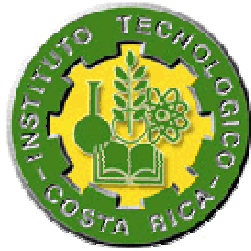


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MATERIALES  
PROYECTO FINAL DE GRADUACION



# DISEÑO DE UN MECANISMO EMPLEADO EN UN SISTEMA DE CONTROL NUCLEÓNICO PARA EVALUACIÓN DE CORROSIÓN EN TUBERÍA METÁLICA AISLADA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. JUÁN ALVAREZ

AUTOR: LUIS DIEGO MARTÍNEZ VÁSQUEZ

FECHA: 21/06/2006

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	2
ÍNDICE DE FIGURAS .....	3
CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
DEDICATORIA.....	6
<b>CAPITULO I: IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA .....</b>	<b>7</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	8
1.1.1 <i>Identificación de la empresa</i> .....	8
<b>CAPITULO II: PROBLEMA EXISTENTE E IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN .....</b>	<b>11</b>
2.1 RESUMEN.....	12
2.2 JUSTIFICACIÓN .....	13
2.3 OBJETIVOS.....	14
2.3.1 <i>Objetivo General</i> .....	14
2.3.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	14
<b>CAPITULO III: TEORÍA CONSULTADA PARA FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>15</b>
3.1 MARCO TEÓRICO.....	16
3.1.1 <i>Introducción</i> .....	16
3.1.2 <i>Diseño Mecánico</i> .....	16
3.1.3 <i>Uniones Soldadas</i> .....	18
3.1.3.1 Soldadura a tracción: .....	19
3.1.3.2 Soldaduras a flexión simple: .....	20
3.1.3.3 Soldaduras a torsión y esfuerzo cortante: .....	21
3.1.3.4 Soldadura a fatiga .....	22
3.1.4 <i>Uniones Roscadas</i> .....	23
3.1.4.1 Terminología, Clasificación y Designación de la rosca .....	23
3.1.4.2 Tipos de perfiles.....	23
3.1.5 <i>Sistema de control nucleónico</i> .....	25
3.1.5.1 Uso de fuentes radioactivas selladas de emisión gamma .....	25
3.1.5.2 El perfilaje gamma.....	26
3.1.5.3 Representación de un perfilaje gamma.....	26
3.1.5.4 Columnas de destilación.....	27
3.1.5.5 Estructuras de bandeja o platos .....	27
3.1.5.6 Estructuras de empaques .....	27
3.1.5.7 Origen de los problemas que pueden presentar los platos.....	28
3.1.5.8 Caso de estudio .....	28
<b>CAPITULO IV DESARROLLO .....</b>	<b>30</b>
4.1 <i>Introducción</i> .....	31
4.2 <i>Datos del Aluminio</i> .....	31
4.3 <i>Diseño del divisor</i> .....	31
4.4 <i>Diseño de la placa de soporte</i> .....	32
4.5 <i>Diseño de los brazos</i> .....	32
4.6 <i>Potencia requerida del motor</i> .....	32
4.7 <i>Diseño de los tornillos de los rodines</i> .....	33
4.8 <i>Calculo de vida remanente del ducto</i> .....	33
4.9 <i>Características de la fuente utilizada en el scn</i> .....	33
<b>CAPITULO V: RESULTADOS OBTENIDOS.....</b>	<b>34</b>
5.1 <i>Elementos Construidos</i> .....	35
5.2 <i>Evaluación</i> .....	38
<b>CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>41</b>

6.1 Diseño Mecánico.....	42
6.2 Sistema de control nucleónico .....	43
<b>CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>45</b>
7.1 Conclusiones .....	46
7.2 Recomendaciones.....	47
7.3 Bibliografía .....	48
7.4 Anexos.....	49
<b>CAPITULO VIII: PLANOS CONSTRUCTIVOS .....</b>	<b>53</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Unidad Estratégica Negocios de Proyectos y Servicios Asociados (UEN PYSA) .....	8
Figura 1. Simulación que indica la concentración de esfuerzos en la soldadura luego de ser sometida a una fuerza. ....	18
Figura 2. Diferentes tipos de soldadura sometidas a tracción. ....	19
Figura 3. Soldaduras sometidas a flexión simple .....	20
Figura 4 Soldaduras sometidas a torsión y esfuerzos cortantes.....	21
Figura 5 Distancia de la garganta $t$ de una soldadura.....	22
Figura 6 Partes de una rosca .....	23
Figura 7. Avance de roscas. a) rosca simple, b) rosca doble y c) rosca triple .....	24
Figura 8. Sujetadores roscados .....	24
Figura 10. Brazo de soporte del receptor .....	35
Figura 11. Brazo de soporte.....	35
Figura 12. Brazo de soporte central.....	36
Figura 13. Brazo de soporte del emisor .....	36
La figura 13 representa el brazo de soporte del emisor, y como se puede ver posee ciertas variaciones con respecto del brazo de soporte del receptor, especialmente en la zona de enlace con el brazo de soporte que va unido a la cremallera. Este brazo irá unido al emisor por medio de pernos y se diseño de acuerdo a la geometría del mismo.....	36
Figura 14. Placa de soporte.....	37
Figura 15. Ensamble General .....	37
Figura 16. Ensamble General .....	38
Figura A1. Vista isométrica superior del equipo mecánico-nucleónico .....	49
Figura A2. Vista isométrica superior derecha del equipo mecánico-nucleónico .....	50
Figura A3. Vista isométrica superior izquierda del equipo mecánico-nucleónico.....	51
Figura A4. Fotografía del emisor de radiación.....	52

## **CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DEL PROYECTO**

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el tribunal examinador integrado por los profesores: Dr. Ing. Juan Álvarez, Ing. Mario Conejo e Ing. Oscar Chaverri como requisito para optar al grado de Licenciado en la carrera de Ciencia e Ingeniería de los Materiales con énfasis en Procesos Industriales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Dr. Ing. Juan Álvarez \_\_\_\_\_

Ing. Mario Conejo \_\_\_\_\_

Ing. Oscar Chavarri \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco especialmente al Sr. Ing. Romano Rodríguez Pacheco por toda su ayuda brindada para la realización de este proyecto, ya que no hubiera sido posible su realización sin su orientación, consejo y experiencia. Agradezco también de manera muy especial a colegas y amigos que me brindaron su apoyo y conocimiento.

## **DEDICATORIA**

Le dedico este proyecto de graduación de la manera más atenta y cariñosa a mi madre, quien me dio la oportunidad y el espacio para que esto fuera posible. Le agradezco también a mi padre y hermanos por todo el apoyo brindado durante esta larga travesía.

## CAPITULO I: IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

## 1.1 INTRODUCCIÓN

### 1.1.1 IDENTIFICACIÓN DE LA EMPRESA

El Instituto Costarricense de Electricidad esta dividido en dos sectores, el Sector Electricidad (ICELEC) y el de Telecomunicaciones (ICETEL).

El sector Electricidad (ICELEC) esta dividido en siete Unidades Estratégicas de Negocios las cuales son:

- [Unidad Estratégica de Negocio-Centro Nacional de Planificación Eléctrica](#)
- [Unidad Estratégica de Negocio Centro Nacional de Control de Energía \(CENCE\)](#)
- [Unidad Estratégica de Negocio Servicio al Cliente](#)
- [Unidad Estratégica de Negocio Transporte de Electricidad](#)
- [Unidad Estratégica de Negocio Producción de Electricidad](#)
- [Unidad Estratégica de Negocio Proyectos y Servicios Asociados](#)
- Unidad Estratégica de Negocio de la [contraloría de Servicios Sector Electricidad](#)

La unidad de la cual se desprende toda la asistencia a la generación de proyectos de energía eléctrica es la UEN PYSA ([Unidad Estratégica de Negocio Proyectos y Servicios Asociados](#)). Esta UEN esta encargada del seguimiento, producción, mantenimiento, planeación y finalización de los proyectos generadores de electricidad, pertenecientes al ICE.

Identificación de la Empresa Grupo ICE Sector Electricidad (ICELEC)

#### 1.1.2 Misión del Grupo ICE

"Mejorar la calidad de vida y el desarrollo económico y social, a través de un servicio de electricidad que supera las expectativas de bienestar, comodidad y progreso de todos los costarricenses."

#### 1.1.3 Visión del Grupo ICE

Constituirse en la mejor empresa eléctrica de América con respecto a la calidad, continuidad, solidaridad, universalidad y precio competitivo del servicio, a la satisfacción de los clientes, al desarrollo sostenible de los recursos energéticos renovables y al manejo del medio ambiente; y ser reconocida como un factor fundamental para el desarrollo económico y social del país, como un símbolo de la capacidad y la democracia costarricense y como un líder de la integración eléctrica de América Central.

#### 1.1.4 La Organización

La organización del Instituto Costarricense de Electricidad se visualiza en la figura 1 que se muestra seguidamente.

Unidad Estratégica Negocios de Proyectos y Servicios Asociados (UEN PYSA)

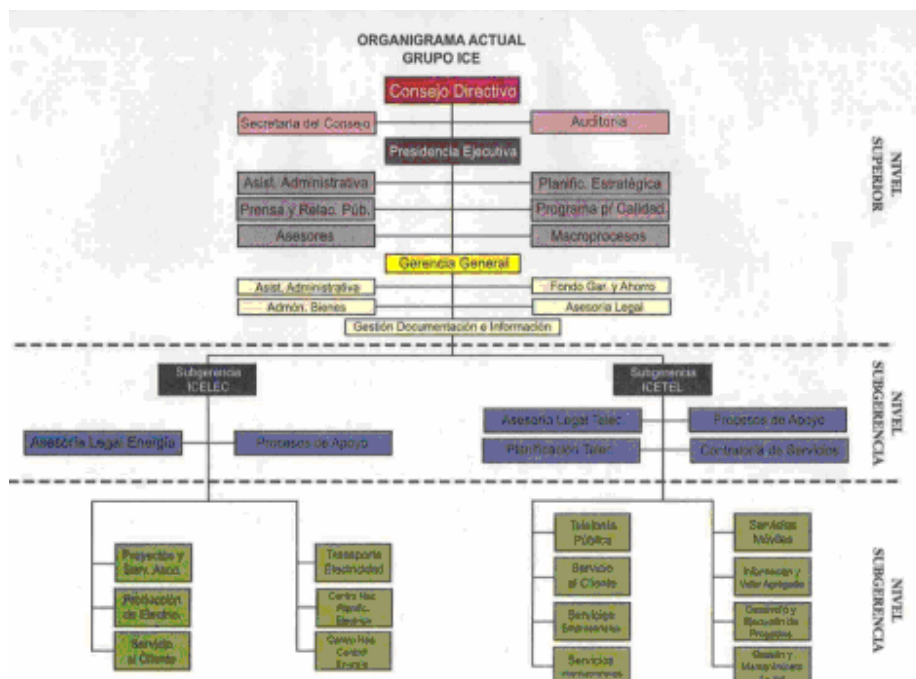


### 1.1.5 Misión de UEN PYSA

Desarrollar y comercializar proyectos y servicios asociados a la industria eléctrica que satisfagan las necesidades y expectativas de los clientes.

### 1.1.6 Visión de UEN PYSA

La UEN Proyectos y Servicios Asociados continuará siendo un área estratégica del ICE, demostrando su capacidad técnica en el desarrollo de proyectos de infraestructura, tanto en el ámbito nacional como internacional, con un enfoque integral de costos, calidad, medio ambiente y en las condiciones óptimas de trabajo.



### Estrategias:

- Promover y participar activamente en la gestión de nuevos Proyectos de desarrollo eléctrico nacional y regional
- Mantener y fortalecer la capacidad y la calidad de realización de estudios de inversión, diseño y construcción de proyectos eléctricos
- Lograr la excelencia en la gestión interna, para obtener estándares competitivos y eficientes a nivel nacional e internacional

- Posicionar los productos y servicios de la UEN Proyectos y Servicios Asociados y del ICE-Electricidad en los mercados externos
- Promover una gestión ambiental ágil y comprometida con el medio y con el entorno social e institucional que permita un crecimiento sostenido con el país.
- Promover y consolidar la actividad de investigación aplicada al desarrollo de proyectos en sistemas eléctricos y al mejoramiento continuo de los productos y servicios de la UEN.
- Alcanzar un alto nivel de seguridad y salud de los trabajadores en el desempeño de sus actividades, congruente con otras políticas de recursos humanos que aseguran su compromiso y bienestar.
- Promover el establecimiento de alianzas con Proveedores, clientes y competidores que le permita a la UEN de Proyectos y Servicios Asociados cumplir con su Misión.

## CAPITULO II: PROBLEMA EXISTENTE E IMPORTANCIA DE SU SOLUCIÓN

## **2.1 RESUMEN**

Esta sección muestra una pequeña reseña sobre el problema que se pretende mejorar y las soluciones propuestas para dicha solución. Dicho trabajo se lleva a cabo actualmente en el Instituto Costarricense de Electricidad, mas específicamente en el campo geotérmico de Miravalles ubicado en la provincia de Guanacaste. En ese lugar se han instalado equipos y maquinaria para la generación de electricidad a partir del poder interno de nuestro planeta. Esta extracción de calor desde el interior de la tierra hasta la superficie terrestre en la planta generadora se lleva a cabo por amplios tramos de tubería que debido a la temperatura y presión de la mezcla gas-agua que circula por ella se desgasta y eventualmente puede presentar fractura. Se busca entonces un mecanismo que evalúe la situación actual de dicho material para valorar si es necesario, ya sea un intercambio de tubería o una posible re-estructuración del material, para conseguir mejores propiedades y una vida útil más larga para los vaporductos.

Dicho dispositivo mecánico consiste en un anillo de aluminio que rodea el tubo, y que en su parte lateral posee un emisor de radiación, y colocado a 180 grados, se encuentra un receptor que captura la radiación recibida una vez que ha pasado por la sección transversal de la tubería. Este remanente de radiación es convertida en una diferencia de potencial que brinda un valor muy exacto al valor real del espesor del tubo que esta siendo analizado. Posteriormente, el emisor y el receptor giran juntos una pequeña distancia para captar el espesor de una nueva sección del tubo, y así sucesivamente se realizan los pasos hasta alcanzar un grafico que, de manera puntual, expresa el valor del espesor de todo el tubo en esa sección de análisis.

## **2.2 JUSTIFICACIÓN**

La realización de este proyecto es de suma importancia para la empresa pues el estado del espesor actual en que se encuentran los vaporductos se desconoce. Debido a esto, es posible que en cualquier momento se puedan presentar fisuras o fracturas en el metal, que ocasionen una disminución del gas extraído desde el suelo hasta la planta de generación, lo que se traduciría en una pérdida de electricidad que deja de producirse. Debido a que el costo de un MW es de un millón de colones y que la planta produce 100MW en un día, las pérdidas en caso de que una tubería principal falle se calculan entre 5 y 10 millones de colones diarios para una falla leve, pero evidentemente estas cifras se pueden incrementar debido al tamaño y ubicación de la fractura. Es por esto que se vuelve necesario buscar métodos de mantenimiento preventivo que eviten en la medida de lo posible este tipo de situaciones desfavorables para la empresa y el país. Las razones para la construcción del equipo nucleónico se pueden enumerar puntualmente como se muestra a continuación:

- I. Disminución de costos de operación.
- II. Aumento de vida útil del material.
- III. Optimización de tiempos de trabajo.
- IV. Prevención de fallas de vaporductos.
- V. Incremento de la seguridad ocupacional de la planta.

## **2.3 OBJETIVOS**

### ***2.3.1 OBJETIVO GENERAL***

- Diseñar un dispositivo de control nucleónico que sea capaz de evaluar corrosión en vaporductos.

### ***2.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS***

- Diseñar cada uno de los elementos y mecanismos involucrados en el conjunto mecánico.
- Velar porque todos los elementos cumplan satisfactoria y seguramente el funcionamiento del conjunto total.
- Construir un dispositivo fácil de transportar, de bajo peso y que cumpla con las especificaciones requeridas.
- Coordinar con un colega del área de electrónica para llevar los datos obtenidos hasta un computador para realizar evaluaciones digitales.

### CAPITULO III: TEORÍA CONSULTADA PARA FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

## **3.1 MARCO TEÓRICO**

### ***3.1.1 INTRODUCCIÓN***

A continuación se presentan los principios de los mecanismos que fueron utilizados para la realización de este proyecto de graduación. Dichos principios deben ser explicados claramente pues fueron mencionados a lo largo de este documento y merecen atención especial por parte del lector. Ahora bien, dado que el eje fundamental de este proyecto es el de diseñar un dispositivo mecánico, entonces las áreas de diseño de maquinas y resistencia de materiales se vuelven pilares estrictamente necesarios a ser tomados en cuenta y por esa razón son aquí mencionados. Posteriormente se procederá a explicar los aspectos aquí tratados y cual es su relación y uso en referencia al proyecto planteado.

I *Esfuerzo*: Este es uno de los principios mas utilizados para diseñar los mecanismos que eventualmente pudieran estuvieran sometidos a esfuerzos de flexión, cortante y torsión. Una vez obtenidos sus valores entonces se procede a dimensionar las piezas de análisis.

II *Uniones Soldadas*: El mecanismo diseñado posee muchas piezas que son unidas mediante cordones de soldadura. Es necesario entonces para conocer las dimensiones del bisel y de la cantidad de soldadura que tiene que ser depositada un estudio cuidadoso de este apartado. Una vez realizado esto se procede a realizar un estudio de elemento finito de las partes se creen estarán sometidas a cargas criticas.

III *Uniones Roscadas*: La tornillería es uno de los elementos mas utilizados en la fabricación de elementos de maquinas, pues es una opción de anclaje entre dos partes, pero que permite flexibilidad y movilidad entre las mismas, por lo que según la aplicación se anteponen a las uniones soldadas.

IV *Perfilaje Gamma*: Este apartado se muestra con el objetivo de brindar al lector los fundamentos del método utilizado para la evaluación de las tuberías del campo geotérmico.

Una vez así explicados los procesos aquí mencionados se procede a dar una explicación detallada de cada uno de esos apartados; sus principios y fundamentos.

### ***3.1.2 DISEÑO MECÁNICO***

El principal objetivo de la resistencia de materiales y de la teoría de los elementos de maquinas es proporcionar al ingeniero los medios para analizar y diseñar máquinas y estructuras de soporte o cargas. Es necesario entonces conocer en primera instancia cual es el diagrama de fuerzas al que esta sometido el elemento o conjunto que deseamos analizar para dimensionarlo adecuadamente y que este pueda funcionar satisfactoriamente sin producir fallas que eventualmente puedan dañar las otras partes. Para esto entonces, se precederá a realizar una extensa explicación de lo que encierran estas leyes, cuales son sus fundamentos y los fenómenos que las gobiernan.



### *Carga axial: esfuerzo normal*

La fuerza por unidad de área o intensidad de las fuerzas distribuidas homogéneamente sobre una sección cualquiera se conoce como el esfuerzo de dicha sección. Este esfuerzo se conoce como esfuerzo normal y puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

en donde  $P$  representa la carga y  $A$  el área sobre la cual esta actuando la carga. Un signo positivo indica un esfuerzo de tracción y un signo negativo indica un esfuerzo de compresión. En el sistema métrico  $P$  se expresa en newtons (N) y el área  $A$  en metros cuadrados ( $m^2$ ). Es importante recordar que aunque la formula es siempre correcta como una expresión para el esfuerzo promedio en cualquier sección transversal, pueden cometerse errores desastrosos si se supone que también da el valor correcto del esfuerzo máximo en la sección de estudio. A menos que se cumplan varios requisitos importantes, el esfuerzo máximo será mayor que  $P/A$  talvez por varios cientos por ciento. El esfuerzo máximo es igual a  $P/A$  solo si la carga esta distribuida uniformemente sobre la sección transversal. Para esto es necesario que:

- La sección que se considere este muy alejada de los extremos cargados. En la mayoría de los casos se logra una distribución considerablemente uniforme en los puntos que se encuentran a casi tres diámetros de las conexiones en los extremos.
- La carga se aplique exactamente a lo largo del eje centroidal de la barra. Si por ejemplo, las cargas se aplican un poco más cercanas a la parte superior, los esfuerzos serán más altos en la parte superior de la barra y más bajos en la parte inferior.
- La barra es un cilindro recto perfecto, sin agujeros, muescas, imperfecciones internas, ni estrías superficiales. Cualquiera de estas imperfecciones elevara la concentración de esfuerzos, lo cual se tratara mas adelante.
- La barra no tiene esfuerzo alguno cuando se eliminan las cargas externas. Este no es el caso con frecuencia. La manufactura de l parte y su comportamiento posterior de carga mecánica y térmica pueden haber creado esfuerzos residuales.
- La barra logra el equilibrio estable cuando se somete a una carga. Este requisito no se cumple si la barra es relativamente larga y la carga trabaja a la compresión, entonces llega a ser elásticamente inestable y se presenta el pandeo.
- La barra es homogénea. Un ejemplo común de no homogeneidad es un material compuesto, como fibras de vidrio o carbono en una matriz de plástico. En ese caso la carga tiene un apoyo excesivo proporcionado por la matriz y las fibras, por lo que el material más rígido es el que soporta el esfuerzo más alto.

### 3.1.3 UNIONES SOLDADAS

La soldadura es un factor crítico en la resistencia al fallo de estructuras y componentes de máquinas. A menudo, el cálculo y ejecución de las soldaduras es el aspecto más crítico para conseguir una buena calidad y resistencia de la estructura.

La resistencia de las juntas soldadas depende de muchos factores que se deben controlar con propiedad para obtener una buena soldadura. Uno de ellos es el calor de la soldadura que puede causar cambios metalúrgicos en el metal original en la vecindad de la soldadura. También, pueden introducirse esfuerzos residuales debido a las gradientes térmicas que causan expansiones y contracciones diferenciales. En la figura se puede apreciar los esfuerzos residuales en una pieza soldada.

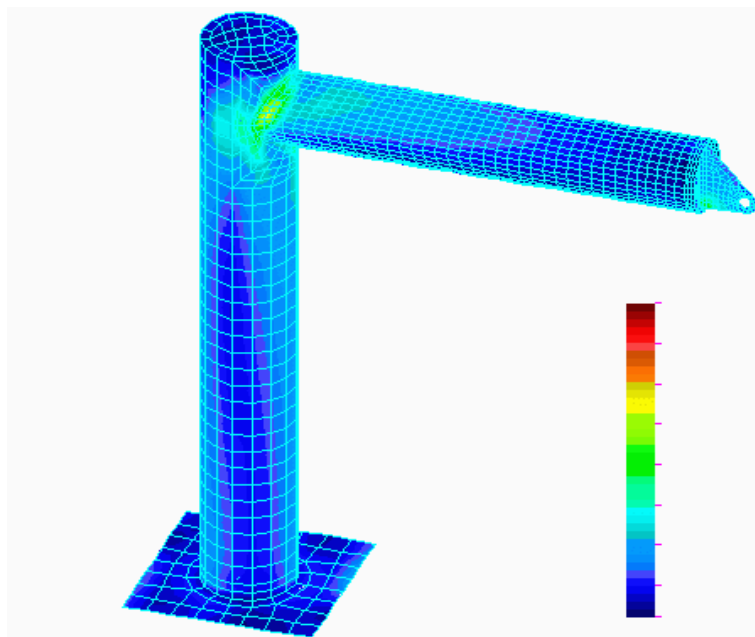


Figura 1. Simulación que indica la concentración de esfuerzos en la soldadura luego de ser sometida a una fuerza.

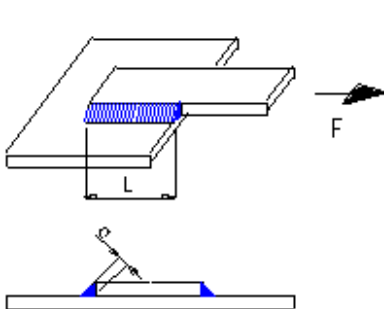
Las medidas que pueden tomarse para controlar estos problemas incluyen el calentamiento de las partes a una temperatura uniforme de la soldadura, recociendo a baja temperatura la parte fabricada por soldadura para eliminar esfuerzos y aplicando granallado en el área de la soldadura después de que se ha enfriado.

Las propiedades de la varilla de soldadura como son ductilidad y resistencia del material están estandarizados por la (AWS) Y la (ASTM). Donde en los dos primeros dígitos de las especificaciones del electrodo se indica la resistencia a la tensión en klbs/pulg<sup>2</sup> del material ya soldado. Por esto antes de efectuar una soldadura se debe primero de analizar los esfuerzos que esta va a tener que soportar para así poder seleccionar correctamente un electrodo y las dimensiones del cordón de soldadura que se debe efectuar.

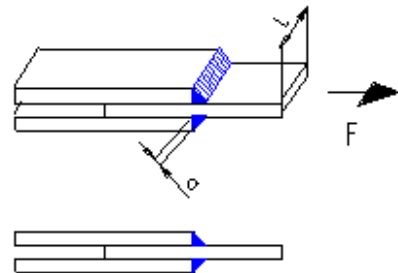
Los cordones de soldadura por lo común se clasifican de acuerdo a la dirección de las cargas como longitudinales y transversales. Además las soldaduras pueden presentar

esfuerzos a tracción, a flexión, a torsión y cortante, o inclusive combinados. Ahora bien, puede observarse en las siguientes figuras los diferentes tipos de esfuerzos a los que eventualmente puede estar sometido un cordón de soldadura, por lo que es requerido identificarlos para poder dimensionar las estructuras en función al tipo de fuerzas que actúen en el conjunto mecánico, y el resto dependerá solamente del electrodo utilizado y de la resistencia que este pueda ofrecer, para que comprado con lo que se espera tenga que resistir se puede emitir un criterio de si el material soportara o fallara.

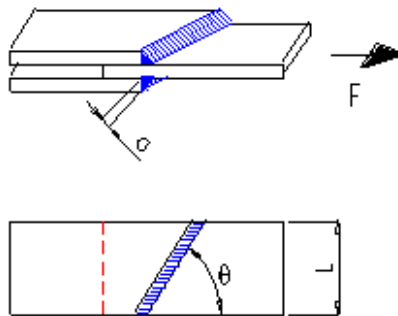
*3.1.3.1 Soldadura a tracción:*



*Figura 2.a: Doble soldadura lateral*



*Figura 2.b: Doble soldadura frontal*



*Figura 2.c: Doble soldadura oblicua*

Figura 2. Diferentes tipos de soldadura sometidas a tracción.

3.1.3.2 Soldaduras a flexión simple:

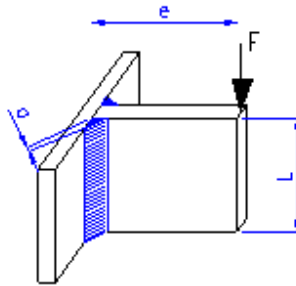


Figura 3a: Soldadura longitudinal

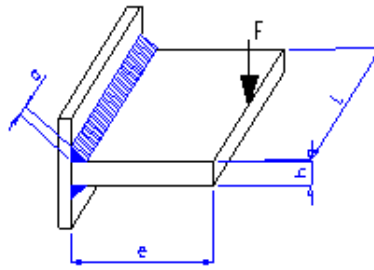


Figura 3b Soldadura transversal

Figura 3. Soldaduras sometidas a flexión simple

3.1.3.3 Soldaduras a torsión y esfuerzo cortante:

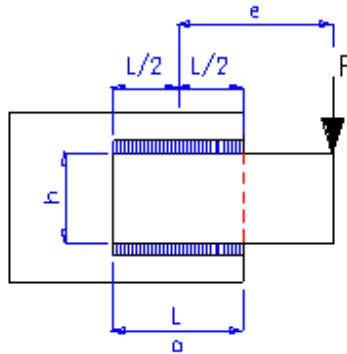


Figura 4a. Doble soldadura lateral.

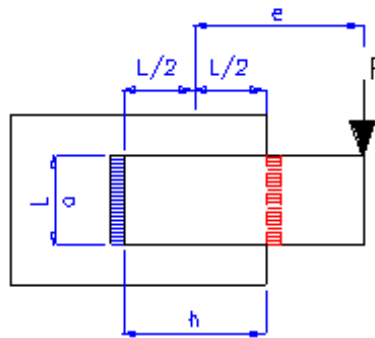


Figura 4.b Doble soldadura transversal

Figura 4 Soldaduras sometidas a torsión y esfuerzos cortantes.

Para analizar los esfuerzos que soporta una soldadura se debe de tomar el área más pequeña que presenta la soldadura comúnmente la distancia de la garganta multiplicada por la longitud de la soldadura. En la figura 2 se muestra la garganta representada como la distancia  $t$  y la longitud como  $L$ :

Para el caso común de una soldadura convexa con catetos  $H$  iguales:

$$T = 0.707 * H (2)$$

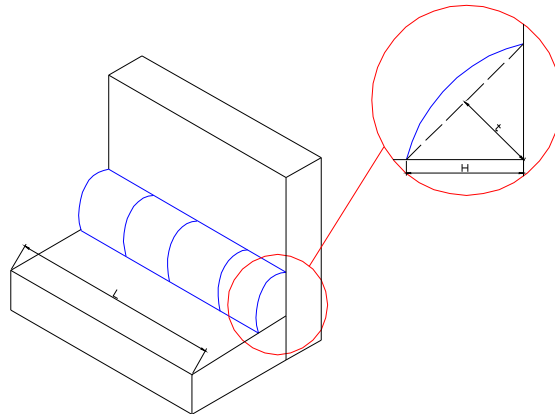


Figura 5 Distancia de la garganta  $t$  de una soldadura

El tamaño de la soldadura  $H$ , debe ser proporcional a los espesores de las placas que se sueldan. Por razones prácticas  $H$  tiene por lo común un mínimo de 3mm en las placas con espesores a 6 mm, hasta un mínimo de 15mm para placas de más de 150mm de espesor.

Aunque se supone que las dimensiones de la garganta  $t$  tienen una orientación de  $45^\circ$  al calcular los esfuerzos cortantes transversales, axiales, torsionales y demás se debe suponer como si los catetos también tuvieran una dimensión igual a la de la garganta.

### 3.1.3.4 Soldadura a fatiga

Cuando las juntas soldadas se sujetan a carga a la fatiga, los pequeños vacíos e inclusiones (los cuales tienen poco efecto en la resistencia estática) constituyen puntos de concentración local de esfuerzos y reducen la resistencia a la fatiga. También el material de soldadura que se extiende más allá del plano de las superficies el cual se llama refuerzo, ocasiona concentraciones obvias de esfuerzo en las orillas del cordón de soldadura. Por lo que la resistencia a la fatiga se puede aumentar esmerilando el cordón de soldadura a ras con las placas.

En la tabla 1 se muestran los factores aproximados de concentración de esfuerzos por fatiga en las soldaduras.

Tabla 1. Factores de concentración de esfuerzo por fatiga  $K_f$

Tipo de soldadura	$K_f$
Soldadura a tope, sin retirar el refuerzo, cargas a la tensión	1.2
Cordón de soldadura en el borde, carga transversal	1.5
Cordón de soldadura en el extremo, carga paralela	2.7
Soldadura T a tope, con esquinas marcadas, carga a la tensión	2.0

### 3.1.4 UNIONES ROSCADAS

Las uniones roscadas (tornillos, tuercas y pernos) son los más conocidos y considerados como poco interesantes dentro de los ensambles mecánicos sin embargo las implicaciones económicas, las de seguridad y confiabilidad han hecho de este tema un problema que necesita cuidado en manufactura buscando obtener pernos de bajo peso, resistentes a la corrosión así como resistentes a las vibraciones entre otros aspectos desarrollados más adelante.

#### 3.1.4.1 Terminología, Clasificación y Designación de la rosca.

Las roscas se encuentran estandarizadas por normas como son las siguientes:

1. American Nacional (Unificadas): Aprobadas en Estados Unidos y Gran Bretaña.
2. Los perfiles Métricos: Perfiles ISO

#### 3.1.4.2 Tipos de perfiles

Perfiles ISO: Los más comunes son los siguientes: M y MJ

Unificadas: De uso común UN y UNR.

Para las roscas MJ se realiza en ella un entalle redondeado en la raíz de de la rosca interna y un diámetro menor más grande en las roscas internas y externas lo que permite un perfil especialmente útil para condiciones de fatiga, por otra parte las roscas UNR presentan condiciones similares.

Las terminologías de roscas de tornillo se explican como sigue:

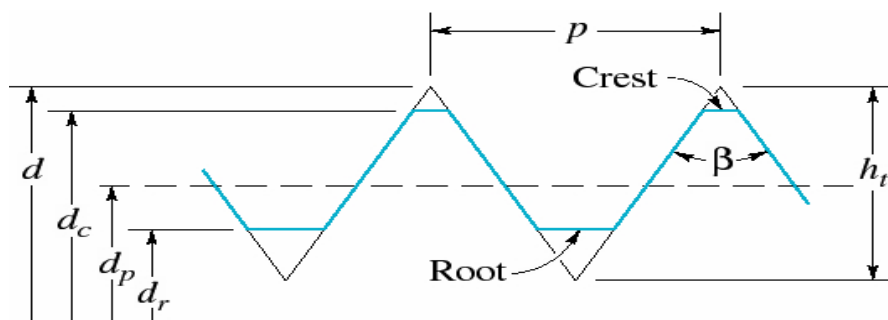


Figura 6 Partes de una rosca

**Paso p:** es la distancia entre dos cuerdas adyacentes, medida en forma paralela al eje de la rosca.

Para unidades inglesas el paso es equivalente es recíproco al número de cuerdas por pulgadas N.

$\beta$  = Angulo de rosca

$d$  = Diámetro mayor mas largo posible de la rosca

$d_c$  = Diámetro de la cresta.

$D_p$  = Diámetro de paso.

$D_r$  = Diámetro de la raíz.

$H_t$  = la altura máxima de la rosca

El avance ( $l$ ): Es la distancia que se desplaza una tuerca en forma paralela al eje del tornillo cuando se le da una vuelta. Para una rosca simple el avance es equivalente al paso.

Para una rosca múltiple el avance es igual a la multiplicación del paso por el número de roscas, es decir para una rosca doble el avance es dos veces el paso.

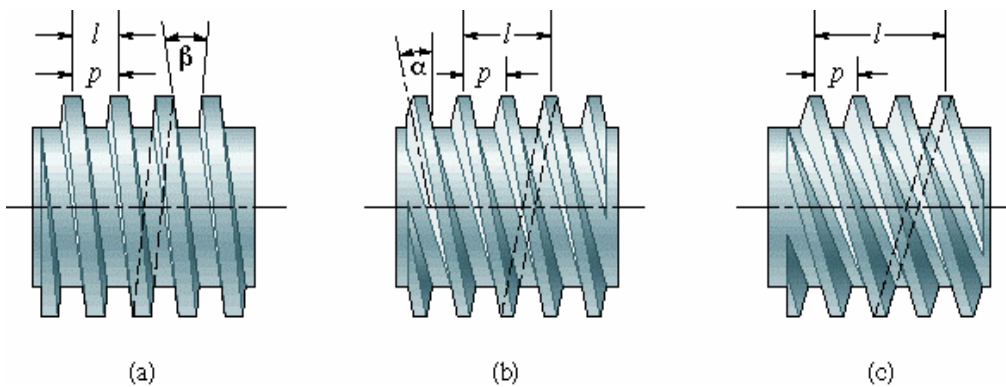


Figura 7. Avance de roscas. a) rosca simple, b) rosca doble y c) rosca triple

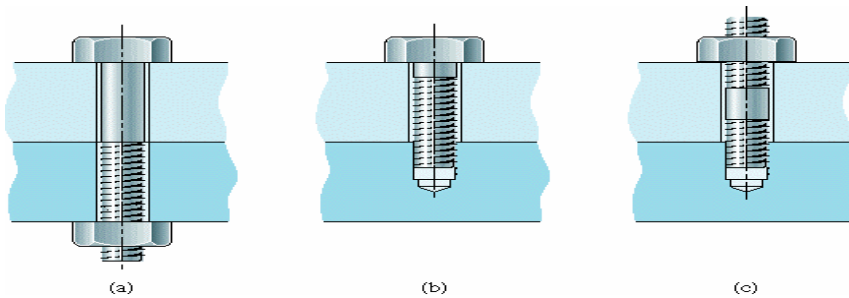


Figura 8. Sujetadores roscados

- Esta figura muestra un perno que pasa de lado a lado las dos piezas que se van a fijar del otro lado existe una tuerca tal como se muestra.
- Para la figura b lo que se muestra es un tornillo de cabeza que se acopla con roscas.
- Otra variación de un tornillo acoplado por medio de roscas.



### **3.1.5 SISTEMA DE CONTROL NUCLEÓNICO**

En el presente capítulo se describen algunos usos de Fuentes radiactivas selladas de actividad media baja como herramientas de diagnóstico nuclear no destructivas en la industria del petróleo y energía. Se presentarán los principios de utilización de fuentes gamma y fuentes de neutrones y su aplicación será ilustrada a lo largo del presente apartado.

Ahora bien, por actividad media baja se entiende el rango de actividades para los cuáles el personal que opera con el material radioactivo puede acercarse por breve tiempo al día a las fuentes radioactivas sin tocarlas para manipularlas con pinzas relativamente cortas. De este modo la exposición a las radiaciones se encuentra dentro de los límites permitidos internacionales para los trabajadores expuestos. Este rango de actividades tiene como un límite práctico de unos 100mCi de Co-137 u otras fuentes selladas de radiación gamma y de hasta 1 Ci de fuentes de neutrones de Am-Be.

#### *3.1.5.1 Uso de fuentes radioactivas selladas de emisión gamma*

Se considerará aquí solamente la modalidad de transmisión gamma, es decir, aquella disposición geométrica en que el objeto bajo estudio se encuentra interpuesto entre una fuente gamma y un detector.

Cuando se interpone un material entre una fuente gamma y un detector, la intensidad del haz de radiación original registrado por el detector resulta disminuido a causa de las diversas interacciones que ocurren entre la radiación y la materia. De este modo al desplazar fuente y detector a lo largo de una estructura cerrada que contiene objetos o materiales en su interior, va obteniéndose una respuesta que representa el conteo de los rayos gamma que logran atravesarla y que reflejan su contenido en la forma e un perfil de densidades. Esto es un perfilaje gamma.

Las fuentes de radiación gamma emiten una cierta cantidad de rayos gamma y de ciertas partículas (radiación beta, neutrinos, etc) de energías características para cada radionúclido en un tiempo también característico.

En la tabla 2 a continuación se describen las principales características de los dos isótopos de mayor uso a nivel industrial que es el caso del Co-60 y del Cs-137. En la primer columna está el símbolo químico del radioisótopo, en la segunda columna, se encuentra el período de semidesintegración del mismo, que representa el tiempo que debe transcurrir para que la mitad de los átomos radioactivos presentes al comienzo se hayan desintegrado. En la tercera columna se presenta la energía de los rayos gamma más relevantes que emiten esos radioisótopos al decaer y entre paréntesis el porcentaje de esos rayos gamma emitidos por cada desintegración. En la cuarta columna se tiene la constante gamma que describe la tasa de dosis equivalente en rem/hora que produce 1 curie de cada radionúclido a 1 metro de distancia.

Tabla 2 Características de fuentes selladas de emisión gamma.

<b>Radioisótopo</b>	<b>Semiperíodo</b>	<b>Energías r- <math>\gamma</math> (MeV)</b>	<b>Constante gamma</b>
Cs-137	30.174 años	0.662 (89.9%)	0.399
Co-60	5.272 años	1.332 (100%)	1.31

### 3.1.5.2 El perfilaje gamma

El perfilaje gamma es una técnica de diagnóstico nuclear utilizando rayos gamma mediante el cuál se estudia el interior de un recinto o sistema (columnas de destilación, nivel de líquidos e interfaces en estanques, posición de estructuras en el interior de columnas, variaciones de la densidad de un fluido en función del tiempo y otros casos) desde el exterior sin interferir con su funcionamiento. En ocasiones este estudio se realiza desplazando por el lado exterior del recinto una fuente gamma y un detector apropiados alineados para obtener un perfil de densidades del interior cuya interpretación puede inferirse el comportamiento del sistema. En otros casos el dispositivo fuente-detector se mantiene fijo en un lugar y se realiza el estudio de la variación de densidades en el interior del recinto en función del tiempo.

### 3.1.5.3 Representación de un perfilaje gamma

En este apartado se trata de representar un sistema hipotético al que se le denominará torre, dentro del cuál se distribuyen un volumen de líquido puro y otro gaseoso puro. Por la parte exterior de la torre se desplaza verticalmente un sistema fuente-detector de modo que la fuente y el detector se encuentran en los lados opuestos de la torre alineados a una misma altura sobre una posición de referencia. Al realizar un perfilaje vertical de esta torre, suponiendo que los centros geométricos de la fuente emisora gamma y del detector están perfectamente alineados y a la misma altura que tanto el líquido como el gas se mantienen inmóviles durante el perfilaje; que la estadística de contaje es muy buena; que la distancia fuente detector se mantiene inalterable durante el desplazamiento físico del sistema y que no existen otras fuentes de perturbación sobre el sistema, entonces se obtiene la respuesta en manera del perfil de la torre.

Los datos para construir un gráfico de este tipo se obtienen desplazando simultáneamente el sistema fuente-detector en tramos fijos por ejemplo tramos de 5cm, en dirección ascendente (o descendiente como convenga) a partir de un punto tomado como referencia cero. En cada uno de estos tramos se registra una lectura del detector. La duración del tiempo de contaje es arbitraria pero debe ser la misma para todas las medidas. Es recomendable que los gráficos se realicen en escala logarítmica y esto proviene del hecho de que la atenuación de la radiación que atraviesa la torre procede aproximadamente según la ecuación  $N = N_0 e^{-\mu x}$  y por lo tanto el contaje puede variar en varios órdenes de magnitud, de modo que la representación logarítmica es la que mejor se adapta para representar estos datos.

En una columna de destilación real existen regiones en su interior con materiales diversos, unos de tipo estructural fijo como bandejas, tuberías y chimeneas y otros compuestos por los fluidos bajo tratamiento los cuáles pueden estar en fase líquida o

gaseosa y que pueden desplazarse continuamente lo largo de la estructura interna de la columna o torre. De este modo la representación de un perfilaje dinámico así como su interpretación, resulta un poco más compleja que el caso anteriormente presentado para un modelo estático.

#### *3.1.5.4 Columnas de destilación*

Una columna de destilación es una estructura cerrada en la cuál se realiza la separación física de un fluido o dos o más fracciones que lo componen. Esta separación se logra sometiendo el fluido a condiciones de presión y temperatura apropiadas a lo largo de la columna de modo de lograr que las fracciones que se buscan separar se encuentren en dos estados diferentes. La fracción más pesada en estado líquido baja por gravedad, mientras que la más liviana en estado gaseoso sube y se condensa en las partes superiores de manera de lograr un intercambio entre ambas fases de modo de transferir la parte gaseosa del líquido que baja a la gaseosa que sube e igualmente transferir la parte líquida que puede arrastrar la fracción gaseosa que sube al líquido que baja. Este mecanismo de transferencia se optimiza al maximizar la superficie de contacto entre ambas fases. En las columnas de destilación esto se realiza mediante dos tipos de estructuras mecánicas básicas: las estructuras de platos o bandejas y las estructuras de empaques. Ambas estructuras pueden encontrarse en l misma columna dependiendo de su diseño y función.

#### *3.1.5.5 Estructuras de bandeja o platos*

Para este apartado se trabaja con una torre con estructura de platos de un solo bajante. Los bajantes de los platos se van alternando a un lado y al otro de la torre sucesivamente obligando al líquido a recorrer un largo camina zigzagueante a lo largo de la torre. El gas se desplaza en la dirección contraria y pasa de un plato a la región del plato siguiente a través de unos ductos ubicados en la parte activa de los platos donde se realiza el contacto entre el líquido que baja y el gas que sube. Estos ductos pueden ser agujeros simples o estructuras compuestas pospartes rígidas o móviles cuya función es ayudar a impedir el desplazamiento del líquido hacia abajo a través de los ductos facilitando el transporte del gas hacia arriba de modo de forzar el contacto gas-líquido sobre la parte activa del plato.

#### *3.1.5.6 Estructuras de empaques*

Una zona de empaque, está compuesta por un agregado de pequeños elementos de empaque que pueden ser metálicos, cerámicos o plásticos y que se acumulan en una región de la torre donde cumplen la función de maximizar el contacto entre el líquido que baja y el gas que sube. La zonas empacadas se usan preferentemente en procesos de destilación al vacío donde se requieren bajas diferencias de presión. Esta acumulación de las pequeñas estructuras en la zona de empaque pueden ser ordenadas o desordenadas dependiendo de la función que deben cumplir.

### 3.1.5.7 Origen de los problemas que pueden presentar los platos

1. *Diseño:* En una torre, un palto puede representa malas condiciones de funcionamiento debido a un diseño inapropiado para el tipo de fraccionamiento con que se procede en una torre.
2. *Daño mecánico:* Por razones de uso, mala utilización de la torre u otra razón, por ejemplo mal armado de los platos durante la reparación, parte de la estructura de uno o varios platos colapsan dejando de cumplir con su función e interfiriendo con el funcionamiento de otros platos en la torre.
3. *Obstrucciones:* Ocurren cuando se depositan permanentemente materiales extraños sobre las estructuras de los platos impidiendo el paso de los fluidos según su función de diseño. Estos materiales extraños pueden tener diversas procedencias, como por ejemplo, trozos de platos dañados, suciedad proveniente de otros procesos que alimentan la torre, depósitos paulatino que naturalmente se encuentran dentro del proceso y que van formando una barrera que crece con el tiempo, depósito ocasional de materiales dejados en las torres durante los periodos de mantenimiento como cascos, herramientas etc.

### 3.1.5.8 Caso de estudio

A continuación se muestra el estudio de un caso particular para representar el uso del perfilaje gamma en la industria de petróleo, debido a que se asemeja en gran medida al estudio hecho en este proyecto en un campo de generación geotérmico

Un campo de producción de petróleo consiste en una serie de pozos de producción distribuidos en una región de acuerdo a criterios geológicos y económicos principalmente. Los pozos productores están agrupados por distancia entre ellos de modo que cada grupo almacena el petróleo crudo que produce en un tanque colector común, en una estación colectora primaria donde el fluido es separado primariamente por gravedad en barros, agua, petróleo y gas. Desde esta estación se bombea la fase separada de petróleo hacia una planta de separación mediante una tubería matriz que es alimentada por la producción de arias estaciones colectoras primarias simultáneamente. Esta tubería matriz puede tener muchas decenas de kilómetros de largo y en este caso tiene un diámetro interno de 61cm. Durante el transporte de petróleo por la tubería matriz a la planta de separación, el petróleo va separándose parcialmente en fase líquida y gaseosa dando origen a la formación bloques de líquido separados por bloques de gas. Estos bloques de líquido transportan energía mecánica que va a ser depositada a una frecuencia del orden de una vez por minuto en los recipientes de separación produciendo fuertes vibraciones en ellos. Existe el temor de que se produzcan daños mecánicos en los separadores y que puedan haber escapes de gas muy peligrosos. El operador de la planta que ordeno el estudio deseaba hacer una caracterización de los bloques de líquido: frecuencia durante un día completo, longitud media en el tiempo entre bloques y tamaño de los bloques de líquido. Siendo un problema muy complejo, este estudio formará parte de otros estudios que actualmente se adelantan para encontrar una solución al problema.

Se propuso la realización de un experimento que consistía en colocar un sistema de perfilaje gamma fijo en la tubería matriz a unos 10 metros antes de la entrada al sistema de distribución a los separadores en la planta. Este sistema consistió en una fuente de 40mCi de Co-60 colocado en un fino colimador de plomo en la parte inferior de la tubería y en un detector de NaI de 2 x 2 pulgadas colocados sobre la parte superior de ella e tal manera que ambos, fuente y detector, se encontraban sobre una línea vertical que pasaba por el centro de la tubería. La temperatura externa de la tubería esta cerca de los 40°C. Se estableció un tiempo de contaje de 1 segundo y un tiempo de espera de 1 segundo para reiniciar el contaje. El sistema fue manejado por un computador de campo mediante interfaces y programas apropiados que iban mostrando en tiempo real la evolución del experimento tomándose más de 50 mil datos en cerca de 28 horas de trabajo continuo. La adquisición de lo datos en la forma como se ha descrito es interesante en sí por que da la distribución de los bloques de líquido en función del tiempo. Sin embargo, puede deducirse información adicional valiosa del experimento calibrando el sistema en función de la radiación gamma por el petróleo líquido dentro de la tubería. Con esta calibración es posible medir la altura de los bloques de petróleo dentro de la tubería y teniendo la longitud de cada bloque de líquido así como su densidad y velocidad, puede medirse la energía cinética que transporta cada bloque. Para realizar la calibración se rotó el sistema fuente-detector en 90°, manteniendo constante la distancia fuente-detector y en dirección horizontal de modo que la línea que une fuente-detector pasara siempre por el centro de la tubería. Haciendo las suposiciones de que el líquido no cambia su densidad en el tiempo y tampoco el gas y que solo cambia el nivel dentro de la tubería, entonces habrá ocasiones en que l líquido ocupará casi todo el volumen de la tubería y ocasiones en que esta estará ocupada en su totalidad solo por el gas dando n estos dos casos extremos también dos lecturas extremas en el sistema de contaje. Durante esta parte del experimento el contaje resulto muchas veces alrededor de 2200 c/s y muchas veces también alrededor de 100 c/s con algunos otros resultados intermedios. Se tomó entonces como representativo a 100c/s par el caso de tubería llena con líquido y a 2200 c/s para el caso de tubería llena por gas. Si además se toma en cuenta que la colimación mecánica de la fuente y el afinamiento de la electrónica del contaje son tales que el efecto de empilamiento gamma se encuentra minimizado y solo se cuentan los fotopicos de Co-60 entonces puede aplicarse la expresión  $N = N_0 e^{-\mu x}$  para describir la atenuación de la radiación gamma dentro de la tubería y realizando la sustitución adecuada de lo parámetros se obtiene que el espesor del la tubería x es de 61cm o puede despejarse cualquier otro parámetro que se requiera según la aplicación de perfilaje que este utilizando.

## CAPITULO IV DESARROLLO

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

Este apartado muestra las consideraciones teóricas que fueron tomadas de las diferentes fuentes bibliográficas y como fueron estas ecuaciones utilizadas para diseñar y construir el dispositivo mecánico nucleónico. Adjunto se anexan también, cálculos y consideraciones referentes a la parte del sistema de control nucleónico (SCN), que fue el medio o ensayo a través del cuál se piensan evaluar las tuberías del campo geotérmico Miravalles y en la sección de anexos se pueden apreciar planos descriptivos de cada una de las partes mencionadas a continuación.

#### **4.2 DATOS DEL ALUMINIO**

Modulo de Elasticidad Aluminio = 70GPa  
Esfuerzo de Fluencia = 145MPa  
Esfuerzo Admisible = 96Mpa  
Peso del emisor = 13kg  
Peso del receptor = 0.5kg  
Peso del motor = 5kg  
F.S. = 1.5  
Tipo 3003 liso

**Peso Total = 18.5kg / 181.3N**

**Tabla 3. Datos del motor utilizado**

Numero de Fases	4
Rango de Voltaje	800-200VDC
Paso	0.9-1.8°
Resistencia de Fase	0.18Ω
Corriente	6000mA
Torque estático	3060g-cm
Torque Dinámico	45900g-cm
Diámetro del eje	0.63"

Tabla 3. Datos del emisor de radiación

#### **4.3 DISEÑO DEL DIVISOR**

Previo a la construcción de la cremallera era necesaria la construcción de un divisor para poder dividir la galleta metálica en 604 dientes, que era el número de dientes requeridos para el presente proyecto. Para esto se dio una colaboración adicional a los encargados del Taller de Precisión pues ellos requerían los planos del mismo para proceder a su fabricación.

#### **4.4 DISEÑO DE LA PLACA DE SOPORTE**

El espesor de esta sección del conjunto mecánico puede dimensionarse de dos maneras, la primera de ellas es por cortante, y la segunda analizando dicha placa como una viga para que no sufra deflexión. A continuación se muestran los cálculos para ambos casos:

*A cortante:*

$$\tau = \frac{P}{A} = \frac{182N}{(85t) * 2} = 96Mpa \quad t = 0,011mm$$

*Como una Viga*

Para una deflexión de 1mm se tiene que:

$$\delta_{MAX} = \frac{PL^3}{48EI} \quad 1x10^{-3} = \frac{182 * 0,33^3 * 12}{48 * 70x10^9 * 0,21t^3} \quad t = 4.82mm \quad (12)$$

#### **4.5 DISEÑO DE LOS BRAZOS**

En esta parte los cálculos se realizan por teoría de la energía de la máxima distorsión y dado que solo están presentes el esfuerzo principal y el valor respectivo para cortante, la ecuación se reduce a:

$$\sigma_e = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (13)$$

$$96 = \left[ \left( \frac{182}{a^2} \right)^2 + 3 \left( \frac{38.97x10^3 * 4.8}{a^3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad a = 15mm \quad (13)$$

#### **4.6 POTENCIA REQUERIDA DEL MOTOR**

De acuerdo a una velocidad tangencial constante de 5mm/s en el piñón se puede encontrar la potencia necesaria en el motor de la siguiente manera:

$$f = \mu N \quad f = 0.57 * 200 = 114N \quad (14)$$

$$P = F * V \quad 114 * 5x10^{-3} = 0,57 \text{ Watts} = 0,8 \text{ hp} \quad (15)$$

En este caso no es necesario expresar el número de revoluciones por minuto necesarias en el motor ya que el tipo que será utilizado es un motor paso a paso y este puede conseguirse en el mercado únicamente con la especificación de potencia.



#### 4.7 DISEÑO DE LOS TORNILLOS DE LOS RODINES

Tomando como base una vez la ecuación de máxima distorsión de la energía, el dimensionamiento de los tornillos viene dado de la siguiente manera:

$$166.67^2 = \left(\frac{63.66}{R^2}\right)^2 + 3\left(\frac{33740.84}{R^3}\right)^2 \quad R = 7.05\text{mm} \quad (16)$$

Ahora bien, en manera de seguridad seria conveniente calcular a que valor critico de fuerza los tornillos eventualmente fallarían, y esto se calcula de la siguiente forma:

$$F_{critica} = \frac{\pi(0.9d)^2}{4} S_y \quad F_{Critica} = 5,3kN \quad (17)$$

#### 4.8 CALCULO DE VIDA REMANENTE DEL DUCTO

Esta ecuación se vuelve necesaria para la parte de control de calidad del ducto, pues se requiere conocer la vida remanente del mismo para planificar el número de evaluaciones que deben realizarse en manera de mantenimiento preventivo, y la ecuación es la siguiente:

$$Vida \text{ Remanente(años)} = \frac{t_{actual} - t_{mínimo}}{tasa \text{ corrosión}(mm / año)} \quad (18)$$

En donde:

$t_{actual}$  = Espesor mínimo actual en mm o pulgadas

$t_{mínimo}$  = Espesor mínimo por condiciones de operación para la zona o tramo, en mm o en pulgadas.

La tasa de corrosión de los tubos del campo geotérmico de Miravalles se ha calculado aproximadamente en un valor 0.1 mm por año pero en realidad el propósito de este ensayo es justamente evaluar el estado de las tuberías y por ende se espera conocer con exactitud este valor en un futuro, aunque el anterior mencionado, según estudios empíricos realizados por el departamento de control de calidad, es muy cercano al real.

#### 4.9 CARACTERÍSTICAS DE LA FUENTE UTILIZADA EN EL SCN

**Tabla 4. Características de la fuente de radiación (Ver foto sección de anexos)**

Característica	Resultado
Marca	TN Technologies
Isótopo	Cs-137
Numero de la fuente	GV-6886
Test aplicados	Leak test
Actividad	16mCi (19/1/06)

## CAPITULO V: RESULTADOS OBTENIDOS

## 5.1 ELEMENTOS CONSTRUIDOS

A continuación se muestran los elementos mecánicos que previamente fueron diseñados y posteriormente construidos en el taller de estructuras mecánicas. Dichos elementos son los requeridos para que el sistema funcione correctamente y ya se comprobó que soportan las cargas satisfactoriamente y por ende pueden ser utilizados sin ningún inconveniente.



Figura 10. Brazo de soporte del receptor

La figura 10, muestra el brazo de soporte del receptor, y sobre este elemento deben ir incluidos tan to el receptor como el motor que hará girar todo el conjunto.



Figura 11. Brazo de soporte

La figura 11, muestra el brazo de soporte que ira directamente interconectado a la cremallera por medio de los roles de contacto que giran lateralmente en la estructura dentada. Este fue uno de los elementos que se tomó en mayor consideración pues es allí en donde se concentran la mayor cantidad de esfuerzos de flexión y torsionales, por lo que se considera un punto crítico del conjunto nucleónico-mecánico.



Figura 12. Brazo de soporte central

La figura 12 muestra el brazo de soporte central, y la función de este es brindar estabilidad y rigidez a todo el conjunto mecánico. Su geometría es bastante sencilla, pues en el pasan ejes de pequeño diámetro encargados de soportar los piñones de avance y los roles que servirán de rueda sobre la cremallera. Además este elemento posee una platina de enlace entre los brazos de soporte del receptor y el emisor para que cuando el motor gire su eje toda la estructura se mueva circunferencialmente en manera de tren sobre la tubería examinada.



Figura 13. Brazo de soporte del emisor

La figura 13 representa el brazo de soporte del emisor, y como se puede ver posee ciertas variaciones con respecto del brazo de soporte del receptor, especialmente en la zona de enlace con el brazo de soporte que va unido a la cremallera. Este brazo irá unido al emisor por medio de pernos y se diseño de acuerdo a la geometría del mismo.

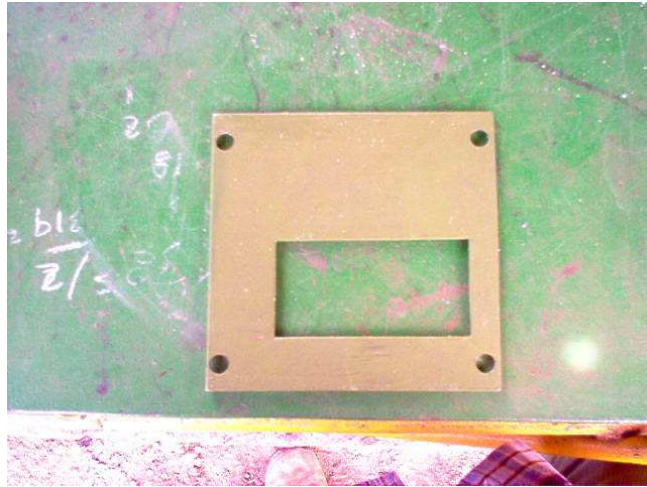


Figura 14. Placa de soporte

La figura 14, aunque posee una sencilla geometría, fue uno de los elementos más complicados de diseñar pues ella debe poseer la estructura necesaria para soportar el motor y además debe poder ser lo suficientemente flexible para que el receptor se pueda mover sobre ella y para que este se encuentre alineado con el receptor.



Figura 15. Ensamble General



Figura 16. Ensamble General

Las figuras 15 y 16 muestran la manera en que se ensamblaron las piezas en un conjunto general para conformar el sistema de control nucleónico.

### 5.2 EVALUACIÓN

Para la realización de estas pruebas, debido a que el equipo mecánico-nucleónico no ha sido terminado, se colocó el tubo en posición vertical y soportados por una pequeña estructura, el emisor de radiación, y a 180°, el geiger, de manera que recibiera la radiación emitida por el emisor. Mientras tanto debía esperarse un aproximado de 5

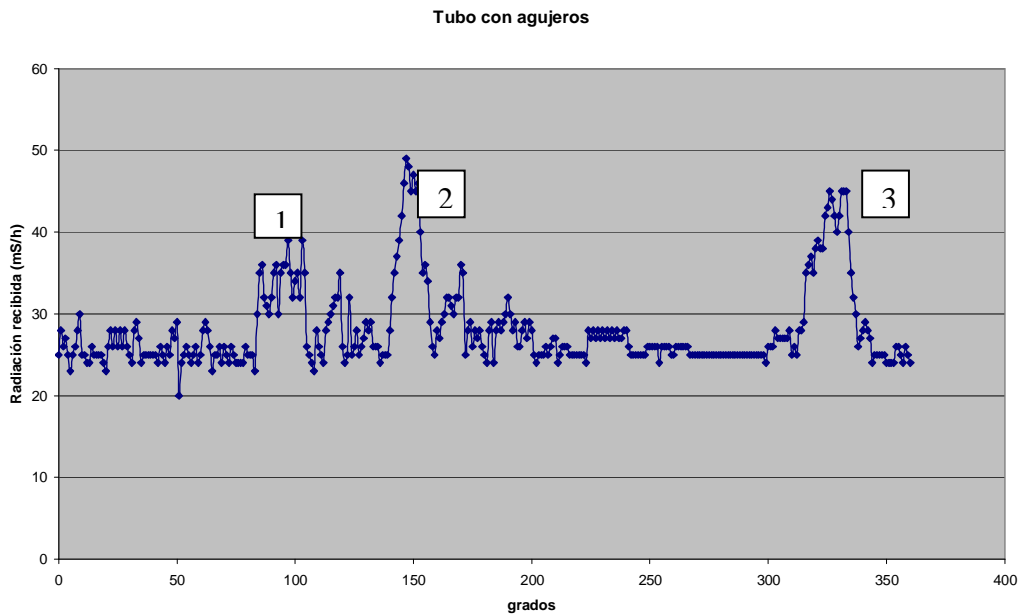


Grafico 1. Grafica generada para un tubo con agujeros

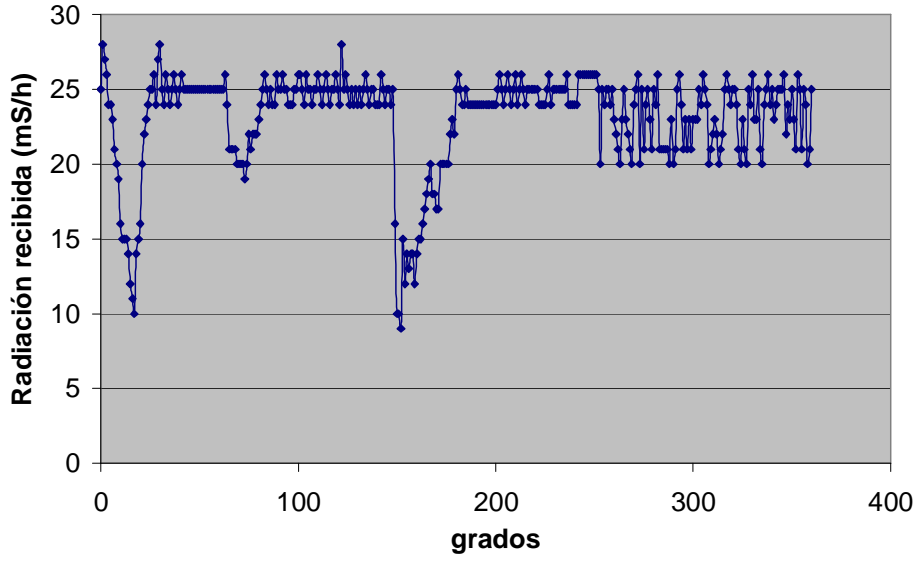
minutos a que el geiger asignara un valor de radiación recibida. Una vez tomado ese dato, se movían los soportes un grado sobre la circunferencia del tubo para tomar el nuevo valor de radiación en ese nuevo punto de análisis, y así sucesivamente hasta alcanzar los 360°. Por medio de esta rudimentaria técnica se pudieron alcanzar gráficos muy similares a los que se espera obtener una vez que se haya terminado la construcción del equipo de control nucleónico, con la única diferencia que el sistema girara 1.8° en lugar de 1°, que es el paso más pequeño que se pudo alcanzar con el motor que se disponía. El grafico 1 muestra los puntos que fueron analizados en una sección del tubo y su correspondiente valor de radiación alcanzada al otro lado del ducto. Los picos que pueden observarse en el gráfico 1 (1,2 y 3), corresponden a defectos u agujeros presentes en la sección de estudio y estos se asocian directamente con el volumen del defecto, por lo que si el equipo se calibra adecuadamente se puede alcanzar una elevada precisión dimensional una vez que se realicen las pruebas a los vaporductos del campo geotérmico. El aumento de radiación recibida por el receptor en las secciones 1,2 y 3 implica que debido a la ausencia de material metálico en esa sección, una mayor cantidad de radiación puede pasar a través de ella y por ende es en estos lugares donde se debe poner más cuidado, pues se puede pensar en primera instancia que son zonas críticas donde puede presentarse una falla.

Por otra parte, el grafico 2, lo que muestra es un grafico muy similar al primero, pero su diferencia fundamental radica en el hecho de que los picos de radiación son inversos debido a la cantidad de radiación absorbida por el defecto. Esto significa que como la cantidad de masa (debida a la corrosión o algún otro agente obstructor) es mayor, la radiación no podrá pasar a través de ella, por lo que al detector llegará solamente una pequeña cantidad de radiación, dando por entendido que en esa sección existe una concentración de corrosión en la tubería.

Ahora bien, para el caso en el que no se encuentren obstrucciones ni agujeros en el espesor de la tubería de análisis, se da por entendido que presenta una sección uniforme y homogénea, libre de cualquier defecto por lo que deberá observarse como una línea recta en un gráfico de *radiación recibida vs No. de grados* pues la radiación recibida por el receptor siempre será la misma ya que no existen defectos en el ducto y puede ser utilizada como patrón de comparación con respecto a los tubos que si presenten algún tipo de defecto.



### Tubo con exceso de corrosión



Grafica 2. Grafica generada por un tubo con exceso de corrosión.



## CAPITULO VI: ANÁLISIS DE RESULTADOS

## **6.1 DISEÑO MECÁNICO**

Los resultados arriba expuestos muestran el uso de la teoría de fallas como instrumento de diseño de elementos mecánicos, y el principio básico establece que una vez que se sobrepase el esfuerzo de las cargas involucradas en el sistema, al esfuerzo *a priori* conocido del material, se producirá la falla en dicho elemento. Para evitar esto, se tomo como base el esfuerzo admisible del material usado, que fue el aluminio 3003 y las piezas se diseñaron y dimensionaron de acuerdo a su resistencia. Durante su construcción se tuvieron que tomar en cuenta factores adicionales que disminuyen el esfuerzo admisible del material además del factor de seguridad, como es el caso de los concentradores de esfuerzos. Este es el caso de agujeros, o imperfecciones en la superficie de las piezas como rugosidades que pueden tener efectos muy nocivos en el desempeño del elemento y merecen ser tratados con mucha atención.

Por otra parte para piezas sometidas a fatiga como es el caso de ejes de transmisión, en primera instancia se pretendieron diseñar de manera que tuvieran una vida infinita, pero debido a que su utilización no es críticamente necesaria para el funcionamiento del dispositivo entonces se pensó que era mejor tratarlos como simples piezas sometidas a flexión y torsión, pues de lo contrario aumentarían su costo de fabricación al verse necesario el uso de tratamientos térmicos superficiales que eventualmente redujeran de manera considerable el efecto de falla en dichas piezas.

Para cada uno de los elementos que se muestran en los planos de este documento (Ver sección de planos constructivos) se realizó un análisis de cuáles son los esfuerzos que en ellos actúan y después se procedió a realizar análisis un poco mas específicos, haciendo elementos finitos en las partes que se esperaba estuvieran mas propensas a fallar ya fuera por su geometría o la cantidad de fuerzas involucradas estaban cerca del límite elástico del material. Aun así, las dimensiones de las piezas fueron sobredimensionadas con un valor de factor de seguridad de 1.5 para dar un margen de mayor rigidez a todo el conjunto y evitando así cualquier desperfecto que pudiera presentarse en el desempeño del sistema.

Una de las partes que esta sometida a un mayor número de esfuerzos y por lo que se le tuvo que prestar bastante atención, fue la de los tornillos de los rodines, pues en algún momento de la evaluación, estos deberán soportar casi toda la carga del conjunto, y su tamaño excedía el dimensionado para los brazos de soporte, que es donde van colocados, y entonces se tuvo que mantener la misma área de soporte con tornillos más pequeños pero en mayor cantidad, para mantener en todo el conjunto rigidez y estabilidad.

Finalmente el cálculo de la vida remanente del ducto se adicionó en este informe pues ha sido tomado como referencia para el control de calidad y mantenimiento de las tuberías que se dará a los ductos del campo geotérmico. La idea de este mantenimiento es que las tuberías siempre se mantengan en un estado óptimo de funcionamiento para poder extraer de ellas la mayor cantidad de vida útil, con el compromiso de que funcionen segura y adecuadamente. Además, este estricto control, permite al personal de control de calidad, realizar un historial de daños de los ductos, para analizar con que agresividad se presentan los defectos, en que tramos de la tubería y en que sector específicamente para que se puedan plantear métodos que eviten el mal funcionamiento de los vaporductos y por ende de la planta geotérmica en general.

## **6.2 SISTEMA DE CONTROL NUCLEÓNICO**

Los gráficos 1 y 2 representan los resultados obtenidos a partir de las primeras pruebas hechas a un tubo metálico aislado. Dentro de su forma se pueden apreciar ciertos pequeños altibajos de radiación recibida que son el resultado de muy ligeros cambios de espesor en el material base pero que no representan ningún peligro de fractura o de obstrucción en el vaporducto debido a su leves cambios que se cuantifican en el gráfico. Los picos más pronunciados en el gráfico 1 se deben a la existencia de agujeros presentes en esa sección de análisis, y pueden detectarse fácilmente pues debido a que el agujero presenta menor cantidad de material base, y pasa a través de él una mayor cantidad de radiación que se ve reflejada en el gráfico. La manera en que va creciendo el nivel de radiación nos brinda la longitud exacta del desperfecto y la cantidad de radiación nos dice el espesor del mismo, por lo que tras un rápido análisis se puede brindar un informe muy detallado del espesor de los vaporductos. Por otra parte el gráfico 2 muestra los mismos pequeños cambios de radiación recibida por el detector, debidos a leves e indiferentes cambios en el espesor del metal base, pero sus picos se pueden ver disminuidos por dos razones: la primera de ellas, es encontrarse durante la evaluación con un cordón de soldadura, que evidentemente por su cantidad de masa y densidad disminuirán considerablemente la cantidad de radiación recibida por el receptor. La otra razón sería encontrar algún objeto que pueda causar obstrucción al flujo de agua y gas presentes en el vaporducto que por un fenómeno físico similar al del cordón de soldadura se verá reflejado en el gráfico con una fuerte disminución de radiación recibida.

Otro factor importante referente a este mismo tema es el de la cantidad de radiación que es capaz de atenuar el agua y el vapor de agua presentes en la sección interior de los vaporductos, pues, si se realizan evaluaciones en tiempo real, es decir, mientras los vaporductos están en funcionamiento, se podrán apreciar en los gráficos picos más pronunciados por el efecto del agua y el vapor de agua, por lo que se debe saber distinguir entre estos y algún defecto u obstrucción que pueda presentar la tubería. Por otro lado, se espera que el defecto que puede presentar mayor problema a ser identificado, por su grado de dificultad, sería aquel que se encontrara en la parte inferior de una tubería que trasegara agua y gas, pues este deberá observarse en el gráfico como una disminución o aumento de radiación en la cresta de la curva de radiación para la absorción del agua, es decir, debe identificarse una leve curvatura, presente en la parte interna de otra curvatura y eso evidentemente dificulta la localización, superficie y profundidad del defecto.

Finalmente es importante destacar lo sucedido con el receptor de radiación, que era del tipo PNF modelo 9750 con un voltaje de operación de 60V y una frecuencia de 60Hz, y era el que se esperaba utilizar en primera instancia pero no poseía la suficiente sensibilidad como para detectar la cantidad de radiación emitida por el emisor, y por ende se tuvo que proceder a la compra de un equipo mas preciso. La causa por la que no se capturaba ninguna señal en el receptor fue por que la ionización que se daba en el interior del mismo no era suficientemente grande como para generar una diferencia de potencial en su salida analógica que pudiera brindar una señal en el multímetro. Esto seguramente se debía a que los cristales de centelleo presentes en el receptor no poseían el tamaño adecuado para brindar resultados más exactos, y entonces era necesaria la búsqueda de un detector con mejores propiedades receptoras para proceder al análisis de las tuberías.

En lo referente al motor seleccionado, este poseía un paso de 1.8 grados de rotación, y se escogió con el objetivo de realizar mediciones lo suficientemente pequeñas en la tubería que al final brindaran gráficos bastante representativos del estado del ducto analizado. La velocidad en este tipo de motores no es un factor importante pues puede ser graduada según los requerimientos del usuario, y por ende nuestro punto de concentración fue justamente un buscar una dimensión de paso que nos permitiera realizar evaluaciones confiables. Este motor, permitirá a toda la estructura moverse rígidamente sobre la circunferencia de la tubería analizada, luego se detendrá y se mantendrá un tiempo en esa posición estática hasta que se haya tomado una medida confiable en el detector, y posteriormente continuará su camino en otros 1.8 grados más y así hasta completar la gráfica. La potencia usada en el motor se diseñó debido a la fricción y fuerza normal con que se apoya el conjunto sobre la estructura de la cremallera, ya que ambas eran las únicas fuerzas que se oponían al movimiento del conjunto y por ende el motor debía solo vencerlas a ambas para iniciar el movimiento, y ya para ese momento el coeficiente de fricción se reduce a un valor dinámico, por lo que la potencia fue diseñada para condiciones estáticas.

Por otra parte, el emisor radiactivo utilizado para la evaluación de los vaporductos es de Cesio-137 con una actividad bastante baja de 20mCi. Existieron en realidad dos formas de verificar que este valor de actividad fuera el adecuado para la realización de las pruebas. La primera de ellas era simplemente colocar la fuente y realizar las mediciones, para corroborar que la sensibilidad del detector en esos valores de actividad fuera lo suficientemente precisa para percibir los ligeros cambios en la radiación debidos a las variaciones de espesor en la tubería. La otra forma era sustituir los valores conocidos en la ecuación número 4 y despejar la variable de actividad entre la fuente y el detector sin el cuerpo a medir en la mitad de ellos dos. Ambos datos nos corroboraron que la actividad que posee la fuente es de suficiente energía para detectar las irregularidades superficiales y subsuperficiales presentes en los vaporductos del campo geotérmico.

## CAPITULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## ***7.1 CONCLUSIONES***

1. El valor de actividad requerido para realizar perfilajes de tipo gamma debe ser de al menos 16mCi, y detectada en el geiger, de 25mSv/h, de lo contrario la sensibilidad del receptor no podrá detectar el espesor de los vaporductos.
2. La cámara de ionización del detector PNF (Point level switch) inicial no poseía la sensibilidad requerida para captar la radiación de la fuente emisora por lo que se tuvieron que realizar las pruebas con un equipo geiger marca Graetz, modelo X5CEX, con rango de operación desde 1nSv/h hasta 20mSv/h.
3. Los tubos que pueden ser evaluados con el equipo de control nucleónico deben poseer un diámetro máximo en la fibra de 700mm debido a que el tamaño de la cremallera impide su uso en valores superiores al indicado.
4. Para conseguir una evaluación que identifique la geometría y localización exacta de los defectos en los vaporductos, se debe realizar la inspección a lo largo de los 360 grados que conforman la sección transversal de la tubería.
5. Debido a que la actividad de la fuente es de solo 16mCi y se trata de una fuente sellada que en contacto emite un valor de 5nSv/h, esta puede ser seguramente trasladada y manipulada por los operarios sin riesgos de sobreirradiación.
6. El espesor y el grado de corrosión en las tuberías de Miravalles pueden ser satisfactoriamente medidos y evaluados a través del dispositivo de control nucleónico presentado en este proyecto.

## ***7.2 RECOMENDACIONES***

1. Se recomienda el uso de un contador digital modelo GCA-04 con salida a un puerto RS-232 con un rango de operación desde 1nSv/h hasta 20mSv/h
2. Mantener siempre los cuidados que son inherentes al trabajo de radiografía industrial y de perfilaje gamma.
3. En la medida de lo posible, enviar operadores calificados, como mínimo nivel I, en radiografía industrial para que estos realicen las pruebas y además den el veredicto del estado del ducto.

### 7.3 BIBLIOGRAFÍA

- Juvinall, R. (2002). *Fundamentals of machine component design*. Balderas 95, Mexico: Limusa.
- Shigley, M (2004). *Mechanical Engineering Design*. NY: McGraw-Hill.
- Du Pont. (1968). *NDT Radiography Text for Du Pont's Education Program for Certification, 1968* (no. FS 5.284:84036). Washington, D.C: Richardson D. Harry
- Smith, William F. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Tang Le (en prensa) Portable digital pulsed X-Ray imaging system. *Physics*
- Morin R. (en prensa) Considerations for selecting a digital radiography system. *Non Destructive Testing*
- Jacubek Jan (en prensa) Quality of X-Ray transmission radiography based on single photon counting pixel device. *Physics*
- Hamrock Bernard (2005) *Fundamentals of machine elements*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Ing. José Scopelliti. (1994) *Apuntes sobre el curso de radiografía industrial nivel I* Comisión de energía atómica argentina. Departamento de Metalurgia, ITCR.
- Ing José Alberto Siles (febrero de 2005). *Curso avanzado de protección radiológica para radiografía industrial y medidores nucleares*. Sabana, Costa Rica
- Alfonso R. García Cueto (1990) *Radiografía*. Santa Paula, México
- Smith. H. Edgard (1998). *Manual del Ingeniero Mecánico*. 1<sup>a</sup> ed. México. Prentice- Hall.
- Calero R (1999) *Fundamentos de Mecanismos y maquinas para Ingenieros*. 1<sup>a</sup> ed. España: Ed Mcgraw-Hill.
- Robert L. Mott, Prentice may, 1992, Mott Diseño de Elementos de Maquinas , 2<sup>da</sup> edición, Stephen Helba.
- ISO. Standard Handbook. Volumen 1, 3<sup>era</sup> Edición, Suiza, 1997.
- Deutschman, Aaron D., Michels, Walter J., Wilson, CharlesE. (1989) *Diseño de máquinas teoría y prácticas*, primera edición, Compañía editorial continental, México
- Faires, Virgil M (1982). *Diseño de Elementos de Máquinas*, primera edición, Uteha, México.



## 7.4 ANEXOS

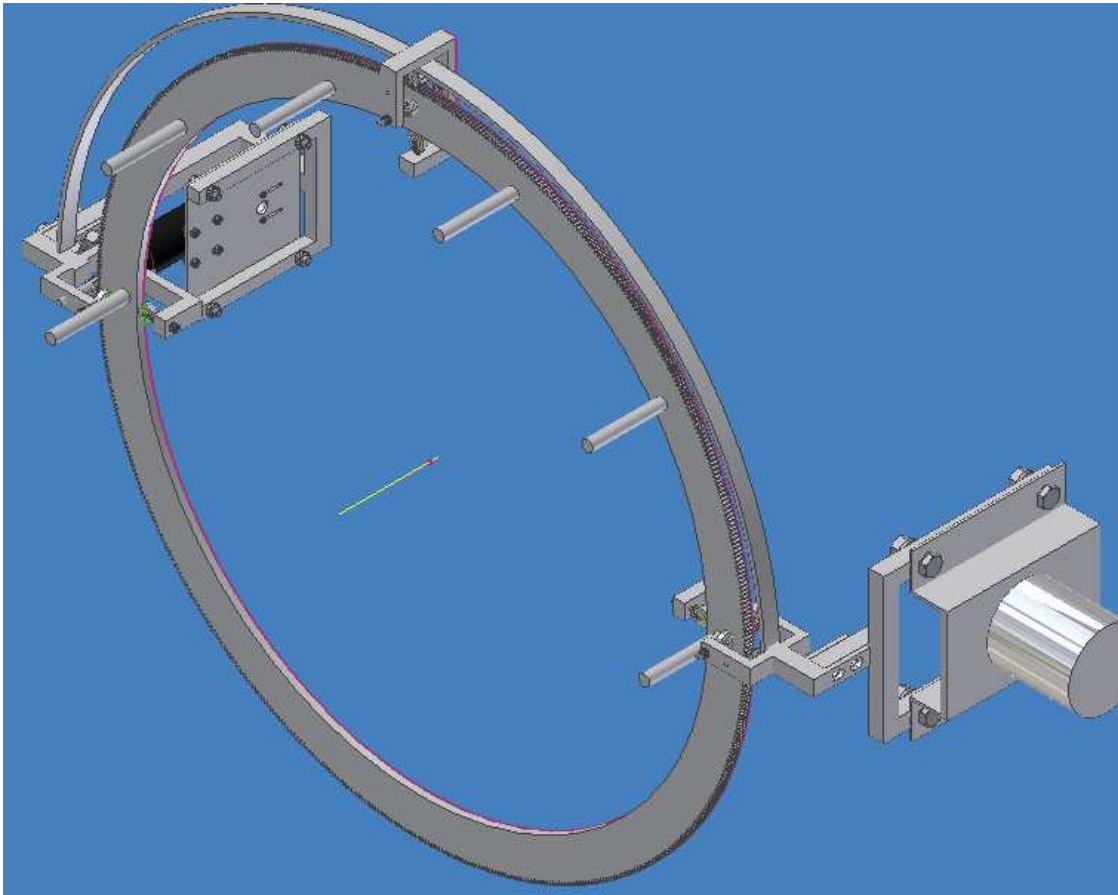


Figura A1. Vista isométrica superior del equipo mecánico-nucleónico

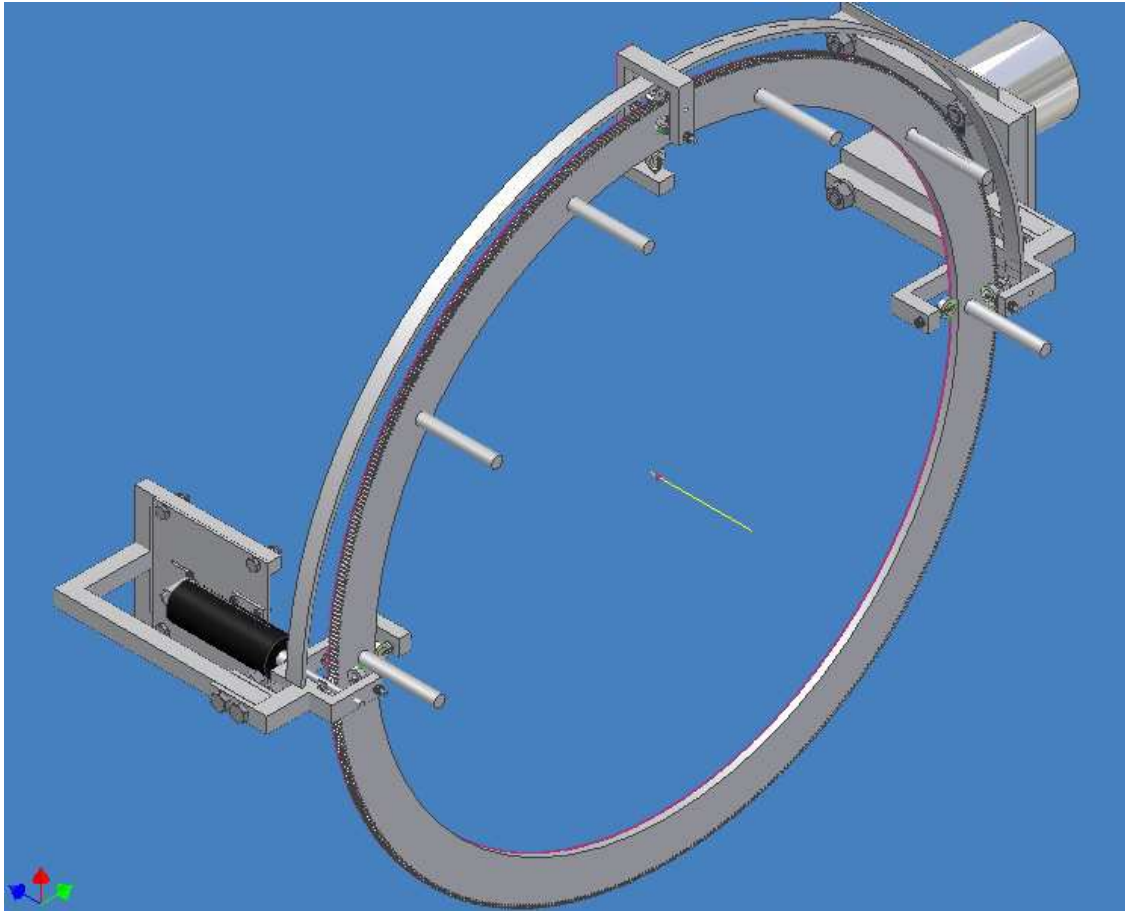


Figura A2. Vista isométrica superior derecha del equipo mecánico-nucleónico

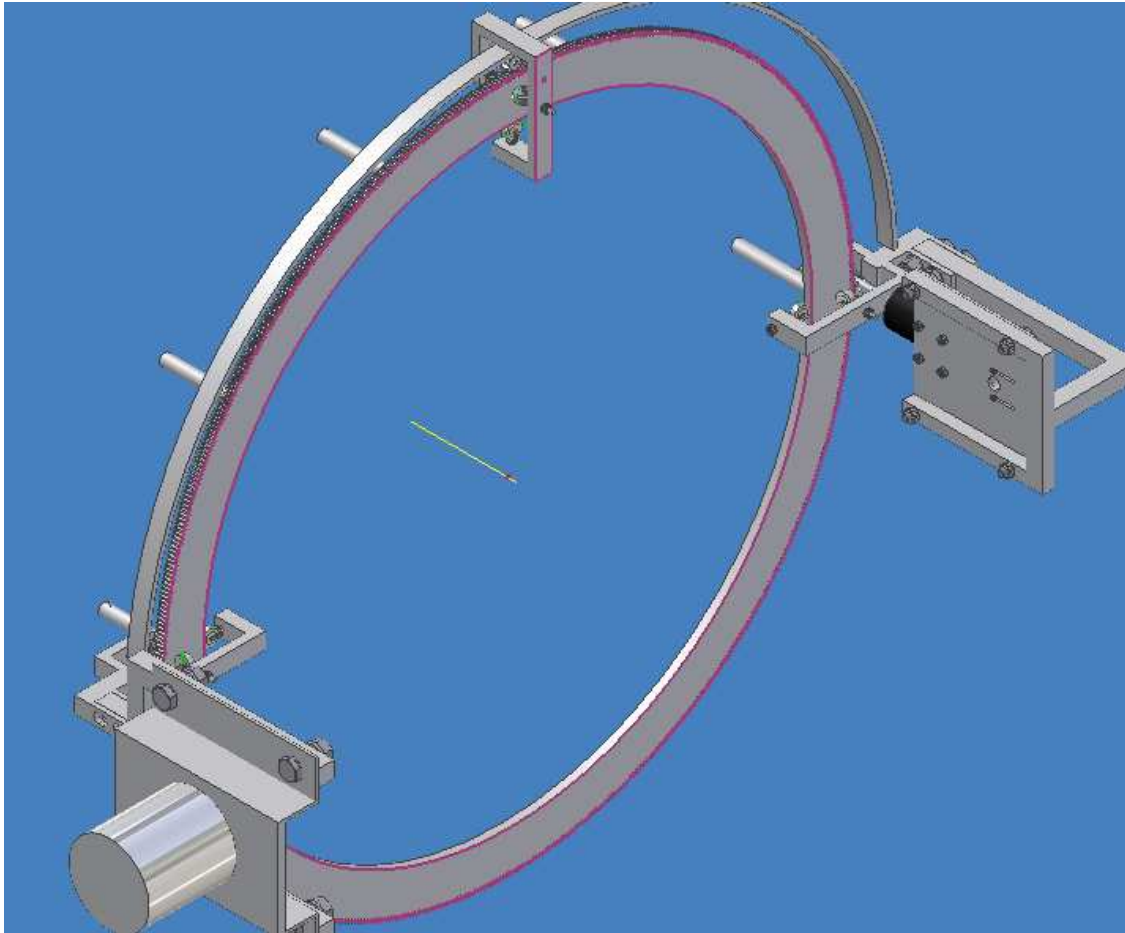


Figura A3. Vista isométrica superior izquierda del equipo mecánico-nucleónico

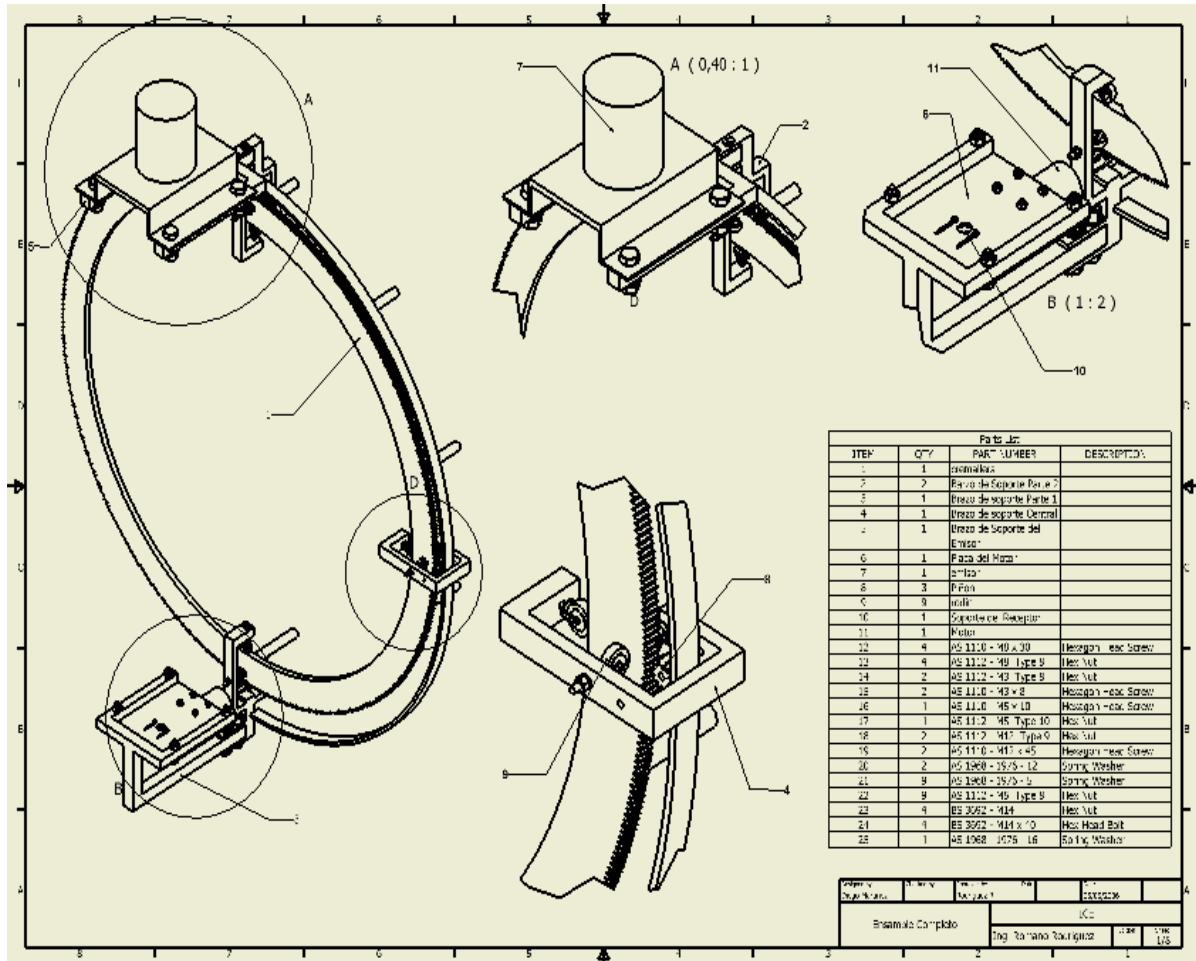


Figura A4. Fotografía del emisor de radiación.



Figura A5. Fotografía del receptor de radiación.

## CAPITULO VIII: PLANOS CONSTRUCTIVOS



Parte Jm			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPCION
1	1	00000000	Asamblea
2	2	Parte de Soporte Parte 2	
3	1	Parte de Soporte Parte 1	
4	1	Parte de Soporte Central	
5	1	Parte de Soporte del Emiso	
6	1	Parte del Mismo	
7	1	00000000	
8	3	00000000	
9	9	00000000	
10	1	Soporte de Recepcion	
11	1	00000000	
12	4	05 11 10 - 40 x 30	Hexagon - ecc Screw
13	4	05 11 12 - 40 Type B	Hex Nut
14	2	05 11 12 - 42 Type B	Hex Nut
15	2	05 11 10 - 45 x 8	Hexagon - ecc Screw
16	1	05 11 10 - 45 x 10	Hexagon - ecc Screw
17	1	05 11 12 - 45 Type 10	Hex Nut
18	2	05 11 12 - 45 Type 9	Hex Nut
19	2	05 11 10 - 45 x 45	Hexagon - ecc Screw
20	2	05 1908 - 15/15 - L2	Spring Washer
21	8	05 1908 - 15/15 - L5	Spring Washer
22	8	05 11 12 - 45 Type B	Hex Nut
23	4	05 3922 - 414	Hex Nut
24	4	05 3922 - 414 x 10	Hex Head Bolt
25	1	05 1908 - 15/15 - L6	Spring Washer

00000000	00000000	00000000	00000000	00000000	00000000
Ensamble Completo					
Ing. Mariano Ruiz Lopez					
CC					
00000000					
00000000					

