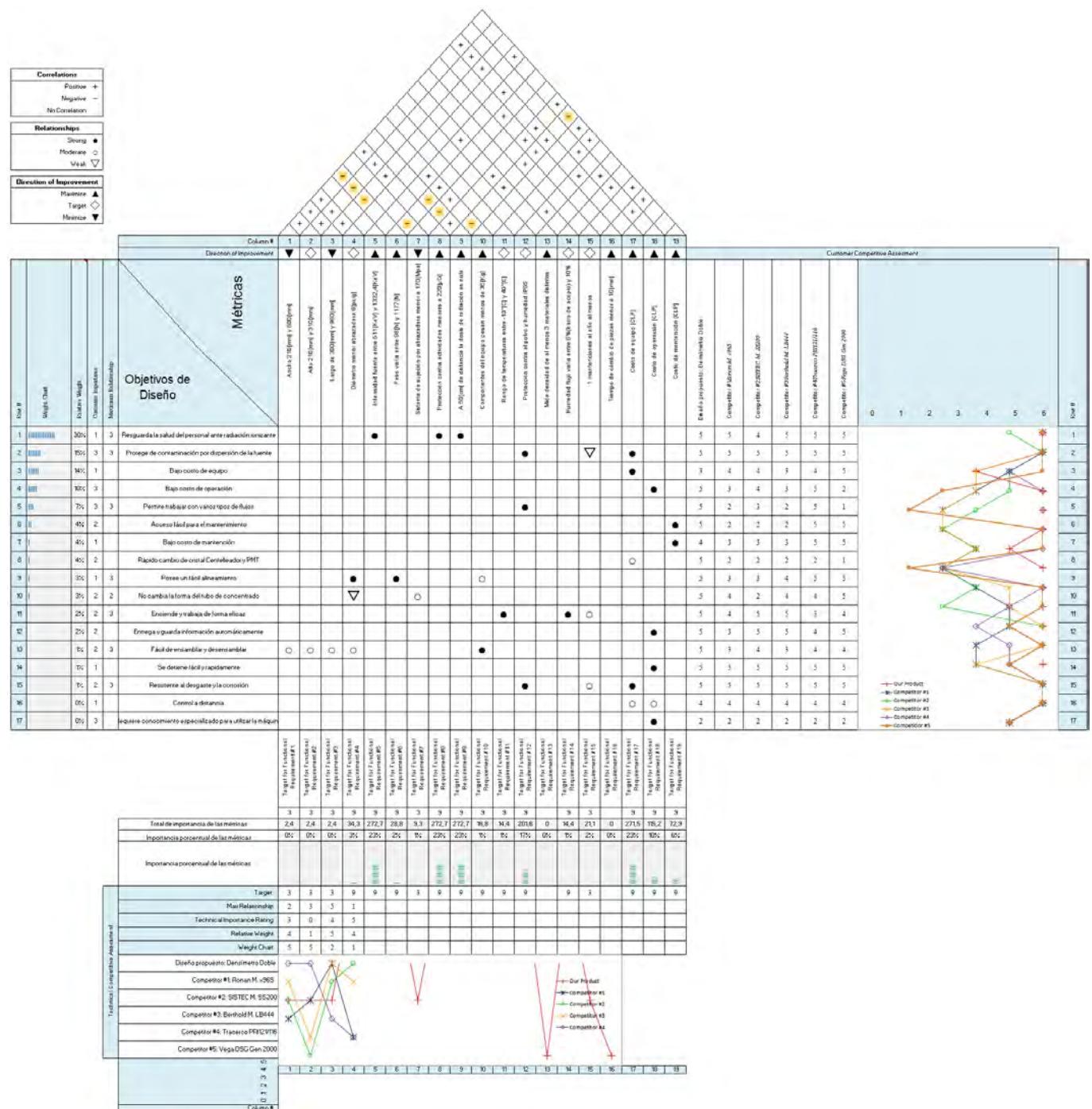
D W	Requerimientos
1. Geometría	
D	Ancho 210[mm] y 800[mm]
D	Alto 210[mm] y 310[mm]
D	Largo 300[mm] y 960[mm]
D	Diámetro menor abrazadera 6[pulg]
2. Radiación	
D	Energía fuente entre 511[keV] y 1332,5[keV]
3. Fuerzas	
D	Peso varía entre 98[N] y 1177[N]
W	Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170[Mpa]
4. Seguridad	
D	Protección contra actividades menores a 220[μCi]
D	A 50[cm] de distancia la dosis recibida es nula
5. Transporte	
W	Componentes del equipo pesan menos de 35[Kg]
6. Operación	
D	Rango de temperaturas entre $-10^{\circ}C$ y $40^{\circ}C$
D	Protección contra el polvo y humedad IP65
W	Mide densidad de al menos 3 materiales distintos
W	Humedad flujo varía entre 6 % (barro de acopio) hasta 10 %
7. Mantenimiento	
W	1 mantenciones al año al menos
W	Tiempo de cambio de piezas menor a 10[min]
8. Costos	
D	Costo de equipo [CLP]
D	Costo de operación [CLP]
D	Costo de mantención [CLP]

5.10 Matriz requerimientos-objetivos

Tabla de congruencias entre **Objetivos** y **Requerimientos** marcados con un círculo:

Peso ponderado	Objetivos de Diseño	Métricas									
		Ancho 210[mm] y 800[mm]	Alto 210[mm] y 310[mm]	Largo 300[mm] y 960[mm]	Diámetro menor abrazadera 6[pulg]	Intensidad fuente entre 511[keV] y 1332,4[keV]	Peso varía entre 98[N] y 1177[N]	Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170[Mpa]	Protección contra actividades menores a 220[μCi]	A 50[cm] de distancia la dosis recibida es nula	Componentes del equipo pesan menos de 35[Kg]
0,303	Resguarda la salud del personal ante radiación ionizante										
0,145	Protege de contaminación por dispersión de la fuente										
0,137	Bajo costo de equipo										
0,103	Bajo costo de operación										
0,073	Permite trabajar con varios tipos de flujos										
0,043	Acceso fácil para el mantenimiento										
0,038	Bajo costo de mantenimiento										
0,038	Rápido cambio de cristal Centelleador y PMT										
0,032	Posee un fácil alineamiento										
0,031	No cambia la forma del tubo de concentrado										
0,016	Enciende y trabaja de forma eficaz										
0,015	Entrega y guarda información automáticamente										
0,008	Fácil de ensamblar y desensamblar	●									
0,007	Se detiene fácil y rápidamente	●									
0,006	Resistente al desgaste y la corrosión										
0,003	Control a distancia										
0,002	Requiere conocimiento especializado para utilizar la máquina										

5.11 Despliegue de la función de casa de la calidad(QFD)



5.12 Resolución de contradicciones de los requerimientos

Anteriormente en el análisis QFD se mencionaron las correlaciones de las métricas. Esta sección tiene por objetivo trabajar con aquellas correlaciones que son contradictorias, en relación a su dirección de mejora. Para resolver estas contradicciones se utilizará como apoyo el método TRIZ(**tabla 5.7**).

Tabla 5.7: Principales competidores o sustitutos

Problema particular	Problema general	Solución general	Solución particular
Ancho, alto y largo VS Peso varía entre 98[N] y 1177[N]	8. Volumen de un objeto VS 2. Peso de un objeto	2. Extracción	La máquina puede ser separada en diversas partes para separar el peso
Peso varía entre 98[N] y 1177[N] VS Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170[MPa]	10. Fuerza VS 31. Efectos secundarios dañinos	24. Mediador	Mejorar roce de abrazadera agregando una lámina de caucho
Peso varía entre 98[N] y 1177[N] VS A 50[cm] de distancia la dosis de radiación es nula	10. Fuerza VS 31. Efectos secundarios dañinos	9. Acción contraria previa	En lugar de reducir el plomo y aumentar la distancia de seguridad. Mejor aumentar el plomo para reducir la distancia de seguridad
Sistema de sujeción por abrazadera menor a 170[MPa] VS A 50[cm] de distancia la dosis de radiación es nula	11. Tensión, presión VS 31. Efectos secundarios dañinos	27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable	Explicar en manual de uso de máquina que la distancia del usuario es la mejor protección
A 50[cm] de distancia la dosis de radiación es nula VS Componentes del equipo pesan menos de 35[Kg]	31. Efectos secundarios dañinos VS 10. Fuerza	9. Acción contraria previa	En lugar de reducir el plomo para facilitar el transporte. Mejor aumentar el plomo para aumentar la seguridad
A 50[cm] de distancia la dosis de radiación es nula VS Costo de mantenimiento [CLP]	31. Efectos secundarios dañinos VS 16. Durabilidad de un objeto	21. Despachar rápidamente	Diseño modular que permite rápidamente extraer el componente a reparar

5.13 Generación de conceptos

En la presente sección se realizará un **"Análisis de Patentes"** por función. Esta consta de una búsqueda de tecnologías y equipos que realicen funciones relacionadas con el diseño del densímetro nuclear. Acto seguido se realizará una **"Carta Morfológica"** donde las funciones anteriormente mencionadas, son segregadas en conceptos clave que puedan llenar ciertas características necesarias para el modelo propuesto. Posteriormente viene la realización de un **"Brainstorming"** que promueve la generación de una gran cantidad de ideas relacionadas al nuevo diseño. De esta forma se generan diversos hilos de alternativas u opciones que detallan al concepto lo mejor posible.

5.13.1 Análisis de patentes por función

Las funciones propuestas en la **tabla 5.9** y utilizando la **Lista de objetivos argumentada punto 5.5**, se relacionan con las patentes de importancia para este proyecto nombradas en el **punto 4.1**. De esta forma se pueden entender los puntos claves que se busca en el diseño del densímetro y que ya se encuentran patentados en el mercado.

Tabla 5.8: Análisis de patentes por función

Función	Nº Patente US	Descripción
Tomar medidas de densidad en tiempo real	3,787,683	Válvula de radiación para medir densidad de fluidos
	4,520,267	Método para determinar fluctuaciones rápidas de densidad de líquidos de enfriamiento para reactores nucleares
Discriminar y medir componentes del flujo	2,953,681	Sistema para medir indices de flujos de masas por radiación
	4,520,267	Método y aparato para analizar oro por radiación gamma
	5,073,915	Rápidas tomas de medidas en diversas soluciones metálicas
Detectar fotones	3,898,463	Aparato contador de centelleo
	103,185,685	Tubo U que cuenta dos veces
Generar luz a partir de radiación	0,137,808 A1	Aparato para medir densidad
Procesar pulsos digitales	4,205,230	Medidor de indice de flujo sólido de materiales

5.13.2 Benchmarking por función

Las funciones propuestas en la (**tabla 5.8**), más la **Lista de objetivos argumentada (punto 5.5)**. Se relacionan con los modelos de densímetros de interés propuestos en el **Benchmarking por objetivos (punto 5.5)**. En la siguiente **tabla 5.9** se realiza una puntuación entre 1 y 5, siendo **1=muy malo** y **5=muy bueno**. Mostrando la puntuación promedio de estos modelos comparando su “performance” o rendimiento frente a las funciones clave.

Tabla 5.9: Análisis de competidores por función

Función	Densímetro Doble	Ronan M. x96S	SISTEC M. SS200	Berthold M. LB444	Tracerco PRI121/116	Vega DSG Gen 2000
Tomar medidas de densidad en tiempo real	5	5	5	5	5	5
Discriminar y medir componentes del flujo	5	3	3	5	3	3
Detectar fotones	5	4	4	5	4	0
Generar luz a partir de radiación	5	2	4	5	2	0
Procesar pulsos digitales	5	5	4	5	5	5
Promedio	5	3,8	4	5	3,8	2,6

5.13.3 Brainstorming

El diagrama de **Lluvia de Ideas** (**figura 5.4**), constituye un método eficaz para resolver problemas de orden de funciones y características de interés en el diseño del densímetro nuclear. Las funciones son obtenidas del diagrama de "Caja Transparente" (**figura 5.2**). Donde estas son ordenadas tanto en paralelo como en serie para explicar el funcionamiento del equipo.

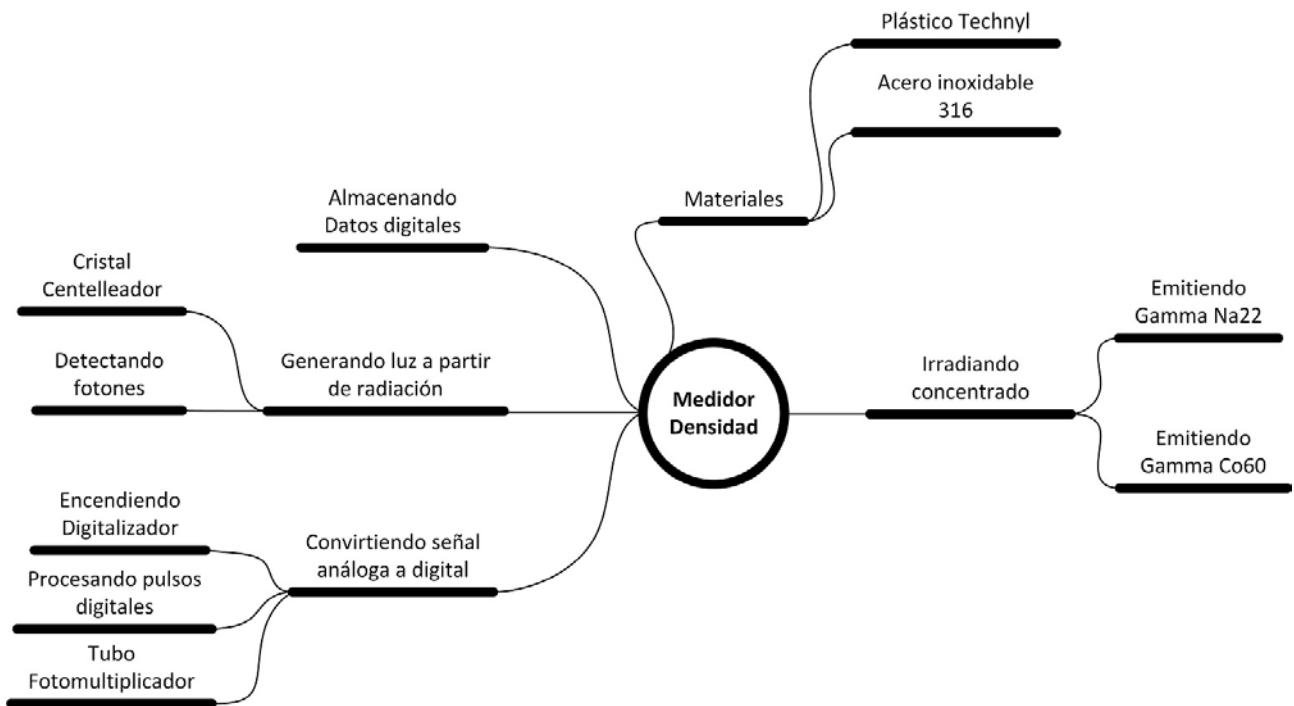


Figura 5.4: Brainstorming de funciones [1]

5.13.4 Carta Morfológica

En la siguiente carta morfológica (**figura 5.10**), se mostrarán diversos diseños para solucionar determinadas funciones y sub-funciones que puede presentar el sistema. Posteriormente estas opciones serán utilizadas para trazar un camino de solución para diseñar un equipo competente a las necesidades requeridas.

Tabla 5.10: Principales competidores o sustitutos

Función	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Modelo Densímetro	Modelo común	Modelo con etiquetador	Modelo Litodensitómetro
Interfaz	Ensamble por abrazadera	Fijación por soldadura	Ensamble por flanges y pernos
Abrazador	Abrazador por planchas y espárragos	Abrazadera de tubo	Perfil circular y pernos
Alineador	Perfiles en "V" y espárragos	Estructura de acople	Estructura integrada al tubo
Disparador	Gatillo vertical indirecto	Gatillo telescópico	Gatillo electrónico

5.13.5 Arquitectura

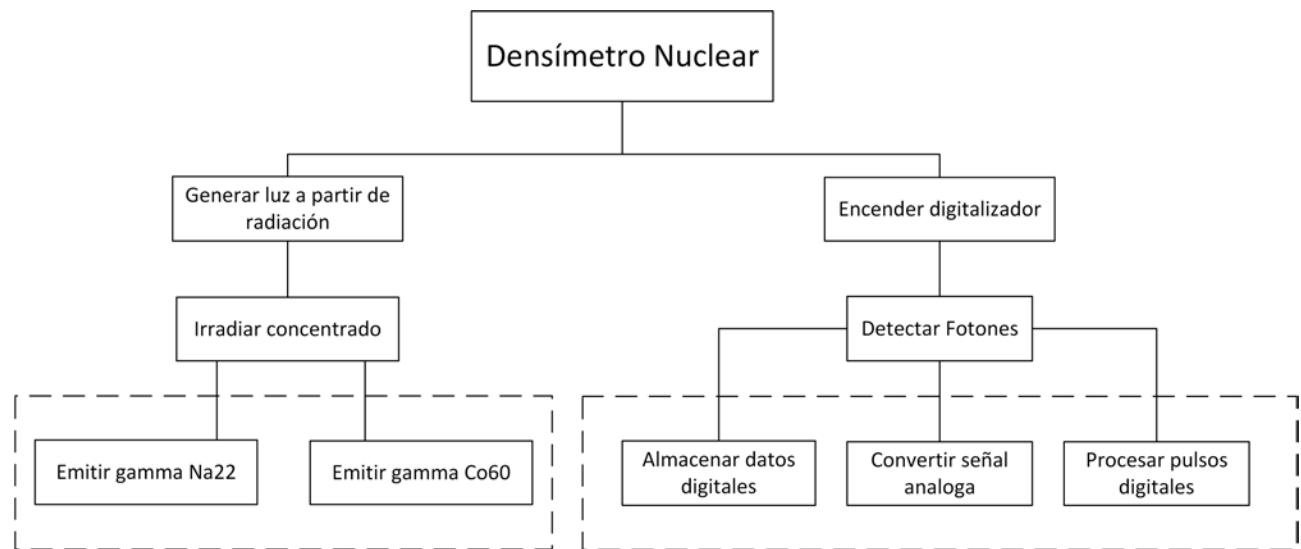


Figura 5.5: Brainstorming de funciones [1]

5.13.6 Layout

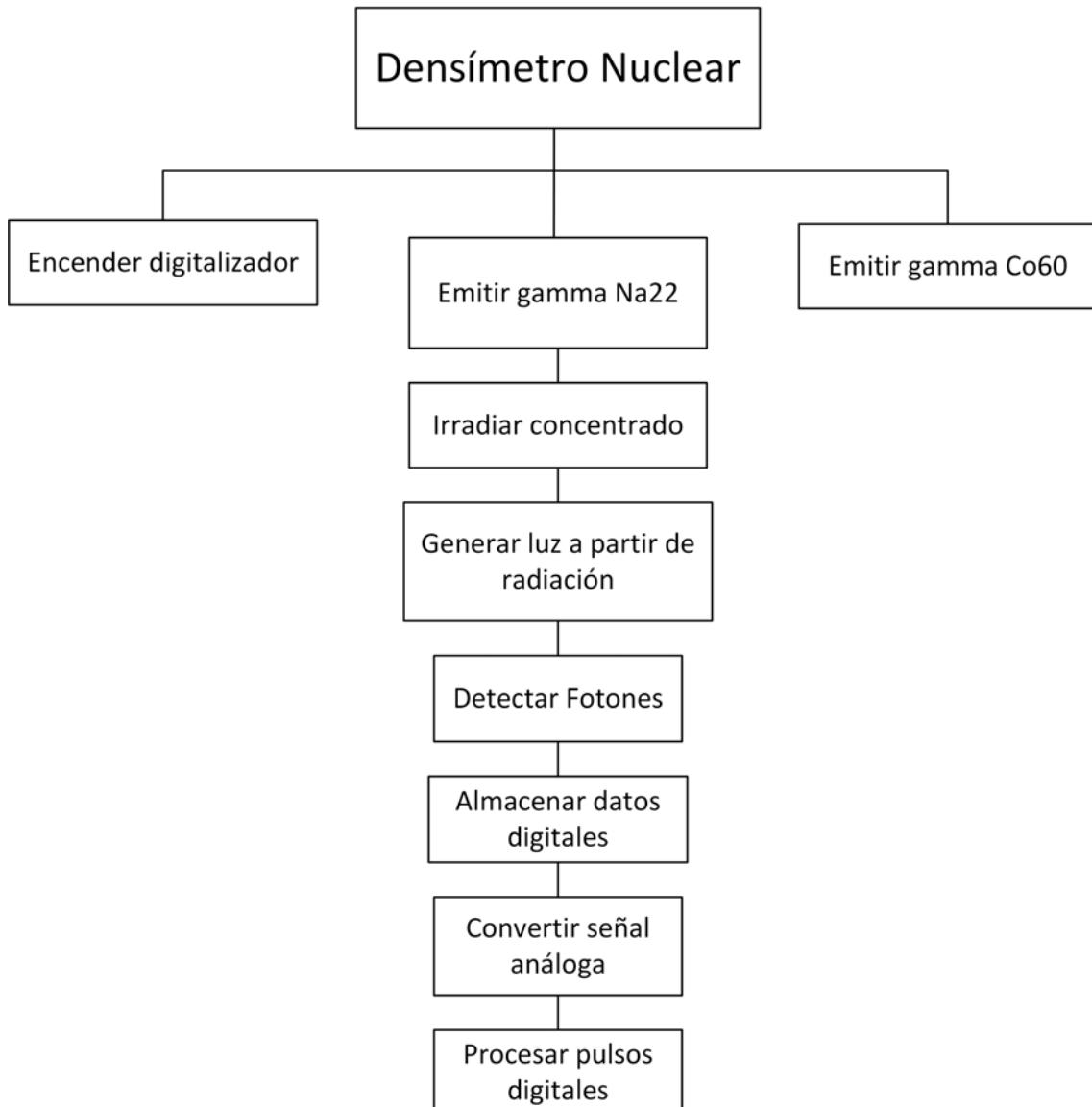


Figura 5.6: Brainstorming de funciones [1]

Capítulo 6

Diseño de Realización (o Diseño Básico)

6.1 ¿Qué es un detector gamma?

El detector gamma está compuesto de un **Cristal Centelleador**, más un **Tubo Fotomultiplicador (PMT)**. La radiación gamma en forma de ondas electromagnéticas alcanzan los minerales enriquecidos del Cristal Centelleador, el cual brillará a causa de los cambios energéticos internos producidos por esta. Estos nuevos fotones, producidos en el cristal, serán captados por el Tubo Fotomultiplicador, que cumple la función de entregar estos datos al adquisidor de datos Caen, donde se podrá procesar la información y hacer los cálculos respectivos de densidad.

Un detector gamma que funciona con un PMT, en la actualidad es una tecnología un tanto desfasada que presenta un problema de interferencias debido a ondas electromagnéticas externas. Para esto se utilizan "metales ferromagnéticos" capaces de detener estas ondas, las cuales poseen un índice de permeabilidad alto como por ejemplo el metal llamado "**Mu-metal**", el cual posee un índice de permeabilidad del orden 80,000. Con este metal recubrimos el exterior del Cristal Centelleador y una porción del Fotomultiplicador para asegurar la efectividad de la medición.



Figura 6.1: Elementos esenciales de un detector gamma [1]

6.1.1 Como funciona un densímetro común

Un densímetro común está compuesto de una fuente y un detector gamma, o también llamado receptor. En temas de seguridad la fuente siempre está cubierta de un protector o "shielding" que controla y también vectoriza la radiación de esta. En otras palabras evita que la radiación se extienda al exterior salvo la zona que se necesita, que será un tubo por donde fluirá el material a medir y finalmente llegará al detector gamma. Una representación del densímetro común puede ser vista en el siguiente dibujo (**figura 6.2**):

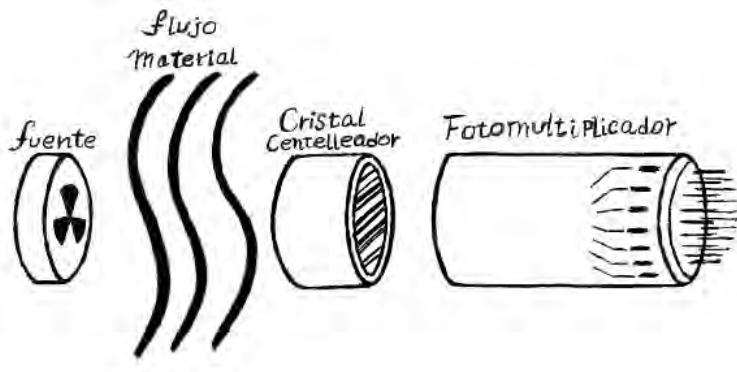


Figura 6.2: Esquema densímetro común [1]

Después de instalar el densímetro en la tubería de concentrado, el primer paso a realizar es la calibración utilizando agua como fluido a medir. Donde se realiza una comparación de una medida experimental, con los valores de una densidad de agua conocida. La medición de densidad de estas se hará de la siguiente forma:

$$I_{agua} = I_0 e^{-x\mu_{agua}} \quad (6.1)$$

$$N_a \frac{Z}{A} \rho_{agua} \sigma_c = \frac{1}{\lambda_{agua}} \Rightarrow \frac{N_a Z}{A} \rho_{agua} \sigma_c = \mu_{agua} \quad (6.2)$$

LA calibración con agua debe realizarse mas de una vez a lo largo de la utilización del sistema, debido al decaimiento medio de la fuente radiactiva. Posteriormente a la calibración con agua, viene la etapa de medición del contenido que en este caso sería concentrado de cobre:

$$I_{cobre} = I_0 e^{-x\mu_{cobre}} \quad (6.3)$$

$$N_a \frac{Z}{A} \rho_{cobre} \sigma_c = \frac{1}{\lambda_{cobre}} \Rightarrow \frac{N_a Z}{A} \rho_{cobre} \sigma_c = \mu_{cobre} \quad (6.4)$$

En la etapa de calibración se irradia el agua, y el receptor lee la información y la muestra al personal a cargo del equipo detector. La idea de calibrar al equipo con agua, es para encontrar y utilizar la zona de sección eficaz del efecto Compton que la fuente posee.

Cabe destacar que la fuente de este diseño debe ser potente, ejemplo un gramo de Cobalto-60 que posee una actividad de $1,85[TBq]$ y aproximadamente una dosis de $0,5[mSv*min]$ a un metro de distancia, por lo tanto esta exposición es directamente nociva para la salud. Lo cual representa una desventaja debido a la alta peligrosidad de la prolongada exposición del personal a la radiación.

6.1.2 Como funciona un densímetro con etiquetador

La principal diferencia del diseño de un etiquetador (**figura 6.3**) es la adición de un segundo cristal centelleador y tubo fotomultiplicador, que se ubican justo detrás de la fuente radiactiva y a muy poca distancia. De esta forma se realizará una lectura, con solo aire (sin interferencias ni flujos), de la actual intensidad (real) de la fuente, ya que esta tiende a perder potencia durante el tiempo.

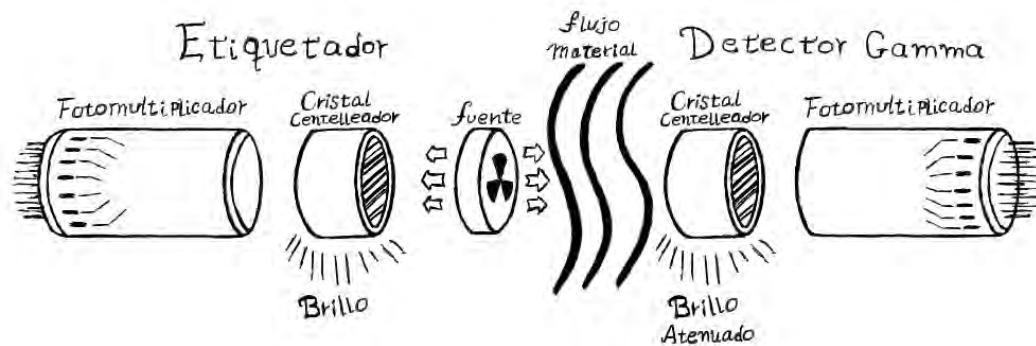


Figura 6.3: Esquema de densímetro con etiquetador [1]

La función del etiquetador es hacer una lectura de la atenuación del flujo de partículas y al mismo tiempo otra lectura “ limpia ” del flujo de partículas inicial. Estas dos lecturas del mismo evento, deben mostrar una diferencia en intensidad del haz gamma al mismo tiempo que auto calibra el sistema a medida que la fuente radiactiva decae.

$$I_{aire} = I_0 e^{-x\mu_{aire}} \quad (6.5)$$

$$\frac{N_a Z}{A} \rho_{aire} \sigma_c = \frac{1}{\lambda_{aire}} \Rightarrow \frac{N_a Z}{A} \rho_{aire} \sigma_c = \mu_{aire} \quad (6.6)$$

$$I_{cobre} = I_0 e^{-x\mu_{cobre}} \quad (6.7)$$

$$\frac{N_a Z}{A} \rho_{cobre} \sigma_c = \frac{1}{\lambda_{cobre}} \Rightarrow \frac{N_a Z}{A} \rho_{cobre} \sigma_c = \mu_{cobre} \quad (6.8)$$

La instrumentación nuclear del densímetro común tradicional utiliza un solo sensor, no habiendo posibilidad de hacer un monitoreo directo de la actividad de la fuente. Esto hace necesario estimar el decaimiento de la fuente radiactiva. Por otro lado, la atenuación de la radiación se calcula en un tiempo de integración definido y en base a un valor estimado/calibrado de radiación incidente, donde no hay referencia alguna a la medición.

La medición por coincidencias permite, gracias al etiquetador, definir un evento de medición, para el cual se tiene una estadística y probabilidad de ocurrencia previamente definidos (medida en calibración).

Utilizando esta probabilidad, y en base a una estadística menos complicada a la necesaria en el método tradicional, es posible medir la atenuación con mayor eficiencia. Este proceso hace posible utilizar una fuente radiactiva de intensidad menor a la utilizada por los equipos tradicionales, lo que disminuye el riesgo de la exposición del personal a radiaciones nocivas.



Figura 6.4: Vista de un etiquetador(Tagger). Fuente(amarillo), cristal centelleador(celeste) y tubo fotomultiplicador(cañón).

[1]

Debido a que existe una lectura sin atenuación, donde la distancia es muy corta y el volumen de aire es muy poco (**figura 6.4**). Se puede tener una mayor precisión de la potencia actual de la fuente radiactiva al momento de hacer la comparación respecto a la lectura de atenuación del flujo de partículas que lee el detector gamma que esta detrás del flujo de concentrado de cobre. También la calibración del equipo es más sencilla, en este caso al utilizar agua, el proceso resultara ser mucho más corto, eficiente ,y solo se necesitará realizar una sola vez.

6.1.3 Como funciona el densímetro doble

La Litología es una parte de la geología que estudia la composición y estructura de las rocas, como su tamaño de grano, características físicas y químicas, estructuras sedimentarias, etc. También incluye su composición, su textura, composición mineralógica, distribución espacial y material cementante.

Es posible crear una máquina que pueda mostrar toda esta información mencionada, utilizando radiación gamma. Lo que nos trae a la unión entre la tecnología de un densímetro nuclear y la Litología. Esta es llamada "**Litodensidad(Lithodensity)**".

El objetivo de esto es obtener una solución exacta que encuentre un equilibrio en el haz de fotones que existe en un medio infinito o mezcla de infinitos materiales, gracias a una fuente que contribuye uniformemente en este haz. Existe evidencia de que la energía se transporta a una gran distancia por colisiones de ángulo pequeño Compton que no afectan a la energía del fotón (**figura 6.5**).

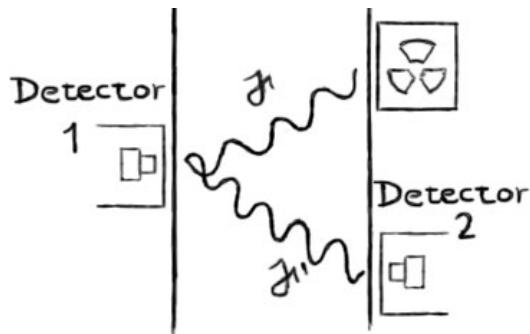


Figura 6.5: Lectura de efecto Compton. [1]

Existe un modelo teórico llamado: "**La base física de la formación litológica con rayos gamma**(The physical foundation of formation lithology logging with gamma rays, W.Bertozzi, D.V.Ellis y J.S.Wahl)", que habla del proceso de propagación de fotones y el desarrollo de un espectro gamma. Debido a este estudio se encontró una solución precisa para el simple caso de un **Medio Infinito con Fuentes Uniformemente Distribuidas**(Infinite medium with uniformly distributed sources "IMUDS"). La aplicación de este modelo trata de entender la variación de densidad respecto a los cambios en la litología, y la naturaleza de la perturbación inducida por un detector en el espectro de equilibrio.

Según este modelo teórico se afirma que existe una forma de medir densidad, midiendo rayos gamma de baja energía. Estos muestran una región de energía donde el efecto fotoeléctrico y el Compton son comparables. Este descubrimiento es importante, debido a que se puede crear información litológica vía "**sección cruzada(cross-section)**" (**figura 6.6**), donde se puede identificar el número atómico específico de cada material en una sección eficaz que comprende tanto al efecto Fotoeléctrico (IF) y efecto Compton (IC). El efecto Fotoeléctrico presenta una mejor efectividad al momento de medir elementos específicos en un entorno de baja energía, donde existen numerosos materiales que interfieren con la dispersión Compton.

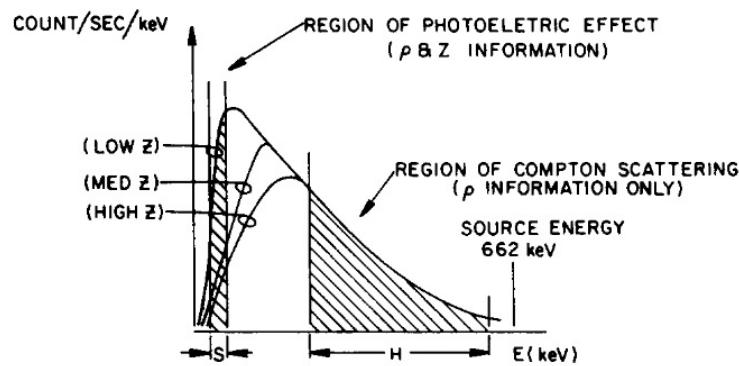


Figura 6.6: Sección cruzada, donde predomina efecto fotoeléctrico para leer el número atómico [11]

Gracias a este avance es posible crear un espectro en una sección localizada y especificada por el método IMUDS, que podrá anticipar pequeños cambios en específicas geometrías por métodos analíticos, y con una razonable certeza.

Para generar esta sección localizada que utilizará este espectro con una angulación compton determinada, que será analizada bajo el modelo IMUDS. Se creará un densímetro doble que estará compuesto de los dos modelos mencionados anteriormente, por lo que podríamos llamarlo un híbrido. Primero cuenta con una fuente de alta intensidad radiactiva de Cobalto-60 más su detector gamma, y a 90° de este se cruza una fuente, de baja intensidad, de Sodio-22 con etiquetador y su respectivo detector gamma (**figura 6.7**). De esta forma se podrá hacer el estudio IMUDS antes mencionado, en dos rangos de energía que generarán la sección cruzada que se desea investigar.

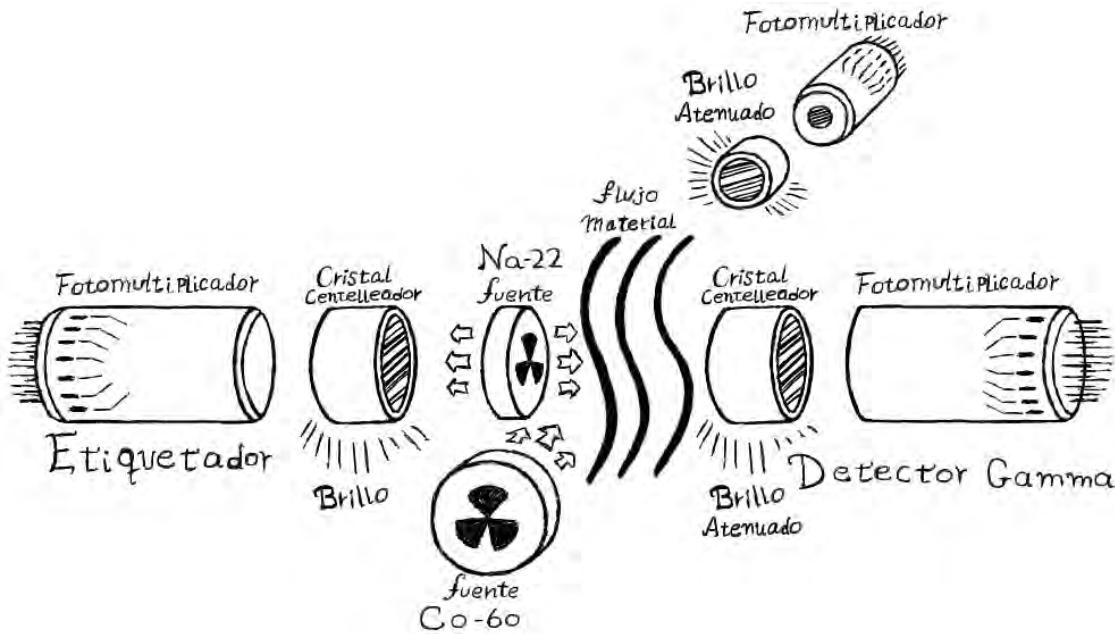


Figura 6.7: Esquema de densímetro doble. [1]

El avance más ambicioso, y objetivo a largo plazo es construir un sistema que pueda identificar diversos componentes específicos en el concentrado de cobre. Como por ejemplo sería útil encontrar la ley del cobre, o buscar concentraciones de metales preciosos como oro o plata dentro de la mezcla. Como ejemplo, la **figura 6.8** muestra un espectro gamma que puede diferenciar entre los diversos componentes que albergan una tubería industrial de 8[pulg] que fue llenada con agua no potable. El gráfico destaca la separación de los pesos atómicos en la sección cruzada, que es la curva antes del máximo encontrado en los 100[KeV]. En un futuro cercano, esta máquina podrá hacer un análisis simultaneo de densidad y litológico del flujo, en una herramienta que podría llamarse "**Litolodensitómetro**".

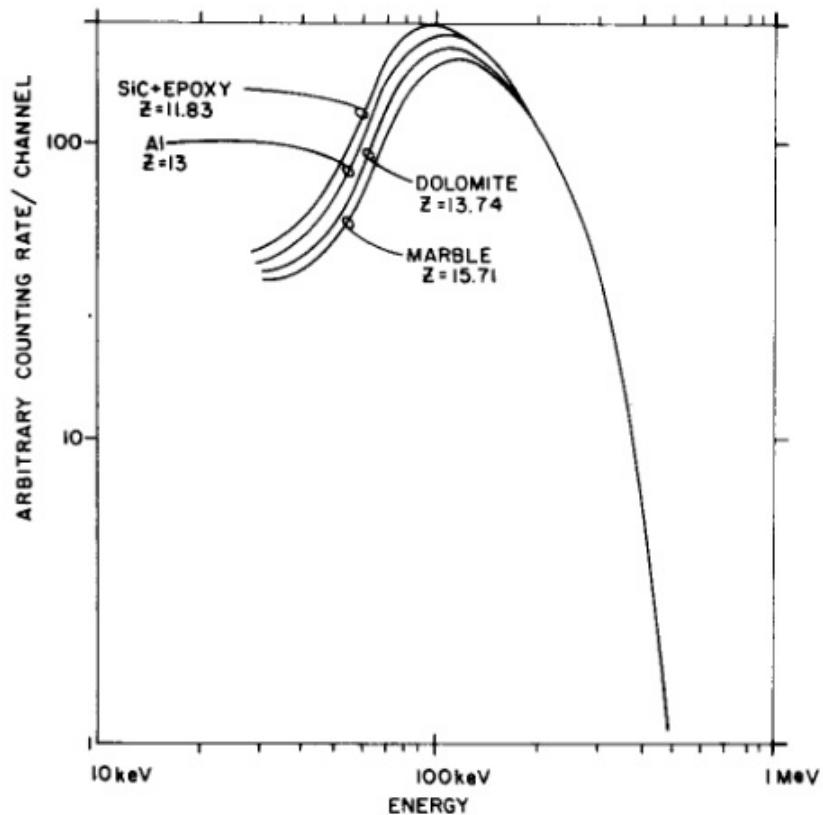


Figura 6.8: Espectro gamma suavizado que diferencia distintos materiales. [1]

6.1.4 Modelo de control de flujo de Radiación

El flujo de radiación es modelado idealmente como una esfera perfecta que se expande desde el centro del isótopo, tal como se muestra en la **figura 6.9**, un "Ángulo Solido" en tres dimensiones. Para la interpretación de la expansión del haz gamma se utilizará un modelo bidimensional, lo que equivaldría a un círculo que se expande hasta tocar con algún objeto. Al suceder esto, en términos básicos, producirá dos tipos de interacciones: será absorbido para desaparecer o generará un fotón. Lo importante es buscar el equilibrio entre estas dos últimas interacciones controlando el lugar donde colisiona el haz gamma.

Una de las formas de controlar la dosimetría que un isótopo genera, es utilizando paredes gruesas de algún material denso. En la siguiente **figura 6.10**, se muestra un ejemplo básico de como se propaga un haz gamma dentro de un sólido denso, y como se muestra el ángulo sólido proyectado al final del trayecto.

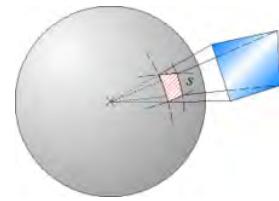


Figura 6.9: Ángulo sólido de una esfera [9]

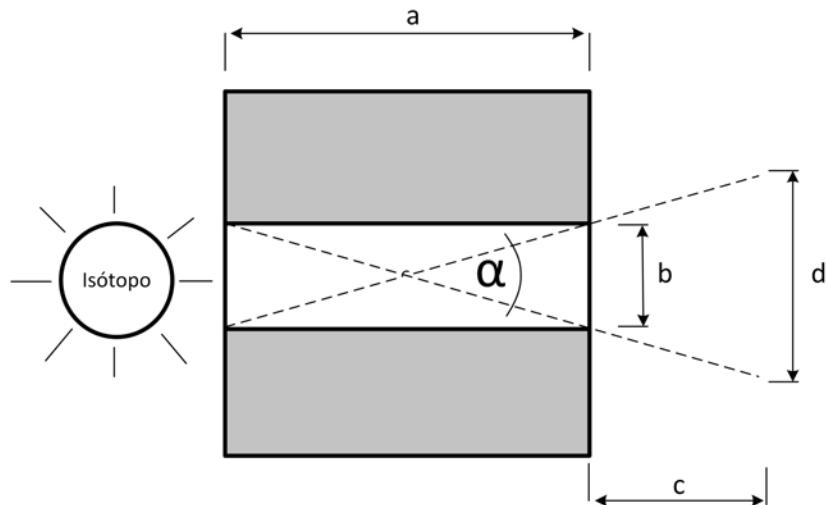


Figura 6.10: Semejanza de triángulos. [1]

Por simple trigonometría y semejanza de triángulos, es posible calcular al ángulo sólido α :

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{b/2}{a/2} \wedge \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{d/2}{(c+d)} \quad (6.9)$$

Igualando las formulas en la **ecuación 6.9** y despejando " d " se tiene una función del Ángulo Solido a través de la variable de distancia " c ". Se representa una proporción lineal, manteniendo fija las dimensiones del colimador " a " y " b ".

$$d = \frac{2bcd}{a} + \frac{b}{2} \quad (6.10)$$

Fijando un diámetro de colimador $b = 2[\text{mm}]$ y una distancia $a = 18[\text{mm}]$, y siendo “ c ” una variable de distancia. Se tiene que “ d ” se comporta de forma lineal en la figura:

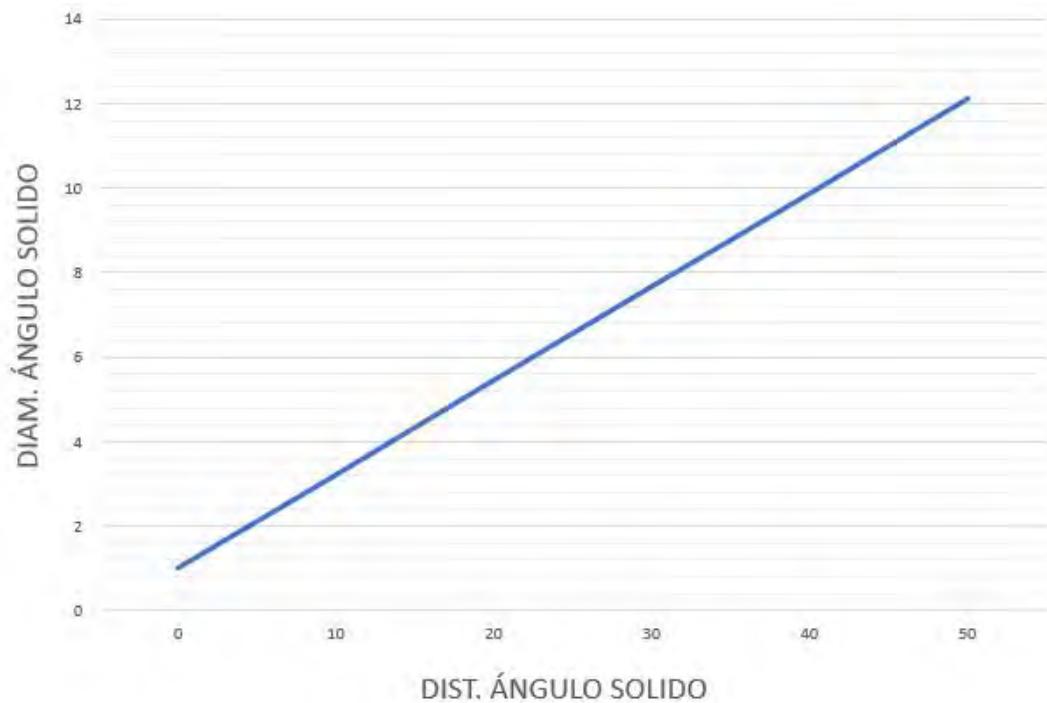


Figura 6.11: Gráfico Diametro VS Distancia Ángulo Solido. [1]

Capítulo 7

Diseño Detallado

En este capítulo se explicarán los componentes del densímetro. Se presentará un diseño terminado del densímetro con etiquetador y se ahondará en sus problemas de diseño. Las soluciones presentadas para este diseño serán las que se apliquen en el diseño conceptual final del Litodensitómetro.

7.1 Definición de componentes

7.1.1 Isótopo o Fuente Radioactiva

Se llama **Radioisótopo o Radionúcleo** a aquel isótopo que es radioactivo. Los átomos que son isótopos entre si, son los que poseen igual número atómico (o número de protones en el núcleo), pero diferente número másico (la suma de número de neutrones y de protones en el núcleo). Entonces los isótopos difieren entre sí por el número de neutrones.

Utilizar una fuente radioactiva de distinto tipo e intensidad, hace variar la técnica de la densimetría nuclear. Esto sucede porque cada isótopo en particular emite fotones con cierta energía definida, y emiten radiación a una tasa por unidad de tiempo específica, mientras este se desintegra. Esta tasa es proporcional a la semivida del radioisótopo. Donde la semivida se define como el periodo de tiempo que debe transcurrir para que la actividad de una muestra caiga a la mitad. Por lo que se recomienda que los radionúcleos utilizados en industrias posean una semivida larga, para asegurar la longevidad de la fuente y su actividad.

Existen diversos usos de los Radioisótopos que miden parámetros diversos (**tabla 7.1**), ya sean: grosor de papel, grosos de lámina metálica, densidad de líquido, densidad de suelo, humedad de suelo, concentración de sedimento en suspensión, concentración de ceniza de carbón, medidor de flujo multifase. Como ejemplo para medir densidad en flujos de líquidos, se utilizan fuentes específicas como: Cesio.137, Bario-133, Americio-241 o Cobalto-60. Estas fuentes poseen niveles de radiactividad relativamente altos.

Tabla 7.1: Distintos tipos de uso industrial para radioisótopos

Parámetro a medir	Fuente
Grosor de papel	Kr-83, Sr-90, Pm-157, TI-204
Grosor de lama metálica	Am-141, Cs-137, Co-60
Densidad de líquido	Cs-137
Densidad de suelo	Cs-137
Humedad de suelo	Am-241/Be, Cf-252
Concentración de sedimento en suspensión	Cd-109, Am-241
Concentración de ceniza de carbón	Cs-137 + Am-241
Medidor de flujo multifase	Cs-137 + Am-241

La fuente mas importante que se utilizará en el diseño conceptual del Litodensímetro será la Na-22 (**figura 7.1**), que también es usada en el densímetro con etiquetador. Esta fuente está recubierta de una resina epóxica de alto impacto que puede tener un color codificado para su identificación. La estructura contenedora de la fuente es de aluminio y la máxima actividad que esta puede presentar es de $0,22[mCi]$. Estas fuentes se pueden adquirir en Chile por la empresa CGM Nuclear S.A.

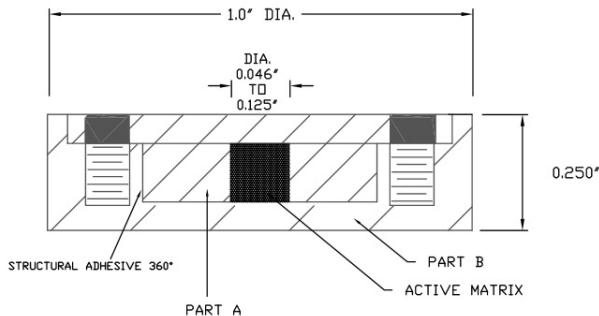
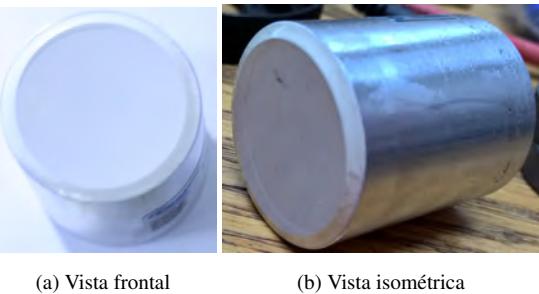


Figura 7.1: Corte transversal de un Radioisótopo Na-22 [3]

7.1.2 Cristal Centelleador

Un **Cristal Centelleador** (**figura 7.2**) es un material que centellea, es decir, exhibe luminiscencia cuando por el pasa radiación ionizante (electrones, positrones u otras partículas o iones más pesados). Esto sucede porque el material absorbe parte de la energía de la partícula incidente y la re-emite en forma de un corto destello de luz, típicamente en el rango visible. Si esta re-emisión es rápida, se le conoce como fenómeno de fluorescencia. De lo contrario, si la excitación es larga, se le conocerá como fenómeno de fosforescencia.



(a) Vista frontal

(b) Vista isométrica

Figura 7.2: Vistas de Cristal Centelleador [1]

Los detectores de centelleo como el PMT o el MPPC, son los más utilizados en la industria para la medición de radiactividad. Estos perciben la interacción de la radiación gamma con la materia, ya sea efecto fotoeléctrico, efecto Compton y producción de pares.

Cuando se liberan electrones sobre un material, este tiende a volver a su estado fundamental, lo cual produce fotones que generalmente se encuentran en el intervalo visible o ultravioleta de la luz. Sin embargo es importante mencionar que la transición de los electrones de vuelta a la banda de valencia estable, solo en cristales centelleadores, es lenta debido a su dopaje con impurezas las cuales crean estados intermedios de la energía antes de volver al estado de valencia. Debido a esto presentan gran poder de frenado de radiación gamma, además su eficiencia relativa al centellear (**tabla 7.2**) aumenta dependiendo de las dimensiones físicas del cristal.

Tabla 7.2: Ejemplos de cristales centelleadores y sus eficiencias

Nombre	Tipo	Efic. Relativa
Anthracene	Sol. Organico	0,43
Pilot B	Sol. Organico	0,30
NE 213	Liq. Organico	0,34
Nal(TI)	Cristal Inorg.	1,00
Csf	Cristal Inorg.	0,05

Los cristales centelleadores utilizados en el densímetro con etiquetador son LaBr₃(Ce) Crystal de 32[mm] y 56,2[mm] de diámetro, y otro del mismo tipo pero de medidas 50[mm] y 100[mm] de largo, respectivamente. Este último esta encapsulado en una estructura de aluminio. Ambos pueden ser conseguidos en la empresa Epic Crystal Company Limited.

7.1.3 Tubo Fotomultiplicador

El tubo **fotomultiplicador** (**figura 7.3**) es un tipo de detector óptico de vacío que aprovecha el efecto de emisión secundaria de electrones para responder a niveles muy bajos de iluminación, manteniendo el nivel de ruido aceptable.

Esta compuesto de un photocátodo, que emite electrones cuando sobre el inciden fotones de energía luminosa, también llamados fotoelectrón. Un campo eléctrico acelera a estos electrones y los dirige hacia un Ánodo, que en estos tubos recibe el nombre de “Dínodo”. El número de Dínodos y su disposición varía con el modelo de fotomultiplicador.

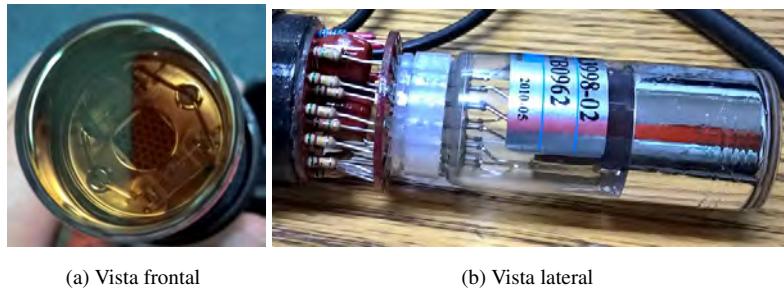


Figura 7.3: Vistas de Tubo Fotomultiplicador [1]

Cuando la luz entra al photocátodo, se convierte la energía de la luz incidente en fotoelectrones emitidos al vacío, los cuales enfocados hacia los Dínodos, donde son multiplicados en un proceso de emisión secundaria. La señal de salida se obtiene en el ánodo. Donde la eficiencia de conversión o sensibilidad del cátodo, varía con la longitud de onda incidente. Esta sensibilidad se llama “**Respuesta Espectral Característica**” y en estos tubos es muy alta, generando poco ruido.

Tipos de fotomultiplicadores

- **Tipo frontal:** Tiene un photocátodo semitransparente el cual es del tipo transmisor, que permite tener mejor uniformidad que el tipo lateral. La disposición frontal permite barrer áreas en un rango definido por el tamaño del tubo fotomultiplicador.
- **Tipo lateral:** Los fotomultiplicadores laterales emplean un photocátodo del tipo reflector y una estructura de jaula circular para los Dínodos, lo que ofrece buena sensibilidad y amplificación con un voltaje de alimentación relativamente bajo. Usados generalmente en espectrofotometría y sistemas fotométricos en general, reciben la luz incidente por un lado del tubo de vidrio. Las ventajas son su bajo costo.

- **Otros tipos:** Se pueden hacer combinaciones de los dos fotomultiplicadores arriba mencionados para mejorar, por ejemplo, la recepción angular de luz, necesaria para experimentos de física de altas energías.

7.1.4 Mu-Metal

El **Mu-Metal** (**figura 7.4**) es una aleación de níquel-hierro compuesta de 75% níquel, 15% hierro, además de cobre y molibdeno. Esta posee una permeabilidad magnética muy alta que hace al Mu-Metal muy eficaz en la detección de campos magnéticos estáticos o de baja frecuencia, que no puede ser atenuada por otros métodos. Debido a esto el nombre griego de la letra "mu"(μ), que representa la permeabilidad.

Sobre las permeabilidades relativas, se pueden tener desde $80,000 - 100,000$ [*miliDarcys*] en comparación con los valores de $10,000 - 20,000$ [*miliDarcys*] de los aceros no aleados.



Figura 7.4: Mu-Metal enrollado para envolver al PMT. [1]

Los objetos de Mu-Metal requieren un tratamiento térmico después de que adoptan su forma definitiva. Se aplica un recocido en un campo magnético, en atmósfera de hidrógeno, donde aumenta la permeabilidad magnética alrededor de 40 veces. El recocido altera la estructura cristalina del material, alineando los granos y eliminando algunas impurezas, especialmente de carbono, que impiden el movimiento libre de los **Dominios Magnéticos**.

La flexión o la aplicación de golpes después del recocido, puede alterar la alineación de granos del material, dando lugar a una disminución de la permeabilidad de las zonas afectadas, que puede ser restaurada mediante la repetición de la etapa del recocido en atmósfera de hidrógeno.

La alta permeabilidad del Mu-Metal proporciona una ruta de baja resistencia para el **Flujo Magnético**, lo que lleva a su uso principal, que es el **Escudo Magnético** contra **Campos Magnéticos estáticos** o que varían lentamente. Las zonas protegidas por el Mu-Metal establecen una ruta para las **Lineas de Campo Magnético** alrededor de la zona blindada, por lo que la mejor forma para proteger es envolviendo el espacio a proteger.

7.1.5 Colimador

Un **Colimador** ([figura 7.5](#)) es un sistema que sirve para homogeneizar las trayectorias, vectores o rayos que emitidos por una fuente, salen en todas direcciones. El resultado es la generación de un caudal de partículas o conjunto de rayos con las mismas propiedades.

Los colimadores ópticos suelen estar formados fundamentalmente por un espejo parabólico, unas lentes y algunos diafragmas. En el caso de los colimadores para emisiones de partículas elementales cargadas se emplean campos eléctricos, magnéticos y diafragmas. Para el caso de partículas neutras se utilizan diafragmas para impedir el paso de partículas que se separan de la dirección elegida y algunos filtros absorbentes para eliminar ciertos rangos de energía.



Figura 7.5: Colimador con apertura de 2mm. [\[1\]](#)

Un colimador es un instrumento de precisión para que cada eje óptico de cada lente o espejo coincida con el rayo central del sistema, de esta forma se consiga un haz de señal fino y detallado.

Capítulo 8

Diseño de Sub-función: Diseño mecánico conceptual Densímetro con Etiquetador

En esta sección se explicará el proceso completo del diseño mecánico conceptual del Densímetro con etiquetador. Se recalca que este diseño de densímetro fue realmente construido y por eso habrá un punto de vista desde la realidad del diseño ya construido.

Primero se hará un estudio de los materiales a utilizar y las características necesarias que un densímetro común utilizaría. Posteriormente se realizará un estudio de un diseño de densímetro común comercial. Haciendo hincapé en sus dimensiones, materiales, tipo de abrazadera o sujeción que utilice, normas de seguridad, etc.

Posteriormente se mostrará en detalle el diseño del densímetro con etiquetador. Mostrando despieces de cada una de sus partes, dimensiones, materiales usados, y ángulo sólido. Ademas se enseñara a calcular el espesor de pared de protección contra la radiación. Haciendo uso de lo aprendido en las unidades anteriores. También se hará un estudio de soldaduras y se terminará con el estudio de elemento finito de las abrazaderas.

8.1 Diseño de sub-función: Diseño de densímetro común o comercial

Primero se hará una recopilación de datos extraídos de los “brochures” (**tabla 8.1**) de empresas conocidas como: Berthold, Thermo, Ohmart Vega, Tracerco y Systec. Estas explican los parámetros necesarios para construir un densímetro comercial.

Tabla 8.1: Parámetros densímetro comercial

Parámetro	Tipo o cantidad
Material estructura exterior	Acero inoxidable AISI 304
Material estructura interior	Plástico Technyl
Tipo de soldadura	TIG
Diámetros de Soldadura	3[mm] a 5[mm]
Tipo de Perno	Chromo-Niquel-Molibdeno(inox)
Diámetro Perno	3[mm], 8[mm] , 10[mm] y 13[mm]
Tipo de Golillas	Golillas de seguridad
Temperatura de trabajo	-40[C] a 70[C]
Peso	Sostenedor Fuente 35[Kg] a 60[Kg] Detector Gamma 15[Kg] a 30[Kg] Unidad de control 5[Kg] a 20[Kg]
Protección IP	IP65/66
Protección anti explosión	ATEX
Tipos de sellos	O-Ring
Humedad de fluido	5 % a 10 %

8.1.1 Análisis Densímetro Systec Modelo SS200

El diseño de un densímetro común está compuesto, como se menciono anteriormente, por una fuente radiactiva y un detector gamma. El primer modelo fue basado en el diseño de la empresa “Systec” con su equipo “**Model SS200**” (**tabla 8.2**), el cual utiliza materiales con formas estandarizadas en el mercado de aceros. El diseño contempla un contenedor cilíndrico para la fuente y un perfil rectangular en el detector gamma.



Figura 8.1: Foto densímetro Systec. [12]

Tabla 8.2: Parámetros mecánicos densímetro Systec

Parámetro	Tipo o cantidad
Sostenedor Fuente	Acero inoxidable 316, IP65, Rellenado con plomo
Radioisótopo	Encapsulamiento doble Cs137 o Co60
Detector Gamma	IP65, Acero Inoxidable 316
Unidad de control	IP65, Acero Inoxidable 316
Temperatura de Operación	0° a 60°
Vibración	0[Hz] a 100[Hz]
Humedad	5 a 95%RH
Peso	Sostenedor Fuente 39[Kg] Detector Gamma 19[Kg] Unidad de control 9[Kg]

8.1.2 Estudio de medidas de densímetro Systec

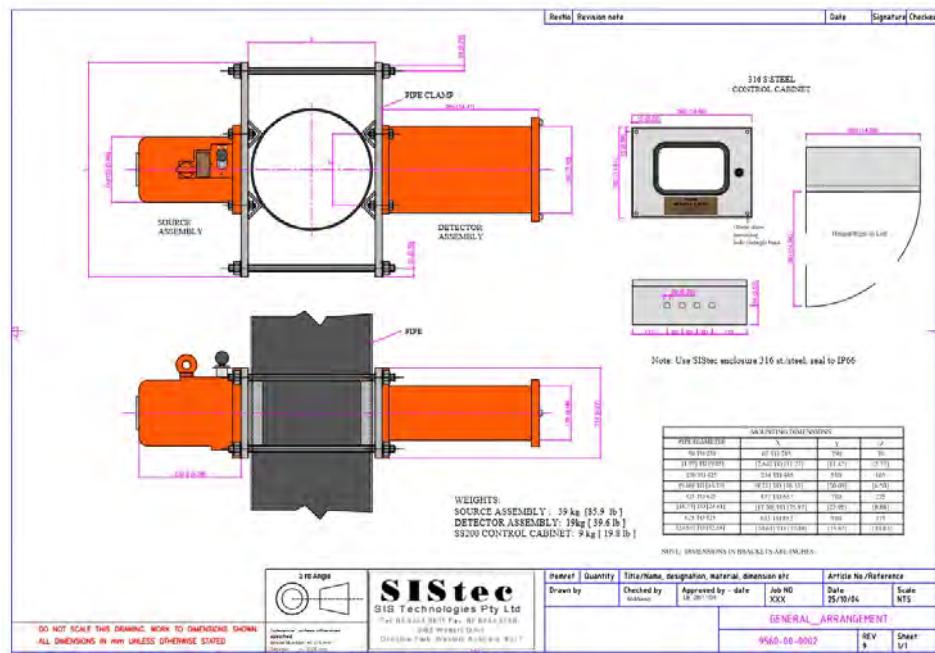


Figura 8.2: Foto densímetro Systec. [12]

Las medidas generales del diseño de un densímetro comercial varían generalmente por la intensidad de su fuente radiactiva, y el diámetro del tubo de flujo a medir. El tamaño de las paredes que detienen la radiación de la fuente, pueden agregar peso mucho peso extra que comprometerá el agarre de las abrazaderas y la estructura del tubo de flujo. Es por esto que se deben realizar análisis estáticos de esfuerzos en las planchas sostenedoras de las abrazaderas que a la vez sostendrán a la fuente.

En la **figura 8.2** se puede apreciar cómo el diseño del modelo SS200 de Systec puede variar según el diámetro de la tubería del flujo a medir. Tenemos dos parámetros: "X" e "Y" que representan a la longitud del espárrago y la arista más larga de la plancha sostenedora (**tabla 8.3**), que también es usada de abrazadera, respectivamente. Las otras medidas pueden variar en caso de no comprometer el centro de gravedad, pero no figuran un cambio importante.

La variable "Z" representa la posición de los pernos de anclaje que sujetarán a la fuente y el detector gamma, con sus respectivas planchas sostenedoras. Esta medida también varía respecto al diámetro del tubo de flujo.

Tabla 8.3: Medidas generales densímetro Systec

Parámetro	Medidas
Sostenedor Fuente	Diámetro: 152[mm] Largo: 239[mm]
Detector Gamma	Perfil rectangular: 202 x 126[mm] Largo: 366[mm]
Espárragos	M10[mm] x X[mm]
Plancha sostenedora	Perfil rectangular: 210 x Y[mm]
Gabinete de control	Caja: 380 x 300[mm] x 380[mm]
X varía entre	67[mm] a 853[mm]
Y varía entre	290[mm] a 910[mm]
Z varía entre	70[mm] a 275[mm]

8.1.3 Tipo de abrazadera

Uno de los aspectos más importantes dentro del diseño de un densímetro es el tipo de sujeción al tubo minero. Generalmente el tipo de abrazadera usado por la mayoría de las marcas (**figura 8.3**), consta de un tipo de sujeción de dos placas de espesor 5[mm] que están sujetas por espárragos, fijados por pernos y asegurados por golillas de seguridad. El área de contacto que es la encargada de producir roce, generalmente es generada por planchas anguladas de 65°, que distribuyen la carga a lo largo de su superficie.



Figura 8.3: Vistas de Tubo Fotomultiplicador [1]

8.1.4 Tipo de alineación

El tipo de alineación utilizada en este modelo es llamado perpendicular, aludiendo a la relación del vector de radiación, de la fuente, respecto al flujo a medir, o también alineación de 180° . Los tipos de alineación dependen de la finalidad del estudio que quiera hacerse (**figura 8.4**), ya que a ángulos inferiores a 90° se tiene un mayor volumen de flujo a analizar.

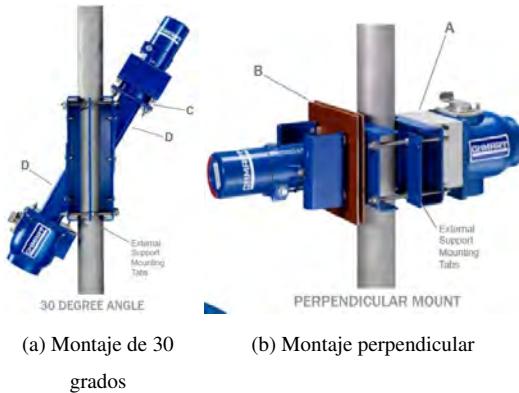


Figura 8.4: Tipos de inclinación en montaje de abrazaderas [1]

8.2 Diseño de sub-función: Diseño de densímetro con etiquetador

Tal como se mencionó en el esquema de la **figura 6.3**, el densímetro con etiquetador agrega un segundo detector gamma, justo detrás de la fuente radiactiva. Siguiendo el esquema del diseño del densímetro comercial antes mencionado, se utilizarán medidas similares teniendo en cuenta ciertos requerimientos que deben cumplirse para que el mecanismo funcione. Es necesario resaltar que el diseño del etiquetador fue construido en la realidad para probar su diseño, por lo que se presentará un punto de vista empírico que se comparará al diseño conceptual. También es importante destacar que el éxito de este diseño definirá el futuro del diseño para el densímetro híbrido.

Lista de requerimientos para diseño con etiquetador

- El nuevo detector gamma y el primero deben ser fácilmente intercambiables.
- Ambos cristales centelleadores deben estar recubiertos de una pared de plomo de al menos $20[mm]$.
- El cristal centelleador, del nuevo detector gamma, debe situarse a una distancia no mayor a $20[mm]$ de la fuente radiactiva.
- Utilizar un isótopo radiactivo de Na-22, el cual requiere una protección de pared de plomo de al menos $100[mm]$.
- La alineación del sistema de anclaje por abrazadera debe ser perpendicular o en 180° .

Una vez estipulados los requerimientos del etiquetador, se procedió a considerar los materiales que este usará y que forma tendrán. Se realizaron búsquedas de proveedores de acero inoxidable, de esta forma se realizará un diseño a partir

de piezas estandarizadas. En la **figura 8.5** se muestra el diseño del densímetro con etiquetador en términos generales, sin embargo en las siguientes secciones se mostrara el diseño del densímetro con etiquetador, se explicaran las piezas utilizadas, lista de materiales, tipo de soldadura, tipos de pernos utilizados y mecanismo de abrazadera.

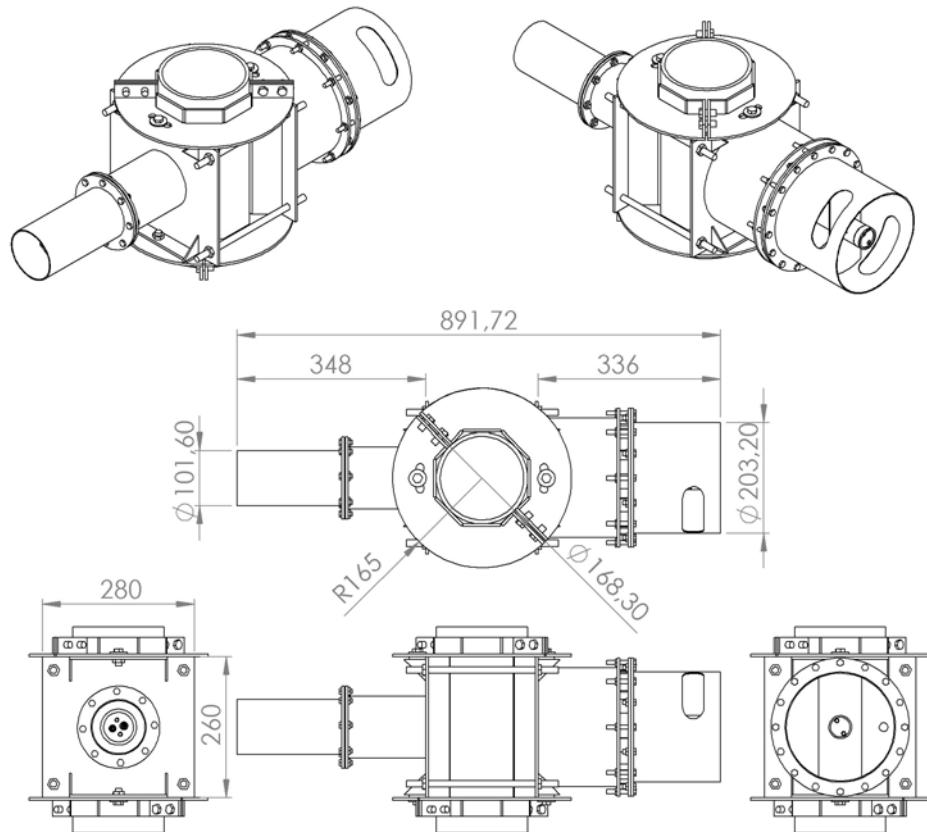


Figura 8.5: Diseño Densímetro con Etiquetador. [1]

8.2.1 Estudio de diseño conceptual de Densímetro con Etiquetador

En la siguiente figura se muestra una vista explosionada que separa al modelo en tres secciones principales (**figura 8.6**): El cuerpo o abrazaderas (1), el etiquetador (2) y el detector gamma (3). Debido al alto peso del etiquetador, el montaje de este conjunto empieza por el cuerpo, que está compuesto de las abrazaderas del densímetro. Al montar este primero, se puede realizar la alineación efectiva de las planchas que sostendrán a las otras partes. Una vez hecha la alineación, se procede al montaje del etiquetador y el detector gamma.

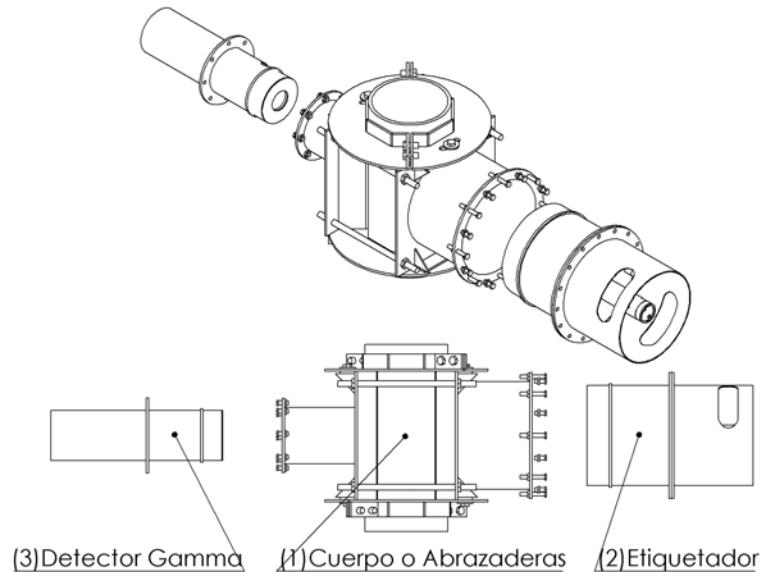


Figura 8.6: Vista explosionada general de Densímetro con Etiquetador. [1]

8.2.2 Estudio de cuerpo o abrazaderas

El montaje del cuerpo del densímetro (**figura 8.7**) empieza por posicionar las abrazaderas tope del eje Y (2). Una vez presentadas, se procede a montar el soporte del etiquetador (4) y el soporte del detector gamma (3). En este punto se puede hacer la alineación necesaria para que no existan errores en la medición, generalmente se requiere un rango de error de $0,5[mm]$.

La alineación trata de juntar perfiles de las abrazaderas, siendo alineados por los topes eje Y (2), más la alineación proporcionada por los espárragos (5) en el eje X. Como aún no se monta ni el etiquetador, ni el detector gamma, se trabajará con solo el peso propio de la estructura, lo que mejora perceptiblemente la maniobrabilidad. De esta forma se conseguirá una alineación bidimensional fácil y eficiente.

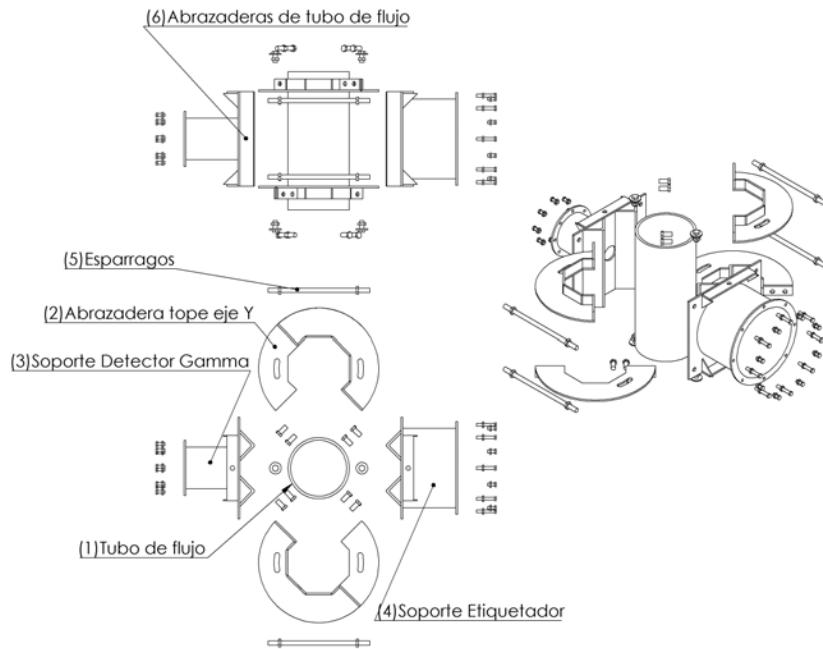


Figura 8.7: Vista explosionada Cuerpo central o Abrazaderas. [1]



Figura 8.8: Vista real de cuerpo y abrazaderas. [1]

8.2.3 Estudio de Etiquetador

Por motivos de altos estándares de seguridad, se solicitó que el espesor de pared de los colimadores que contienen el isotopo, tengan un espesor de pared de 100[mm] (**figura 8.9 (a)**). Es por esto que el etiquetador alcanza el peso total de 47[kg]. El gatillo u obturador (**figura 8.10 (16;4)**) del etiquetador es un disco grueso de plomo que gira mediante una barra excéntrica al centro de los colimadores. El detector gamma interno del etiquetador es removible e intercambiable (**figura 8.10 (7;8;9;10;11;12;13;14)**).

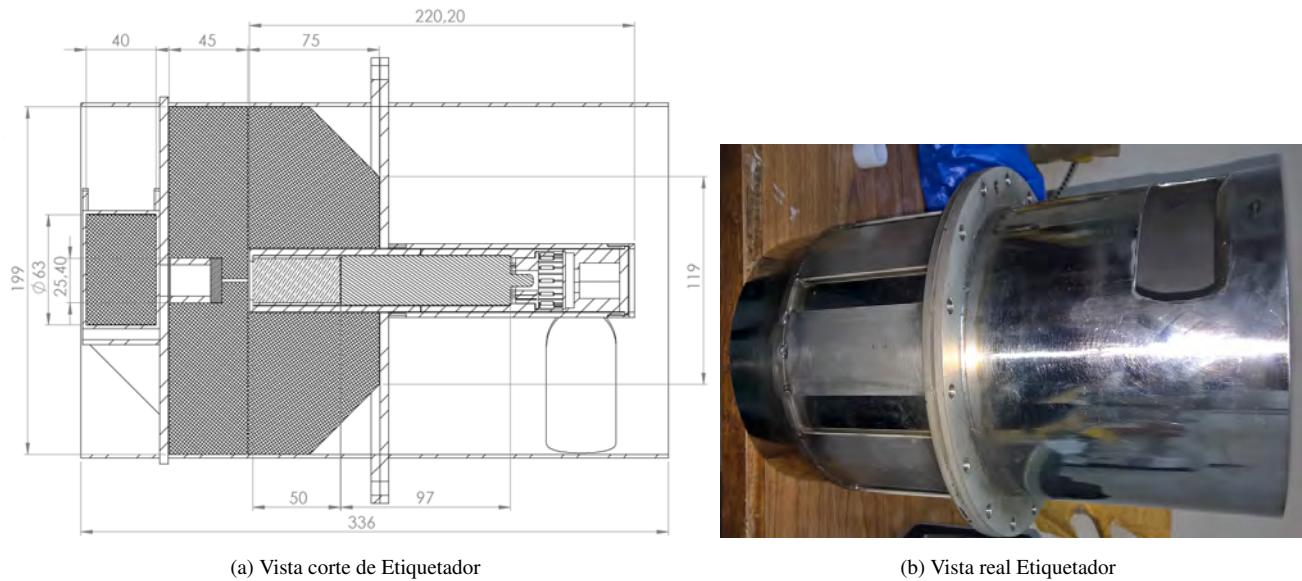


Figura 8.9: Vistas diseño de Etiquetador [1]

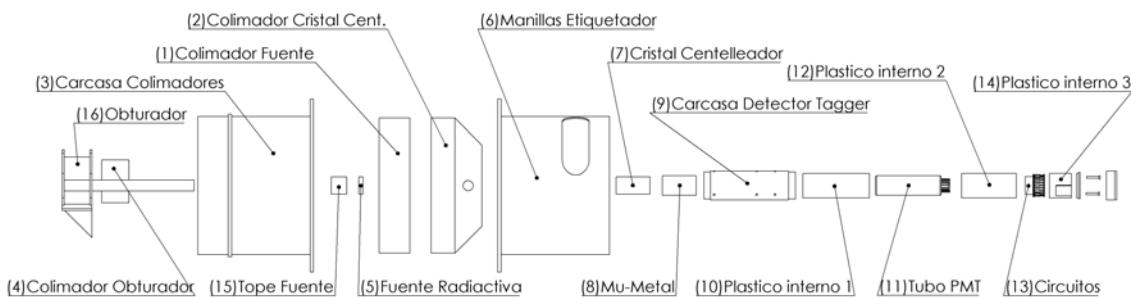


Figura 8.10: Vista explosionada de Etiquetador. [1]

Estudio de Detector Gamma

El detector gamma externo se coloca en el lado opuesto del tubo, respecto al etiquetador, tal como muestra la **figura 8.6**. Este detector cuenta con un cristal centelleador y un tubo fotomultiplicador de gran diámetro (cercano a los 57[mm]), que prácticamente dobla en volumen a los componentes usados en el detector interno del etiquetador. Esto es debido a que se necesita aumentar el diámetro del ángulo sólido para mejorar la recepción de rayos gamma que vienen desde el lado opuesto del tubo de concentrado. Este detector gamma también utiliza plomo para proteger al cristal centelleador de rayos gamma extranjeros (**figura 8.11**).

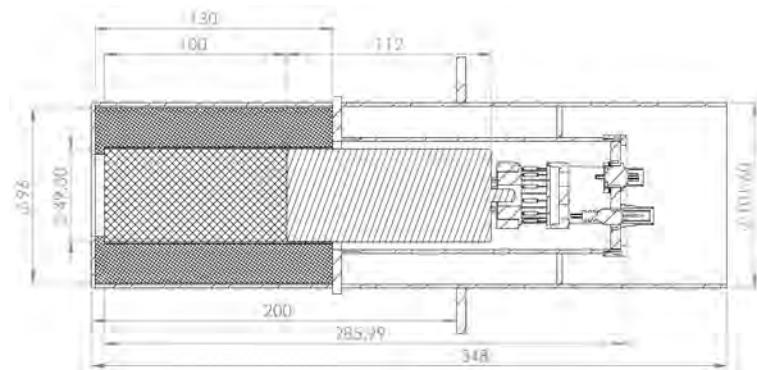


Figura 8.11: Vista corte de Detector Gamma. [1]

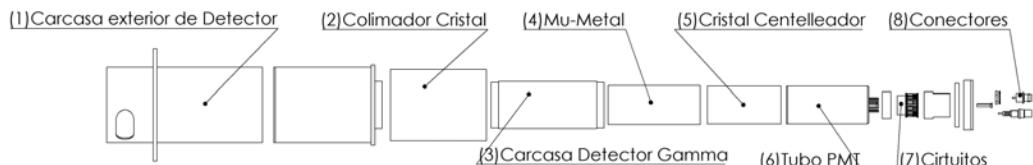


Figura 8.12: Vista explosionada de Detector Gamma. [1]



Figura 8.13: Vista real Detector Gamma. [1]

8.2.4 Ángulos sólidos de colimador etiquetador

Las dimensiones que se verán en esta sección fueron tomadas para el trabajo de la memoria de Rene Ríos. Lo siguiente que se hará será analizar los ángulos sólidos que fueron elegidos para este diseño.

En la primera **figura 8.14 (a)**, se puede ver un disco de plomo que posee un agujero de una pulgada en el centro, que contendrá al Isótopo de Sodio-22. Debido a que el haz gamma está atenuado, controlado y vectorizado por el colimador de plomo. En el acercamiento (**figura 8.14 (b)**) se pueden ver los escapes por donde el haz gamma puede avanzar, los cuales van en ambas direcciones. Mirando hacia el angulo sólido derecho que será irradiado, la radiación cruza un pequeño agujero de para alcanzar una sección importante de la superficie del cristal centelleador que pertenece al etiquetador. Mientras que por el lado izquierdo, se deja al haz gamma abarcar un gran angulo sólido del tubo que transporta el flujo de cobre, que mas tarde alcanzará la cara del cristal centelleador que pertenece al receptor.

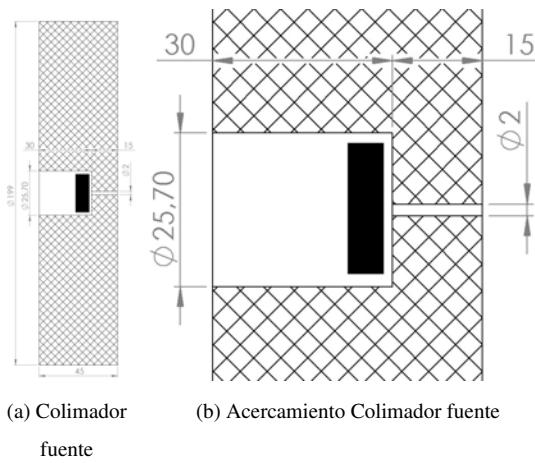


Figura 8.14: Vista en corte de Colimador contenedor de fuente radiactiva [1]

Siendo un poco más específico con la **figura 8.14 (b)**. En el diseño existe un pequeño agujero de $2[mm]$ de diámetro por $15[mm]$ de largo que se hizo en el colimador de la fuente. La selección de estos dos últimos parámetros es muy importante para el diseño diferenciador del densímetro con etiquetador. Estos diseños fueron hechos por el Ingeniero Civil Electrico, Rene Ríos, creador de este proyecto, el cual explica en su memoria **"Desarrollo de un método de densimetría nuclear con aplicaciones en minería"**, los pasos a realizar para obtener una función representativa de la densidad, controlando la distancia de la fuente a los cristales mediante colimadores y también usando distintos tipos de diámetro de cristales.

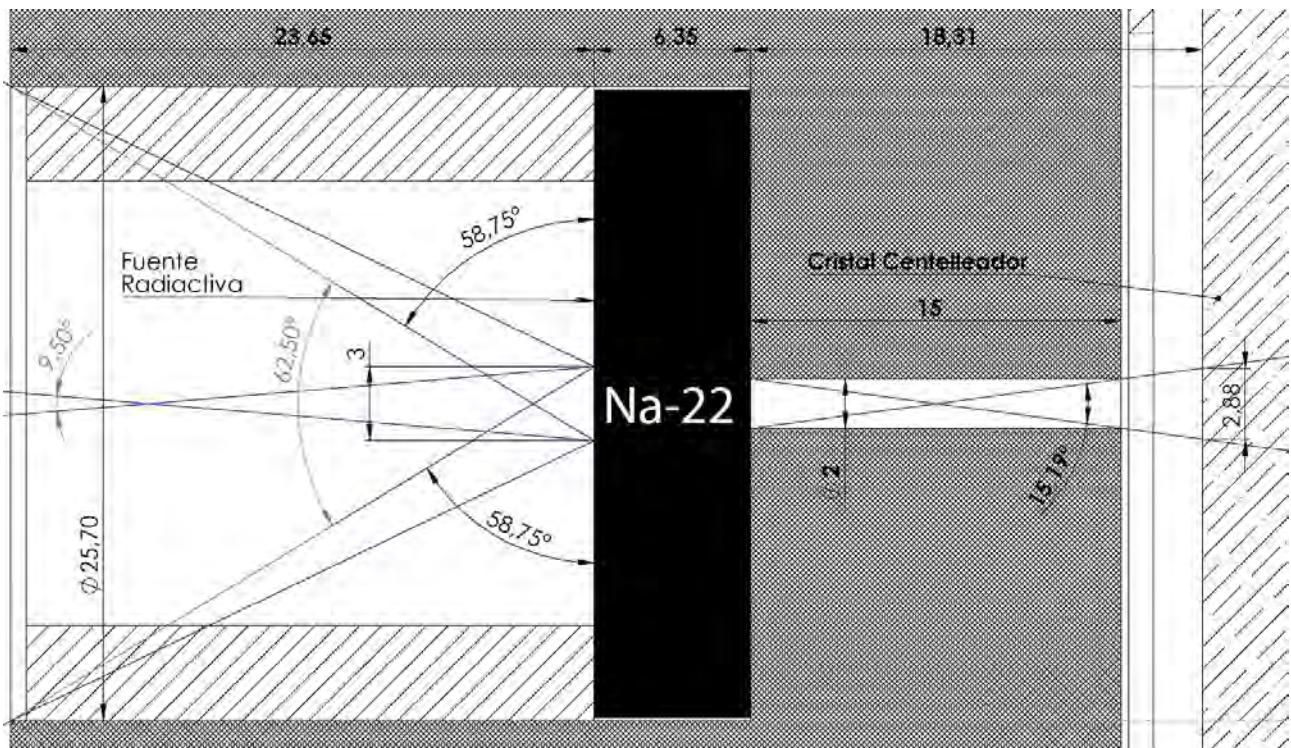


Figura 8.15: Máximos ángulos colimador etiquetador. [1]

En la **figura 8.15** se muestran los máximos ángulos sólidos que se crean por los rayos gamma. Al posicionar la fuente de Sodio-22 (color negro) dentro del colimador, se puede obtener la representación de los máximos ángulos del haz gamma que no han sido atenuados.

Los extremos expuestos del isótopo, que posee un núcleo de 3[mm] de diámetro, emiten un decaimiento positrón-gamma en dirección cruzada de extremo a extremo dentro del colimador. Dentro del agujero derecho de diámetro 2[mm], con un ángulo de 15,2° y una distancia de 15[mm], y el agujero izquierdo de 25,7[mm], con un ángulo de 62,5° y una distancia de 23,65[mm]. De esta forma se pueden saber los ángulos sólidos que llegarán proyectados a los cristales cintilladores respectivos.

Representación bidimensional de ángulo sólido

Se explicará la propagación de la propagación de rayos gamma, dentro de la estructura que soporta la fuente, y que elementos serán irradiados por estos. Es importante visualizar idealmente que el haz gamma no rebota en las paredes e idealmente se comporta de manera muy similar a la luz.

La característica principal de usar una fuente de Sodio-22, es que su decaimiento a través de una emisión de un positrón genera una aniquilación de par electrón-positrón. Lo que produce dos fotones gamma simultáneos que viajan en direcciones opuestas.

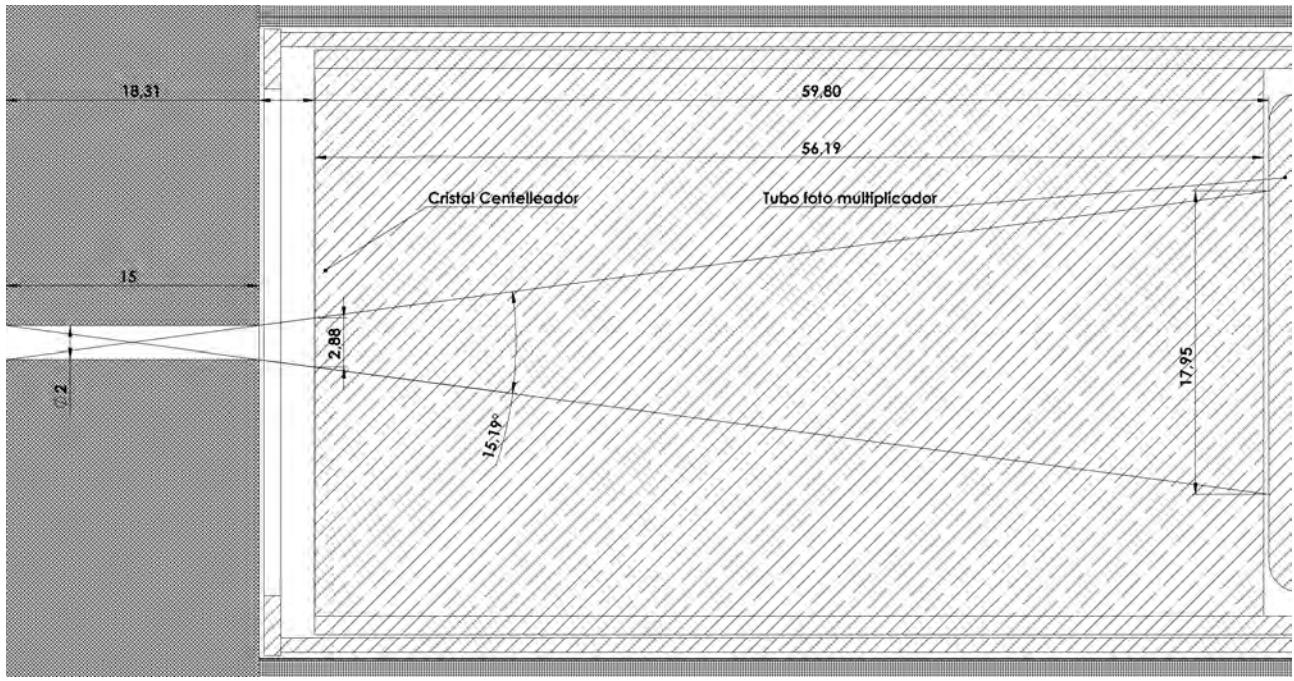


Figura 8.16: Exposición gamma a través de cristal derecho. [1]

En el caso del cristal centelleador (**figura 8.16**) derecho de diámetro 35[mm] y largo 59[mm], el ángulo sólido alcanza un diámetro e entrada de 2,88[mm] de exposición, sobre la primera cara del cristal que después se expande dentro de este mismo. Debido a que la distancia entre el cristal y la fuente es de 18,3[mm] prácticamente no existe disminución de la atenuación del rayo gamma. El perfil del ángulo sólido que llega al final del cristal centelleador es el mismo que abarca dos tercios de la cara frontal del tubo fotomultiplicador, que para efectos de la investigación, coincide con la sección de ánodos llamados "Dínodos" de lectura del tubo fotomultiplicador.

Si bien el haz gamma no interferido ni atenuado, que se representa en la **figura 8.16**, es aquel que abarca un porcentaje del volumen del cristal centelleador. Es necesario recalcar que el ángulo sólido del haz gamma, esta diseñado para alcanzar mas del 80 % del tubo fotomultiplicador que esta pegado al cristal centelleador, dejando un diámetro de ángulo sólido de 17,9[mm].

También es importante mencionar que las paredes de plomo menores a 60[mm] no detienen la radiación del Sodio-22. Es por esto que el resto del cristal supuestamente no expuesto por radiación no interferida, realmente está siendo expuesto a radiación atenuada por el mismo colimador que no puede detener el paso de esta.

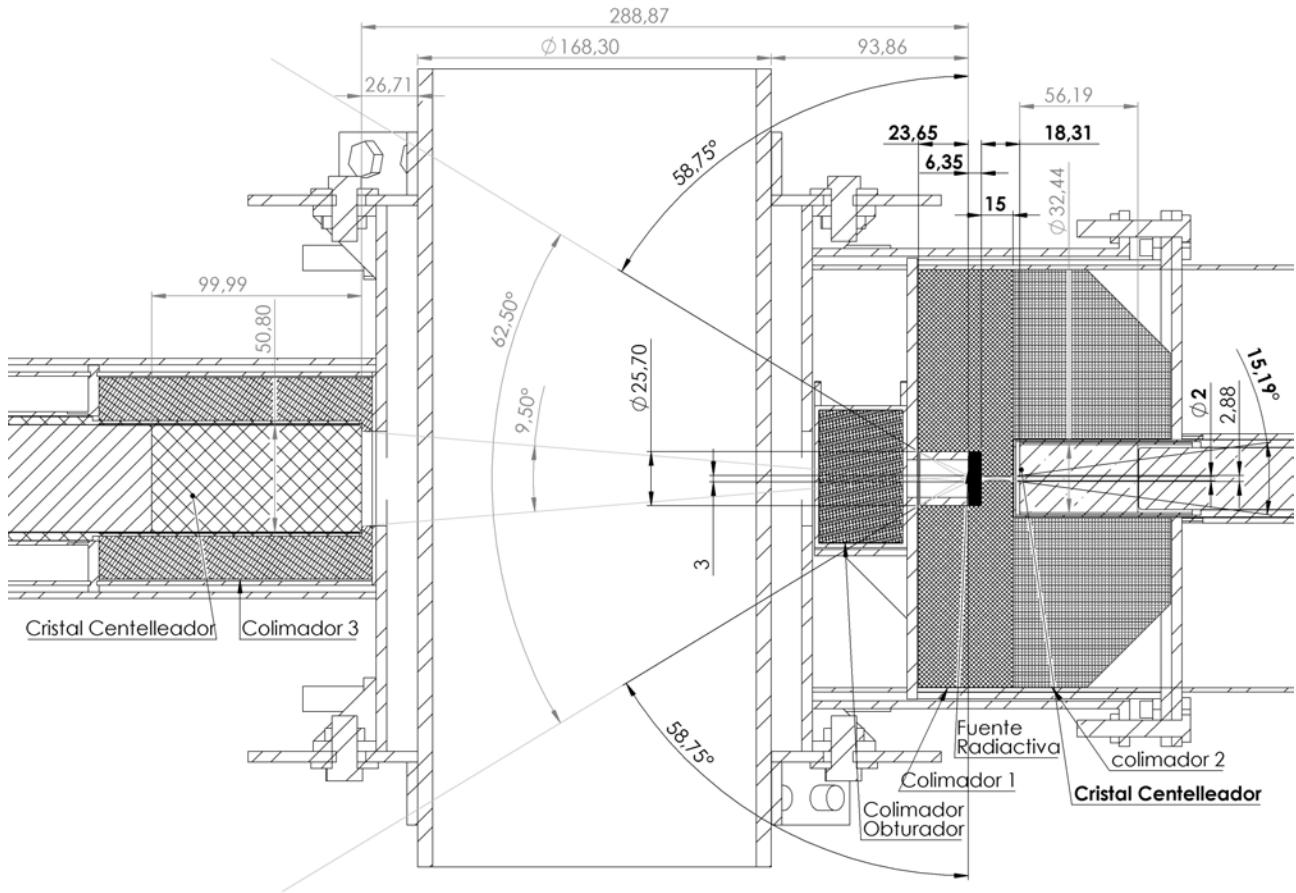


Figura 8.17: Ángulo sólido proyectado desde la fuente. [9]

Por el lado izquierdo de la fuente Sodio-22 (**figura 8.17**), se encuentra la propagación de $62,4^\circ$ del haz gamma. Sus fotones gamma viajan a través del aire una distancia de $94[\text{mm}]$, e intercepta a la tubería de acero de $13[\text{mm}]$ de espesor y $168[\text{mm}]$ de diámetro, que contiene el caudal de concentrado de cobre. El caudal de cobre disminuye la intensidad del haz gamma, que posteriormente será interceptado por la cara frontal de un cristal centelleador de $50,8[\text{mm}]$ de diámetro que se encuentra a $288,9[\text{mm}]$ de distancia. Debido a que este último cristal centelleador debe captar el haz gamma con mayor dificultad, distancia y mitigación de este, y también su gran dispersión que es imposible de vectorizar de una manera más efectiva. Se decidió por utilizar un cristal de diámetro $56[\text{mm}]$ y de largo $100[\text{mm}]$. De esta forma, gracias a su mayor volumen, el ángulo sólido se aumenta a un valor de $9,5^\circ$, lo que incrementará la probabilidad estadística de recibir los electrones emitidos de la fuente para después generar el efecto fotoeléctrico en estas adversas condiciones.

8.2.5 Modelo de atenuación de plomo

Sabemos la formula de atenuación de intensidad(número de fotones) de rayos gamma sobre un material de espesor x. La intensidad de rayos gamma I_0 es atenuada hasta la intensidad I , en la siguiente ecuación:

$$I = I_0 e^{-x\mu} \quad (8.1)$$

$$\mu = \rho \frac{N_a Z}{A} \sigma_c \Rightarrow \mu = \frac{1}{\lambda} \quad (8.2)$$

Donde e es la base de los logaritmos naturales, y μ es llamado el coeficiente lineal de atenuación.

Ahora bien, también necesitaremos un gráfico de coeficiente másico de atenuación del material correspondiente para atenuar la radiación. En este caso se utilizará plomo puro. Su gráfico de la siguiente **figura 8.18**:

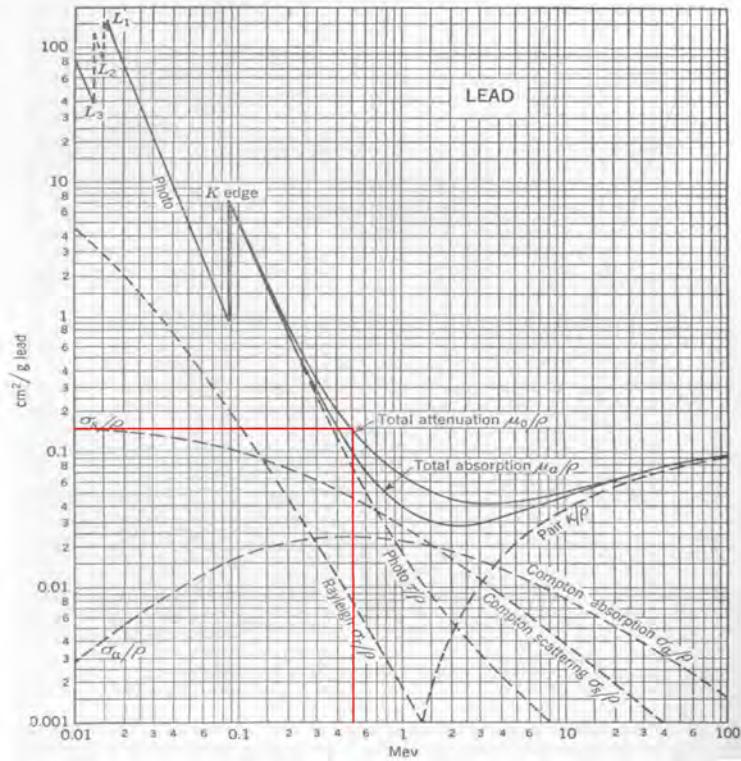


Figura 8.18: Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo. [8]

En este gráfico podemos ver la intensidad de la radiación en el eje x y el coeficiente de atenuación “ μ ” en el eje y, ambos se encuentran en escalas logarítmicas. Según la energía de nuestra fuente $Na22$ que posee un decaimiento beta-menos de intensidad $511[KeV]$, nos situara en un coeficiente de atenuación de $\mu_{Pb} = 0,15[\frac{cm^2}{g}]$ y también se conoce que la densidad del plomo es $\rho_{Pb} = 11,34[\frac{g}{cm^3}]$.

Según la pagina web de "Health Physics & Radiological Health"[\[17\]](#). Tenemos que el valor de la unidad absorbida por un millón de decaimiento gamma(MBq). Buscamos el valor de la constante específica de rayo gamma " Γ " del Sodio-22 a un metro de distancia y tenemos lo siguiente:

$$\Gamma = 3,62 * 10^{-4} \frac{mSv/h}{MBq} \quad (8.3)$$

De acuerdo al área efectiva que se está usando en el factor Γ , la cual es una esfera de $4\pi r^2$ con radio de un metro. Se disminuye esta área a una distancia radial de un centímetro. De esta forma se sabrá el factor de unidad absorbida a una distancia peligrosa:

$$\Gamma = 3,62 * 10^{-4} \frac{mSv/h}{MBq} * \frac{1}{0,01^2 [cm^2]} \Rightarrow \Gamma = 3,62 \frac{mSv/h}{MBq} \quad (8.4)$$

Por simple regla de tres, se transforma el valor de desintegración atómica por segundo de la fuente de Na-22 de 220[μCi]:

$$1[MBq] = 27[\mu Ci] \Rightarrow 8,14[MBq] = 220[\mu Ci] \quad (8.5)$$

Por lo tanto, la constante I_0 de la **ecuación 8.1** quedaría cómo:

$$I_0 = 3,62 \frac{mSv/h}{MBq} * 8,14[MBq] = 29,47[mSv/hr] \quad (8.6)$$

De acuerdo a la ley estipulada en Chile, por el ministerio de salud, **Decreto N°3 del 3 de Enero de 1985**, que establece las "**medidas de protección personal radiológicas y los límites de dosis radioactivas que pueden recibir las personas ocupacionalmente expuestas**", con el objeto de prevenir y evitar la sobreexposición a radiaciones ionizantes, el **límite de dosis anual** será de 50[mSv]:

$$D_{anual} = 50[mSv/año] \Rightarrow D_{hr} = 5,7[\mu Sv/hr] \quad (8.7)$$

Entonces la **ecuación 8.1**, muestra la dosis radiactiva atenuada por hora. Reemplazando los valores quedaría como:

$$I_{hr} = I_0 e^{-x\mu} \Rightarrow 5,7 * 10^{-3}[mSv/hr] = 29,47[mSv/hr] * e^{-0,15[\frac{cm^2}{g}]*11,34[\frac{g}{cm^3}]*\alpha[cm]} \quad (8.8)$$

Despejando α :

$$\alpha = \ln \left(\frac{5,7 * 10^{-3}[mSv/hr]}{29,47[mSv/hr]} \right) / \left(-0,15[\frac{cm^2}{g}] * 11,34[\frac{g}{cm^3}] \right) = 5,02[cm] \quad (8.9)$$

El espesor de pared necesario para conseguir atenuar la fuente de Na-22 con actividad de 220[μCi], a una dosis anual permitida en Chile es de 5[cm] de plomo puro.

Otra alternativa de estudio de espesores de plomo

En la web se pueden buscar calculadoras para atenuación de radiación que trabajan de manera similar a los cálculos realizados en el punto anterior. Un ejemplo se puede encontrar en la pagina <http://www.radprocalculator.com/Gamma.aspx>.

Se identifica que tipo de fuente se utilizará, en este caso será Na-22. Después se ingresa la actividad de la fuente en [μCi] y la distancia de área efectiva que se uso en el cálculo anterior para calcular el factor Γ que es 1[cm].

Gamma Emitter Point Source Dose-Rate <--to--> Activity and Shielding Calculations (In Air)

Select Calculation

Activity and Dose-Rate Shield Thickness Add Shielding

Enter or Select Isotope
Na-22

Select Dose-Rate Units
mSv/hr

Select Activity Units
uCi

Select Distance Units
Centimeters

Select Activity Calculation
 Activity to Dose-Rate
 Dose-Rate to Activity

Enter Activity
220 uCi

Enter Distance
1 cm

220 uCi of Na-22 at 1 Centimeters

Calculate 22.8901830605238 mSv/hr
Calculated Dose-Rate

[About the Gamma Calculator](#) [Gamma Emission and Exposure Rate](#)

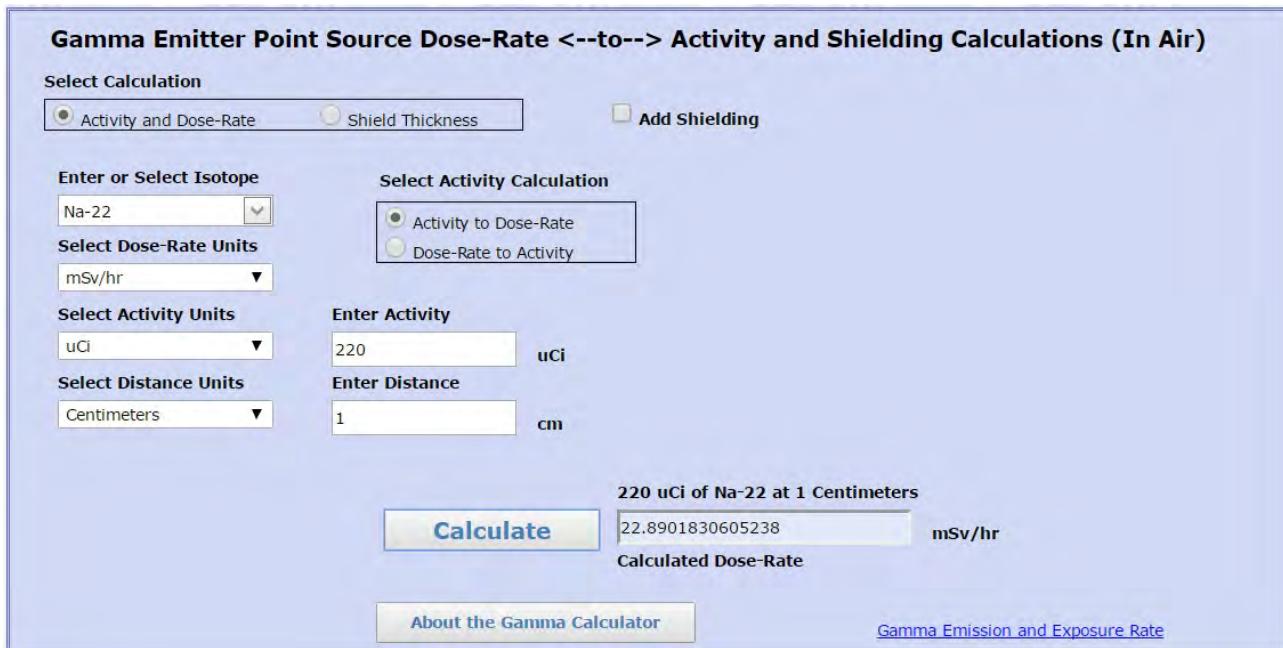


Figura 8.19: Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo. [8]

El resultado de la dosis entregado a 1[cm] de distancia (**figura 8.19**), es cercano a 23[mSv/hr] lo que es muy similar al valor entregado en la **ecuación 8.6** como dosis inicial I_0 . Posteriormente cambiamos la función de la calculadora a cálculo de espesores de barrera e ingresamos este valor en la dosis inicial. Especificamos que se empleará plomo de barrera y que la dosis de radiación por hora que esperamos conseguir es la permitida en Chile (**ecuación 8.7**).

Gamma Emitter Point Source Dose-Rate <-to--> Activity and Shielding Calculations (In Air)

Select Calculation

Activity and Dose-Rate Shield Thickness Add Shielding

Enter or Select Isotope
Na-22

Select Dose-Rate Units
mSv/hr

Enter Initial Dose-Rate
22,89 mSv/hr

Enter Desired Dose-Rate
0,0057 mSv/hr

Shielding Entries

Select Shield Material
Lead

Select Thickness Units
Centimeters

Use Buildup Factor (recommended)
[Click to Learn About Buildup Factors](#)

Attenuation (μ) Energy Absorption (μ_{en}) **Calculate** Requires 4.8 Centimeters of Lead
4.8 cm
Calculated Thickness

[About the Gamma Calculator](#) [Gamma Emission and Exposure Rate](#)

Figura 8.20: Gráfico de coeficiente de atenuación de plomo. [8]

El resultado final (**figura 8.20**), es 4,8[cm] de espesor de pared de plomo, lo que resulta muy similar a lo anteriormente calculado, con un 4% de diferencia.

8.2.6 Estudio soldadura en etiquetador

Para el cálculo de la unión soldada, se ha tomado en consideración la unión más vulnerable en toda la estructura, que corresponde al cordón de soldadura que une el sostenedor del tubo que contiene la fuente radiactiva, también llamado etiquetador. En este tubo se encuentran 3 piezas de plomo, las primeras dos son colimadores de plomo que pesan 19[Kg] y 13[Kg] cada uno, y la tercera pieza es el obturador del haz gamma que pesa 1,1[Kg]. Debido al importante espesor que estos colimadores deben tener para detener la intensidad de la radiación de la fuente, el peso aumenta de acuerdo a la cantidad de protección necesaria para cumplir las normas de seguridad óptimas.

Sumando el acero inoxidable que necesita la estructura, el peso total del etiquetador es de 47[Kg], por lo tanto este deberá ser cargado por dos personas, lo que significa un estrés constante de carga para la unión soldada que sostendrá a esta pieza. También es la unión que más peso tendrá que sostener en todo el diseño del densímetro. Es por esto que analizar las características de esta soldadura, dará una buena imagen sobre si será necesario considerar otras secciones unidas y, por supuesto, si soportará la carga constante que impondrá esta pieza.

De acuerdo a la metodología de medición de resistencia de soldadura entregada por el libro "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley". Tenemos que considerar que la soldadura utilizada en la unión será de arco y se pueden considerar

soldaduras tipo TIG o MIG. Esto debido a que este proceso produce el tamaño de garganta de la soldadura adecuado a la aplicación.

Tipo de soldadura

El tipo de soldadura utilizará es establecida por la sección a soldar. Por esto, veremos el tipo de geometría de los elementos a unir. El primero es un cilindro hueco que será unido a el segundo elemento que es una placa rectangular. Este cilindro se convertirá en la interfaz que sostendrá al etiquetador o al detector gamma, es por esto que la unión de la plancha mas el cilindro será llamada “**Plancha o placa sostenedora**”.

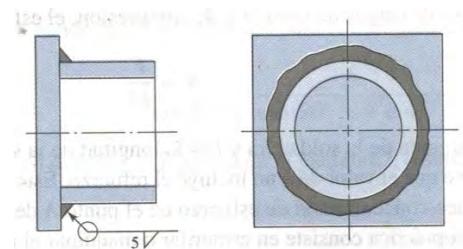


Figura 8.21: Soldadura circundante, de filete [14]

Si observamos los tipos de soldadura que el **Manual Induras** provee tendremos lo siguiente:

Tipo de soldadura								
Cordón	Filete	Tapón o muesca	Ranura					
			Cuadrada	V	Bisel	U	J	
				∨	∨	U	J	

Figura 8.22: Tipos de soldadura. [13]

Si ponemos atención a la unión utilizada en la **figura 8.21**, que será la misma que usaremos, podemos ver que la simbología afirma ser **circundante o circular**, de una **altura de garganta** de 5 mm, y el triángulo muestra que el tipo de soldadura será de **filete**. Tal como figura la segunda opción de la **figura 8.22** del Manual Induras.

Datos importantes al diseñar soldadura

De acuerdo a los acotaciones o limitaciones elegidas hasta ahora, ya sea el tipo de soldadura, soldadura de cordón, soldadura circular. Tendremos que considerar los siguientes factores de diseño, propuestos por el libro de **Shigley**.

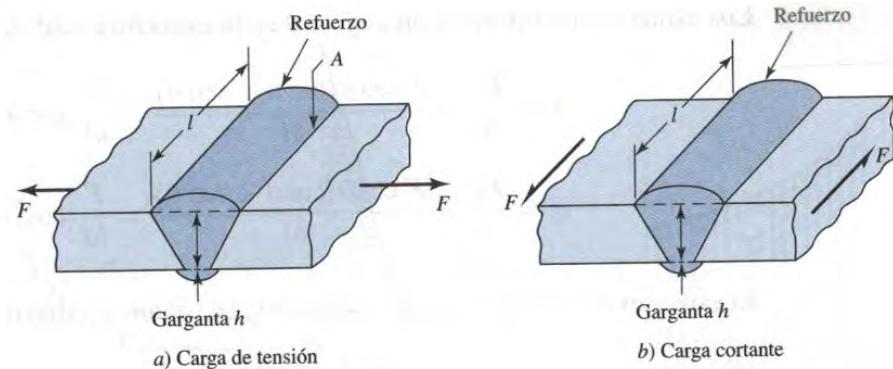


Figura 8.23: Tipos de soldadura. [13]

Estas consideraciones son hechas para resistir esfuerzos de Tensión y Cortantes (**figura 23**). Es necesario destacar que la garganta de altura “ h ” no considera el “re-fuerzo” que sobresale de las superficies de las soldaduras.

Los primeros datos importantes son: la altura “ h ” de soldadura y el largo de recorrido del cordón “ l ”.

Lo siguiente que hay que considerar es el **segundo momento de inercia o segundo momento unitario de área** del perfil que se soldara por el contorno externo del cilindro hueco. En este caso es ideal considerar el perfil circular del cilindro unido a la placa sostenedora tiene un perfil de corte transversal triangular.

Para un perfil circular de soldadura, el segundo momento de área de la **figura 8.24**, se toma respecto de un eje horizontal que pasa por G , en el centroide del grupo de soldaduras, siendo h el tamaño de soldadura, el plano del par flexionante (**figura 8.25 (a)**) es normal al plano de la página.



Figura 8.24: Perfil soldadura [14]

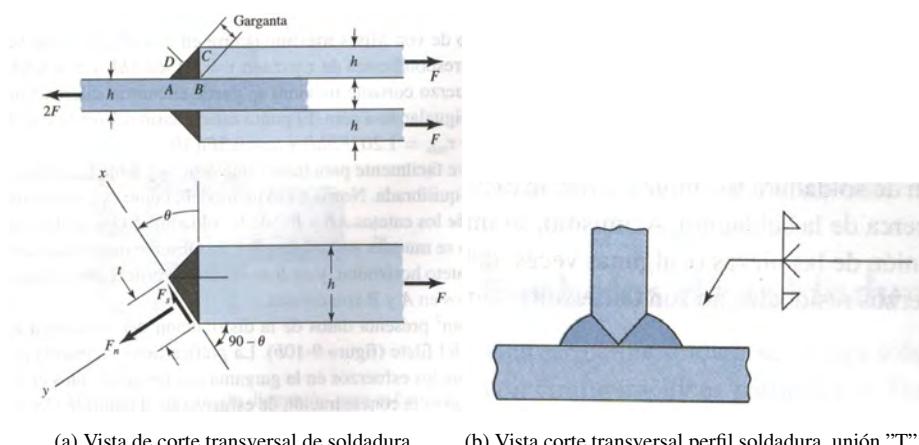


Figura 8.25: Vistas corte transversal de soldadura. [14]

Segundo momento unitario de área del perfil transversal de soldadura:

$$I_u = \pi r^3 \quad (8.10)$$

Donde r es el radio del círculo de soldadura.

Área de la garganta:

$$A = 1,414\pi hr \quad (8.11)$$

Fuerza cortante primario de soldadura:

$$\tau' = \frac{V}{A} \quad (8.12)$$

Donde V es la reacción de fuerza cortante, A es el área total de la garganta.

Segundo momento de área, para cordón circular:

$$I = 0,797hI_u \quad (8.13)$$

Esfuerzo cortante nominal:

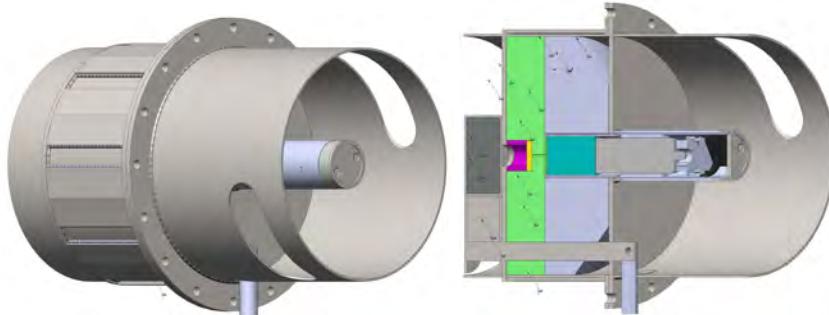
$$\tau = \frac{Mc}{I} = \frac{M\frac{d}{2}}{I} = \frac{Fr_zr_y}{I} \quad (8.14)$$

Donde r_y es el radio del círculo y r_z es la distancia al centroide G.

Momento resistente, para cilindro hueco:

$$S = \frac{I}{c} = \frac{\pi(r_2^4 - r_1^4)}{4r_2} = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D} \quad (8.15)$$

Debido a que el cilindro se encuentra en voladizo. Necesitaremos calcular la distancia del centroide de todo el contenido del etiquetador, contando los colimadores de plomo que son la principal fuente del peso. Debido a la complejidad del diseño del etiquetador, se utilizará el software de diseño SolidWorks para calcular el centro de masa de la estructura (**figura 8.26**).



(a) Vista etiquetador, centro de masa

(b) Vista corte etiquetador, centro de masa

Figura 8.26: Vistas de etiquetador, cálculo centro de masa [1]

Centro de masa en eje z:

$$r_z = 106,57[\text{mm}] = 0,107[\text{m}] \quad (8.16)$$

Centro de masa en eje x e y:

$$r_x = r_y = 0[\text{mm}] = 0[\text{m}] \quad (8.17)$$

Estudio de esfuerzos en material de estructura soportante (**tabla 8.4**):

Tabla 8.4: Valores de diseño para estructuras de acero inoxidable

Parámetro	Medidas
Tipo de acero	Acero inoxidable 316
Límite esfuerzo fluencia	170[Mpa]
Límite esfuerzo tensión	485[Mpa]
Elongación	40%

Estudio de esfuerzos en material de cátodo de soldadura (**tabla 8.5**):

Tabla 8.5: Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austeníticos [15]

Parámetro	Medidas
Tipo de electrodo	Electrodo AWS E-316-16
Límite esfuerzo fluencia	400[Mpa]
Límite esfuerzo tensión	612[Mpa]
Elongación	41%

Método convencional para metal de aporte

Con este método comprobaremos si el cordón de soldadura es lo suficientemente resistente como para soportar la carga impuesta y bajo que factor de seguridad trabajará. Este cálculo fue extraído del libro "Diseño en Ingeniería Mecánica 8^{ava} edición" por Shigley, pagina 476.

Es importante destacar que el método utiliza el "Segundo momento de área", el cual posee una unidad métrica de milímetros elevado a cuatro.

Como ya conocemos la posición del centro de masa (**figura 8.27**), y los valores límite de esfuerzos del material y electrodo que se usará. Se dará paso a revelar los valores faltantes para realizar este cálculo. Estos valores fueron calculados desde el programa de diseño SolidWorks (**tabla 8.6**), que se basa en la utilización de piezas comerciales vistas desde catálogos.

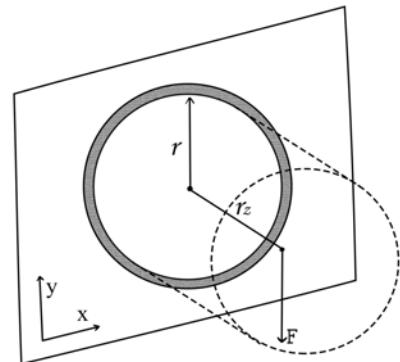


Figura 8.27: Metal de aporte marcada en sección gris. [1]

Tabla 8.6: Valores de diseño para electrodo de soldadura en aceros austeníticos

Parámetro	Símbolo	Medidas
Masa total	m	46,63[Kg]
Diámetro exterior	D	203,2[mm]
Diámetro interior	d	199,2[mm]
Altura de cordón	h	3,2[mm]

Entonces procedemos al cálculo por el método convencional para el metal de aporte.

$$A = 1,414\pi hr = 1,4443 \times 10^{-3} [m^2] \quad (8.18)$$

$$I_u = \pi r^3 = 3,2948 \times 10^{-3} [m^3] \quad (8.19)$$

$$I = 0,707hI_u = 7,4542 \times 10^{-6} [m^4] \quad (8.20)$$

$$\tau' = \frac{F}{A} = \frac{46,63 \times 9,81}{1,4443 \times 10^{-3}} = 316786,9 [Pa] \quad (8.21)$$

$$\tau'' = \frac{Mr}{I} = \frac{46,63 \times 9,81 \times 0,1016 \times 0,107}{7,454 \times 10^{-6}} = 667148,5 [Pa] \quad (8.22)$$

$$\tau = \sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} = \sqrt{316786,9^2 + 667148,5^2} = 667359,7 [Pa] \quad (8.23)$$

$$n_1 = \frac{0,577 \times 400 \times 10^6}{667359,7} = 345,84 [-] \quad (8.24)$$

Las propiedades del acero inoxidable 316 (**tabla 8.4**):

$$S_y = 170 [MPa] \quad \wedge \quad S_{ut} = 485 [MPa] \quad (8.25)$$

Las propiedades del electrodo de acero inoxidable AWS E – 326L – 16 (tabla 8.5):

$$S'_y = 400 [MPa] \quad \wedge \quad S'_{ut} = 612 [MPa] \quad (8.26)$$

Método convencional para el metal de unión (voladizo)

El método convencional sirve para calcular la resistencia de una unión homogénea del material sin ningún tipo de unión. En este caso la unión de la plancha sostenedora y el cilindro están unidos por el mismo metal del que están hechos en una distribución homogénea e ideal. Este método analizará el perfil del corte transversal del cilindro (**figura 8.28**), por lo que este cálculo hará uso del **Momento Resistente** el cual posee una unidad de milímetros elevado a tres. Posteriormente se compara el factor de seguridad de esta unión homogénea con el resultado de la unión soldada.

$$S = \frac{I}{c} = \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4r_2} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{32D} = 7,77668 \times 10^{-4} [m^3] \quad (8.27)$$

$$\rho = \frac{M}{S} = 62939,61 [Pa] \quad (8.28)$$

$$n_2 = \frac{S_y}{\rho} = 2701 [-] \quad (8.29)$$

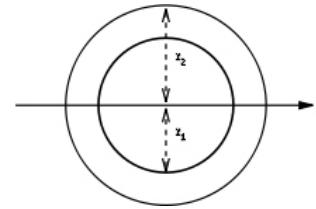


Figura 8.28: Momento resistente.

[1]

Cálculo soldadura con vida infinita para carga estática

Si bien los factores de seguridad n_1 y n_2 son excesivamente altos. Se realizará un cálculo para saber la vida infinita bajo otros factores. De acuerdo a la Unidad 6, página 279 del libro "Diseño en Ingeniería Mecánica por Shigley".

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S'_e \quad (8.30)$$

Factor de Superficie: K_a Para acero maquinado o laminado en frío:

$$a = 4,51 [MPa] \quad \wedge \quad b = -0,265 \quad (8.31)$$

$$K_a = a S_{ut}^b = 4,51 * 485^{-0,157} = 0,8759 [-] \quad (8.32)$$

Factor de Tamaño: K_b (nota: se utiliza la unidad [mm])

Para flexión:

$$d = 203,2 [mm] \quad (8.33)$$

$$K_b = 1,51d^{-0,157} = 1,51 * 203,2^{-0,157} = 0,65559[-] \quad (8.34)$$

Factor de Temperatura: K_c

Para carga de flexión:

$$K_c = 1 \quad (8.35)$$

Factor de Temperatura: K_d

Temperatura máxima:

$$T = 50^{\circ}C \Rightarrow \frac{S_y}{S_{RT}} = 1,010[-] \quad (8.36)$$

$$K_d = \frac{S_y}{S_{RT}} = 1,010[-] \quad (8.37)$$

Factor de Confiabilidad: K_e

$$K_e = \frac{1}{K_f} = \frac{1}{1,4} = 0,7143 \quad (8.38)$$

Factor de Efectos Varios: K_f (nota: se utiliza la unidad [mm])

$$\frac{d}{h} = \frac{45}{5} = 9[-] \wedge \frac{d}{w} = \frac{45}{260} = 0,173[-] \Rightarrow K_t = 1,5 \wedge q = 0,8 \quad (8.39)$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0,8 * (1,5 - 1) = 1,4 \quad (8.40)$$

$$S'_e = 0,5 * S_{ut} = 0,5 * 485 = 242,5[Mpa] \quad (8.41)$$

$$S_e = 0,8759 * 0,65559 * 1 * 1,010 * 0,7143 * 1,4 * 242,5 = 140,64 = 141[Mpa] \quad (8.42)$$

Utilizando el criterio de falla de Gerber:

$$\left(\frac{n\tau_a}{S_e} \right)^2 + \left(\frac{n\tau_m}{S_{ut}} \right)^2 = 1 \quad (8.43)$$

Descomponiendo y despejando al factor de seguridad "n":

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{0,67S_{ut}}{\tau_m} \right)^2 \frac{\tau_a}{S_e} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\tau_m S_e}{0,76S_{ut}\tau_a} \right)^2} \right] \quad (8.44)$$

El factor que define el tipo de soldadura llamado K_{fs} , se encuentra en el libro de Shigley, y el área de la soldadura a usar se calcula de la siguiente forma:

$$K_{fs} = 1,5 \quad (8.45)$$

$$A = 1,414\pi hr = 1,414\pi * 0,0032 * 0,2032 = 0,0028885[m^2] \quad (8.46)$$

También debemos saber los esfuerzos cortantes que se ejercerán sobre la soldadura. Estos esfuerzos fueron calculados de acuerdo a la máxima fuerza de peso ejercida por el etiquetador que pesa 46[Kg]. Esta fuerza se aplica sobre el área de la soldadura de las planchas (**ecuación 8.46**).

De esta forma podemos inferir que:

$$\sigma = \frac{46[\text{kg}] * 9,81[\text{m/s}^2]}{0,0028885[\text{m}^2]} = 156226,2[\text{Pa}] \quad (8.47)$$

$$\tau_a = \tau_m = \frac{K_{fs}F_a}{A} = 1,5 * 156226,2 = 234339,3[\text{Pa}] \quad (8.48)$$

Entonces, volviendo a la ecuación de Gerber tenemos:

$$n = \frac{1}{2} \left(\frac{0,67 * 485x10^6}{234339,3} \right)^2 \frac{234339,3}{141x10^6} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2 * 234339,3 * 141x10^6}{0,76 * 485x10^6 * 234339,3} \right)^2} \right] \quad (8.49)$$

$$n = 557,96[-] \quad (8.50)$$

8.2.7 Estudio de abrazaderas del etiquetador

En esta sección se realizará un “**Análisis estático de abrazaderas**”, siguiendo los pasos enseñados en el libro “**Diseño en ingeniería mecánica**” por Shigley, unidad 3. Se utilizará este método de análisis debido a que el sistema de abrazaderas del densímetro con etiquetador atrapan al tubo minero, que transporta concentrado de cobre, de tal forma que pueden alcanzar un punto critico en la resistencia de este último. Provocando un gasto importante para la minera. Por esto se debe realizar un análisis estático en las abrazaderas que detienen a una masa que ejerce una fuerza de peso importante, mediante contacto roce entre dos superficies.

Lo primero que se calcula es el **peso total del densímetro con etiquetador**, el cual se estima mediante el software Solidworks, que entrega un valor de $95,4[Kg]$.

También debemos saber que el **coeficiente de roce entre acero y acero** (mirar **figura 8.29**), según algunas fuentes web, es de $0,74$.

Es necesario destacar que este diseño permite un área de contacto entre el tubo y las abrazaderas. Que consta de una línea de $260[mm]$ con un ancho de $1[mm]$. Este concepto de área será utilizado para los siguientes párrafos al momento de explicar los criterios de cálculo de fuerzas.

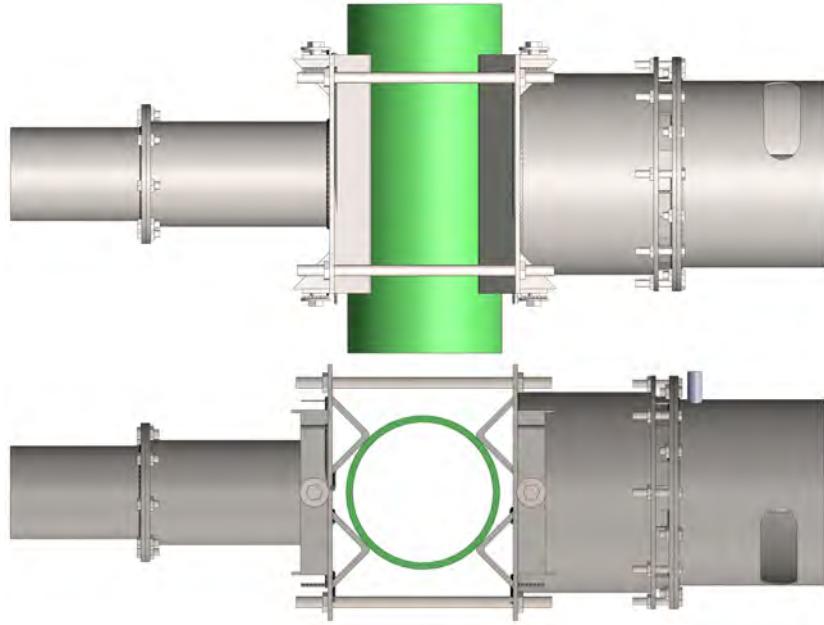


Figura 8.29: Tipos de soldadura. [13]

Pocas líneas atrás se mencionó que el densímetro con etiquetador pesaba 95,4[Kg]. Lo siguiente que analizaremos son los valores de pre-carga de los espárragos. Estos están en la **norma ASTM** las cuales los clasifica en **Clases de Propiedad**, empezando por 4.6 hasta 12.9 (**figura 8.30**). Donde el menor grado posee una resistencia de prueba mínima de 225[MPa] y el mayor grado una de 970[MPa]. Es necesario entender que con el valor de la resistencia de prueba se puede obtener el valor del esfuerzo de carga de prueba.

Investigando las propiedades del diseño de los espárragos, se puede entender que no son capaces de conseguir con la misma facilidad, un valor de resistencia de prueba tan alto como un perno, ya que estructuralmente no cuentan con la misma superficie de apoyo que sería la cabeza del perno. Sin embargo a un precio más elevado si es posible conseguir espárragos de propiedades similares a la de pernos de altos grados.

I Clases métricas de propiedad mecánica de pernos, tornillos y bieles de acero*

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima, [†] MPa	Resistencia mínima a la tensión, [†] MPa	Resistencia mínima a la fluencia, [†] MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono	
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T y R	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de medio carbono, T y R	
10.9	M5-M36	830	1 040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
12.9	M1.6-M36	970	1 220	1 100	Acero aleado, T y R	

Figura 8.30: Tabla de grados de pernos. [14]

Para entender esto, se realizará un estudio inicial utilizando valores de pernos de alto grado para demostrar la importancia del “**Esfuerzo de prueba**” o “**Resistencia de prueba mínima**” o también llamado “**Pre-carga**”.

Se realizará un estudio mediante elementos finitos para hacer la demostración. Primero se modificará el diseño base, creado en SolidWorks, realizando una pequeña extracción de material equivalente al “**Área de esfuerzo de tensión**”, que se puede ver en la **figura 8.35**, que se encuentra unos párrafos más adelante.

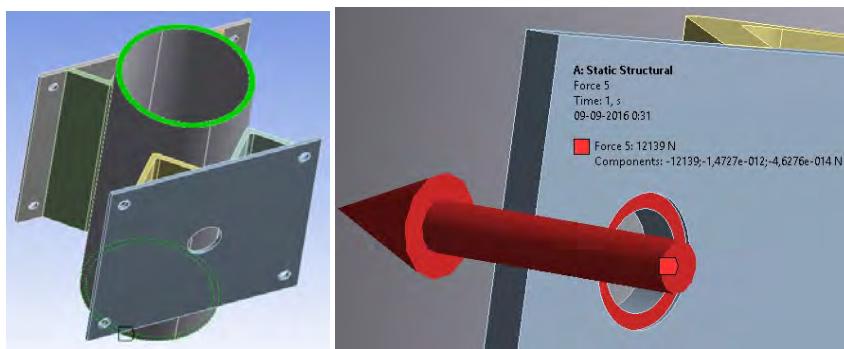
El modelo de estudio para el densímetro con etiquetador será reducido a dos planchas de acero y el tubo de concentrado minero, tal como muestra el modelo básico de la **figura 8.32**. Esto se hace para reducir los tiempos de análisis en el programa de elementos finitos llamado "Ansys". Este modelo se exporta a un formato ".step" y se carga en el programa.

Una vez en el ambiente de Ansys, lo primero que hay que definir son las características del acero inoxidable 316L, ya que este no existe dentro de la biblioteca de aceros del programa. Para que Ansys funcione correctamente se necesitan al menos cuatro valores clave: Densidad, módulo de Young, módulo de Poisson y Resistencia de fluencia (**figura 8.32**).

Properties of Outline Row 3: SS 316L				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	8000	kg m^-3	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
3	Isotropic Elasticity			<input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
4	Derive from	Young's Modulus and...		<input type="checkbox"/>
5	Young's Modulus	1,93E+11	Pa	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
6	Poisson's Ratio	0,27		<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
7	Bulk Modulus	1,3986E+11	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
8	Shear Modulus	7,5984E+10	Pa	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
9	Tensile Yield Strength	1,7E+08	Pa	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
10	Tensile Ultimate Strength	4,85E+08	Pa	<input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

Figura 8.32: Caracterización acero 316L dentro de Ansys. [1]

El siguiente paso, dentro de Ansys, es la importación del modelo ".step" y la asignación del material de acero 316L a todo el modelo. Posteriormente, se crean las fijaciones y esfuerzos aplicados en el modelo. Para este análisis se hará una fijación de superficies en la sección superior e inferior del tubo minero, tal como lo muestra la siguiente **figura 8.33 (a)**.



(a) Fijación de caras
(b) Definición fuerzas

Figura 8.33: Definición de esfuerzos en Ansys [1]

En este paso se realizarán iteraciones de la fuerza "F" aplicada en el área de apoyo de la tuerca sobre la plancha de

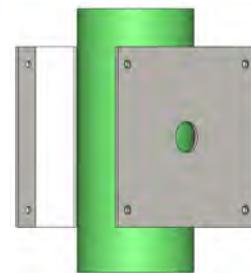


Figura 8.31: Modelo básico. [1]

acero (**figura 8.33 (b)**). Este esfuerzo corresponde a la pre-carga de prueba que está caracterizada en la **figura 8.30**, y tal como se explicó en la **figura 8.34**, el área de la pre-carga será la misma que el "corte representativo" que posee la misma área de esfuerzo de tensión.

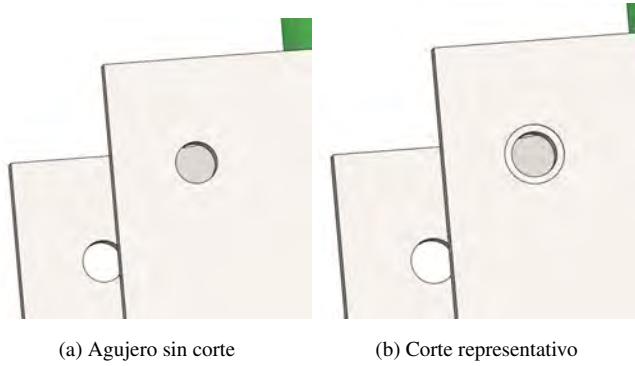


Figura 8.34: Descripción gráfica de Área de esfuerzo de tensión [1]

Una vez entendido esto, se eligen dos diámetros de espárragos para hacer las pruebas: 10[mm] y 12[mm]. Estas medidas fueron elegidas de acuerdo a los parámetros mostrados en el plano del densímetro Systec en la figura 8.2. Este plano no es claro en cuanto a los diámetros de los espárragos usados, pero debido a la proporcionalidad de los dibujos se tomo la decisión de realizar las pruebas en esas dos dimensiones.

De acuerdo al diámetro de espárrago elegido, existe un “Área de esfuerzo de tensión” específico. Estos valores se pueden apreciar en la siguiente **figura 8.35**:

Diámetro mayor nominal d , mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso p, mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²	Paso p, mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0

Figura 8.35: Tabla de áreas de esfuerzo y diámetro. [14]

Por recomendación profesional, generalmente es necesario hacer pruebas con pernos de grado 8.8, ya que su alta resistencia a la fluencia suele elegirse para pernos re-utilizables. Entonces según la **figura 8.30**, para trabajar con rangos de diámetro 10[mm] y 12[mm], el grado más cercano al 8.8 corresponde al 9.8 (**tabla 8.7**):

Tabla 8.7: Iteraciones en simulación de espárragos con propiedades similares a pernos

Grado	Diámetro espárrago	Res. de prueba	Área de esfuerzo de tensión
9.8	10[mm]	650[Mpa]	58[mm ²]
9.8	12[mm]	650[Mpa]	84,3[mm ²]

8.2.8 Resultados de simulaciones en Ansys para pernos M10, clase 9.8

Dado que el valor de fluencia representa el valor límite permisible de la resistencia del material, y este criterio será aplicado en todo el ensamblaje y parte que posea este tipo de acero. El análisis de estrés de Von Mises y el criterio de fallo elástico propone un estudio de material dúctil que sufrirá daño elástico hasta que la “**Energía de distorsión elástica**” rebase el esfuerzo de fluencia.

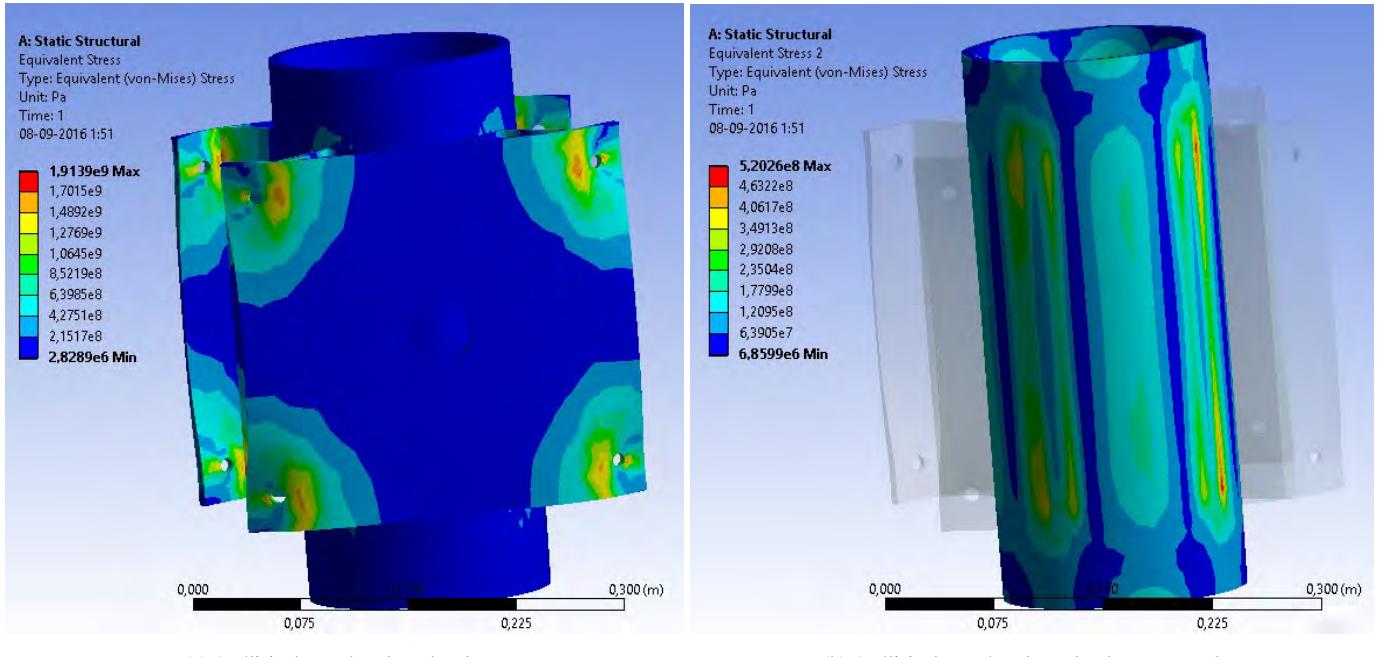


Figura 8.36: Análisis de estrés M10 con 650[Mpa].[1]

Tabla 8.8: Resultados de análisis en pernos M10, clase 9.8

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %
8.36(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	1914[Mpa]	1126 %	395 %
8.36(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	520[Mpa]	306 %	107 %

En el análisis del ensamble completo, con un esfuerzo de 650[Mpa], ubicado en la **figura 8.36(a)** podemos apreciar que los agujeros que soportan la carga de las tuercas sobre las planchas sufren un daño irreparable de 1914[Mpa], que corresponde a “395 %” veces superior al límite plástico o de tracción.

La entrega de energía de distorsión concentrada sobre las paredes del tubo de concentrado minero que se puede apreciar

en la figura 7.26(b). Presentan un valor máximo de: 520[Mpa]. El cual excede el límite de tracción hasta un 7,3 %. Por el hecho de exceder el límite de fluencia en un 306 %, podemos inferir que la utilización de pernos grado 9.8, que utilizan pre-cargas de 650[Mpa] en diámetros cercanos a los 10[mm], no deberían ser una opción a considerar. Debido a la alta concentración de esfuerzos que sus pre-cargas generan sobre la plancha de acero. Una posible solución sería utilizar un mayor diámetro de perno, lo cual se realizará un poco más adelante, o cambiar el diseño de la plancha de acero.

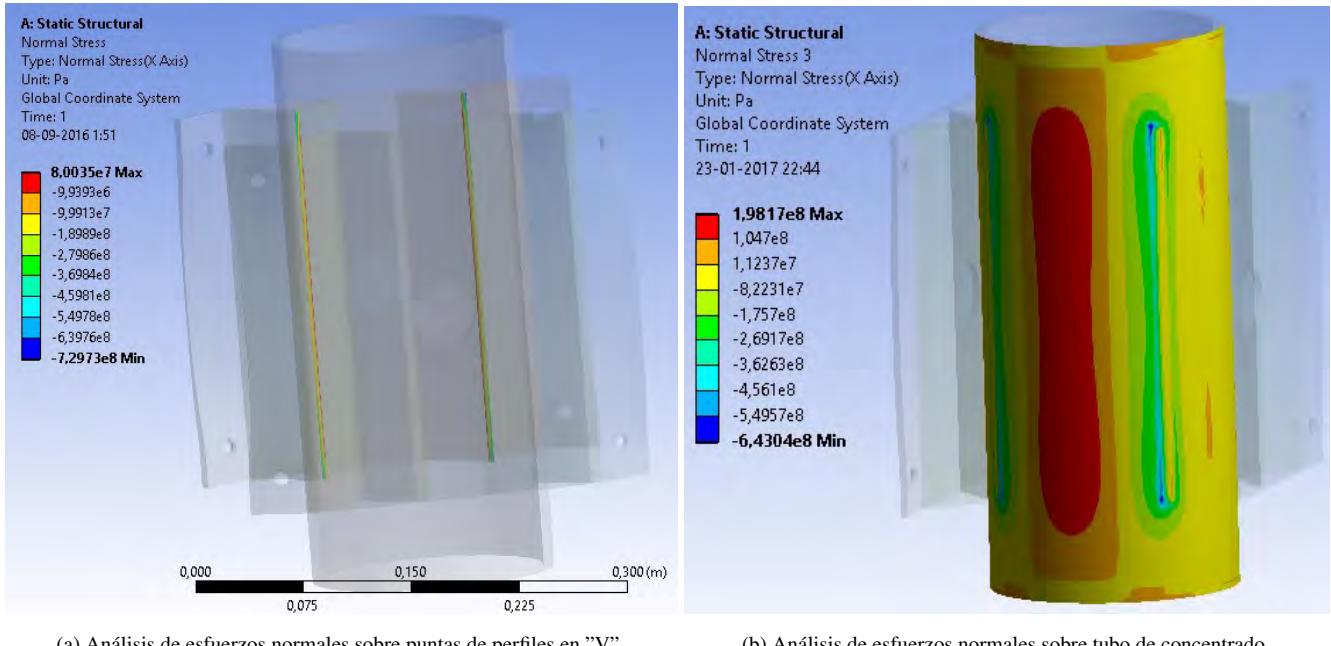


Figura 8.37: Análisis de esfuerzos normales M10 con 650[Mpa]. [1]

Tabla 8.9: Resultados de análisis en pernos M10, clase 9.8

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %
8.37(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	730[Mpa]	429 %	151 %
8.37(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	643[Mpa]	378 %	133 %

Para el análisis de esfuerzos normales se realizaron dos estudios que están ubicados sobre las piezas “**Profiles en V o profiles doblados**” que corresponden a los apoyos puntuales de las planchas de acero sobre el tubo minero. Es importante destacar que los esfuerzos en color azul son los de **compresión** y aquellos en color rojo son los de **tracción**.

El primer análisis se realiza en la cara interna de la punta de estos perfiles que corresponde a la **figura 8.37 (a)**. Donde

el esfuerzo de compresión aplicado es: $730[Mpa]$. El cual es superior al esfuerzo de fluencia hasta un 429 %. El segundo estudio correspondiente a los esfuerzos normales sobre la cara externa del tubo de concentrado de cobre (**figura 8.37 (b)**), se puede apreciar un esfuerzo de compresión de $643[Mpa]$ que trabaja sobre zona plástica del acero inoxidable en un 133 %. Este resultado es indeseado debido a que el tubo de concentrado pertenece a la minera y cambiar este debido a daños por terceros es extremadamente caro.

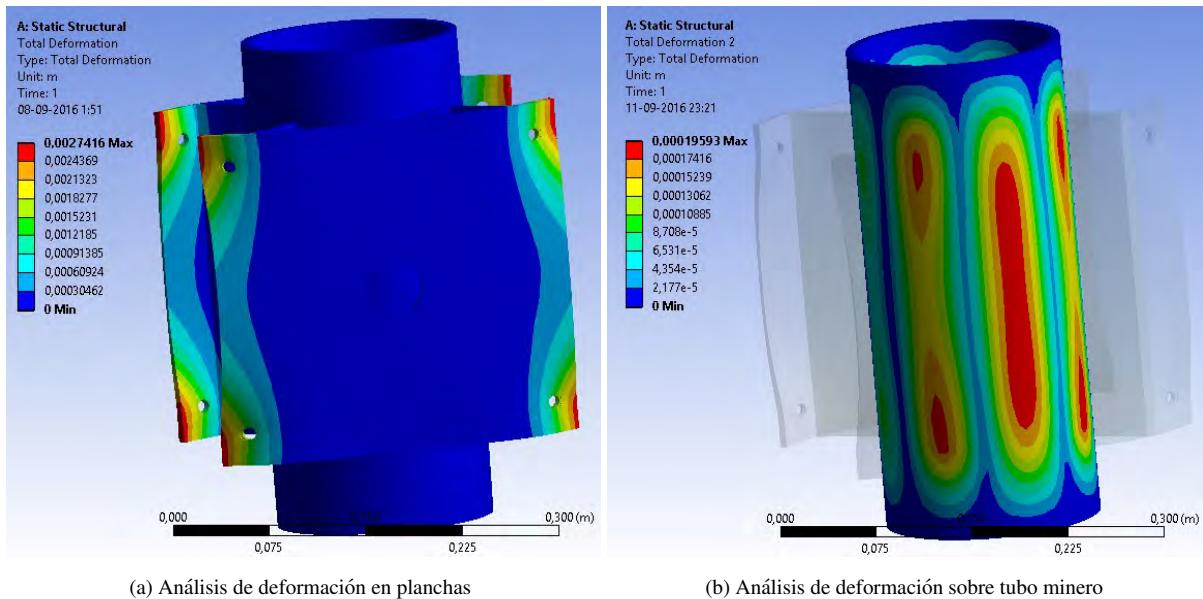


Figura 8.38: Deformación estructural M10 con $650[Mpa]$. [1]

Tabla 8.10: Deformación plástica M10, clase 9.8

Figura	7.28(a)	7.28(b)
Def. experimental	$2,7[mm]$	$0,2[mm]$

Si bien la deformación máxima figurada en este análisis muestra un casi despreciable valor de $0,2[mm]$ sobre el tubo minero y un $2,7[mm]$ sobre las planchas, en la práctica se puede asegurar que al menos en las planchas estos valores serán mucho mayores. El programa Ansys considera que los materiales poseen un **"recocido"** perfectamente homogéneo, y la distribución de esfuerzos será ideal.

8.2.9 Resultados de simulaciones en Ansys para pernos M12, grado 9.8

Tal como se hizo el análisis de un perno M10 bajo una presión de prueba de 650[Mpa]. Se realizará el mismo análisis para un espárrago de diámetro 12[mm], simulando que es un perno M12 y bajo la misma presión de prueba de 650[Mpa]. De esta forma podremos saber si existe una mitigación de la deformación elástica o plástica debido a la mayor área de contacto.

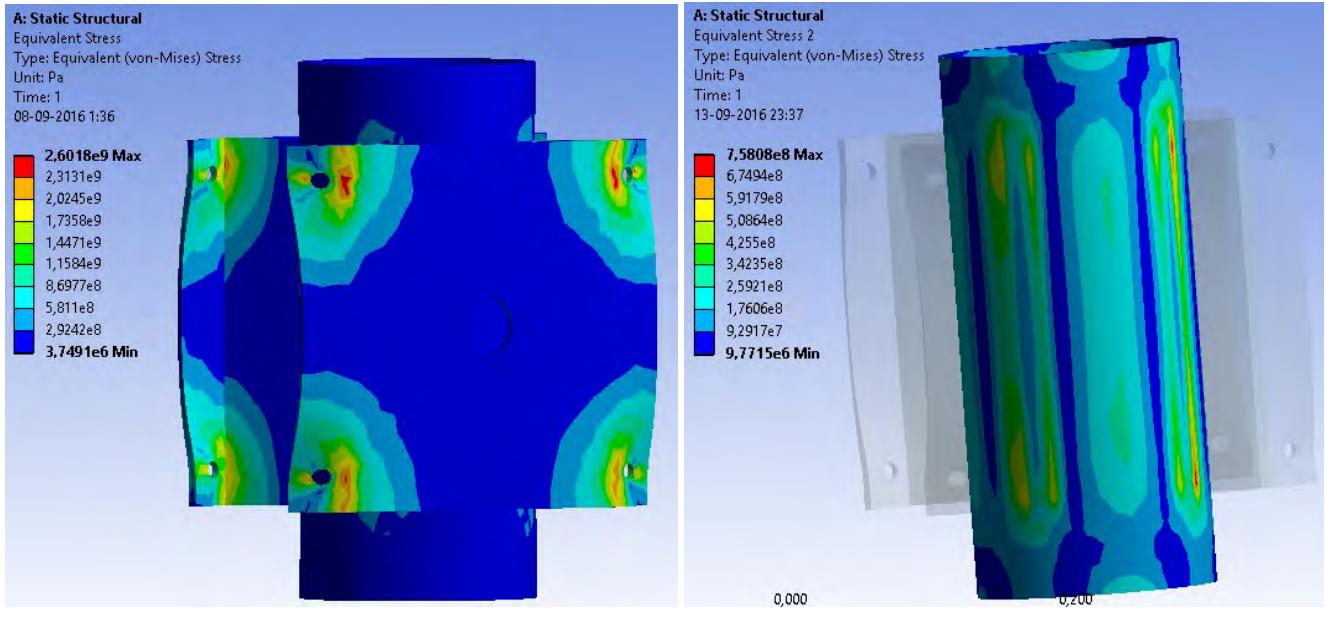


Figura 8.39: Análisis de estrés M12 con 650[Mpa].[1]

Tabla 8.11: Resultados de análisis en pernos M10 y M12, clase 9.8

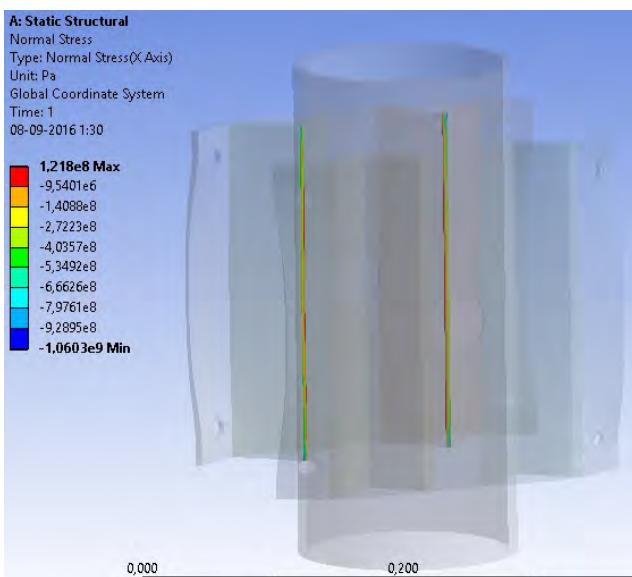
Figura	Resistencia de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %	Comparación Esfuerzos exp. %
8.36(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	1914[Mpa]	1126 %	395 %	- %
8.36(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	520[Mpa]	306 %	107 %	- %
8.39(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	12[mm]	2602[Mpa]	1530 %	536 %	136 %
8.39(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	12[mm]	758[Mpa]	156 %	446 %	146 %

Los esfuerzos experimentales de Von Mises ubicados en la estructura interna del tubo minero, sobrepasan en un 536 % al esfuerzo de fluencia del acero inoxidable. En cuanto a las planchas que reciben el esfuerzo de pre-carga, estas se

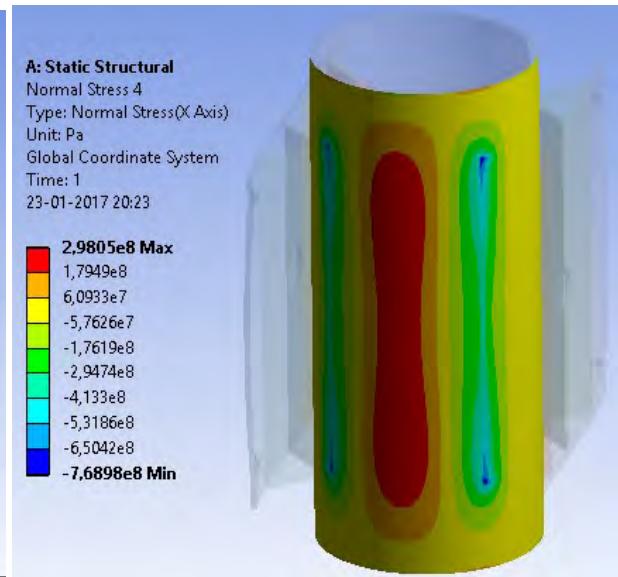
deforman con facilidad llegando a superar su esfuerzo de fluencia en un 1530 %.

La deformación plástica, se confirma que esta existe debido a un aumento sobre un 446 % de lo permitido, en los esfuerzos internos de Von Mises del tubo de concentrado. Las planchas sufren una deformación plástica de un 536 % sobre lo recomendado. Por lo que las planchas sufren un fallo irreparable que es percibible a simple vista.

En cuanto a la consideración de aumentar el diámetro de perno de 10[mm] a 12[mm]. La comparación de los esfuerzos de Von Mises obtenidos nos muestra que existe un aumento de un 36 % y un 46 %, sobre las planchas y el tubo minero respectivamente. Debido a el aumento de cargas, sobre la estructura, se descarta la idea de mantener el esfuerzo de pre-carga de 650[Mpa], y aumentar el diámetro de "Área de Esfuerzo de Tensión" a un diámetro de 12[mm] para disminuir los esfuerzos internos.



(a) Análisis de esfuerzos normales sobre puntas de perfiles en "V"



(b) Análisis de esfuerzos normales sobre tubo de concentrado

Figura 8.40: Análisis de esfuerzos normales M12 con 650[Mpa]. [1]

Tabla 8.12: Resultados de análisis en pernos M10 y M12, clase 9.8

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %	Comparación Esfuerzos exp. %
8.37(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	730[Mpa]	429 %	151 %	- %
8.37(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	643[Mpa]	378 %	133 %	- %
8.40(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	12[mm]	1060[Mpa]	624 %	219 %	145 %
8.40(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	12[mm]	769[Mpa]	452 %	159 %	120 %

Comparando la reciente **figura 8.40 (a)** con la tabla de esfuerzos. Salta a la vista un aumento del 624 %, de esfuerzos de compresión, sobre el límite elástico. Este esfuerzo de compresión experimental es superior en un 145 % sobre la misma carga pero en un diámetro de 10[mm].

Para la **figura 8.40 (b)** el aumento de cargas de compresión sobre la cara del tubo de concentrado en la **figura 8.37 (b)** es mayor. Donde el esfuerzo de compresión experimental es mayor en la cara de esfuerzos de compresión correspondiente al diámetro de 12[mm] aumenta en un 120 %, que trabaja sobre la zona plástica en un 159 %.

Al comparar los esfuerzos normales del perno M12 sobre el perno M10. Caemos en la conclusión de que al igual que los esfuerzos de Von Mises, los esfuerzos normales también aumentan al incrementar el Área de Esfuerzo de Tensión y por lo tanto no es recomendable utilizar pernos con una mayor área de tensión.

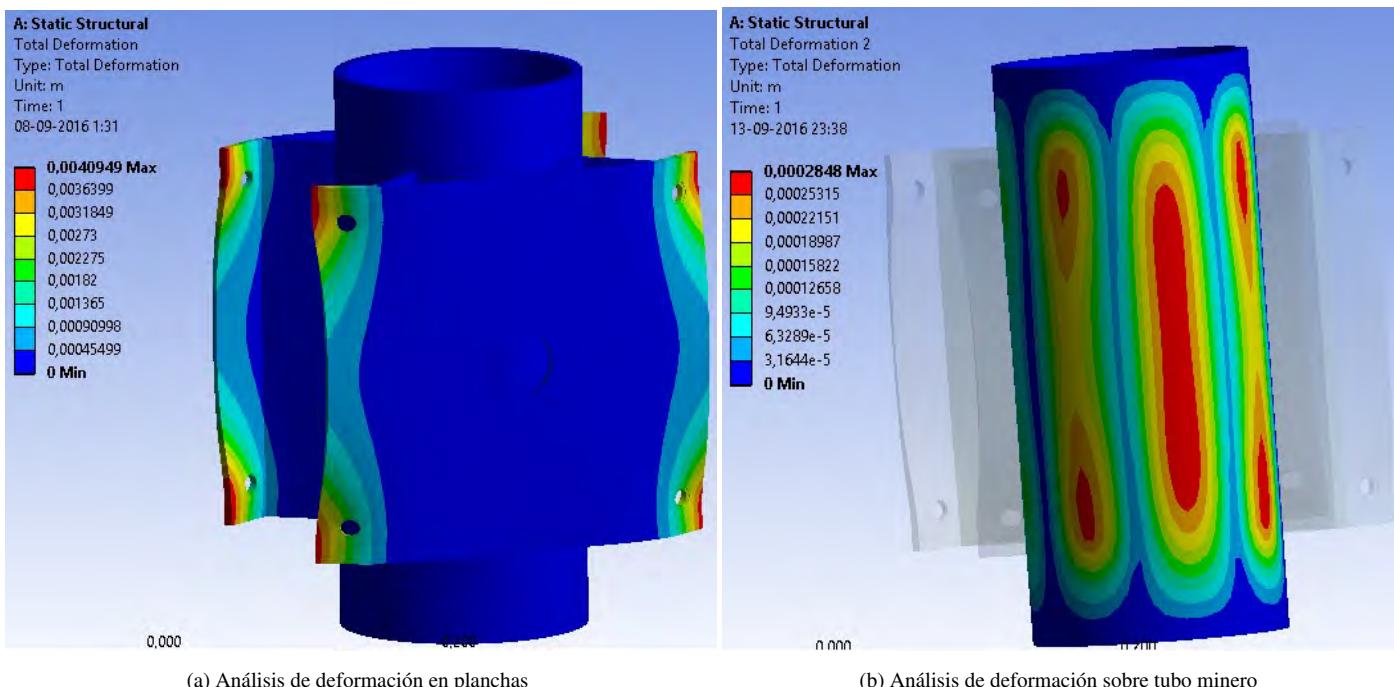


Figura 8.41: Deformación estructural M12 con 650[Mpa]. [1]

Tabla 8.13: Deformación plástica M10, clase 9.8

Figura	7.28(a)	7.31(a)	7.28(b)	7.31(b)
Defor. experimental	2,7[mm]	4,1[mm]	0,2[mm]	0,3[mm]
Comp. experimental	- %	152 %	- %	150 %

En esta tabla comparativa se realizaron medidas de deformación para planchas (a) y el tubo de concentrado (b). Gracias

a la comparación porcentual, ya sea para las planchas o el tubo de concentrado, se puede observar un aumento del 50 % de la deformación al aumentar el diámetro de los pernos de 10[mm] a 12[mm]. Por lo que podemos inferir que aumentando el área de apoyo de la pre-carga, también aumenta la deformación de la estructura, por lo tanto se confirma que no es recomendable aumentar el "Área de Esfuerzo de Tensión", para mitigar el esfuerzo creado sobre las esquinas de las planchas(a).

Análisis de resultados para pernos M10 y M12, clase 9.8

Una vez obtenidos dos análisis sobre pernos de clase 9.8, es posible tener una noción sobre la clase al cual se encuentra sometido el tubo en ese punto. Los análisis muestran que, para ese diseño de densímetro, las planchas son las que fallan con un índice superior al 1000 % en los esfuerzos internos de Von-Mises, y lo más importante es que el tubo minero se ve afectado siendo superado su esfuerzo de tracción en esfuerzos normales a su cara externa por sobre 378 %.

Una de las soluciones es cambiar el diseño, manteniendo la clase de los pernos, pero esto conllevaría a un gran costo adicional de tiempo y dinero. Sin embargo la calidad de los pernos puede no ser un factor decisivo en el diseño, ya que el principal objetivo que estas abrazaderas deben cumplir es la de sujetar de forma segura al densímetro sin afectar al tubo de concentrado que pertenece a la minera que será el cliente. Por lo tanto, se realizará el mismo análisis, pero con una clase de perno menos baja que la clase 4.6 (**figura 8.30**).

Si bien bajando la pre-carga aun puede cumplir el objetivo de la abrazadera. Se realizará un análisis similar, pero con un espárrago de acero inoxidable escogido en una tienda comercial. La resistencia de prueba de este espárrago es un poco menor que los 225[Mpa] que pertenecen al perno de clase 4.6.

8.2.10 Análisis de espárrago M10, clase inferior a 4.6

El espárrago escogido para este diseño es un ASTM 193A Gr B8, el cual es un estándar en acero aleado e inoxidable, y posee una resistencia mínima de fluencia 205[Mpa] según el catalogo Reinike. Este valor de fluencia efectivamente es menor al grado menos bajo de pernos de la **figura 8.30** que corresponde a la clase de propiedad 4.6.

Debido a que no es posible encontrar el valor de la pre-carga del espárrago y pensando que la relación entre resistencias de prueba y resistencias de fluencia es lineal, se realizará una estimación de la resistencia de prueba mínima con una regla de tres (**tabla 8.14**):

Tabla 8.14: Regla de tres para cálculo de resistencia de prueba de espárrago ASTM193A GR B8

Grado	Res. de prueba	Res. de Fluencia
4.6	225[Mpa]	240[Mpa]
?	α	205[Mpa]

Ejecutando la aproximación lineal en regla de tres:

$$\frac{225}{240} = \frac{\alpha}{205} \quad (8.51)$$

$$\alpha = 192[Mpa] \Rightarrow R_{p(esp)} = 192[Mpa] \quad (8.52)$$

Una vez conseguida la resistencia de prueba estimada, nuevamente usaremos la **figura 8.35**, y de acuerdo al análisis de esfuerzos de pernos clase 9.8 anteriormente realizado. Necesitaremos el área de esfuerzo de tensión " A_t " para un espárrago de 10[mm] de diámetro nominal, desechando la opción de utilizar un diámetro de perno 12[mm].

Por lo que tenemos un área de esfuerzo de tensión:

$$A_t = 58[mm^2] \quad (8.53)$$

Para mantener a un perno re-utilizable se necesita multiplicar la resistencia de prueba por 0,75. En el caso del espárrago se realizará la misma suposición:

$$R'_{p(esp)} = 0,75 * 192[Mpa] = 144[Mpa] \quad (8.54)$$

Para obtener la fuerza ejercida sobre el Área de Esfuerzo de Tensión. Debido a la carga de la tuerca que equivale a la pre-carga:

$$F_{precarga} = 144[Mpa] * 58[mm^2] = 8360,2[N] \quad (8.55)$$

Tal como se realizó anteriormente. La preparación para los análisis de Ansys serán los mismos a los análisis finitos realizado anteriormente. Se ingresará el valor obtenido por el último cálculo de la fuerza de pre-carga, se utilizará el mismo material de acero inoxidable 316. Bajo los mismos parámetros que Ansys utilizó para realizar los cálculos de pernos clase 9.8.

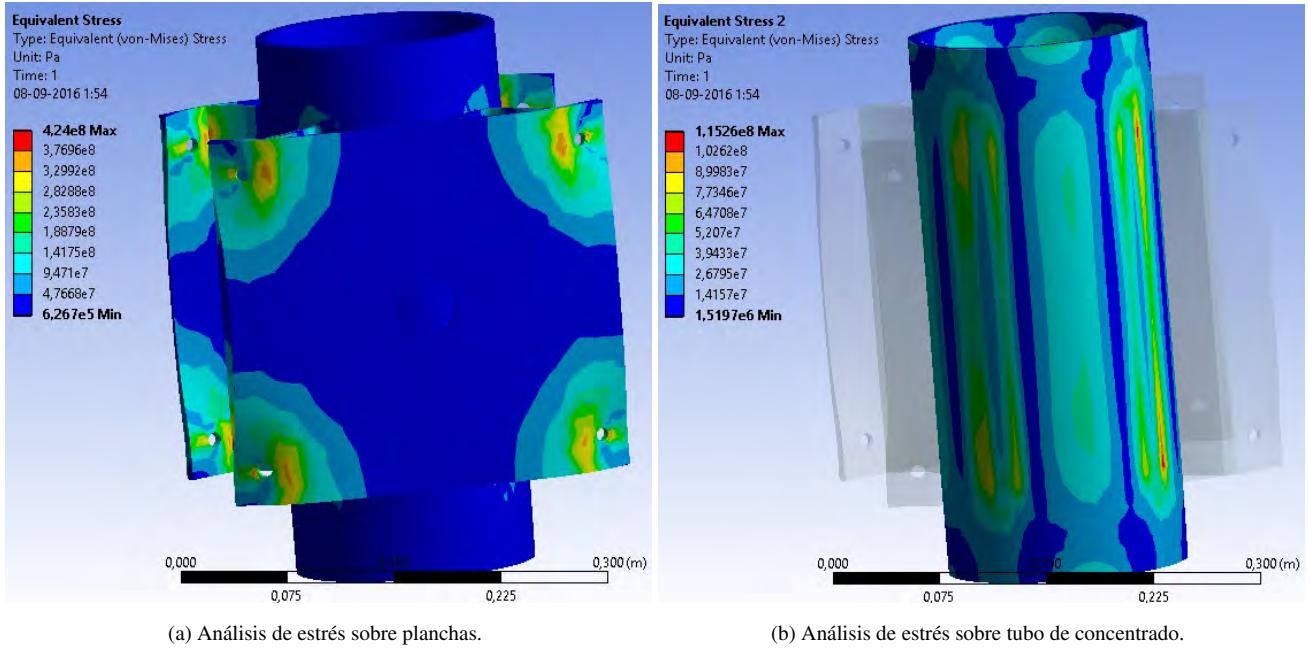


Figura 8.42: Análisis de estrés espárrago M10 con 144[Mpa].[1]

Tabla 8.15: Resultados de análisis en pernos M10, clase inferior a 4.6

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia SS316L Fluencia-Tracción	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %
8.42(a)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	424[Mpa]	249 %	87 %
8.42(b)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	115[Mpa]	68 %	24 %

Debido a que el esfuerzo de prueba de 144[Mpa] solo comprende un 22 % de la resistencia de prueba del perno clase 9.8. Se puede esperar una notoria disminución en los esfuerzos de Von Mises.

El tubo minero se mantiene seguro en la zona de deformación elástica donde las cargas de estrés comprenden un 68 % de su resistencia de fluencia. Por lo tanto esta pieza no se verá comprometida por deformación plástica, trabajando en un factor de seguridad de 1,48, resultando bastante ajustado.

Las planchas continúan sufriendo excesos de cargas de compresión. Esto puede atribuirse a un mal diseño, que concentra esfuerzos en los extremos de las soldaduras de los perfiles en "V". Las cargas resultantes de la prueba muestran hasta un 249 % de los esfuerzos de fluencia, acercándose peligrosamente hasta la zona plástica en un 87 %.

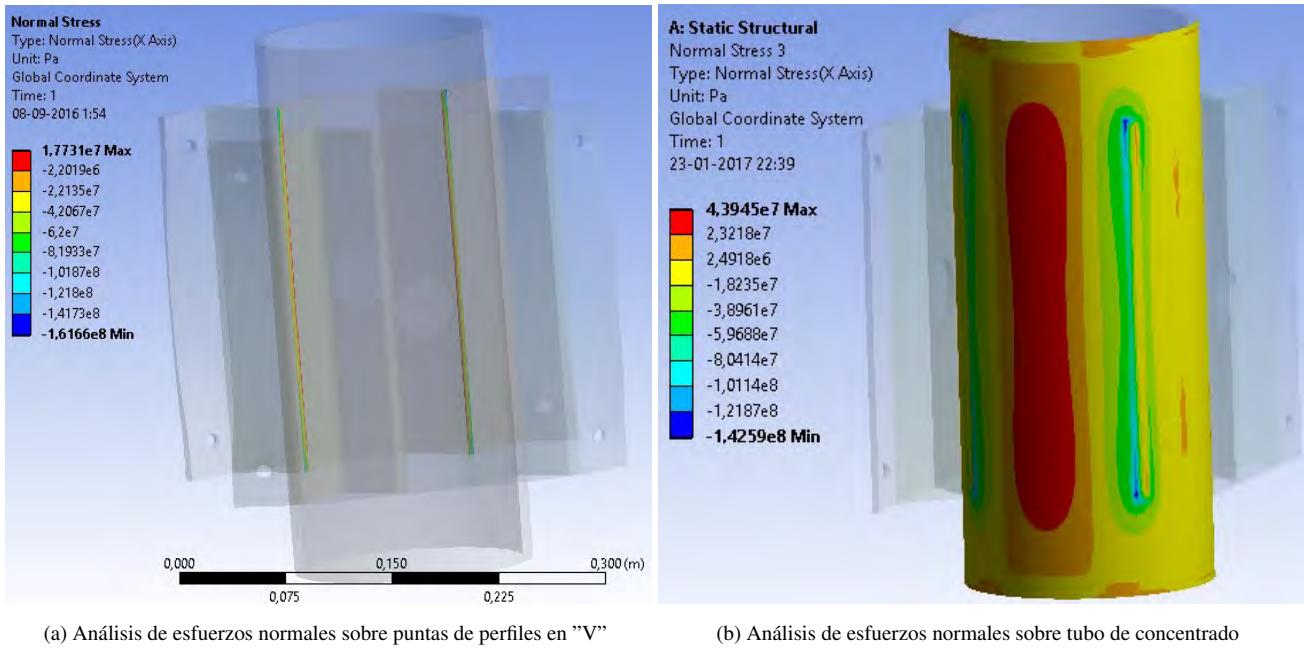


Figura 8.43: Análisis de esfuerzos normales espárrago M10 con 144[Mpa]. [1]

Tabla 8.16: Resultados de análisis en pernos M10 y M12, clase inferior a 4.6

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia Fluencia-Tracción SS316L	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %	Comparación Esfuerzos exp. %
8.37(a)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	730[Mpa]	429 %	151 %	- %
8.37(b)	650[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	643[Mpa]	378 %	133 %	- %
8.43(a)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	162[Mpa]	95 %	33 %	22 %
8.43(b)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	143[Mpa]	84 %	29 %	22 %

Los esfuerzos normales producidos por la pre-carga de 144[Mpa], en la **figura 8.43(a)** consiguen alcanzar la zona elástica en un 95 % para las planchas que poseen la sujeción de perfil en "V". En el caso del tubo de concentrado, los esfuerzos experimentales producidos por Ansys alcanzan un valor del 84 % de los esfuerzos de fluencia.

Estos datos son alentadores, ya que estos esfuerzos de compresión son mucho menores que los esfuerzos producidos por los pernos clase 9.8. Donde los esfuerzos de pernos de clase inferior a 4.6 ejercen una carga cercana al 30 % de los clase 9.8. Como se vio en el análisis anterior de esfuerzos de Von Mises, se cumple que las cargas sobre el cilindro de concentrado no salga de la zona elástica, incluso en los extremos de apoyo de los perfiles doblados en "V", donde existe la mayor concentración de carga.

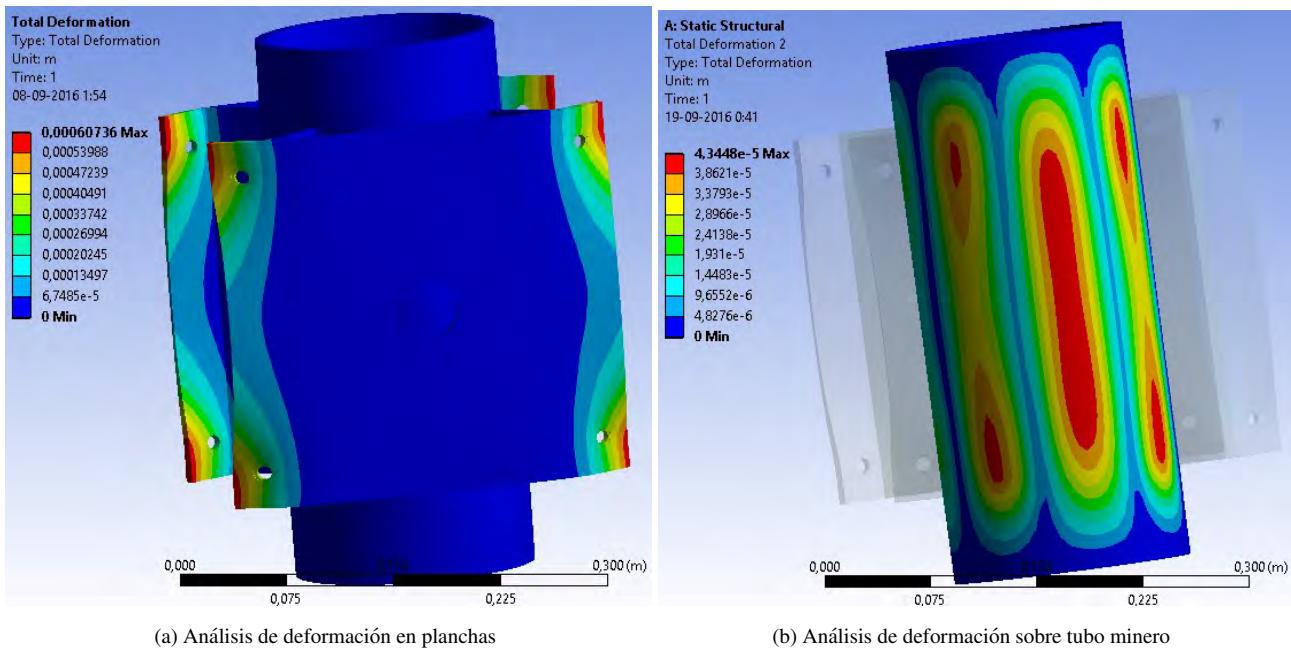


Figura 8.44: Deformación estructural espárrago M10 con 144[Mpa]. [1]

Tabla 8.17: Deformación plástica M10, clase inferior a 4.6

Figura	7.28(a)	7.34(a)	7.28(b)	7.34(b)
Defor. experimental	2,7[mm]	0,6[mm]	0,2[mm]	0,04[mm]
Comp. experimental	- %	22 %	- %	7 %

Los resultados de deformación de las planchas son alentadores. Se debe tener en consideración que esta es una deformación elástica de 0,6[mm] que apenas alcanzan un 22 % de la deformación provocada por los pernos clase 9.8. La experiencia muestra un resultado más notorio que puede alcanzar hasta los 5[mm] de deformación. Por otro lado, el análisis de deformación del tubo minero es muy cercano a la realidad, donde no se perciben deformaciones de ningún tipo con deformaciones de 0,04[mm].

Conclusión sobre estudio de abrazaderas

La primera observación que el análisis de perno clase 9.8 muestra, es la excesiva concentración de esfuerzos de compresión que esta ubicada en los extremos de la soldadura que une los perfiles doblados en "V" con las planchas, lo que hace que las planchas se curven y no permitan soldar las interfaces (tubo con flange horizontal) que serán el soporte para el etiquetador y el detector. Estos valores tienden a mostrar críticos resultados que se repiten y superan la barrera elástica con facilidad, sin importar que clase de perno de clase inferior se utilice. Lo mismo se repite para el tubo de concentrado de cobre, que se deforma hasta su zona plástica. Este problema se atribuye a un mal diseño de las abrazaderas que distribuyen los esfuerzos de compresión de forma no homogénea.

En el diseño construido, se tuvo que adjuntar soportes en el centro de las planchas para que funcionaran de separadores (**figura 8.45; 8.46**), ya que los espárragos generaban un pandeo en la plancha sostenedora. Se buscará una solución final en el diseño del "**Litodensitometro**" que se encuentra en una paginas más adelante, dando enfoque a una mejor distribución de esfuerzos normales e internos, a través de la plancha.



(a) Presentación de planchas sobre tubo (b) Presentando soportes extras para planchas

Figura 8.45: Momento en que se midieron y cortaron soportes para planchas. [1]



(a) Presentación de planchas totalmente planas sobre tubo (b) Soldando interfaz sobre planchas planas

Figura 8.46: Adjuntando soportes extras para mantener la alineación de planchas. [1]

8.2.11 Análisis estático de fuerzas

Para este análisis se debe entender como se proyectan las cargas ejercidas por los espárragos ubicados en las planchas que sujetan al etiquetador y al receptor. Estas cargas se concentran en las placas dobladas, llamadas perfiles "V", exactamente en las puntas de estas. El problema de estas es que concentran las cargas en áreas de apoyo muy pequeñas, lo que genera excesivas concentraciones de esfuerzos que pueden exceder la zona elástica del acero, tal como se vio en el análisis Ansys anterior.

Existe un defecto en el diseño del densímetro con etiquetador. El centro de masa esta desplazado 84,52[mm] hacia el etiquetador, ya que este dobla en cantidad de plomo al receptor gamma. Esto significa que el centro de masa estará posicionado cerca de la cara extrema del tubo de concentrado minero.

En la siguiente **figura 8.47**, se presenta en forma simplista de diagrama de cuerpo libre. Como se proyectan las fuerzas normales de los espárragos sobre el tubo y las fuerzas de roce aplicadas en los cuatro apoyos de las abrazaderas.

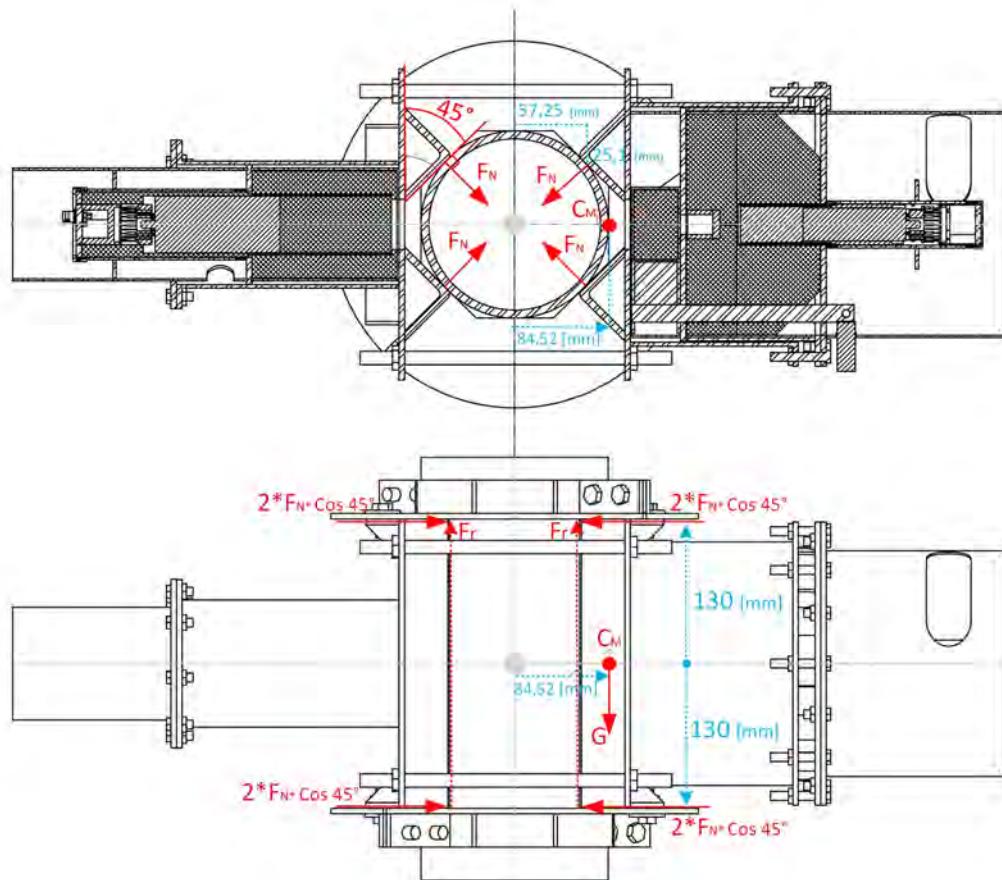


Figura 8.47: DCL densímetro con etiquetador. [1]

Después de realizar el análisis Ansys para pernos de diámetro M10 con pre-cargas de 144[Mpa] en los espárragos (**sección 8.2.10**), se necesita crear una base de datos que sea de utilizar para realizar un análisis de fuerzas. Para realizar esto se creó un mallado de 4[mm] de espacio. Donde se toman datos en una línea recta que recopile los esfuerzos de compresión críticos. Los datos se ordenan en un gráfico que compara esfuerzos de compresión [Mpa] a lo largo del eje z[mm] (**figura 8.48; 8.49**).

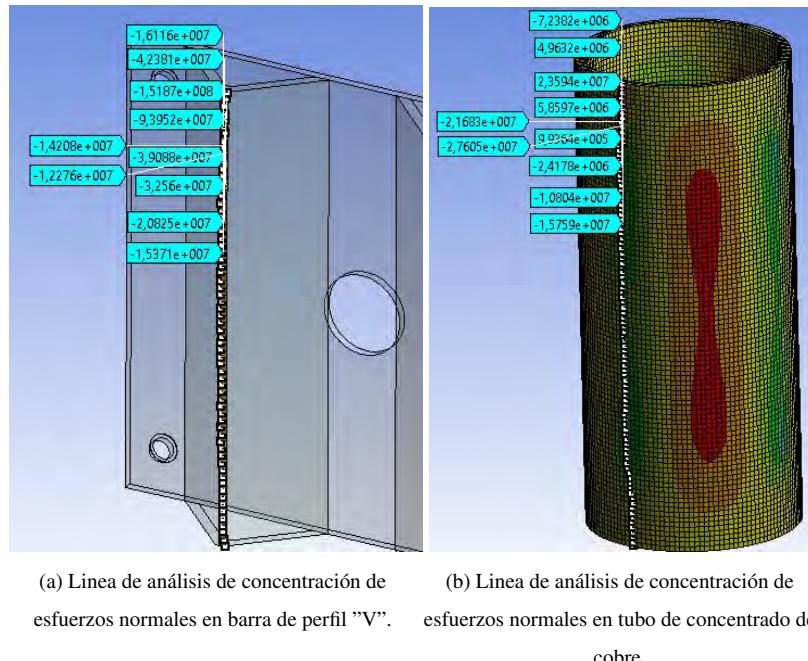


Figura 8.48: Vistas de líneas de base de datos de interés.[1]

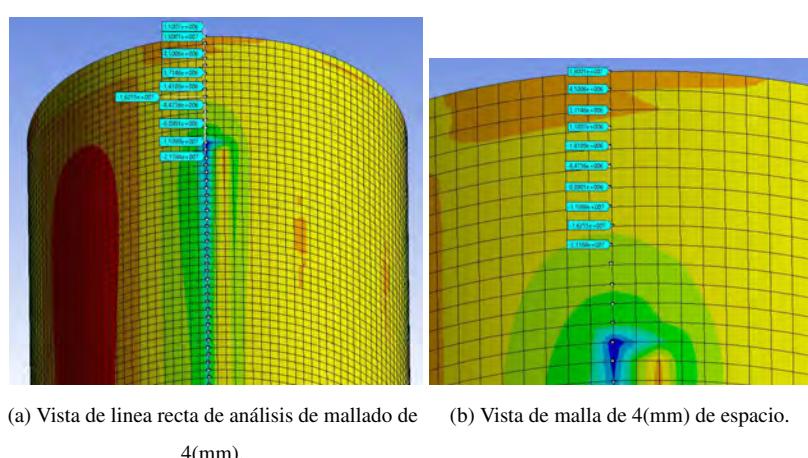


Figura 8.49: Ejemplo de creación de base de datos sobre malla.[1]

Los gráficos obtenidos son los siguientes:

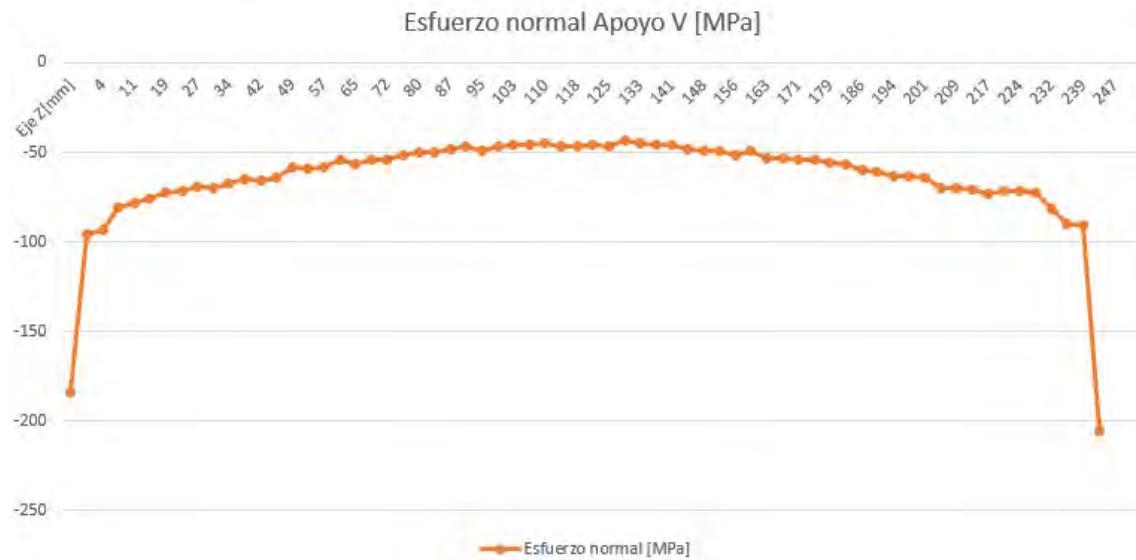


Figura 8.50: Base de datos para perfil "V". [1]

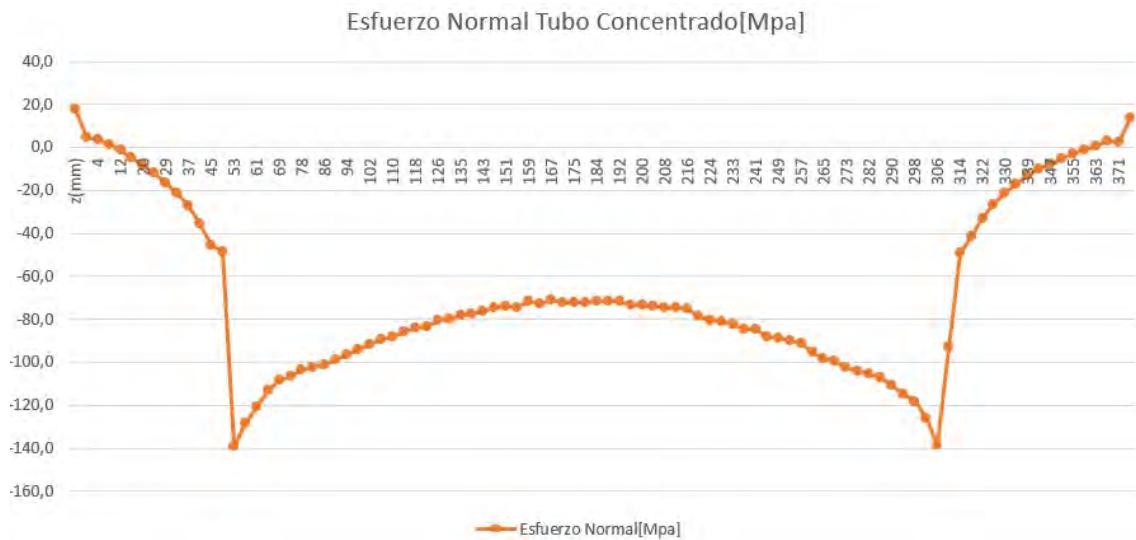


Figura 8.51: Base de datos para tubo minero. [1]

De acuerdo a los resultados de los dos últimos gráficos, **figura 8.50** y **figura 8.51**, lo primero que es necesario destacar es que los esfuerzos negativos pertenecen a esfuerzos de compresión y los positivos a tracción. Es visible que la representación gráfica de los perfiles en "V" es exageradamente lineal e ideal. Donde los mayores esfuerzos de compresión se concentran en los extremos de los perfiles en "V" y prácticamente no existen esfuerzos en el centro. Es por esto que se hará uso del gráfico del tubo minero para realizar este análisis. Dicho esto podemos ver que el dominio de importancia dentro del eje Z para el tubo minero, se concentra entre los puntos 45[mm] y 273[mm]. Donde están los esfuerzos normales que representan la respuesta al apriete de las abrazaderas de los perfiles en "V"

Representando los esfuerzos normales sobre la cara externa del tubo de concentrado (**figura 8.52**). Se muestra en la extensión del tubo como se ejercen los esfuerzos de compresión de interés a lo largo de una linea en el eje Z.

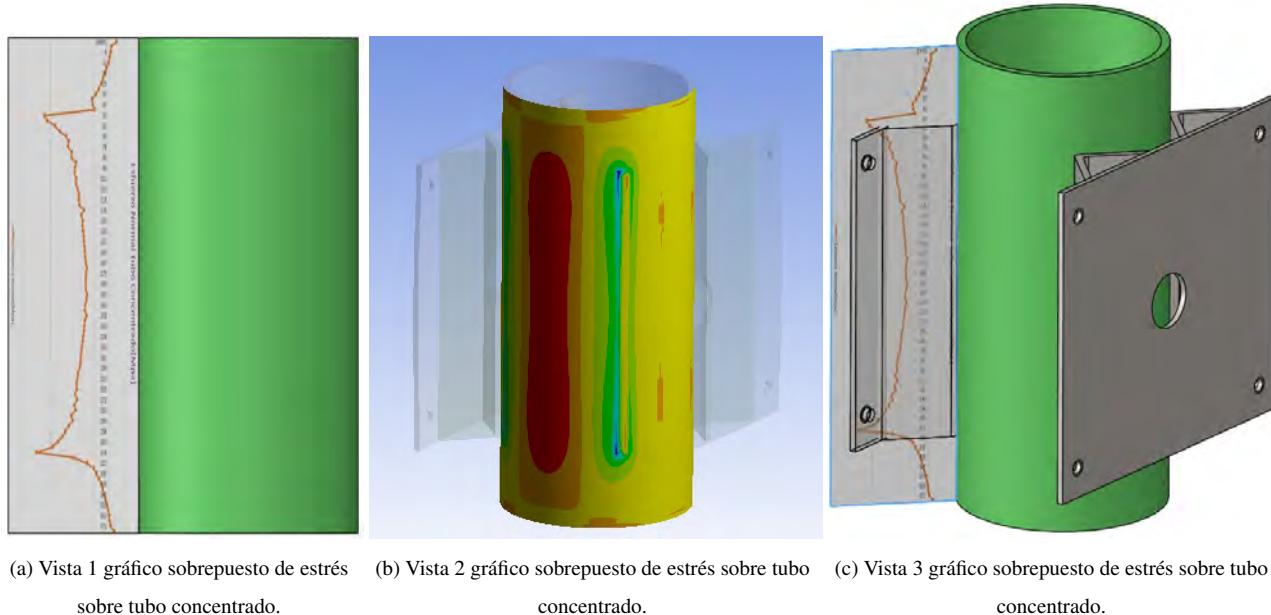


Figura 8.52: Vistas de gráfico sobrepuerto sobre tubo de concentrado, M10 con 144[Mpa].[1]

Utilizando el software de Matlab, se realiza una regresión lineal de la base de datos para crear una distribución de esfuerzos normales ejercidos sobre el tubo de concentrado. Sin embargo la ecuación obtenida resultó ser de grado doce, por lo que se tuvo que separar la ecuación en tres dominios para reducir las ecuaciones a un máximo de grado dos.

Considerando que los esfuerzos de compresión son positivos. El primer dominio del eje Z es 0 - 20[mm] posee una regresión lineal de grado dos correspondiente a:

$$P_{(z1)} = -0,518303571428572 * x^2 + 11,8882142857143 * x + 66,8857142857142 \quad (8.56)$$

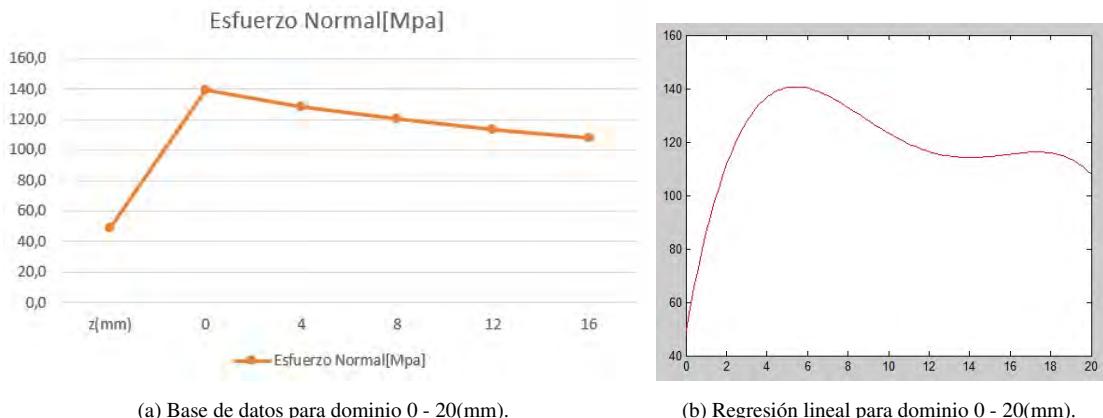


Figura 8.53: Metodo de regresión lineal en dominio 0 - 20(mm)].[1]

El segundo dominio del eje Z es 20 - 233[mm] posee una regresión lineal de grado dos correspondiente a:

$$P_{(z2)} = 0,00331022131639223 * x^2 - 0,856733507671479 * x + 127,424511773116 \quad (8.57)$$

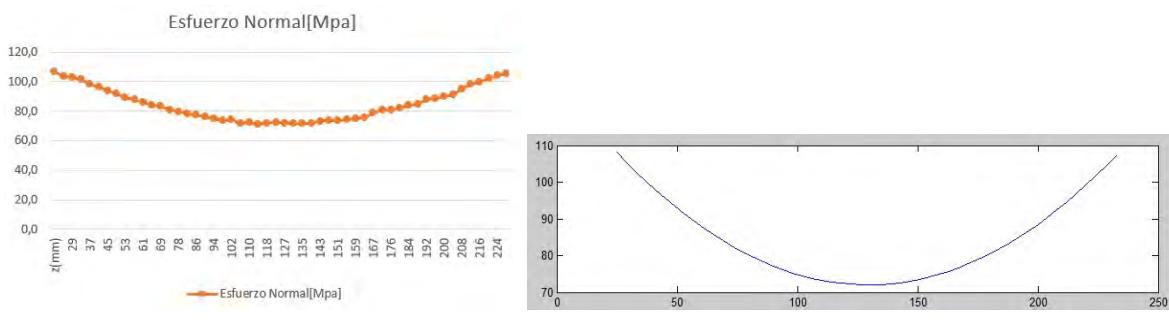
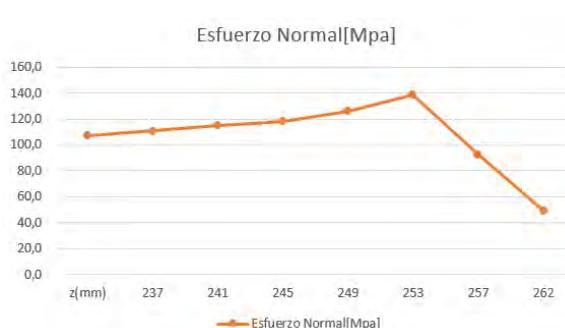


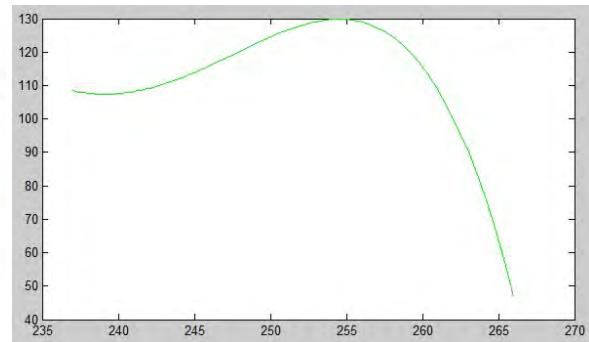
Figura 8.54: Metodo de regresión lineal en dominio 20 - 233(mm)].[1]

El tercer dominio del eje Z es 233 - 266[mm] posee una regresión lineal de grado cuatro correspondiente a:

$$P_{(z3)} = -0,235726291139427 * x^2 + 117,329913601092 * x - 14470,1907768860 \quad (8.58)$$



(a) Base de datos para dominio 233 - 266(mm).



(b) Base de datos para dominio 233 - 266(mm).

Figura 8.55: Metodo de regresión lineal en dominio 233 - 266(mm).[1]

La ecuación por sección de dominio quedaría de la siguiente forma

$$P_{(z)} = \begin{cases} P_{(z1)} & \text{si } 0 < z < 20 \\ P_{(z2)} & \text{si } 20 < z < 233 \\ P_{(z3)} & \text{si } 233 < z < 266 \end{cases} \quad (8.59)$$

Para plantear las sumatorias de ecuaciones de fuerzas es necesario realizar una aproximación de espesor de apoyo sobre el tubo de $1[mm]$. De esta forma se pueden integrar las fórmulas de cargas $P_{(z)}$ bajo el área de apoyo que tendrá una extensión entre punto y punto a través de la malla de $4[mm]$.

Las áreas de apoyo para el tubo minero y los pernos son:

$$A_v = 1[mm] * 4[mm] = 4[mm^2] \quad \wedge \quad A_{esf.tension} = 58[mm^2] \quad (8.60)$$

El dominio a utilizar para realizar la sumatoria de fuerzas es una división a la mitad del tubo minero (**figura 8.56**). Es necesario destacar que las fuerzas sobre el área de pre-carga aplicadas deben multiplicarse por ocho, aunque el dominio este acotado. Debido a que estas fuerzas son aplicadas al mismo tiempo en ambos sentidos para que puedan ser sostenidas.

Sumatoria de fuerzas en eje Y:

$$0 = \sum F_y \quad (8.61) \quad \text{Figura 8.56: Modelo para sumatoria de cargas. [1]}$$



$$0 = 2 * A_v * \int_0^{20} P_{(z1)} dz + 2 * A_V * \int_{20}^{233} P_{(z2)} dz + 2 * A_v * \int_{233}^{266} P_{(z3)} dz - 8 * P_{144} * A_{esf.ten} * \cos(45) \quad (8.62)$$

$$0 = 2 * 4 * \cos(45) * 233,2 + 2 * 4 * \cos(45) * 18006 + 2 * 4 * \cos(45) * 3570,9 - 8 * 144 * 58 \quad (8.63)$$

$$0 = 100484 - 66816 = 33668 \quad (8.64)$$

Esta contradicción se origina por la ecuación de elementos finitos utilizada para medir los esfuerzos normales en el programa Ansys. Sumatoria de fuerzas en eje Z:

$$0 = \sum F_z \quad (8.65)$$

$$0 = 2 * 0,74 * A_v * \int_0^{20} P_{(z1)} dz + 2 * 0,74 * A_V * \int_{20}^{233} P_{(z2)} dz + 2 * 0,74 * A_v * \int_{233}^{266} P_{(z3)} dz - G \quad (8.66)$$

$$0 = 2 * 0,74 * 4 * \cos(45) * 233,2 + 2 * 0,74 * 4 * \cos(45) * 18006 + 2 * 0,74 * 4 * \cos(45) * 3570,9 - 95,4 * 9,81 \quad (8.67)$$

$$0 = 74358,2 - 935,874 = 73422,3 \quad (8.68)$$

Debido al contradictorio resultado anterior, este resultado está lejos de ser acertado, sin embargo muestra que la fuerza de roce supera con creces la fuerza mínima de roce estático que es $95,4 * 9,81 = 935,9[N]$. Por lo que asegura que el conjunto no deslizara a lo largo del tubo minero.

8.3 Diseño de sub-función: Re-diseño de abrazaderas

Debido a los análisis mostrados en la sección 8.2.10. Se realizará un re-diseño de las placas sostenedoras que sostienen a las fuentes y a los detectores gamma, ya que la flexión que estas experimentan, por la pre-carga de los pernos, destruye la alineación necesaria para disminuir la incertidumbre de las mediciones de coincidencias que el haz gamma genera sobre el cristal centelleador.

La razón por la que las placas sostenedoras se flectan, es por su insuficiente momento de área el cual genera una concentración de esfuerzos que vencen la zona elástica de la plancha con facilidad. Para el primer diseño se utiliza una placa cuadrada de espesor 5[mm] donde se sueldan dos perfiles triangulares que harán el contacto con el tubo minero. Este diseño es común entre densímetros ya comercializados (**figura 8.57**).

Utilizando el mismo software de diseño SolidWorks, se medirá la sección transversal de la placa sostenedora:

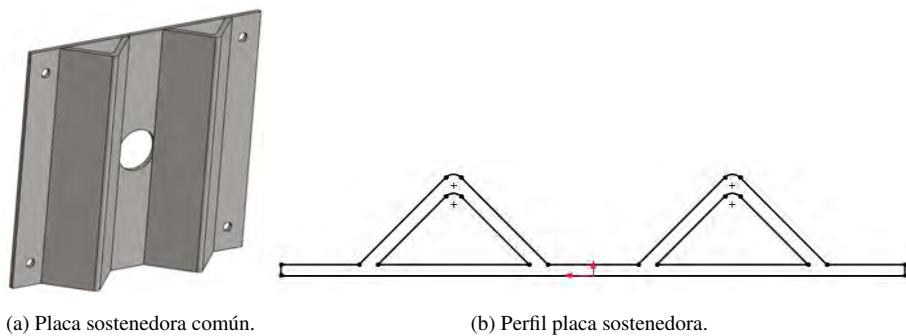


Figura 8.57: Vistas placa sostenedora común.[1]

área [mm²]

$$A_{P.comun} = 2696$$

Centro de gravedad [mm]

$$X = 12,88$$

$$Y = 0$$

$$Z = 130$$

Momentos de inercia del área [mm⁴]

$$L_{xx} = 14858727,77 \quad L_{xy} = 0 \quad L_{xz} = 0$$

$$L_{yx} = 0 \quad L_{yy} = 475078,88 \quad L_{yz} = 0$$

$$L_{zx} = 0 \quad L_{zy} = 0 \quad L_{zz} = 15333806,65$$

Momento polar de inercia, del área, en el centro de gravedad = 15333806,65

Para solucionar el problema de la flexión, que compromete a la alineación del haz gamma con el detector. Se mantuvo la idea del apoyo de los perfiles en "V", aumentando el área de transversal que recibe las cargas de compresión y tracción (**figura 8.58**). Los datos mostrados por el nuevo diseño de abrazadera son:

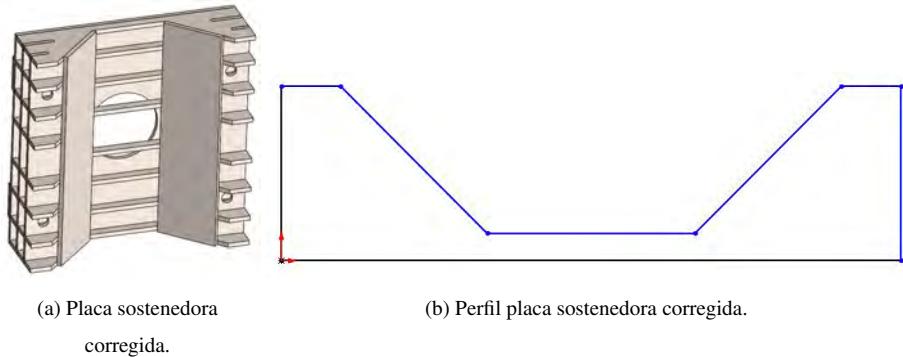


Figura 8.58: Vistas placa sostenedora corregida.[1]

Área [mm²]

$$A_{P.corregido} = 9040,96$$

Centro de gravedad [mm]

$$X = 125$$

$$Y = 26,11$$

$$Z = 0$$

Momentos de inercia del área [mm⁴]

$$L_{xx} = 3341661,22 \quad L_{xy} = 0 \quad L_{xz} = 0$$

$$L_{yx} = 0 \quad L_{yy} = 74262585,65 \quad L_{yz} = 0$$

$$L_{zx} = 0 \quad L_{zy} = 0 \quad L_{zz} = 77604246,87$$

Momento polar de inercia, del área, en el centro de gravedad= 77604246,87

La comprobación de este resultado se hace con un cálculo en papel. Dividiendo el área del perfil de la placa sostenedora en cinco secciones (**figura 8.59**), y fijando el punto de origen en la esquina inferior izquierda tenemos la siguiente figura:

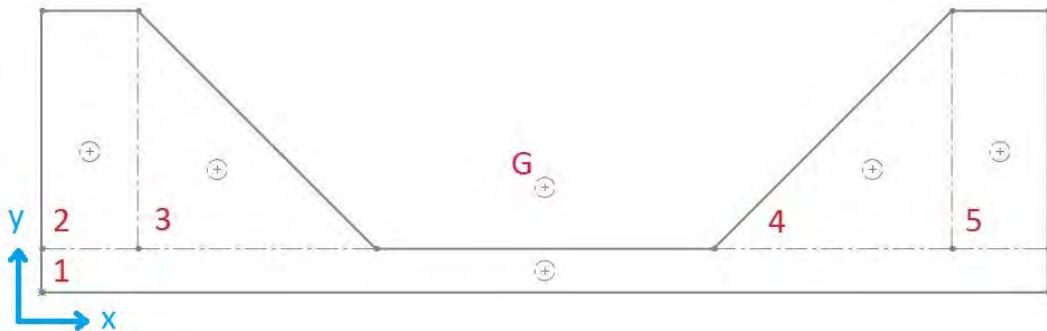


Figura 8.59: División de áreas de sección transversal de placa sostenedora. [14]

Identificamos los centros de masa de cada una de las cinco figuras, representados por cálculos de diámetro 5[mm]. Además, se identifican en la **figura 8.60**, las medidas esenciales para tomar las siguientes mediciones:

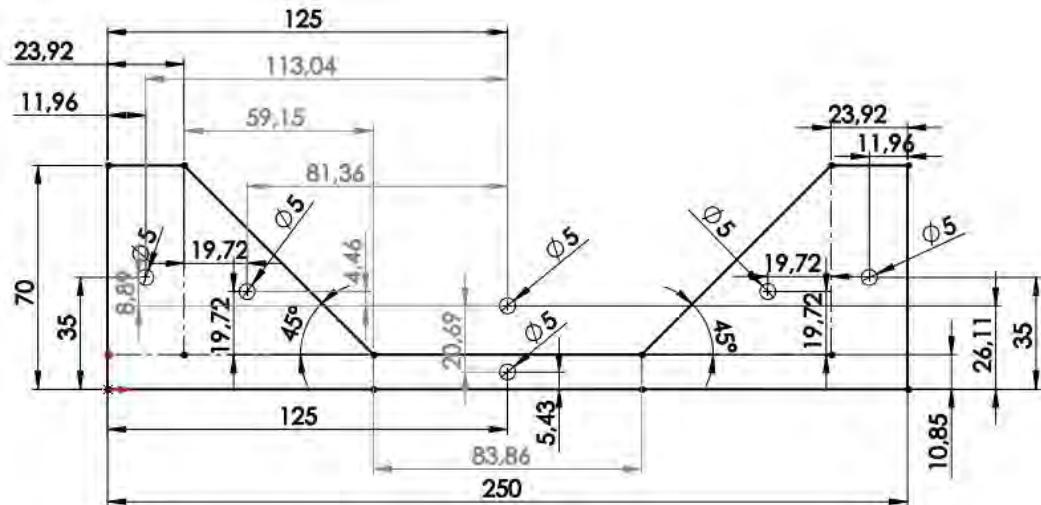


Figura 8.60: Identificación de medidas esenciales. [14]

Posteriormente se calculan las áreas y segundos momentos de área respecto al eje x:

Área figura Valor[mm²]

$$A_1 = 250 * 10,85 = 2712,5$$

$$A_2 = 23,92 * 59,15 = 1414,87$$

$$A_3 = \frac{59,15 * 59,15}{2} = 1749,36$$

$$A_4 = \frac{59,15 * 59,15}{2} = 1749,36$$

$$A_5 = 23,92 * 59,15 = 1414,87$$

Segundo momento de área Valor[mm⁴]

$$I_x1 = \frac{250 * 10,85^3}{3} = 106441$$

$$I_x2 = \frac{23,92 * 59,15^3}{12} = 412519$$

$$I_x3 = \frac{59,15 * 59,15^3}{36} = 340029$$

$$I_x4 = \frac{59,15 * 59,15^3}{36} = 340029$$

$$I_x5 = \frac{23,92 * 59,15^3}{12} = 412519$$

Fig I_x [mm⁴] A [mm²] d [mm] $I_x + A * d^2$ [mm⁴]

$$1 \quad 106441 \quad 2712,5 \quad 20,69 \quad 1,2676 * 10^6$$

$$2 \quad 412519 \quad 1414,87 \quad 8,87 \quad 524339$$

$$3 \quad 340029 \quad 1749,36 \quad 4,46 \quad 374827$$

$$4 \quad 340029 \quad 1749,36 \quad 4,46 \quad 374827$$

$$5 \quad 412519 \quad 1414,87 \quad 8,87 \quad 524339$$

$$\Sigma \quad \quad \quad 3,06593 * 10^6$$

Comparado al valor experimental entregado por SolidWorks: $L_{xx} = 3341661,22$, el indicador de comparación es de un 0,92 %. Lo que equivale a una diferencia de un 8 %.

Ahora se calculan las áreas y segundos momentos de área respecto al eje y:

Área figura Valor[mm²]

$$A_1 = 250 * 10,85 = 2712,5$$

$$A_2 = 23,92 * 59,15 = 1414,87$$

$$A_3 = \frac{59,15 * 59,15}{2} = 1749,36$$

$$A_4 = \frac{59,15 * 59,15}{2} = 1749,36$$

$$A_5 = 23,92 * 59,15 = 1414,87$$

Segundo momento de área	Valor[mm ⁴]
$I_y1 = \frac{10,85*250^3}{12}$	$= 1,41276 * 10^7$
$I_y2 = \frac{59,15*23,92^3}{3}$	$= 269847$
$I_y3 = \frac{59,15*59,15^3}{12}$	$= 1,02009 * 10^6$
$I_y4 = \frac{59,15*59,15^3}{12}$	$= 1,02009 * 10^6$
$I_y5 = \frac{59,15*23,92^3}{3}$	$= 269847$

Fig	$I_y[\text{mm}^4]$	$A[\text{mm}^2]$	$d[\text{mm}]$	$I_x + A * d^2[\text{mm}^4]$
1	$1,41276 * 10^7$	2712,5	0	$1,41276 * 10^7$
2	269847	1414,87	81,36	$9,63538 * 10^6$
3	$1,02009 * 10^6$	1749,36	113,04	$2,33735 * 10^7$
4	$1,02009 * 10^6$	1749,36	113,04	$2,33735 * 10^7$
5	269847	1414,87	81,36	$9,63538 * 10^6$
Σ				$8,01453 * 10^7$

Comparado al valor experimental entregado por SolidWorks: $L_{yy} = 8,01453 * 10^7$, el indicador de comparación es de un 1,08 %. Lo que equivale a una diferencia de un 8 %.

El trasfondo de aumentar el área transversal al esfuerzo aplicado sobre la placa, es para obtener una mejor resistencia a las cargas internas de tracción y compresión. El indicador de aumento del momento de inercia entre el modelo común y el corregido es de un 16900 %. Mientras que el indicador de aumento de área transversal es de un 335 %.

Resultados de simulaciones en Ansys para pernos M10, grado 9.8 sobre placa sostenedora corregida

Al igual que los análisis de elemento finito anteriores. Se analizara la resistencia a la pre-carga de los espárragos M10 correspondiente a 144[Mpa].

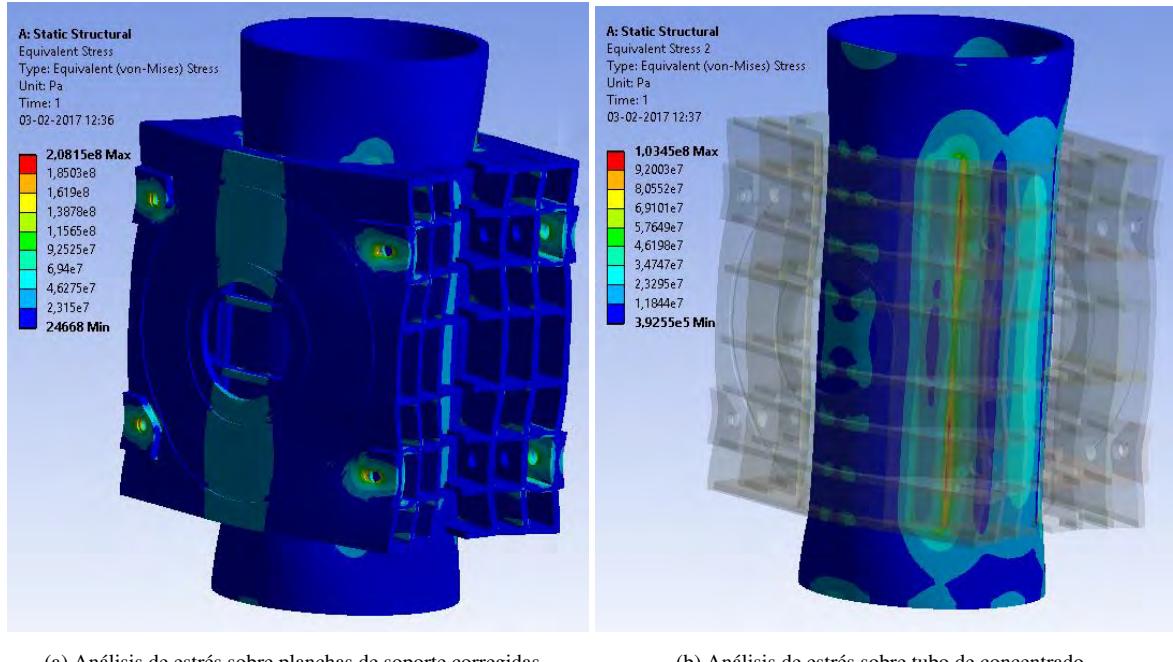


Figura 8.61: Análisis de estrés M10 con 144[Mpa].[1]

Tabla 8.18: Resultados de análisis en pernos M10, clase inferior a 4.6, sobre placas de diseño corregido

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia Fluencia-Tracción SS316L	Diámetro	Máx. Experimental	Esf. Fluencia %	Indice Res. Tracción %	Indice Res. Esfuerzos exp. %
8.42(a)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	424[Mpa]	249 %	87 %	- %
8.42(b)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	115[Mpa]	68 %	24 %	- %
8.61(a)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	208[Mpa]	120 %	43 %	49 %
8.61(b)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	103[Mpa]	61 %	21 %	90 %

Los resultados de esfuerzos experimentales de Von Mises sobre la placa corregida son bastante alentadores. Reduciendo las cargas un mínimo de 103[Mpa] sobre el tubo minero, lo que equivale a un 10 % de reducción respecto al diseño común. Un notorio cambio sobre la placa corregida es percibido en el área de flexión que trabaja en ordenes de carga muy bajos en color celeste, alrededor de 69,4[Mpa], que equivalen a un 41 % del máximo esfuerzo elástico.

Es necesario destacar que prácticamente la totalidad del conjunto analizado trabaja bajo el 50 % de la zona elástica del material. A excepción del "Área de esfuerzo de tensión" que corresponde a una pequeña zona de la cara soportante de la pre-carga que ejercen los espárragos (**figura 8.62**). Estas alcanzan el máximo de esfuerzos internos de 208[Mpa]. Este resultado es alentador debido a que es una zona muy pequeña y las cargas son disipadas antes de llegar a la otra cara de la placa sostenedora.

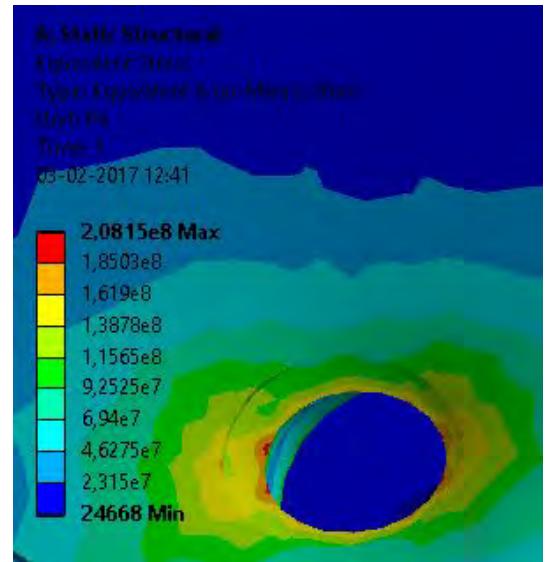
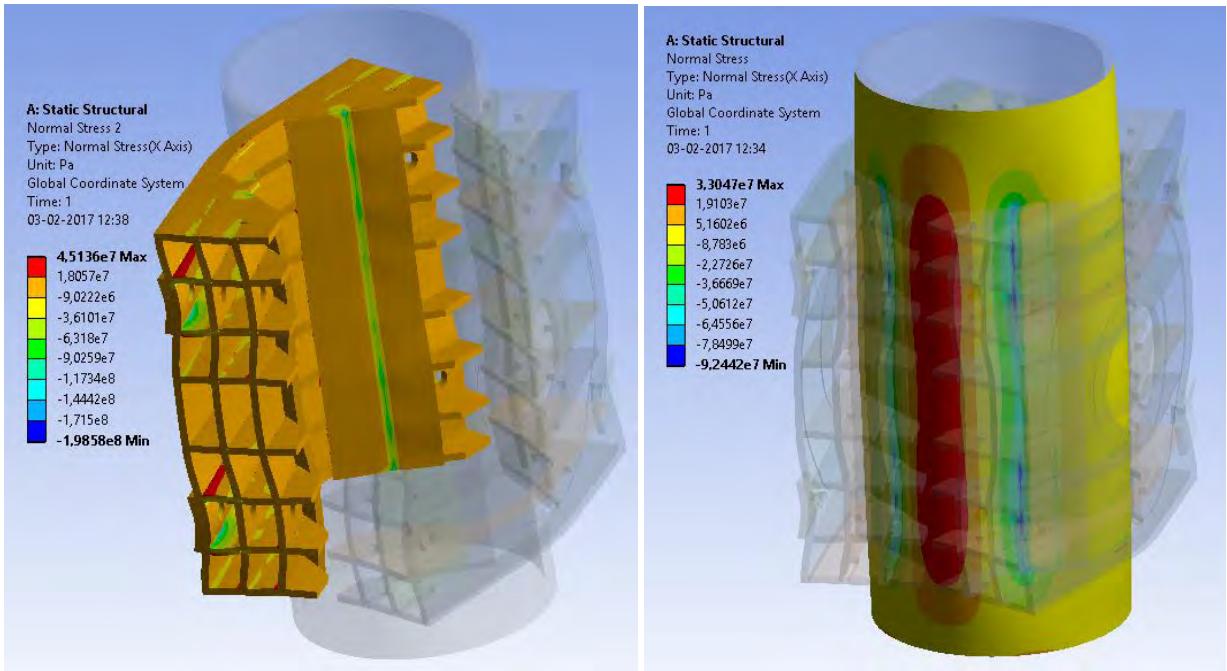


Figura 8.62: Vista de máximas cargas de compresión. [1]



(a) Análisis de esfuerzos normales sobre planchas de soporte corregidas

(b) Análisis de esfuerzos normales sobre tubo de concentrado

Figura 8.63: Análisis de esfuerzos normales M10 con 144[Mpa]. [1]

Tabla 8.19: Resultados de análisis en pernos M10, clase inferior a 4.6, sobre placas de diseño corregido

Figura	Resistencia de prueba	Resistencia Fluencia-Tracción SS316L	Diámetro	Máx. Esf. Experimental	Indice Res. Fluencia %	Indice Res. Tracción %	Comparación Esfuerzos exp. %
8.43(a)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	162[Mpa]	95 %	33 %	- %
8.43(b)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	143[Mpa]	84 %	29 %	- %
8.63(a)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	117[Mpa]	69 %	24 %	72 %
8.63(b)	144[Mpa]	170[Mpa]-485[Mpa]	10[mm]	92[Mpa]	54 %	19 %	64 %

Teniendo en cuenta la misma observación que en el análisis de esfuerzos de Von Mises. La máximas cargas de tracción y compresión no están sobre los apoyos del tubo minero, sino en las "Áreas de esfuerzos de tensión" que son las caras de la placa que soportan las pre-cargas de los espárragos. Siendo la máxima carga de compresión del orden 198[Mpa], pero esta representa a una ínfima porción de la plancha.

Dicho esto los esfuerzos normales de importancia, que hacen contacto con la cara del tubo minero desde la placa, también muestran una gran mejora en cuanto alivianamiento de cargas se refiere. Siendo la carga normal de $117[Mpa]$ en la zona de color verde (**figura 8.64**), esta corresponde a un 69 % del esfuerzo de límite elástico sobre la placa. Lo que representa a un 72 % del esfuerzo normal conseguido en el diseño de placa sostenedora común. De la misma forma, los esfuerzos normales ejercidos sobre la cara del tubo minero muestran una alentadora reducción hasta $92[Mpa]$, que respecto al diseño común representa una reducción de hasta el 64 % de las cargas de compresión.

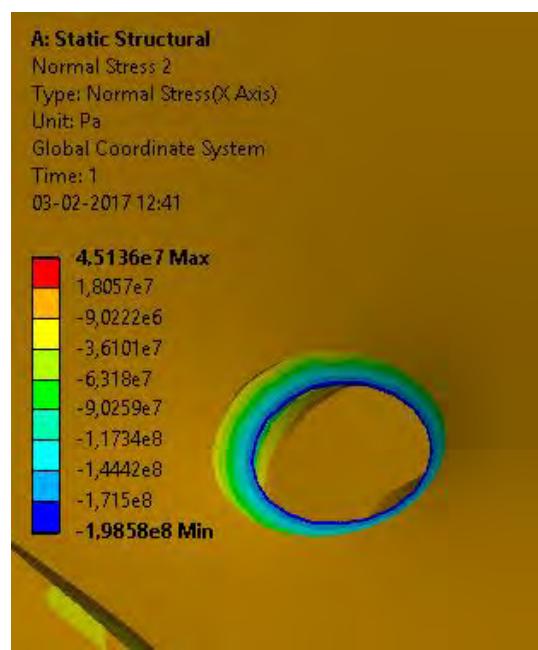
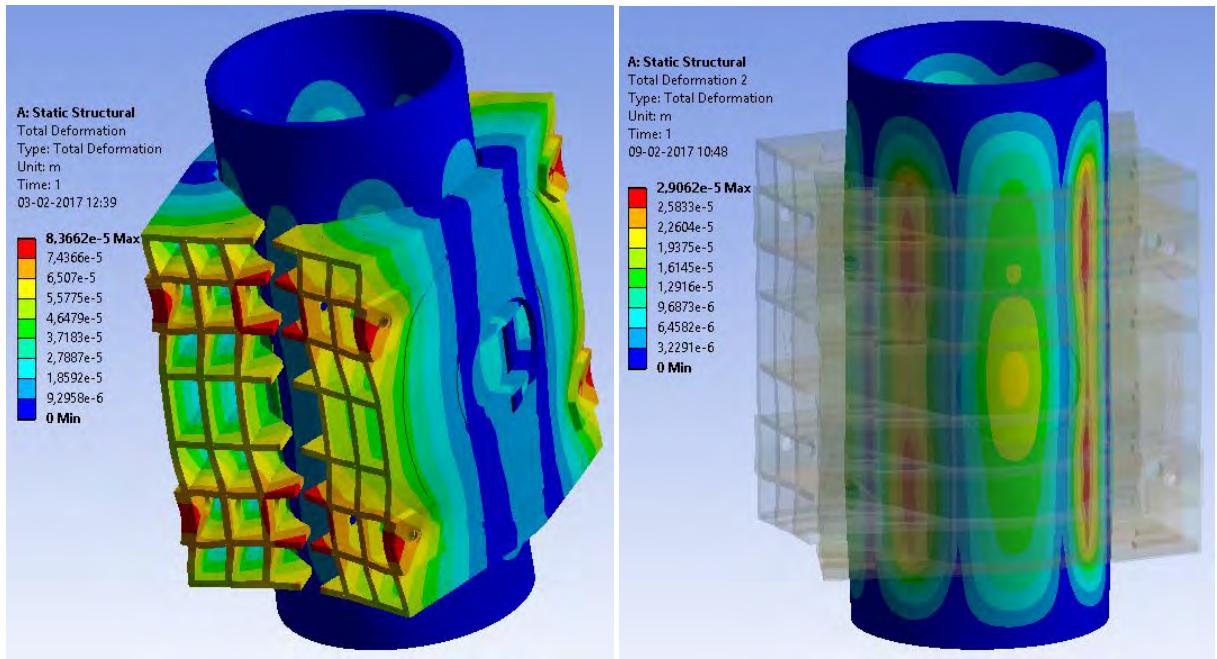


Figura 8.64: Vista de máximas cargas de compresión. [1]



(a) Análisis de deformación en planchas corregidas

(b) Análisis de deformación sobre tubo minero

Figura 8.65: Deformación estructural M10 con 144[Mpa]. [1]

Tabla 8.20: Deformación plástica M10, clase 9.8

Figura	7.34(a)	7.52(a)	7.34(b)	7.52(b)
Defor. experimental	0,6[mm]	0,08[mm]	0,04[mm]	0,03[mm]
Comp. experimental	- %	13 %	- %	75 %

El principal enfoque de el diseño corregido es impedir la flexión de las planchas para evitar sacrificar la alineación del haz gamma. Los resultados muestran un alentadora reducción de deformación del 87% o dicho de otra forma una reducción de flexión hasta un 13%. Por el lado del tubo minero, la reducción de deformación es de un 25%.

8.4 Diseño de sub-función: Diseño de Litodensitometro

Después de haber conseguido, un mecanismo de abrazadera eficiente para cargar grandes pesos y distribuir su carga a través del tubo minero sin generar deformaciones en este ([sección 8.3](#)). Se mostrara el diseño final del Litodensitometro, o densímetro doble, que es el objetivo final del diseño de esta memoria.

El diseño de Litodensitometro exige dos requisitos difíciles de conseguir:

- **Crear una abrazadera que pueda sostener a cuatro elementos en lugar de dos.**
- **Cuidar las alineaciones del haz gamma de las dos fuentes que deben irradiar la misma zona al mismo tiempo.**

El primer modelo del Litodensitometro era complicado de alinear y su sistema de abrazadera era complicado de fijar al tubo, ya que el sistema de apriete constaba de ocho pernos. Por lo que tampoco era seguro que pudiese generar la pre-carga suficiente para abrazar a tubo con la suficiente fuerza sin evitar que toda la estructura deslice a través de este y caiga. Este poseía un control de la alineación vertical por platos, como los primeros diseños, pero esta idea fue descartada ya que al utilizar pernos para abrazar al tubo, quedaba expuesta a moverse y sacrificar la alineación.

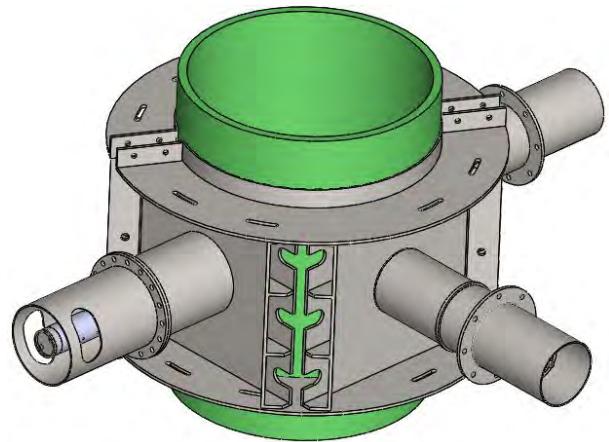


Figura 8.66: Isometrica de viejo diseño

Litodensitometro.[\[1\]](#)

La primera gran modificación que se hizo, fue en el etiquetador. Según el modelo de atenuación de plomo ([sección 8.2.5](#)), el espesor de las paredes de plomo que se pueden utilizar pueden ser reducidas desde 100[mm] hasta los 50[mm]. Debido a que el sistema de disparador genera un agujero adicional de 15[mm]. Se decidió utilizar un espesor de pared de 60[mm]. Lo que disminuye el peso total del etiquetador desde 47[Kg] hasta los 17[Kg]. Lo que significa una disminución de un 64%. Recordar que el transporte de la fuente, sin sufrir un exceso de dosis de radiación, es uno de los puntos importantes del diseño.

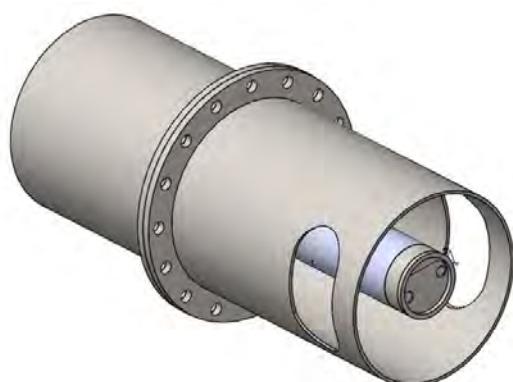


Figura 8.67: Isométrica de viejo diseño

Litodensitometro.[\[1\]](#)

Para solucionar el problema del montaje de cuatro elementos sobre la abrazadera. Se utilizo el nuevo diseño de abrazadera (**sección 8.3**), y se le añadió una interfaz para montar una nueva placa o plancha sostenedora.

La ventaja de este diseño radica en la facilidad de alinear las placas. Además el montaje de las placas laterales servirán para corroborar y mantener la alineación.

La plancha lateral es montada y fijada por pernos M8, con una interfaz de detector gamma previamente soldada como las otras planchas, manteniendo la alineación ya fijada por los cuatro espárragos. Para el caso del lado opuesto la situación es la misma, pero se decidió por utilizar un diseño de isótopo redondo que puede ser directamente apernado a la plancha para mostrar la flexibilidad del diseño.

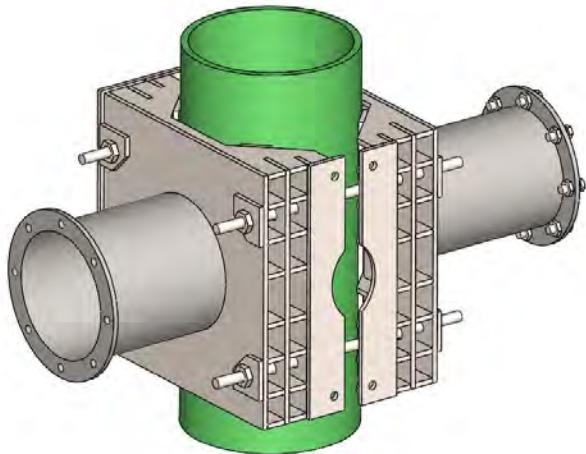


Figura 8.68: Vista de interfaz de montaje lateral.[1]

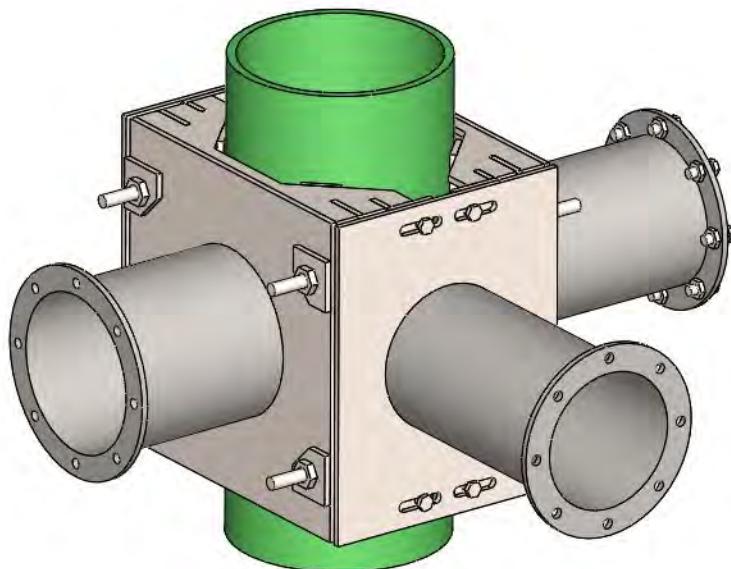


Figura 8.69: Montaje plancha lateral. [14]

El primer paso de instalación del Litodensitometro, es el posicionamiento de las interfaces que sostendrán las fuentes y detectores. Realizar una instalación con el menor peso posible facilita la alineación de estas tal como se muestra en la **figura 8.69**.

Después de la alienación de las planchas sostenedoras y el apriete de las abrazaderas, se realiza la colocación de las fuentes y detectores se ven en la siguientes **figuras 8.70 y 8.71**:

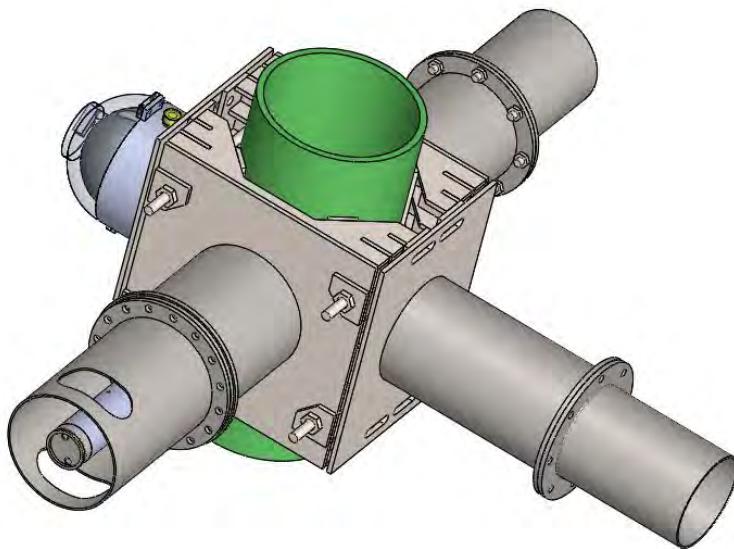
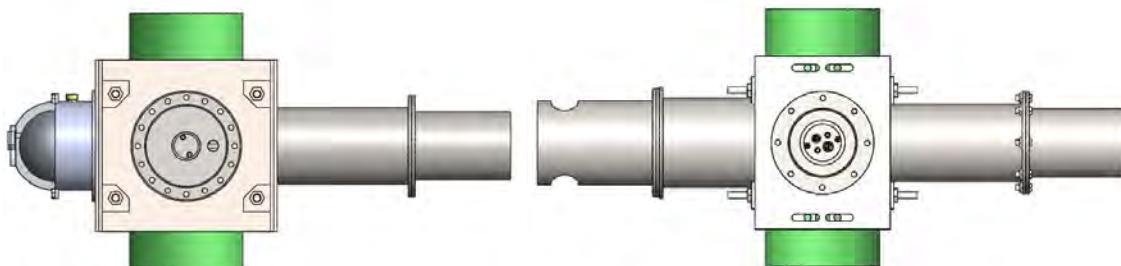


Figura 8.70: Montaje plancha lateral. [14]



(a) Análisis de deformación en planchas corregidas

(b) Análisis de deformación sobre tubo minero

Figura 8.71: Deformación estructural M10 con 144[Mpa]. [1]

El peso total del diseño antiguo del densímetro con etiquetador es de 94[Kg], mientras que el diseño del Litodensitómetro que posee un diseño reducido del etiquetador, posee un peso total de 89[Kg]. Lo que plantea una reducción de peso total del 5% contando con la presencia de una fuente y un detector extra. Mientras que las mediciones de esfuerzos realizadas con Ansys mostraron un funcionamiento positivo, con pre-cargas de 144[Mpa], más el peso total del antiguo diseño de etiquetador. Se puede comprobar la efectividad de la mejora del nuevo diseño.

Capítulo 9

Conclusiones

Escribir conclusiones aqui.

Apéndice A

Norma ISO 2919:2012

ISO 2919 : 2012 establece un sistema de clasificación para sellado de fuentes radioactivas que están basadas en pruebas de eficacia y especifican requerimientos generales. Pruebas como eficiencia, producción, marca y certificación. Esta provee una lista de prueba para que los productores de sellado de fuentes radioactivas puedan evaluar la seguridad de estos productos, ya sea en uso selectivo para ciertos tipos de aplicaciones requeridas. Un ejemplo puede ser la protección contra el material radioactivo, que emite radiación ionizante.

Apéndice B

Norma Atex - Protección de explosiones

Para diseñar un producto acorde a la normativa ATEX es necesario seguir un "marco legislativo de seguridad y salud", distado por el mercado Europeo. Esta legislación consta de tres partes:

- **Regulation (EC) 765/2008** la cual establece los requerimientos para la acreditación y la vigilancia de los productos registrados.
- **Decisión 768/2008** Sobre un marco común para la comercialización de los productos, incluye proveer de referencias que deban incorporarse en caso de que el producto sea revisado. En efecto, es una plantilla para la futura legislación de armonización de productos.
- **Regulation (EC) 764/2008** Estableciendo procedimientos relacionados a la aplicación de ciertos tecnicismos legales nacionales a productos comercializados en otros países de la unión Europea.

Otros requerimientos esenciales respecto a la salud y el cuidado(EHSRs). Están listados en "Anexo II" y desde la norma ATEX 2014/34/EU guidelines - 1st Edition - April 2016[16] tienen requisitos específicos como:

- Potenciales fuentes de ignición de equipo pensado para ser usado en una atmósfera potencialmente presente de explosivos.
- Sistema de protección autónoma pensados para operar después de sucedida una explosión, con el objetivo principal de detener la explosión de forma inmediata y/o limitar los efectos de las llamas y presiones.
- Mecanismos de seguridad destinados para contribuir en el funcionamiento seguro del dispositivo y del sistema de protección autónoma, si este esté expuesto a alguna fuente de ignición.
- Componentes sin función autónoma esencial para el funcionamiento seguro del dispositivo o el sistema de protección autónoma.

Apéndice C

Los requerimientos ATEX

La normativa ATEX requiere que se cumplan los siguientes elementos, para proveer del sello ATEX:

- **El sello CE** La sello CE es una auto explicativo logo que indica que el equipo cumple con las disposiciones técnicas y requisitos ATEX y otras directivas.
- **Requisitos de seguridad y salud esenciales** Bajo el marco legislativo de seguridad y salud. El "Anexo II de la directiva ATEX", requiere que se establezcan principios de seguridad integrada para todas las fuentes de ignición eléctricas y no eléctricas. Se puede demostrar el cumplimiento de estos requisitos buscando la norma Europea EN 60079.
- **Certificado de examinación tipo EC** Para categoría uno (equipos eléctricos y mecánicos) y categoría dos (equipos eléctricos). Un "organismo de certificación" deberá verificar que su equipo cumpla con todas las necesidades de la norma ATEX pertinentes, para recibir el "Certificado de examinación tipo EC". Para equipos de categoría tres, no se requiere una certificación tipo EC, sin embargo los fabricantes deben asegurarse que sus productos cumplan con la norma ATEX, siguiendo una ruta de trabajo.
- **Evaluación de calidad** Las instalaciones que producen su equipo deben poseer una evaluación de calidad tipo EN ISO/IEC 80079-34 que llegara a un organismo de certificación para entregarle una certificación de garantía de calidad(QAN).

C.1 ¿Cómo se relaciona el Litodensitometro con la norma ATEX?

Según el estudio de patentes realizado previamente para conocer a la competencia. Uno de los llamativos puntos en común del diseño de todos los densímetros, ya sean nucleares o no, es la norma anti explosiones ATEX.

Debido a que todo densímetro posee un adquisidor de datos, significa que este posee un sistema eléctrico que puede ser un potencial generador de ignición, estando expuesto a una atmósfera de riesgo explosivo. Dentro de las mineras existen un sinnúmero de elementos explosivos, como por ejemplo el ANFO. Es por esto que se utilizan elementos electrónicos certificados para atmósferas de riesgo de explosión, pero esa es una sección que no corresponde a esta memoria.

Otro punto de vista que esta relacionado a esta norma, pero no esta tomado en cuenta salvo en el requisito de calidad de producto(QAN), es el peligro de contaminación por esparcimiento del isótopo radiactivo. El equipo debe ser capaz de mantener a la fuente gamma cautiva dentro de este, resistiendo altos impactos, altas presiones y temperaturas.

Si bien los parámetros anteriormente mencionados pueden ser controlados por una asociación de control de calidad. La dosimetría generada a partir de una modificación de pared de protección de plomo por exposición a explosiones. Es un trabajo de la Comisión Chilena de Energía Nuclear(CCHEN).



(a) Vista de conexiones eléctricas

(b) Análisis de deformación sobre tubo minero

Figura C.1: Electronica de un densímetro. [1]

En caso de querer certificar un diseño comercial de Litodensitometro. Primero el diseño del densímetro deberá ser aprobado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear. La cual examinara si el dispositivo cumple con los requisitos de seguridad para evitar que el personal sufra dosimetrías que están fuera de la norma de un trabajador expuesto. Posteriormente se deberá obtener una certificación de control de calidad(QAN) para ambientes explosivos. Que vendrá a ser una evaluación tipo EN ISO/IEC 80079-34. Finalmente se deberá solicitar el sello ATEX para certificar que el equipo es apto para trabajar en zonas de riesgo explosivos. Siguiendo estos pasos se puede certificar un densímetro nuclear para ser comercializado en el extranjero.

Apéndice D

Protección IP 65

El **grado de protección IP** hace referencia a la norma internacional *IEC 60529 Degrees or protection* utilizado con mucha frecuencia en los datos técnicos de equipamiento eléctrico o electrónico, en general de uso industrial como sensores, medidores, controladores, etc.

Mediante la asignación de diferentes códigos numéricos, el grado de protección del equipamiento puede ser identificado de manera rápida y con facilidad.

De esta manera, un grado de protección IP65, indica que:

- Las letras IP identifican al estándar "*Ingress Protection*"
- El primer dígito "6" describe el nivel de protección ante el polvo, en este caso : "*El polvo no debe entrar bajo ninguna circunstancia.*"
- El segundo valor "5" describe el nivel de protección frente a líquidos (normalmente agua), que cita: "*El objeto debe resistir (en todas direcciones) los chorros de agua.*"



Figura D.1: Electrónica que necesita ser protegida. [14]

Apéndice E

Composición del flujo de concentrado de cobre

El proceso operativo de obtención del mineral comienza con la extracción de millones de toneladas al año de mineral con una ley del 1 %. Pasando por sucesivas etapas de transporte, chancado y molienda, para lograr las condiciones de tamaño, dureza y calidad necesarias para la flotación. Durante el proceso de flotación, se obtiene un concentrado de cobre.

El concentrado de cobre seco está compuesto idealmente de 31 % de cobre (Cu, número atómico 29) el cual se somete a separación por medio de un proceso de Pirometalurgia en grandes hornos que funcionan a altas temperaturas.

Concentrado de cobre es una pulpa espesa obtenida de la etapa de flotación en el proceso productivo, en la que se encuentra una mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de sales de otros metales. Posee una humedad de alrededor del 8 %, ya que con valores superiores, el concentrado se comporta como un barro difícil de manipular y exige más energía para la fusión.

Generalmente en la capa superior se encuentran los **minerales oxidados (cuprita)**, junto a cobre nativo en pequeñas cantidades, lo que explica su elaboración milenaria ya que el metal podía extraerse fácilmente en hornos de fosa. Por debajo del nivel freático (nivel mar), se encuentran las **piritas (sulfuros)**, **primarias calcosina (S₂Cu)**, **covellina (SCu)** y las **secundarias calcopirita (S₂FeCu)**. Acompañando a estos minerales se encuentran otros como la bornita (Cu₅FeS₄), los cobres grises, los carbonatos azurita y malaquita, que suelen formar masas importantes en las minas de cobre por ser la forma en la que usualmente se alteran los sulfuros. Finalmente, junto a estos, los lodos se recuperan además el **oro (Au)**, **plata (Ag)**, **platino (Pt)**, **molibdeno (Mo)**, **Zinc (Zn)**, **azufre (S)**, **silice (Si)** y **fierro (Fe)** entre otros. Su proporción depende de la mineralogía de la mina.

Los rangos de fluctuación de la composición química del concentrado de cobre, son mostrados en la **tabla E.1**:

Tabla E.1: Tabla de composición de concentrado de cobre

Mineral	Rango Inferior	Rango Superior
Cobre(Cu)	29,70 %	46,00 %
Oro(Au)	1,0(<i>ppm</i>)	3,5(<i>ppm</i>)
Plata(Ag)	46(<i>ppm</i>)	90(<i>ppm</i>)
Molibdeno(Mo)	0,07 %	0,35 %
Asufre(S)	25 %	33 %
Zinc(Zn)	0,15 %	0,25 %

Bibliografía

- [1] Recursos propios. Programas de dibujo, SolidWorks, etc.
- [2] George E. Dieter, Linda C. Schmidt, Engineering Design, Fourth Edition.
- [3] CGM Nuclear S.A. Empresa Certificada ISO 900:2008
- [4] Interacción de la radiación con la materia. http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/094/htm/sec_6.htm
- [5] Interacción de la radiación con la materia.
- [6] Able Instruments & Controls Ltd. www.able.co.uk
- [7] http://csn.ciemat.es/MDCSN/recursos/ficheros_md/133100241_2411200913036.pdf
- [8] http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401541/exe/Modulo/Modulo/leccin_22_composicion_y_accion_de_las_radiaciones.html
- [9] https://es.wikipedia.org/wiki/'Angulo_s'olido
- [10] <http://www.collahuasi.cl/espanol2/compania/produccion.asp>
- [11] <https://www.copy.com/s/t%3ApsPhXeCMQ91N06xh%3Bp%3A%252F1%25252E1441151.pdf%3Boid%3A3976>
- [12] Brochure Systec modelo SS200
- [13] Manual Indura, propiedades Acero Inoxidable 316, pag 93 <http://www.indura.cl/content/storage/cl/biblioteca/c230fb3467c14e16b09e360b3cc49860.pdf>
- [14] Libro Diseño en ingeniería mecánica, por Shigley
- [15] PDF de propiedades de Soldadura, Indura Argentina <http://www.indura.com.ar/Descargar/Electrodos%20para%20Soldar?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Far%2Fbiblioteca%2Fea9bd106bf24485ebd93fd213209699b.pdf>

[16] <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/16402/attachments/1/translations>

[17] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-05/documents/08-0442-attach-3.pdf>