



Universidad Carlos III de Madrid  
Escuela Politécnica Superior  
Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA INDUSTRIAL

---

Análisis Estructural  
de un Intercambiador de Calor  
de un Reactor Avanzado

---

AUTOR: CARLOS GARCÍA MERINO

Director de proyecto en la Universidad Carlos III: Ángel Arias Hernández  
Director de proyecto en Empresarios Agrupados, A.I.E.: D. Fco. Javier Pérez García

Abril 2008

**Resumen**

El objetivo fundamental de este proyecto consiste en el estudio estructural de un intercambiador de calor de un reactor avanzado de Generación VI. Este intercambiador de calor es el condensador PCCS (Passive Containment Cooling System), sistema de seguridad de una central nuclear ESBWR.

El análisis estructural del condensador se ha realizado analítica y numéricamente. El cálculo analítico utiliza expresiones obtenidas del código ASME, para determinar tensiones por presiones internas. Y el cálculo numérico, llevado a cabo mediante el código ANSYS, permite determinar los valores tensionales producidos por cargas dinámicas.

Realizado el cálculo y su comparación con los valores admisibles, obtenidos del código ASME, se ha comprobado que el condensador PCCS cumple con los requisitos y sollicitaciones impuestas para todos los niveles de operación.

## Índice

<b>1 Motivación y Objetivos .....</b>	<b>6</b>
1.1 Motivación.....	7
1.2 Objetivos.....	7
<b>2 Antecedentes .....</b>	<b>9</b>
2.1 Suministros de Energía.....	10
2.2 La Energía Nuclear.....	11
2.2.1 Introducción a la energía nuclear.....	11
2.2.1.1 Radiactividad.....	11
2.2.1.2 Reacciones nucleares.....	13
2.2.1.3 Obtención del combustible.....	16
2.2.1.4 Residuos nucleares.....	17
2.2.2 La energía nuclear como alternativa energética.....	20
2.3 Centrales Nucleares.....	23
2.3.1 Centrales de agua en ebullición, BWR.....	24
2.3.2 Centrales de agua a presión, PWR.....	26
2.3.3 Evolución tecnológica de los reactores. Generaciones.....	29
2.4 Central nuclear clase ESBWR.....	34
2.4.1 Desarrollo de las centrales de agua en ebullición.....	34
2.4.2 Desarrollo del ESBWR.....	38
2.4.3 Componentes principales del ESBWR.....	41
2.4.3.1 Vasija del reactor y elementos internos.....	41
2.4.3.2 Sistema de Varillas de Control, CRDS.....	42
2.4.3.3 Sistema de Caldera Nuclear, NBS.....	43
2.4.3.4 Sistemas de Emergencia de Enfriamiento del Núcleo, ECCS.....	44
<b>3 Requerimientos de diseño y sollicitaciones consideradas .....</b>	<b>47</b>
3.1 Descripción del sistema pasivo de enfriamiento de la contención, PCCS.....	48
3.2 Requerimientos.....	53
3.3 Descripción geométrica.....	56
3.4 Materiales empleados.....	58
3.5 Hipótesis de cálculo.....	60
3.6 Definición de las cargas.....	62
3.6.1 Peso propio y empuje.....	63
3.6.2 Carga debida a la presión de diseño ( $P_d$ ).....	63

3.6.3	Carga debida a la temperatura de diseño ( $T_d$ ).....	63
3.6.4	Cargas producidas por la parada de seguridad frente a terremotos (SSE)....	64
3.6.5	Cargas producidas por la descarga de las válvulas de seguridad (SRVD) ...	70
3.6.6	Cargas producidas por accidente con pérdida de refrigerante (LOCA) .....	72
<b>4</b>	<b>Cálculo Analítico .....</b>	<b>75</b>
4.1	Código ASME .....	76
4.2	Dimensionado .....	77
4.2.1	Líneas de tubería, tube bundle y sleeves (manguitos).....	77
4.2.2	Headers (tambores).....	78
4.2.3	Head fittings .....	81
4.2.4	Header covers .....	82
4.2.5	Header Bolts .....	84
<b>5</b>	<b>Cálculo mediante el método de elementos finitos .....</b>	<b>87</b>
5.1	Introducción al método de elementos finitos.....	88
5.2	Introducción a ANSYS.....	90
5.3	Características del modelo de elementos finitos .....	92
5.4	Aplicación de las cargas .....	95
5.5	Modelo en ANSYS.....	98
5.5.1	Tipos de elementos utilizados.....	99
5.5.2	Modelizado de los componentes.....	102
5.5.3	Modelo ensamblado.....	109
<b>6</b>	<b>Análisis de los resultados .....</b>	<b>112</b>
6.1	Definición de los parámetros.....	113
6.2	Tensiones admisibles.....	114
6.3	Resultados obtenidos .....	127
6.3.1	Resultados del análisis analítico .....	127
6.3.2	Resultados del análisis mediante elementos finitos.....	129
6.3.2.1	Expansión térmica .....	129
6.3.2.2	Análisis dinámico .....	133
6.3.3	Comparación de resultados obtenidos y valores admisibles .....	141
6.4	Justificación de la estructura de soportado dinámico .....	150
<b>7</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>154</b>
<b>8</b>	<b>Trabajos futuros .....</b>	<b>157</b>

<b>9 Bibliografía.....</b>	<b>159</b>
<b>Anexo A. Planos PCCS.....</b>	<b>162</b>
<b>Anexo B. Archivo de entrada del modelo .....</b>	<b>165</b>
<b>Anexo C. Archivo de entrada del análisis dinámico.....</b>	<b>188</b>
<b>Anexo D. Archivo de salida de ANSYS del análisis dinámico .....</b>	<b>193</b>

**Glosario de Acrónimos**

<b>Acrónimo</b>	<b>Descripción</b>
ABWR	<i>Advanced Boiling Water Reactor</i>
ADS	<i>Automatic Depressurization System</i>
ASME	<i>American Society of Mechanicals Engineers</i>
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
CRDHS	<i>Control Rod Drive Hydraulic System</i>
CRDS	<i>Control Rod Dive System</i>
DBA	<i>Design Basis Accident</i>
DOE	<i>Department of Energy</i>
DPV	<i>Depressurization Valves</i>
ECCS	<i>Emergency Core Cooling System)</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
ESBWR	<i>Economic Simplified Boiling Water Reactor</i>
ESF	<i>Essential Safeguards Feature</i>
FMCRD	<i>Fine Motion Control Rod Drive</i>
GDCCS	<i>Gravity Driven Core Cooling System</i>
GE	<i>General Electric</i>
GFR	<i>Gas-Cooled Fast Reactor</i>
HCU	<i>Hydraulic Control Unit</i>
IC	<i>Isolation Condenser</i>
ICS	<i>Isolation Condenser System</i>
LFR	<i>Lead-Cooled Fast Reactor</i>
LOCA	<i>Loss of Coolant Accident</i>
MEF	<i>Método de Elementos Finitos</i>
MSR	<i>Molten SALT Reactor</i>

NBS	<i>Nuclear Boiler System</i>
PCC	<i>Passive Containment System</i>
PCCS	<i>Passive Containment Cooling System</i>
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RCCV	<i>Reinforced Concrete Containment</i>
RPS	<i>Reactor Protection System</i>
RPV	<i>Reactor Pressure Vessel</i>
SBWR	<i>Simplified Boiling Water Reactor</i>
SCWR	<i>Supercritical-Water-Cooled Reactor</i>
SFR	<i>Sodium-Cooled Fast Reactor</i>
SRV	<i>Safety Relief Valve</i>
SRVD	<i>Safety Relief Valve Discharge</i>
SSE	<i>Safe Shutdown Earthquake</i>
TEPCO	<i>Tokyo Electric Power Company</i>
VHTR	<i>Very-High-Temperature Reactor</i>

# ***1 Motivación y Objetivos***

---



## ***1.1 Motivación***

La producción de energía y el desarrollo de nuevas tecnologías son factores básicos para el desarrollo de la sociedad actual. Hay que procurar obtener el máximo rendimiento energético con el menor impacto medioambiental posible, en definitiva, tener siempre presente el desarrollo sostenible. Teniendo en cuenta los anteriores aspectos, la energía nuclear es una fuente de energía que hay que considerar en el futuro.

En la producción de energía eléctrica mediante centrales nucleares se están llevando a cabo enormes avances tecnológicos, donde actualmente se están desarrollando los reactores nucleares de Generación IV. Estos reactores tienen mayor capacidad de producción de energía con sistemas más seguros y eficaces, como es el caso del reactor nuclear ESBWR (Economic Simplified Boiling Water Reactor), del cual se estudiará en el presente proyecto uno de sus componentes.

Al hablar de energía nuclear no puede pasar desapercibido el concepto de la seguridad. La seguridad nuclear es sin duda el principal factor que hay que tener en cuenta a la hora del desarrollo de las centrales nucleares. Por ello, hay una motivación añadida en este proyecto, y es que además de estar dentro de un campo como el de la energía nuclear, se añade el poder estudiar y mejorar un importante elemento del sistema de seguridad de la central. Se ha procedido al cálculo de estructuras de responsabilidad, como es el caso del condensador PCCS, Passive Containment Cooling System,

## ***1.2 Objetivos***

El objetivo fundamental ha consistido en la comprobación estructural del condensador PCCS, frente a una serie de cargas a partir de una geometría impuesta por el cliente. Por lo tanto no se procede al diseño en sí del condensador, aunque como se comprueba más adelante, se incorpora en el sistema una estructura que minora la respuesta del condensador frente a las cargas dinámicas.

El condensador PCCS deberá cumplir una serie de requerimientos impuestos por el cliente, para distintos niveles de operación de la central nuclear. Los valores de tensión admisibles serán obtenidos a partir del código ASME. En cambio, los valores de tensión generados por los niveles de operación serán obtenidos de dos formas:

- la primera corresponderá a los análisis estáticos para las cargas a presión de diseño y test, en los que se emplearán las expresiones obtenidas mediante el código ASME.
- para los estudios de cargas térmicas, cargas dinámicas y peso propio se recurrirá al cálculo mediante elementos finitos. En este análisis se incluyen los demás niveles de operación (desde el A, hasta el D).

En el proyecto no se ha tenido en cuenta la posible contribución de tensiones generadas por estados transitorios de presión y temperatura, así como el estudio de soldaduras o los anclajes a la contención.

## ***2 Antecedentes***

---

## **2.1 Suministros de Energía**

La energía se ha convertido en un factor fundamental e imprescindible para el desarrollo de la sociedad. Se hace indispensable asegurar su aprovisionamiento en el presente y en el futuro, tanto desde el punto de vista de la disponibilidad como del punto de vista económico. Por lo tanto, para garantizar el suministro eléctrico hay que mantener las puertas abiertas a diversas formas de generación, tecnologías y combustibles sin descartar las innovaciones que puedan desarrollarse.

Los siguientes aspectos son fundamentales para poder garantizar el suministro eléctrico desde el punto de vista de la generación:

- Sobrecapacidad suficiente vs. Incremento de la demanda.
- Diversificación de fuentes: geográfica y por tecnologías
- Autoabastecimiento energético.
- Estabilidad y competitividad de los costes.
- Estabilidad del precio a medio y largo plazo.
- Defensa frente a la volatilidad de los precios de las materias primas energéticas.
- Compatibilidad con las exigencias medioambientales: desarrollo sostenible y Cumplimiento del Protocolo de Kioto.
- Mantenimiento de las capacidades nacionales: I+D y capacidades tecnológicas.

La política energética de muchos países se centra en disponer de fuentes de energía que puedan evitar la dependencia de un suministro externo en la mayor medida posible. Una alta dependencia puede acarrear riesgos económicos, sociales, ecológicos y físicos. Esto ocurre en la Unión Europea y en mayor medida en España. La Unión Europea cubre sus necesidades energéticas en un 50% con productos importados (45% del petróleo importado proviene de Oriente Medio y el 40% de las importaciones de gas natural de Rusia), y si no se pone remedio se prevé que en unos 20 años se incremente hasta el 70%. En España casi el 80% de la energía primaria consumida es importada del exterior. Estas importaciones de energía suponen el 6% del total de importaciones de la Unión Europea.

Debido a esta problemática, en el Libro Verde de la Comisión Europea, titulado “Hacia una estrategia europea de seguridad del abastecimiento energético”, se refleja la necesidad que tiene la Unión Europea de solucionar el problema de la dependencia energética, adoptando estrategias de seguridad del abastecimiento energético reduciendo el riesgo de la dependencia externa.

Una solución para disminuir la dependencia energética es la “*Energía Nuclear*”. Las centrales nucleares proporcionan un gran suministro eléctrico con una potencia instalada en la central muy baja, de forma continua y permanente, asegurando el suministro con cualquier condición ambiental.

## ***2.2 La Energía Nuclear***

### ***2.2.1 Introducción a la energía nuclear***

La aplicación principal de la energía nuclear es la producción de electricidad en las centrales nucleares. Debido a la fusión del uranio, la energía de las radiaciones emitidas produce una gran cantidad de calor que se aprovecha para la obtención de energía eléctrica.

#### ***2.2.1.1 Radiactividad***

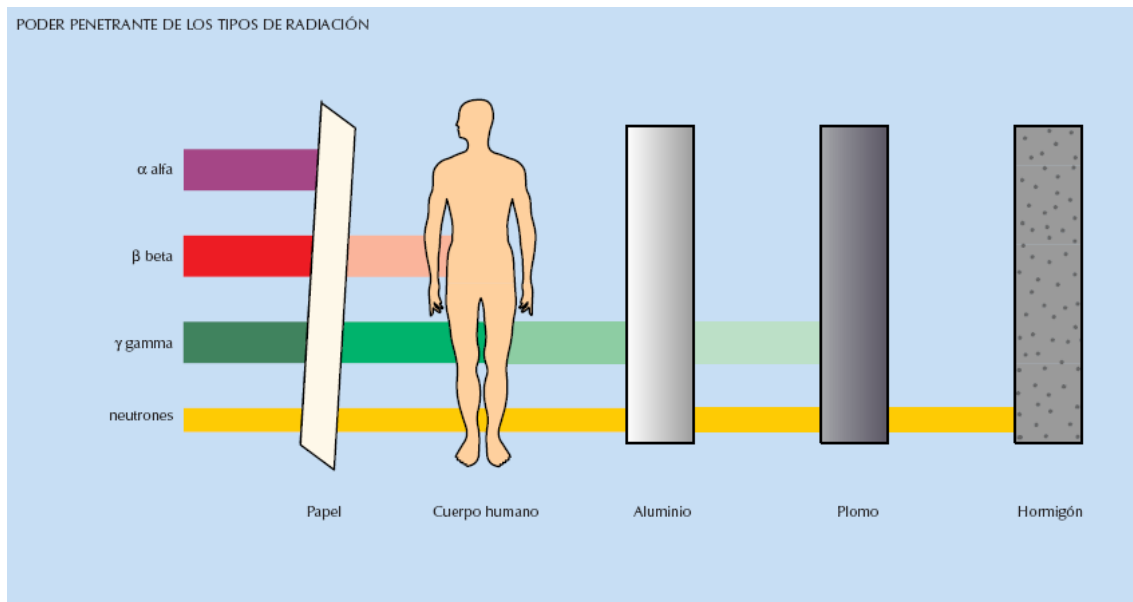
Las radiaciones emitidas se producen por el fenómeno de la *radiactividad*, propiedad de algunos elementos que se encuentran en la naturaleza (uranio, torio, etc.), que consiste en la emisión de radiaciones sin excitación previa. Fue descubierta por Henry A. Becquerel en 1896, al observar que el uranio emitía radiación de forma espontánea.

La emisión de radiaciones ionizantes es una característica de muchos átomos en cuyo núcleo el número de neutrones es escaso o excesivo, lo que les hace inestables. Estos átomos son llamados radiactivos.

Otro factor importante es la intensidad con la que se desintegra una sustancia radiactiva, y se denomina actividad, expresa el número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo.

La emisión de radiaciones puede ser de cuatro tipos:

- Alfa: con capacidad limitada de penetración en la materia pero con mucha intensidad energética
- Beta: algo más penetrante pero menos intensa
- Gamma: muy penetrante
- Neutrónica: también muy penetrante



*Figura 1. Propagación de las radiaciones.*

Las radiaciones naturales proceden de los procesos nucleares que tienen lugar en el exterior de la Tierra, las emitidas por las sustancias radiactivas presentes en la corteza terrestre (y en proporciones distintas en función de la geografía) y la procedente de los isótopos radiactivos contenidos en los organismos vivos. Por lo tanto la radiación y radiactividad forman parte de la naturaleza y de nuestro propio cuerpo, ya que proceden de las materias existentes en el universo.

Por otro lado, existe otro tipo de radiación, y es la radiación artificial, es decir, radiaciones que provienen de sustancias radiactivas que no existen en la naturaleza. Este fenómeno fue descubierto por el matrimonio Joliot-Curie (recibieron el Premio Nobel de Química en 1935 por ello), cuando observaron que una lámina de aluminio se volvía radiactiva cuando era interceptada por un haz de rayos alfa. Estas radiaciones artificiales provienen principalmente de exploraciones radiológicas con fines médicos, las televisiones en color, los viajes en avión, las emisiones de las centrales térmicas de carbón cuyos humos contienen isótopos radiactivos y las instalaciones nucleares.

Debido al gran impacto que estas radiaciones tienen en las personas, se hace necesario que las centrales nucleares estén dotadas de una gran tecnología, sean altamente controladas y sometidas a organismos nacionales e internacionales para su regulación, para lograr así unas dosis de radiación muy bajas, siendo prácticamente nulas para el público en general y muy baja y controlada en el personal de la central.

### 2.2.1.2 Reacciones nucleares

#### Fisión Nuclear

La fisión nuclear es una reacción en la cual al hacer incidir neutrones sobre un núcleo pesado, éste se divide en dos núcleos, liberando una gran cantidad de energía y emitiendo dos o tres neutrones. Fue descubierta por O. Hahn y F. Strassmann en 1938, al detectar elementos de pequeña masa en una muestra de uranio puro irradiada con neutrones.

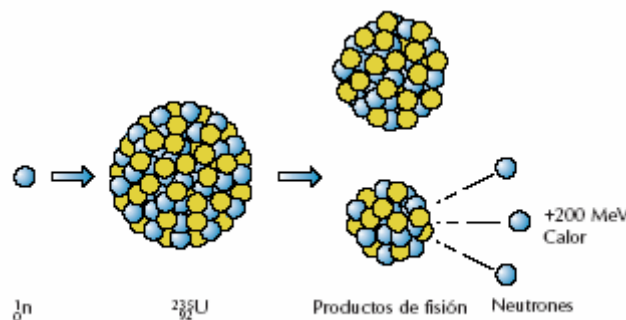
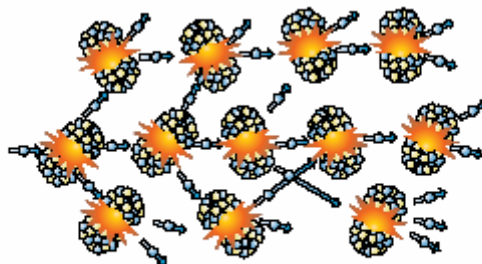


Figura 2. Reacción de fisión nuclear.

El proceso de fisión es posible por la inestabilidad que tienen los núcleos de algunos isótopos de elementos químicos de alto número atómico (como el uranio 235), debido a la relación existente entre el número de partículas de carga eléctrica positiva (protones) y el número de partículas nucleares de dichos núcleos (protones y neutrones), bastando una pequeña cantidad de energía como la que transporta el neutrón que colisiona con el núcleo, para que pueda producirse la reacción de fisión.

A su vez, los neutrones emitidos en la fisión de un núcleo pueden ocasionar nuevas fisiones al interactuar con nuevos núcleos fisionables que emitirán nuevos neutrones y así sucesivamente. A este efecto multiplicador se le conoce con el nombre de reacción en cadena. La primera reacción de fisión en cadena sostenida la consiguió Enrico Fermi, en 1942, en la Universidad de Chicago. Cuando se consigue que sólo un neutrón de los liberados produzca una fisión posterior, el número de fisiones que tienen lugar por segundo es constante y la reacción está controlada. En este principio están basados los reactores nucleares.



La reacción en cadena continúa al chocar los neutrones libres con otros núcleos, que se fisionan y así sucesivamente.

*Figura 3. Reacción en cadena de la fisión nuclear.*

### Fusión Nuclear

La fusión nuclear es la reacción en la que dos núcleos muy ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos, se unen para formar un núcleo más pesado y estable, con gran desprendimiento de energía.

Para que se produzca la fusión es necesario que los núcleos cargados positivamente se aproximen venciendo las fuerzas electrostáticas de repulsión. La energía cinética



necesaria para que los núcleos que reaccionan venzan las interacciones se puede suministrar en forma de energía térmica o utilizando un acelerador de partículas.

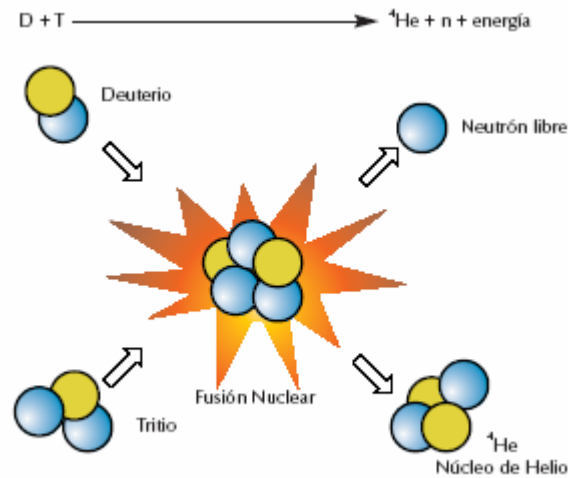


Figura 4. Reacción de fusión nuclear.

Para que tengan lugar estas reacciones, es necesario generar un plasma mediante un calentamiento que debe confinarse durante el mayor tiempo posible para que se produzca el máximo número de reacciones. La ganancia energética de la fusión consiste en que la energía necesaria para calentar y confinar el plasma sea menos que la energía liberada por las reacciones de fusión.

Para conseguir estas reacciones en el laboratorio se emplean dos métodos:

- El confinamiento magnético por la aplicación de fuertes campos magnéticos exteriores, que permiten que los iones choquen entre sí debido a la energía cinética alcanzada por las altas temperaturas.
- El confinamiento inercial, que aprovecha la energía procedente de un láser o un haz de iones para obtener una elevada compresión de pequeñas cantidades de materia fusionable, consiguiendo, en un tiempo muy pequeño, las elevadas temperaturas necesarias para conseguir la fusión.

### 2.2.1.3 Obtención del combustible

El combustible empleado por las centrales nucleares, como ya se ha visto en la fisión nuclear, es el uranio. Este elemento requiere de una serie de procesos y tratamientos antes de ser empleado en la central nuclear que se conocen como *Primera Parte del Ciclo del Combustible*. Esta primera etapa abarca desde la exploración, minería, producción del uranio y su posterior tratamiento para su uso en las centrales nucleares.

El uranio es un metal que se encuentra en diferentes minerales de la Tierra, siendo unas 500 veces más pesado que el oro. En la corteza terrestre alcanza una media de 2,7 gramos por tonelada.

Los yacimientos más importantes se encuentran en Australia, Canadá y Rusia. Actualmente en España no hay ninguna mina de uranio en explotación comercial. De las minas se extrae la mayor parte del mineral de uranio, aunque también se obtiene como subproducto de la explotación del cobre, oro o fosfato.

Una vez que se ha extraído el mineral de uranio se procede a la fabricación del concentrado de uranio, triturando el mineral y extrayendo el uranio por procesos químicos. Este uranio dará lugar a un sólido llamado “yellow cake” o pastel amarillo y contendrá una concentración del 70-80% de uranio. Este producto aún no se puede introducir como combustible en el reactor nuclear, ya que sólo contiene 0,7% de uranio <sup>235</sup> fisionable, por lo tanto hay que someterlo al proceso conocido como *enriquecimiento*. En esta etapa se consigue elevar la concentración hasta 3-5% mediante la separación de los isótopos de uranio <sup>235</sup> y <sup>238</sup>, mediante la difusión gaseosa y la centrifugación, que son los principales métodos de enriquecimiento. En España la etapa de enriquecimiento se hace fuera del país, ya que no hay ninguna instalación que la realice.

Una vez enriquecido, se transforma en polvo de dióxido de uranio y después en pastillas de naturaleza cerámica sinterizadas a unos 1700 °C. Estas pastillas son cilíndricas de un 1 cm de altura por un 1 cm de diámetro y 5 gramos de peso aproximadamente, y se obtiene la misma energía equivalente que 810 kilos de carbón, 565 litros de petróleo ó 480 metros cúbicos de gas natural. Las pastillas se introducen en una varilla de zircaloy

(aleación de circonio y estaño) herméticamente cerrada, y disponen de un muelle en la parte superior para mantener la columna de pastillas en la posición deseada. Estas varillas se agrupan en haces y forman lo que se denomina el *elemento combustible*, que será introducido en el reactor para que se lleven a cabo las reacciones nucleares.

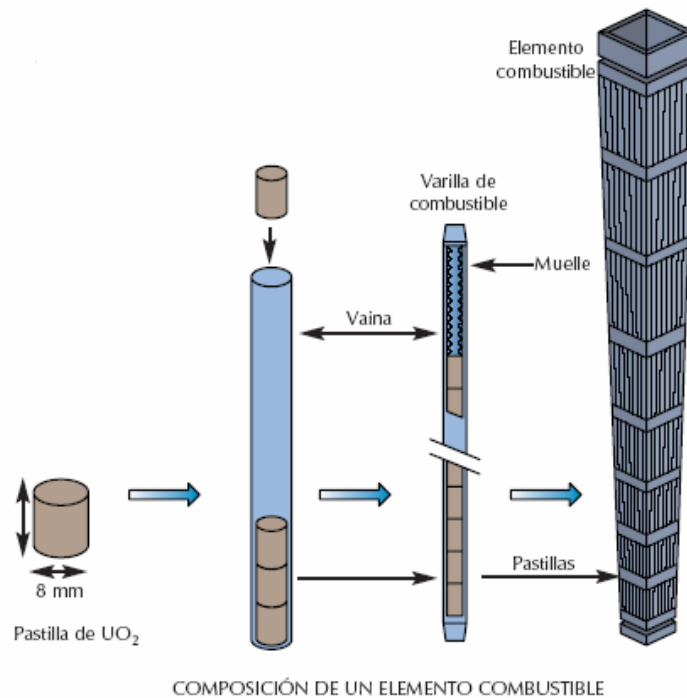


Figura 5. Elemento combustible.

#### 2.2.1.4 Residuos nucleares

La industria nuclear genera residuos y algunos de los cuales son radiactivos. Los residuos radiactivos son aquellos materiales para los que no está previsto un uso posterior, y que contienen o están contaminados con radionucleidos en concentraciones superiores a unos niveles máximos establecidos por las autoridades reguladoras competentes.

La producción de electricidad en centrales nucleares genera, hablando en términos de actividad y no de volumen, la mayor cantidad de residuos, incluyendo los residuos que derivan de la obtención del combustible nuclear (minería, fabricación de elementos, etc.) así como el desmantelamiento y cierre de las instalaciones.

Por lo tanto, la generación de residuos es un punto muy importante a la hora de hablar de centrales nucleares, y se necesita un buen control y almacenamiento de los mismos. De cara a su almacenamiento, los residuos radiactivos se clasifican en residuos de baja y media actividad y residuos de alta actividad.

### Residuos de baja y media actividad

Contienen isótopos beta y/o gamma, su periodo de semidesintegración es inferior o igual a 30 años, y no desprende calor. Estos residuos lo componen herramientas o materiales utilizados en algunas zonas de las centrales nucleares, material médico diverso utilizado en determinadas áreas de hospitales, etc.

Llegan en bidones metálicos, que una vez acondicionados con una matriz de hormigón, se introducen en contenedores cúbicos también de hormigón. A su vez estos contenedores se tapan y se rellenan con mortero para inmovilizar su contenido. Finalmente se sitúan en celdas de almacenamiento con capacidad para unos 300 contenedores. El modelo básico de almacenamiento de estos residuos puede observarse la Figura 6.



*Figura 6. Almacén de residuos nucleares.*

En España, todos los residuos radiactivos de baja y media actividad se almacenan en el Centro de Almacenamiento de El Cabril, situado en Sierra Abarran, dentro del término municipal de Hornachuelos en la provincia de Córdoba, en funcionamiento desde 1992.

### Residuos de alta actividad

Contienen isótopos emisores alfa y su periodo de semidesintegración es superior a 30 años, y pueden desprender calor. Lo componen fundamentalmente combustible gastado de las centrales nucleares, en caso de no reprocesamiento del mismo, cuando se realiza la parada del reactor para la recarga de combustible.

Los elementos combustibles ya gastados se extraen y son transportados hasta la piscina, de hormigón con paredes de acero inoxidable, destinada a su almacenamiento temporal dentro de la misma instalación, colocándose en unos batidores metálicos ubicados en el fondo, como puede observarse en la Figura 7. Se almacenan bajo agua para que disminuya su carga térmica y su actividad. La utilización de agua, hormigón y acero se debe a su capacidad de blindaje para las radiaciones ionizantes emitidas por estos elementos, permitiendo la manipulación del combustible de forma segura, sin riesgo de contaminación.



*Figura 7. Piscinas de almacenamiento.*

También se depositan en almacenamientos temporales en seco en el propio emplazamiento, donde los elementos combustibles se colocan en contenedores especiales como complemento a las piscinas y como paso intermedio antes de su almacenamiento definitivo. De este modo, se permite la ampliación de la capacidad de

almacenamiento en el emplazamiento de forma segura, flexible y progresiva. Además, la manipulación del combustible irradiado se minimiza al utilizar un mismo contenedor para almacenamiento y transporte. (Ver Figura 8).



*Figura 8. Contenedores de residuos nucleares.*

### ***2.2.2 La energía nuclear como alternativa energética***

La disponibilidad de combustible en el sector nuclear está asegurada, a diferencia de los combustibles fósiles, por:

- Reservas importantes de uranio a costes iguales o muy próximos a los actuales del mercado.
- Mercado con una relación oferta-demanda favorable para el consumidor.
- Países suministradores de uranio muy estables políticamente (Canadá, Australia, etc.).
- Almacenamiento mucho más barato que para los combustibles fósiles, lo que permite un importante grado de independencia.

Se mejora el equilibrio entre exportaciones e importaciones ya que el coste del combustible nuclear por unidad de energía producida es muy inferior al de los combustibles fósiles, por lo que el coste de las importaciones se reduce.

Por otra parte las reservas nucleares proporcionan disponibilidad de combustible a medio y largo plazo, mientras que las reservas de otros combustibles tienen horizontes

muy cercanos de limitaciones de suministro y aún más cercanos de incrementos de costes, lo que dificulta su adquisición.

Otro factor favorable para la energía nuclear es la estabilidad de precios, ya que la composición del coste del kWh (utilizando valores medios y a nivel internacional) para el caso del gas incorpora aproximadamente un 70% por el coste del combustible, en cambio en la energía nuclear rondaría el 19%. Por lo tanto, una subida en los precios del combustible afectaría muy seriamente al coste del kWh de gas, mientras que en el caso de la energía nuclear influiría en menor grado.

También hay que tener en cuenta que el precio de mercado del kWh de la energía nuclear es un dato más “real” que el de otras energías, ya que incorpora en sus costes la mayor parte de las externalidades, como el desmantelamiento de centrales, tratamiento de residuos, emisiones de gases y líquidos, etc. Por el contrario, en otras fuentes de energía, como puede ser el caso de las centrales térmicas convencionales, no incorporan aún el efecto de sus emisiones, en particular de las que producen el calentamiento del planeta (por lo que el coste tiene un mayor grado de variabilidad a corto plazo).

COSTE DE PRODUCCIÓN ELÉCTRICA INCLUYENDO EXTERNALIDADES	
Carbón	7
Petróleo	6
Gas	3,9
Eólica	6,2
Hidráulica	4,7
Nuclear	3,5

Figura 9. Coste de producción.

Todas las fuentes de energía deben ser utilizadas de forma que respeten la *salud humana* y el *medio ambiente*. Con respecto a las emisiones de gases las centrales nucleares no producen CO<sub>2</sub>, evitando la emisión de más de 2500 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a nivel mundial, cantidad equivalente al 8% del total de emisiones en todas las actividades humanas. En la Unión Europea, la producción de origen nuclear evita la emisión de 800 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> cada año, cifra equivalente al mismo

ahorro de emisiones que si se retiraran todos los coches que circulan por las calles de Europa. En España, evita anualmente la emisión de unos 60 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalente a parar el 75% de los vehículos que circulan por el país.

Hay que tener en cuenta otros factores que afecten a la naturaleza como es el caso del uso del suelo. Sus residuos sólidos son de un volumen muy bajo, del orden del 0,05% del volumen total de los residuos industriales generados en España. Los residuos están debidamente confinados y controlados en todo momento por instituciones oficiales. El uso del suelo, bien cada vez más escaso, presenta, como puede verse a continuación, diferencias espectaculares entre unas y otras plantas energéticas.

USO DEL SUELO	
Uso comparativo del suelo con diferentes fuentes energéticas para una central eléctrica de 1.000 MW de potencia	
NUCLEAR	1-4 km <sup>2</sup>
SOLAR	20-50 km <sup>2</sup>
EÓLICA	50-150 km <sup>2</sup>
BIOMASA	4.000-6.000 km <sup>2</sup>

*Figura 10. Uso del suelo.*

Por otro lado, el coste a lo largo de toda la operación de una central nuclear tiene una parte dedicada a la inversión del 57% aproximadamente, frente al 22% de las centrales de ciclo combinado. De este modo, en el caso de las centrales nucleares, a través de la inversión se potencia la presencia de la industria y se fomenta el empleo.

Dado el carácter de tecnología punta de la energía nuclear, los conocimientos, avances e I+D en campos como materiales especiales, nuevos equipos, nuevos métodos y técnicas, etc., se convierten en patrimonio del conjunto del país y se posibilita su aplicación en diversas áreas de la industria.

A continuación se muestran unos gráficos comparativos de los costes de generación de distintas fuentes de generación de energía eléctrica.



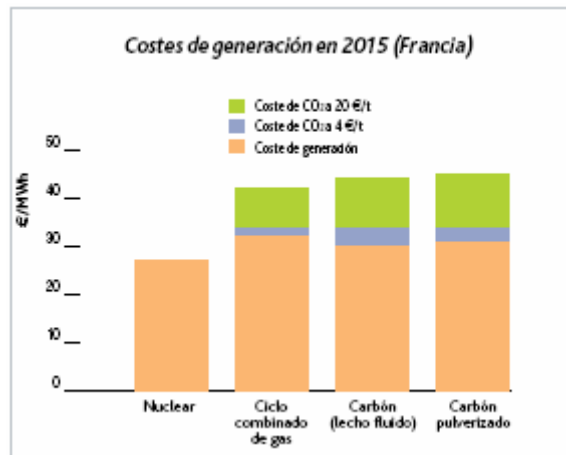


Figura 11. Coste de generación en el futuro (Francia).

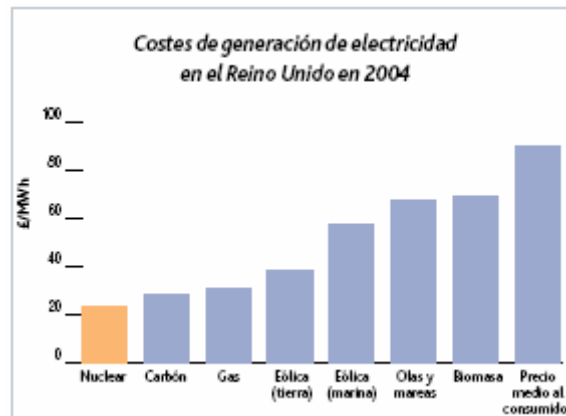


Figura 12. Coste de generación en el Reino Unido.

Los tres objetivos fundamentales a la hora de desarrollar una buena política energética son: competitividad económica global, la seguridad en el aprovisionamiento de las fuentes primarias de energía y la protección del medio ambiente. Por lo tanto, se puede decir que la energía nuclear es una excelente alternativa.

### 2.3 Centrales Nucleares

De todos los tipos de centrales nucleares destacan las centrales nucleares que emplean agua ligera como refrigerante y moderador. Estas centrales han experimentado un gran desarrollo, y los dos tipos de reactores nucleares más destacados son: los de agua a presión, o BWR (Boiling Water Reactor) y los de agua en ebullición, o PWR

(Pressurized Water Reactor). Entre estos dos tipos se incluyen el 90% de los reactores comerciales operativos en el mundo y a los que pertenecen el total de las centrales nucleares españolas.

### 2.3.1 Centrales de agua en ebullición, BWR

En este tipo de reactores, el principio de funcionamiento reside en que el agua que refrigera el combustible del reactor cambia de fase, hierve a su paso por el reactor, a una presión de unas 70 atmósferas. El vapor generado pasa por unos sistemas de separadores de agua y de secado y posteriormente a la turbina, sin necesidad de utilizar un generador de vapor (como sucede en el caso de reactores PWR). La vasija incorpora unos sistemas de recirculación de agua mediante bombas para garantizar una adecuada refrigeración del reactor. La Figura 13 nos muestra un esquema del funcionamiento básico de los reactores BWR.

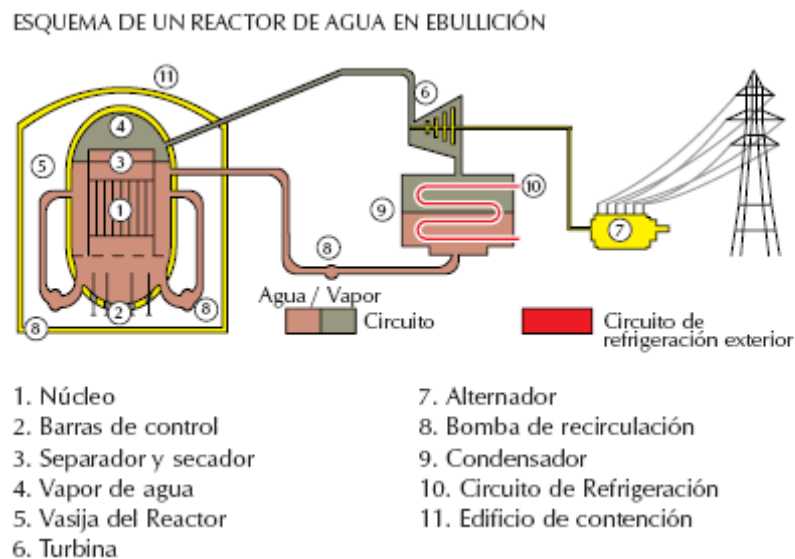


Figura 13. Esquema de un reactor BWR.

Debido a que no introduce elementos adicionales en el proceso de generación de vapor ya que es el propio reactor que actúa como caldera para la producción de calor, se puede decir, que el reactor de agua en ebullición se asemeja en gran medida a la concepción clásica de una central térmica.

En la vasija de un BWR (Fig. 14) existe una recirculación de agua líquida (no evaporada) hacia la parte anular de la misma, alrededor del reactor, donde se mezcla con la proveniente del condensado. Esta mezcla es succionada por una corriente formada con el agua de la parte inferior de dicho espacio anular, entrando todo ello en el colector inferior, desde el cual penetra ascendiendo en el núcleo del reactor y entrando en ebullición, lamiendo verticalmente las vainas de combustible. La proporción de vapor es de aproximadamente el 13%, y tras su expansión por la turbina, se condensa y se restituye de nuevo a la vasija. Por otro lado, el 87% de agua líquida se recircula hacia el espacio anular exterior.

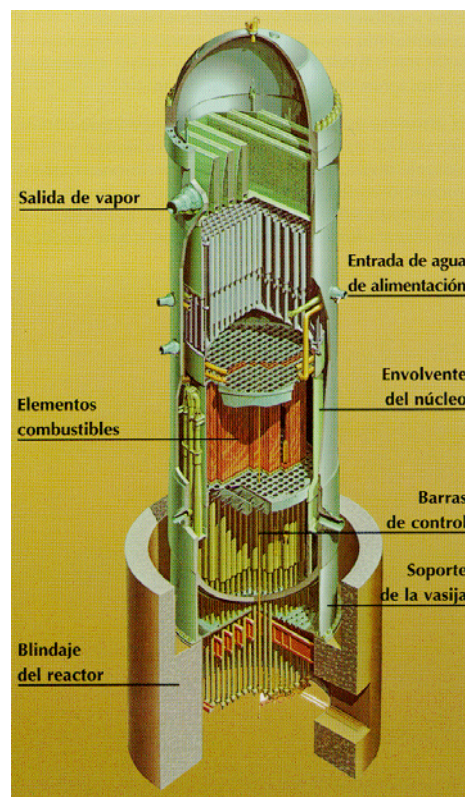


Figura 14. Vasija de un reactor BWR.

Mediante la variación de la potencia impulsora de las bombas de recirculación se pueden modificar las condiciones de paso del refrigerante a través del reactor. Estas bombas son las que producen las corrientes de aspiración del agua que entra en el colector inferior y que, en función de la impulsión recibida, proporcionará diversos caudales para la refrigeración del núcleo. Al variar estas condiciones, nos permite también variar la potencia suministrada por el reactor, sin necesidad de manipular las barras de control. Esto es debido a que la potencia es función del número de fisiones

producidas. Al aumentar o disminuir el caudal, disminuye o aumenta el número de burbujas en ebullición generadas, por lo que al disminuir la cantidad de burbujas aumenta la moderación de neutrones, y esto se traduce en un aumento de las fisiones del sistema, es decir, un aumento de la potencia.

Otra forma de variar la potencia del reactor es mediante el movimiento de las barras de control mediante un sistema hidráulico, maniobrado desde el exterior. Estas barras de control presentan una particularidad en estas centrales, y se debe a su colocación en el reactor. Están situadas en la parte inferior de la vasija debido a que el acceso al núcleo del reactor es imposible desde la parte superior de la vasija por la presencia de los separadores y secadores de vapor.

El  $UO_2$  enriquecido es el combustible de este tipo de reactores y se encuentra envainado en tubos de aleaciones de zirconio, formando los elementos combustibles (ya descritos en apartados anteriores).

El sistema de contención es otra de las características principales de los reactores BWR. Consta de un edificio de hormigón que constituye el blindaje biológico y dentro de él, la contención propiamente dicha, que es una construcción de acero de forma cilíndrica coronada por una figura semicircular. La función de este edificio metálico es retener a los posibles productos de fisión en caso de accidente, y dentro de él se alberga la vasija, las bombas de circulación, las válvulas de seguridad, el pozo seco, la piscina de relajación, etc.

La piscina de relajación es un gran depósito de condensación para las descargas de vapor, que proviene de las válvulas de seguridad, durante los transitorios. Es también un sumidero de calor y una fuente de agua para la refrigeración del núcleo en caso de accidente de pérdida de refrigerante del reactor.

### ***2.3.2 Centrales de agua a presión, PWR***

Al contrario que en los reactores BWR, donde el vapor se transfiere de forma directa del reactor a la turbina, en los PWR se necesita un generador de vapor.

En el reactor de agua a presión el agua de refrigeración, que circula a gran presión, lleva la energía desprendida en el núcleo del reactor a un intercambiador de calor, donde se genera el vapor que alimentará al turbo-grupo. La característica básica es que el agua, que actúa como refrigerante y moderador del reactor, permanece líquida a su paso por el reactor. Debido a este diseño, el vapor que acciona la turbina tiene que ser generado en un componente diferente, denominado generador de vapor. Este circuito está a menos presión que la del circuito primario, entendiéndose por primario el conjunto de tuberías y componentes a través de los cuales pasa el refrigerante. Las condiciones de operación del refrigerante son de 150 atmósferas y 320 °C a la potencia nominal. La Figura 15 muestra un sencillo esquema de las centrales PWR.

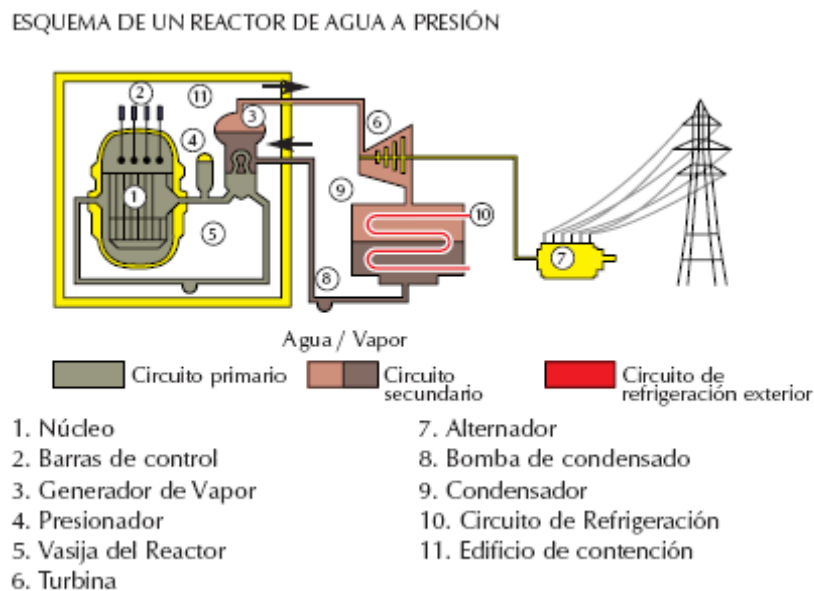


Figura 15. Esquema de un reactor PWR.

En la Figura 16 se observa el conjunto de elementos que componen el circuito primario. En el caso de los grandes reactores de potencia unitaria de 3000 MW térmicos, equivalente a 1000 MW eléctricos, está distribuido en tres o cuatro lazos que pasan por el propio reactor.

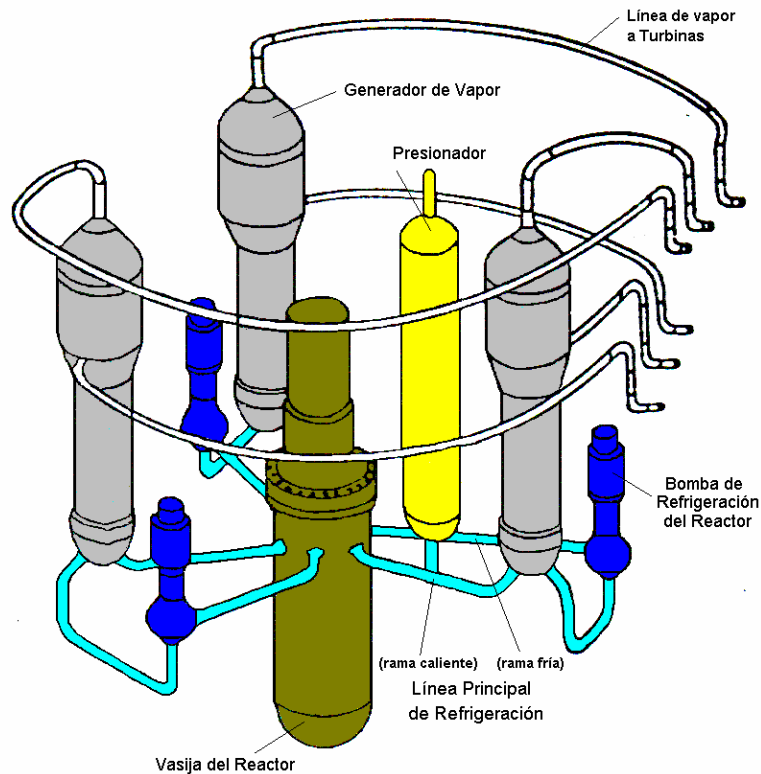


Figura 16. Circuito primario de una central nuclear PWR.

Cada lazo tiene un generador de vapor y una bomba de recirculación. En el generador de vapor, el agua del primario cede su energía al agua del secundario, que entra en ebullición. El agua enfriada del primario retorna del generador de vapor al reactor mediante la impulsión de las bombas. Un elemento adicional y que sólo aparece en una de las ramas es el presionador, encargado de regular la presión de trabajo y controlar el nivel del circuito primario.

El ciclo termodinámico se da lugar en el circuito secundario, donde se encuentran el generador de vapor (foco caliente), la turbina, el condensador, las bombas de condensado, y circuitos de calentadores y bombas de agua de alimentación, que llevan el fluido hasta las condiciones de trabajo. El generador de vapor consiste en un intercambiador de vapor, en el cual, el secundario sufre cambio de fase. La configuración más adoptada para el diseño del intercambiador es la de introducir el agua caliente del primario por la parte interna de unos tubos de transmisión, por cuyo exterior viaja el fluido secundario que se transforma en vapor, el cual tiene un mayor volumen específico.

El reactor se encuentra inserto en una vasija de acero con un espesor de 25-30 cm aproximadamente y unas 400 Tm de peso. Está provista de una tapa unida por una brida a la vasija que puede retirarse para proceder a la recarga de combustible.

El combustible ocupa el lugar inferior del espacio hueco de la vasija, mientras que en la parte superior se encuentran localizados los elementos guía de las barras de control. El refrigerante, mediante las bombas de recirculación, entra en la vasija del reactor por las bocas conectadas a las ramas frías del circuito primario. Una vez en la vasija, y tras bajar por la zona periférica del anillo de la vasija, llega a su espacio inferior y a partir de ahí sube verticalmente lamiendo las vainas del combustible, procediendo a su refrigeración. El refrigerante sale por la parte superior del núcleo, y se conduce a los generadores de vapor a través de unas tuberías.

El reactor se controla mediante las barras de control y el ácido bórico disuelto en el refrigerante. Ambos son buenos absorbentes de neutrones y tienden a hacer menos reactivo el núcleo, con lo que la potencia del reactor dependerá de la concentración de boro y la longitud de las barras de control, llegando a ser posible su parada.

Los elementos combustibles han de ser cambiados al final de cada ciclo de operación, que dura entre 12 y 24 meses, extrayendo los más gastados e introduciendo los elementos nuevos, también denominados *frescos*.

### **2.3.3 Evolución tecnológica de los reactores. Generaciones.**

Desde que en los años 40 Fermi lograra en Chicago la primera reacción de fisión en cadena, los reactores han estado en continua evolución. Esta evolución se puede agrupar en determinadas etapas, denominadas generaciones. La Figura 17 muestra un gráfico donde se aprecia la ubicación de cada generación en el tiempo.

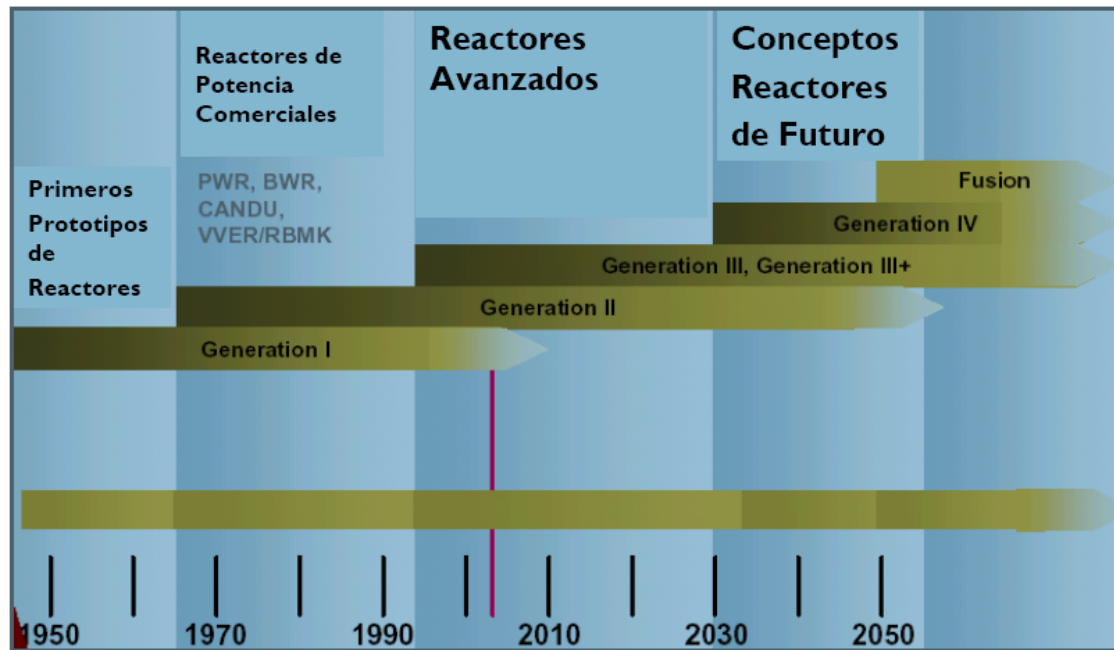


Figura 17. Evolución cronológica de las generaciones de reactores.

### Generaciones I y II.

A la generación I pertenecen los primeros prototipos para uso comercial, construidos en Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Francia y la entonces Unión Soviética (a principio de los 50) y, poco después los demostradores, algo mayores, del orden de 500 MWe. Los suministradores nucleares mejoraron sus diseños, ofreciendo reactores de mayor potencia, combustible evolucionado, sistemas modernos de control y seguridad, redundancia de equipos y otras características que los hacían más seguros y fáciles de operar. Estos reactores constituyen la Generación II y a ella pertenecen casi todas las centrales actualmente en operación. Aparecieron en la década de los 70.

Los titulares de las centrales son empresas responsables, públicas o privadas, que actúan en marcos regulatorios consolidados, y las centrales alcanzan rendimientos y factores de carga excelentes. Esta generación comprende más de 400 unidades en todo el mundo, con un total de más de 365 GWe. A esta generación pertenecen las centrales nucleares españolas.

Tras los accidentes de Three Mile Island y Chernobil se produjo una gran disminución de la actividad nuclear, debido al impacto en una opinión pública desinformada,



desorientada e influida por las organizaciones antinucleares. Otro factor influyente derivaba de los problemas económicos, como el alargamiento de los plazos de construcción por litigios y moratorias combinado todo esto en un escenario mundial de crisis económica, una gran inflación y altos tipos de interés. Por lo que muchas centrales en construcción fueron canceladas y otras sufrieron interrupciones muy costosas.

### Generación III

Para evitar los problemas que habían contribuido al descenso de los años 80 y 90 en varios países se inicio un gran esfuerzo de optimización de la actividad nuclear.

Los organismos reguladores han hecho una importante simplificación de sus requisitos, estableciendo, en lo posible, normas comunes en los distintos países y se ha impuesto un sistema de certificación de normalización, para evitar que se produzcan conflictos posteriores sobre temas básicos de diseño.

Los suministradores, por otro lado, emprendieron un esfuerzo muy intenso de rediseño, incrementando la modularización y sobre todo introduciendo en el diseño modificaciones relacionadas con fuerzas naturales, como la gravedad y la convección natural, funciones antes asignadas a sistemas y componentes activos, como bombas y motores. Con esto se elimina el porcentaje de fallo en el caso de que tengan que actuar estos elementos.

Otros objetivos globales que se han conseguido en los reactores de esta generación son: un aumento de la simplicidad en las centrales, reducciones en las dosis de operación, disminución de la posibilidad de fusión del núcleo (de  $5 \cdot 10^{-5}$  años a  $3 \cdot 10^{-7}$ ), aumentar la disponibilidad y el tiempo de vida de la central a 60 años, alargar el ciclo del combustible y disminuir el volumen de los residuos entre otros.

Se ha conseguido que los reactores resultantes, llamados de Generación III, estén en su mayoría certificados. Constituirán la base de los programas nucleares de los próximos 25-30 años.

A continuación se mostrarán algunos de los reactores que pertenecen a esta generación: los reactores EPR, de agua a presión de unos 1600 MWe, desarrollado por la franco-alemana Areva NP, el ABWR y el ESBWR desarrollados por General Electric, el AP-1000 de Westinghouse y el ACR-700, de agua pesada desarrollado por la canadiense AECL. Actualmente están en construcción dos unidades del EPR de 1600 MWe en Finlandia y Francia; cuatro de ABWR de 1350 MWe funcionan ya en Japón y otros dos están en construcción avanzada en Taiwán.

China iniciará en breve la construcción de cuatro unidades AP-1000 y existen numerosos planes de construcción de reactores de esta generación en varios países. Estados Unidos está realizando el programa más importante, cuya puesta en marcha puede construir la señal de salida para múltiples pedidos en muchos países.

Los últimos avances en los reactores de esta generación se pueden incluir en otra etapa distinta, llamada Generación III+.

#### Generación IV

Aunque para largo plazo se cumplan las necesidades de demanda con los reactores de Generación III, aparecen otras áreas de interés que los anteriores reactores no satisfacen. Y se tiene previsto que se produzca un gran despliegue nuclear que comenzará a partir de 2030, coincidiendo así con el fin de vida útil de numerosas centrales. A estos reactores se les conoce por los reactores de Generación IV.

Las ventajas principales de estos reactores son las siguientes:

- Sostenibilidad en cuanto a la seguridad de suministro a largo plazo, que implica el aprovechamiento integral de los recursos de combustible.
- Capacidad de hacer frente a un gran incremento de la demanda eléctrica sin aumentar las emisiones de gases que producen el efecto invernadero. Al generalizarse el uso del vector hidrógeno en el transporte y del calor para la desalación del agua del mar y aguas salobres.

- No proliferación, se deberá asegurar que en las operaciones que se realicen en la central nuclear no se abra la posibilidad de desviación del plutonio para actividades bélicas.
- Minimización y gestión segura de los residuos radiactivos de alta actividad, incluyendo la separación de actínidos e isótopos de larga vida y su posible transmutación a isótopos de vida más corta, en sistemas híbridos. En los futuros repositorios se llegará, después de unos pocos siglos desde el depósito de los residuos resultantes, a radiotoxicidades semejantes a la del uranio natural.

El desarrollo de estos reactores se lleva a cabo por los programas GIF IV e INPRO, donde colaboran varios países en régimen de cooperación internacional. Estos programas tienen objetivos parecidos y se llevan a cabo mediante un proceso de convergencia para evitar duplicaciones innecesarias.

Los tipos de reactores incluidos en esta generación son los siguientes:

- Reactor Rápido Refrigerado por Sodio (SFR): refrigera el núcleo con sodio líquido mientras que en el circuito secundario emplea agua. Utiliza un ciclo Rankine.
- Reactor Rápido Refrigerado por Aleación de Plomo (LFR): en este caso la refrigeración del núcleo es por convección natural, y utilizará como refrigerante plomo líquido o un eutéctico plomo-bismuto. En el circuito secundario se utiliza helio. En este caso se puede optar por un ciclo Brayton directo o un Rankine indirecto.
- Reactor Rápido Refrigerado por Gas (GFR): el componente empleado para la refrigeración del núcleo es el helio y emplea un ciclo Brayton directo. Pueden alcanzar rendimientos del 48%.
- Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR): reactores refrigerados por helio por lo que se puede emplear un ciclo Brayton directo o un ciclo Rankine indirecto.

Este tipo de reactores también se pueden utilizar en la generación de hidrógeno por ciclos termoquímicos o para la gasificación de carbón.

- Reactor Supercrítico Refrigerado por Agua (SCWR): operan por encima del punto crítico del agua y utilizan un ciclo Rankine, obteniendo un rendimiento entorno al 44%.
- Reactor de Sales Fundidas (MSR): el refrigerante es una mezcla líquida de sodio, zirconio y fluoruros de uranio. Este fluye a través de los canales de grafito del núcleo y el calor generado en la sal es transferido al helio del circuito secundario mediante un intercambiador de calor, empleando un ciclo Brayton directo. Con este tipo de reactor se obtienen unos rendimientos del 44-50%.

Entre estos seis tipos de reactores cabe destacar dos que están más desarrollados actualmente, los SFR y los VHTR.

## **2.4 Central nuclear clase ESBWR**

### **2.4.1 Desarrollo de las centrales de agua en ebullición**

Las centrales nucleares de reactores de agua en ebullición (BWR), al igual que los reactores de agua a presión (PWR), se empezaron a desarrollar en los años 50, debido a los programas llevados a cabo por la Marina de los Estados Unidos sobre los submarinos nucleares. La primera central nuclear BWR que se construyó fue la central de Vallecitos en 1957 (San José, California) y tenía una capacidad de producir 5MWe. Esta central confirmó la validez de las plantas BWR de producir electricidad satisfactoriamente para la red nacional de energía eléctrica. Después le siguió la central Dresden 1 (1960), y así sucesivamente, sufriendo una serie de evoluciones con el fin de lograr la mayor simplicidad.

La simplificación del diseño del BWR se ha producido principalmente en dos áreas claves, en los sistemas del reactor y en el diseño de la contención. Estos cambios se puede observar en la Tabla 1 donde se refleja la evolución cronológica de los BWR.

<b>Tipo de Central</b>	<b>Fecha</b>	<b>Central y Características</b>
BWR/1	1960	Dresden 1 Primera central comercial BWR
BWR/2	1969	Oyster Creek ??? Ciclo directo
BWR/3	1971	Dresden 2 Utilización de la primera bomba de inyección Introdujo mejoras en el ECCS
BWR/4	1972	Vermont Yankee Incremento de la potencia (20%)
BWR/5	1977	Tokai 2 Mejoras en el ECCS Válvula de control de caudal
BWR/6	1978	Cofrentes Sala de control más compacta Sistema de protección de sistemas nucleares sólidos
ABWR	1996	Kashiwazaki-Kariwa 6 Bombas internas del reactor Varillas de control de pequeños desplazamientos Control avanzado, tecnología digital y de fibra óptica Mejoras en el ECCS: alimentadores de alta y baja presión
ESBWR	En proceso	Circulación natural Elementos pasivos del ECCS

*Tabla 1. Evolución cronológica de los reactores BWR.*

El vapor se generaba en el reactor y fluía a un tambor de vapor elevado y a un generador de vapor secundario antes de llegar a la turbina. El primer paso hacia el camino por conseguir lo que se denominó ABWR, se centró en la eliminación del tambor de vapor externo por la introducción de dos mejoras técnicas, el separador de vapor interno y el secador (KRB, 1962). Estas modificaciones y simplificaciones del diseño por innovaciones en la tecnología se repetirían de forma continua durante todo el desarrollo de las centrales BWR.

El primer ciclo directo de gran tamaño de BWR (Oyster Creek) apareció a mediados de los años 60 y se caracterizó por la eliminación de los separadores de vapor y por la utilización de 5 circuitos de recirculación externa. Después, los sistemas del reactor fueron simplificados por la introducción de bombas de inyección internas. Posteriormente estos circuitos de recirculación se redujeron a tan sólo 2, debido a que las bombas de inyección empujaban de forma suficiente al flujo de recirculación. Este cambio apareció por primera vez en la planta BWR/3 Dresden-2.

Al ESBWR, y su predecesor, el SBWR se simplificaron debido a la utilización de una vasija mayor y un núcleo más corto para alcanzar una recirculación natural sin la utilización de ninguna bomba. La Figura 18 ilustra la evolución del diseño del sistema del reactor.

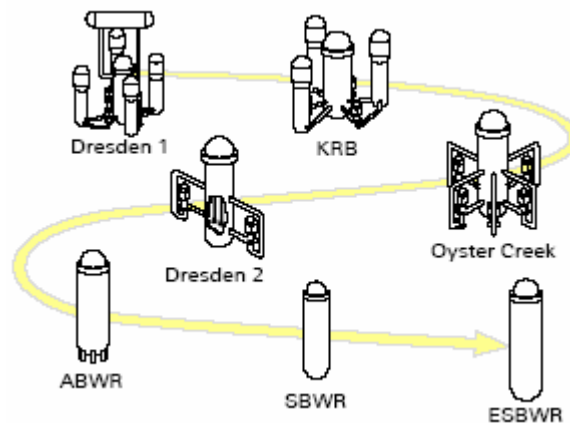


Figura 18. Evolución del diseño del reactor.

La primera contención de un BWR era una estructura esférica y seca. Este tipo de estructuras todavía se utilizan en los diseños de las plantas PWR, en configuraciones esféricas y cilíndricas. Sin embargo, el BWR cambió rápidamente el diseño de la contención de “supresión de presión” por una piscina de relajación, con lo que se consiguieron diversas ventajas. Entre las cuales caben destacar:

- Alta capacidad de transferencia de calor.
- Una presión de diseño más baja.
- Mayor capacidad para realizar una rápida despresurización.

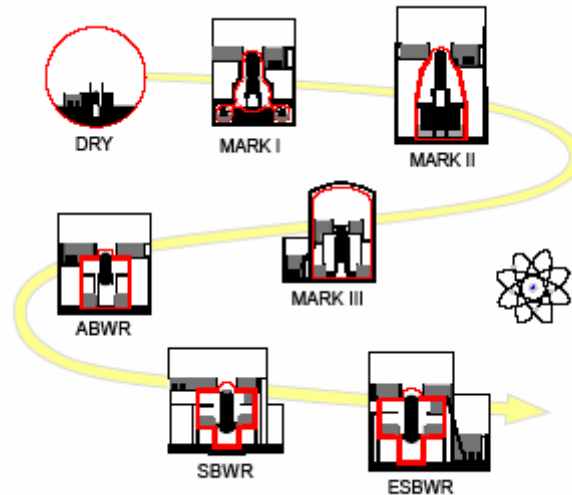
- Permite filtrar y retener los productos generados por la fisión.
- Grandes provisiones para proporcionar agua en caso de accidente.
- Diseño compacto, una mayor simplicidad.

La reducción de la presión de diseño en la contención junto con la eliminación de los circuitos de recirculación externos, permiten que la contención sea más compacta (y, por extensión, el edificio del reactor).

Este nuevo diseño de la contención se utilizó por primera vez en la central Mark I. Tenía una configuración característica, en forma de una bombilla para reforzar concretamente el pozo seco, envolviendo mediante un anillo de acero a la piscina de relajación, ya que está contenía agua a alta presión. El diseño cónico del Mark II es menos complicado, debido sobre todo al aumento del tamaño del pozo seco de la contención, que proporciona mayor espacio para el vapor y la tubería ECCS. El diseño de la contención del Mark III, utilizado en los modelos BWR/6s y algunos BWR/5s, presenta unas mejoras más simplificadas. Su contención tiene una estructura tipo cilíndrico circular recto que permite una construcción más fácil, proporcionando accesos preparados para equipamiento y espacios más amplios para las tareas de mantenimiento. El Mark III incluye otras características como los respiraderos horizontales, para reducir el conjunto de accidentes con pérdida de refrigerantes (LOCA) por cargas dinámicas, y una estructura de acero autoestable para asegurar la estanqueidad.

La contención del ABWR es significativamente más pequeña que la contención del Mark III. Esto se debe a la eliminación de los circuitos de recirculación consiguiendo una contención y un edificio del reactor significativamente más compacto. La estructura está fabricada con un refuerzo de acero, denominado RCCV (refuerzo específico para vasijas de la contención). La contención del ESBWR tiene una similar construcción al del ABWR, pero estrechamente más largo, para poder colocar los sistemas pasivos ECCS.

La Figura 19 ilustra la evolución de la contención de las centrales tipo BWR, desde las primeras versiones hasta los diseños del RCCV ESBWR actuales.



*Figura 19. Evolución de la contención*

Hay 93 centrales BWR actualmente, incluyendo 4 centrales ABWR, operando en todo el mundo, y muchas de ellas están dentro de las mejores centrales nucleares, representadas en la categoría “best of class”. Numerosos países confían en las centrales BWR para satisfacer sus necesidades de consumo eléctrico. Por ejemplo, Japón tiene 32 centrales BWR, que representan 2/3 de su capacidad nuclear instalada. La Compañía de Potencia Eléctrica de Tokio (TEPCO), con 17 centrales nucleares propias y todas ellas del tipo BWR. La estación nuclear Kashiwazaki-Kariwa perteneciente a TEPCO, constituida por 7 grandes centrales BWR, es la mayor en generación de potencia del mundo, con la producción de 8200 MWe. Similarmente, las centrales BWR también predominan en Taiwán y varios países de Europa. En Estados Unidos hay 35 BWR en operación.

Como último dato, decir que la central ABWR es la única central nuclear avanzada en operación o bajo construcción.

### **2.4.2 Desarrollo del ESBWR**

Desde que se produjo el accidente de Three Mile Island en 1979, se ha generado un gran interés en el desarrollo de un reactor con elementos de seguridad pasiva y con una menor dependencia de las acciones de los operarios. También se tomó este nuevo concepto para desarrollar un reactor más sencillo, con menos componentes y que en caso de tener que recurrir a las acciones de seguridad no tuviera que depender de



generadores diesel. General Electric (GE) comenzó un estudio para elaborar un nuevo concepto de BWR, basándose sobre estos principios nació el Reactor de Agua en Ebullición Simplificado (SBWR, Simplified Boiling Water Reactor) a principios de los años 80. Este proyecto contó con el apoyo del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE, Department of Energy), EPRI y numerosos organismos estadounidenses.

Alguna de las mejoras principales que se introdujeron fueron el Sistema de Enfriamiento por Gravedad (GDCCS, Gravity Driven Core Cooling System), las válvulas de despresurización (DPV, Depressurization Valves) y *vacuum breakers* del pozo seco/pozo húmedo a prueba de filtraciones.

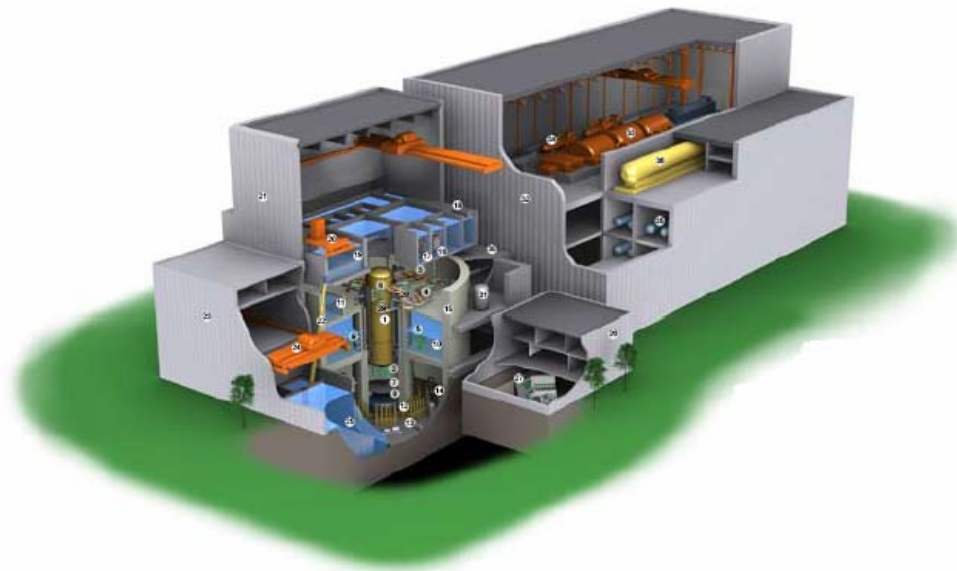
Un equipo internacional desarrolló por completo el diseño, con nuevos componentes y sistemas integrados de verificación, y con una característica muy innovadora, el Sistema Pasivo de Enfriamiento de la Contención (PCCS, Passive Containment Cooling System), que fue adoptado rápidamente en Europa y Japón.

Era necesario un Programa de Certificación del Diseño, con el objetivo de obtener una licencia estandarizada, similar a la obtenida para el ABWR. Sin embargo, como pasó en otros diseños, el desarrollo del programa de certificación se detuvo, ya que el SBWR, con 670 MWe, era demasiado pequeño para ser económicamente competitivo en relación a otras formas de generación eléctrica. Pero GE continuó buscando otras alternativas para conseguir hacer un SBWR atractivo para la generación de potencia. Con apoyo de organismos europeos, el SBWR fue mejorando progresivamente hasta conseguir una potencia de 1550 MWe. Esto fue posible por la utilización de vasijas de presión en el reactor (RPV), cuyas estructura estaba ya establecida en el ABWR, obteniendo a su vez ventajas por la utilización modular de sistemas seguridad pasiva, los Condensadores de Aislamiento (IC, Isolation Condensers) y los PCCS.

El ESBWR ha conseguido unas determinadas simplificaciones debido a la utilización de sistemas de operación innovadores, como por ejemplo combinando enfriador de cierre y los sistemas de limpieza de agua del reactor, y combinando varias piscinas enfriadoras y sistemas de limpieza. Además de estas modificaciones también se eliminaron varios sistemas, como el tratamiento de gas auxiliar y el control de inflamabilidad. A

continuación se muestran unas características básicas de diseño que hacen que se deposite una gran confianza en el ESBWR:

- Utiliza características del BWR que ya han sido utilizadas con éxito anteriormente, como la circulación natural y los condensadores de aislamiento (IC).
- Utiliza sistemas estándar y prácticos, como las características comunes con el ABWR (tamaño de la vasija, materiales, etc.).
- Se incrementa el rango de valores en los parámetros del ESBWR, como el empleo de separadores, grandes canales por donde fluyen dos fases.
- Realización de extensas tareas independientes, controles integrales y de componentes en diferentes escalas para el PCCS
- Realización de controles a cualquier nuevo componente.



*Figura 20. Central nuclear ESBWR.*

### **2.4.3 Componentes principales del ESBWR**

#### **2.4.3.1 Vasija del reactor y elementos internos**

La vasija del reactor alberga, como su propio nombre indica, el núcleo del reactor, el cual es la fuente principal de generación de vapor. Esta vasija contiene el calor, producto del vapor generado, dentro de su contorno, y sirve como barrera de seguridad frente a los productos que se generan de la fisión, durante el funcionamiento normal de la central. La Vasija a Presión del Reactor (RPV, Reactor Pressure Vessel) del ESBWR tiene el mismo diámetro que en la central ABWR. Esta vasija tiene aproximadamente 27.6 m de longitud y 7.1 m de diámetro. La Figura 21 muestra el RPV y los elementos internos.

Las características más importantes que incorporan el RPV y sus elementos internos son las siguientes.

- Toberas de vapor con estranguladores de caudal.
- Tobera de agua de alimentación doble con manga térmica.
- Soporte de la vasija por bloques en corredera.
- El piso se encuentra por debajo de la cabeza, relativamente.
- Eliminación de las grandes toberas situadas debajo del núcleo.
- Utilización de un armazón forjado en forma de anillo encima y debajo del núcleo.
- Una gran chimenea para garantizar la circulación natural del flujo en el núcleo.

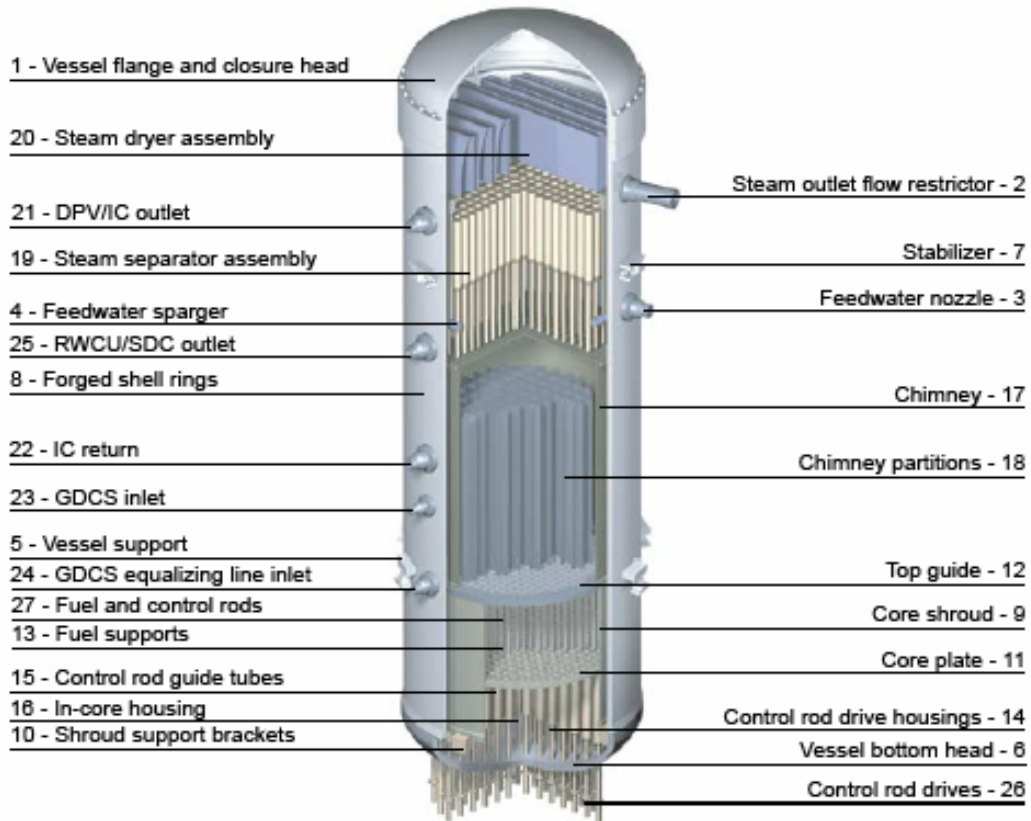


Figura 21. Vasija a presión del reactor.

#### 2.4.3.2 Sistema de Varillas de Control, CRDS

Los CRDS controlan los cambios en la reactividad del núcleo durante la operación de potencia. Este control se realiza mediante el movimiento y posicionamiento en pequeños incrementos de estas varillas absorbentes de neutrones dentro del núcleo. Actúan por medio de las señales obtenidas del control de varilla y el sistema de información (RC e IC).

En función de donde estén colocadas estas varillas, absorberán una determinada cantidad de neutrones con lo que la reactividad variará, con lo que variará también la potencia calorífica obtenida.

El CRDS, incorpora un control rápido de la varilla frente a una respuesta de las señales, ya sean manuales o automáticas, del sistema de protección del reactor (RPS, Reactor

Protection System). Cuando el RPS manda la parada de emergencia, el CRDS proporciona una reactividad negativa necesaria para poder parar el reactor.

En la Figura 22 se muestra la configuración de una varilla.

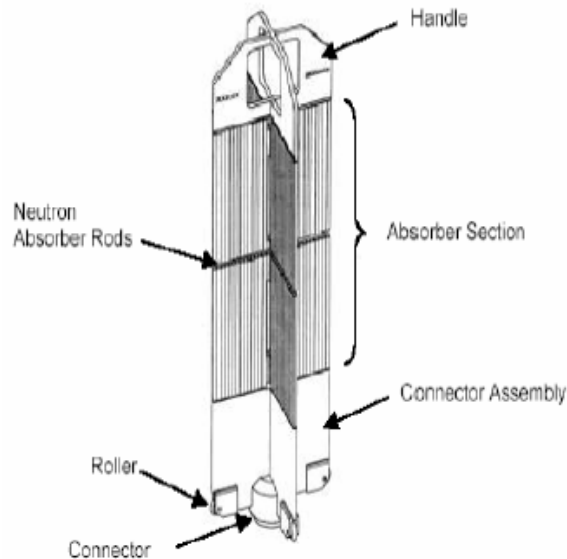


Figura 22. Varilla.

El CRDS está constituido por tres elementos principales:

- Mecanismos electro-hidráulicos de pequeños desplazamientos (FMCRD).
- Unidad de control hidráulica (HCU).
- Sistema hidráulico de varillas de control (CRDHS).

#### 2.4.3.3 Sistema de Caldera Nuclear, NBS

El objetivo del NBS es dirigir el caudal de vapor desde las toberas de salida de vapor del RPV hasta la turbina principal. En cada tobera de salida de vapor se encuentra incorporado un estrangulador del caudal del mismo, limitándolo si se produjese una rotura en la línea de vapor.

Este sistema incorpora provisiones para aliviar al RPV de las condiciones de sobrepresión. También está incluida en este sistema una parte de la isla nuclear del sistema de agua de alimentación.

### 2.4.3.4 Sistemas de Emergencia de Enfriamiento del Núcleo, ECCS

En una central nuclear lo más importante es la seguridad, ya que un pequeño fallo en cualquier componente puede desencadenar una gran catástrofe. A continuación se verán algunos de los sistemas de seguridad de que está provista la central ESBWR. En la Figura 22 se muestra la distribución de estos sistemas de seguridad.

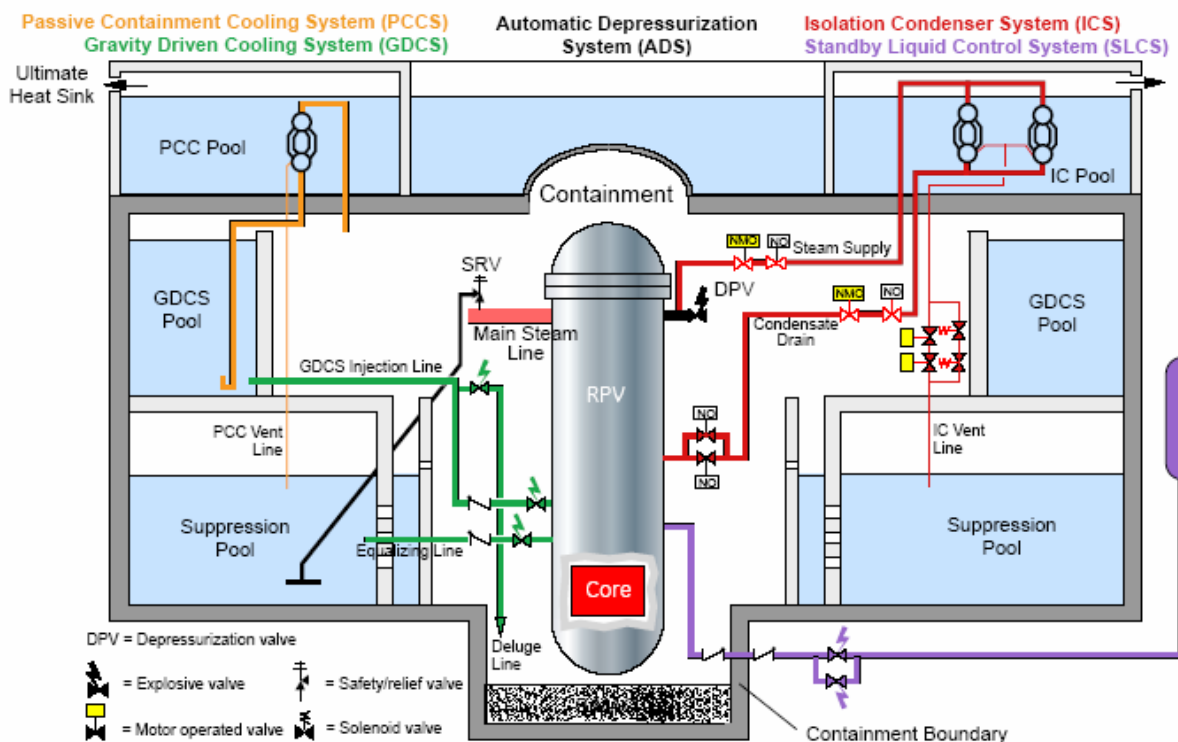


Figura 22. Distribución de los distintos sistemas de seguridad.

#### - Sistema de Despresurización Automática, ADS

Este sistema se inicia automáticamente si se recibe una señal de que el nivel de agua en el RPV es bajo al mismo tiempo que existe una sobrepresión en el pozo seco. Aunque

lógicamente, el ADS también se activa si sólo se recibe la señal de que el nivel de agua en el RPV es bajo.

La iniciación de este sistema se producirá después de un cierto periodo de tiempo para permitir que los sistemas de reserva de alta presión (como el CRDS o partes del sistema de agua de alimentación) tengan la posibilidad de restablecer el nivel de agua del RPV, y de este modo evitar la actuación del ADS.

Este sistema actúa cuando por otros métodos no pueden restablecer el nivel de agua del RPV y disminuir la presión a tiempo. Cuando esto ocurre se activan las válvulas de despresurización, DPV (Depressurization Valves), que reducen la presión en el contorno del núcleo del reactor añadiendo agua en el RPV. Estas válvulas se abren median un mecanismo explosivo (Figura 23).

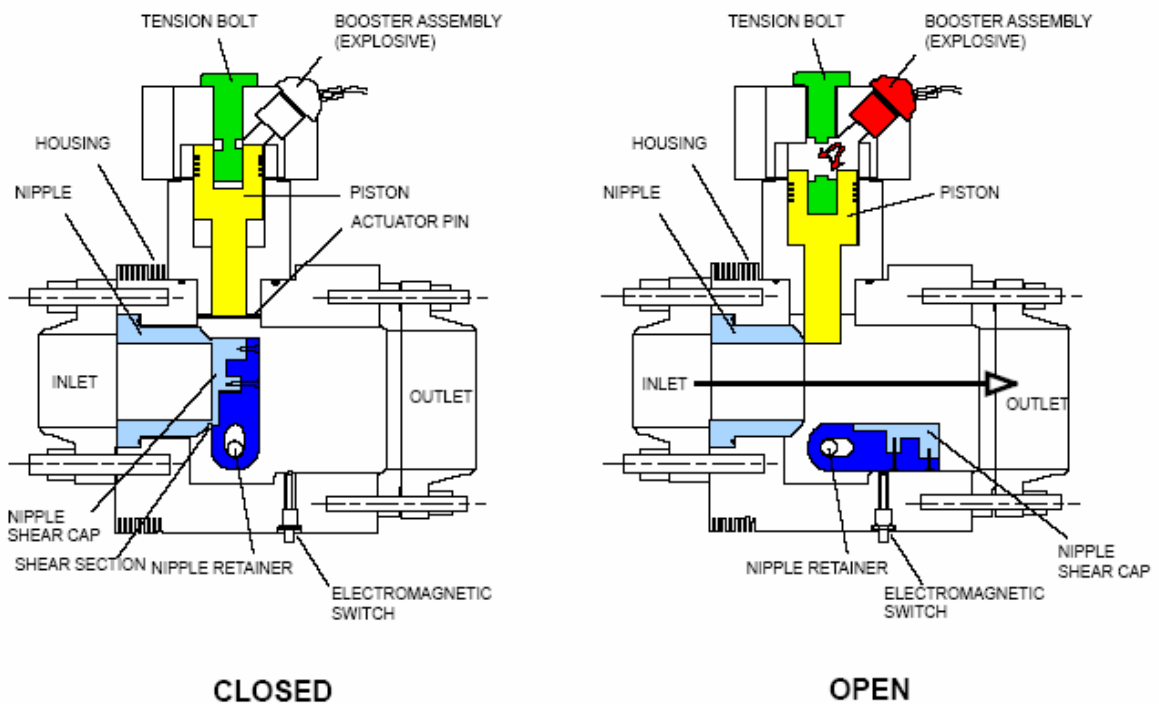


Figura 23. Mecanismo explosivo para el accionamiento de las válvulas.

*-Sistema De Enfriamiento del núcleo por gravedad, GDCS*

El GDCS está dividido en cuatro partes, cada parte consta de tres subsistemas independientes: un sistema de enfriamiento de corta duración (inyección), un sistema de enfriamiento de larga duración (compensación) y una línea de inundación.

Los sistemas de enfriamiento de larga y corta duración proporcionan agua refrigerante bajo el efecto de la fuerza de la gravedad, para reponer el nivel de agua perdida en el RPV si se produjera un LOCA (accidente con pérdida de refrigerante). La línea de inundación conecta la piscina del GDCS con la parte más baja del pozo seco. En la Figura 22 se puede ver la distribución de estos subsistemas.

*-Sistema condensador de aislamiento, ICS*

La función principal del ICS consiste en limitar la presión del reactor y conseguir un aislamiento en las líneas principales de vapor con la utilización de la válvula de alivio de seguridad (SRV, Safety Relief Valve).

El ICS, además, conserva suficiente volumen refrigerante del reactor, debido al agua almacenada en el RPV, para evitar una despresurización automática causada por el bajo nivel de agua del reactor. (Ver Figura 22).

*- Sistema pasivo refrigerante de la contención, PCCS*

Sistema encargado de enfriar la contención cuando se produce un accidente con pérdida de refrigerante, accidente tipo LOCA.

El objetivo principal de este proyecto consiste en el análisis estructural de este componente, por lo que se verá en más detalle en el próximo capítulo.



### ***3 Requerimientos de diseño y solicitaciones consideradas***

---

### ***3.1 Descripción del sistema pasivo de enfriamiento de la contención, PCCS***

El condensador PCCS (Passive Containment Cooling System) es un intercambiador de calor que actúa como elemento de seguridad pasiva, encargado de mantener la contención dentro de los límites de presión y temperatura de diseño, en el caso de producirse accidentes base de diseño (DBA). En la siguiente figura se muestra una foto real de este condensador, donde se puede observar el tamaño que tiene esta estructura.



*Figura 24. Condensador PCCS.*

Está constituido por 6 módulos completamente independientes y cada uno de ellos contiene un intercambiador de calor (condensador PCCS), que conduce por medio de tuberías la composición de gas-vapor de la contención, devolviendo a la salida el vapor condensado a la contención y reciclando el vapor no condensable. El vapor condensado es conducido al sistema de enfriamiento por gravedad (GDCS) y el gas es vertido a la piscina de relajación, a través de una línea que es sumergida en la misma y que lleva incorporado un rociador.

En la Figura 25 se puede observar un plano donde se muestra la sección de una planta del edificio del reactor nuclear, pudiendo ver la distribución de los intercambiadores PCCS (6 módulos centrales) y de los intercambiadores ICS (4 módulos laterales).

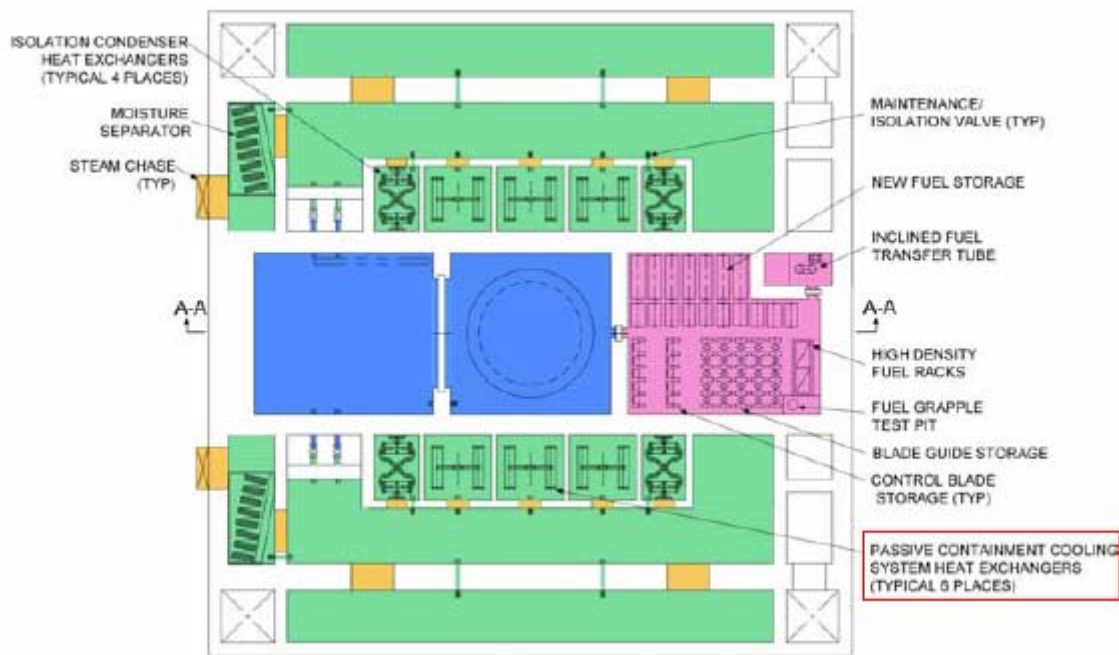


Figura 25. Sección de una planta del edificio del reactor.

Tanto los sistemas PCCS como los ICS se colocan en la parte inferior de las piscinas, piscinas IC (Isolation Condensar) para los ICS y piscinas PCC (Passive Cooling Containment) para los PCCS. Esto es debido al calentamiento que se produce en el volumen de agua de las piscinas, como consecuencia del intercambio de calor para enfriar los gases de la contención. Este aumento de la temperatura hace que parte del agua de la piscina se evapore, por lo que disminuye su volumen, por eso el hecho de que los intercambiadores estén colocados en la parte más baja de las piscinas. Este vapor (no radiactivo) es vertido a través de los separadores de humedad (ver Figura 26).

Los intercambiadores de calor son de tipo abierto y de tubo-tambor, configurados en módulos dobles y accionados por combinación de flotabilidad, presión y procesos de circulación natural por condensación conducida.

El PCCS está denominado como un ESF, es decir, un elemento de seguridad de ingeniería. Cada uno de los 6 módulos PCCS está compuesto a su vez por 2 intercambiadores de calor, con una capacidad nominal de 11 MWt.

Cuando se produce un LOCA, la mezcla de vapor y gas no condensado va a los tambores superiores de los intercambiadores de cada PCCS, a través de la contención, por medio de las tuberías de alimentación (steam line pipe). El proceso de condensación se realiza en las tuberías que unen los tambores superiores con los inferiores, en el empaquetamiento de tubos verticales (tube bundle), donde hay una mayor superficie de contacto para el intercambio de calor.

Al final de los tambores inferiores de los intercambiadores se recoge un producto, compuesto por condensado y por gas no condensable junto con una pequeña concentración de vapor de agua. Debido a estos dos tipos de productos se hace necesaria la separación de estos en compartimentos distintos (ver Figura 26):

- El condensado pasa de los tambores inferiores del PCCS a la piscina GDCS. Las tuberías encargadas de llevar el condensado son las “condensate drain lines”, aunque a partir de ahora se nombrarán líneas de drenaje.
  
- El gas no condensable junto con la pequeña proporción de vapor de agua pasa a la piscina de relajación (suppression pool). La descarga de estos compuestos se realiza de forma continua debido a la generación de un camino de caída de presión hacia la zona de descarga, por lo que la purga se realiza ya desde el empaquetamiento de tubos verticales. Esta caída de presión se consigue porque la presión en el pozo seco es algo mayor que la presión del pozo húmedo. El vertido se realiza a través de las tuberías “non-condensables vent lines”, que a partir de ahora se nombrarán como líneas de vertido.

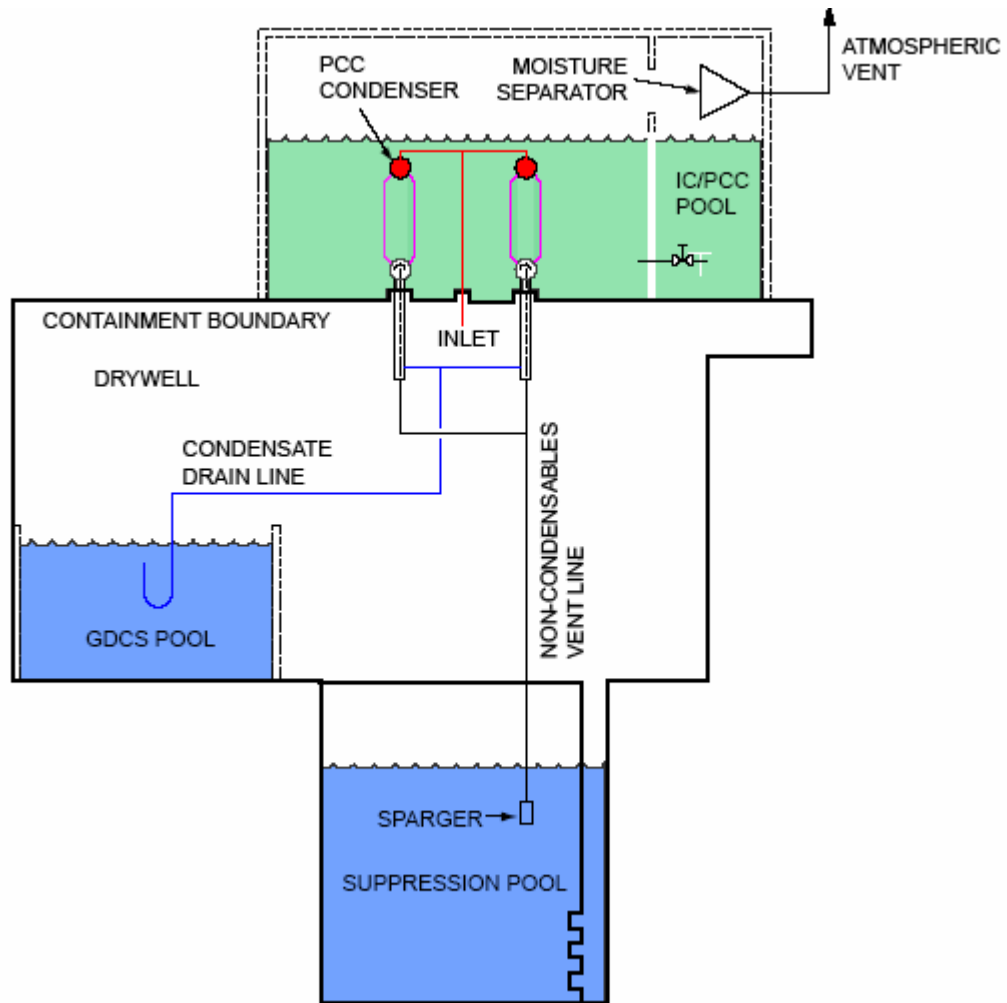


Figura 26. Líneas del PCCS.

Cabe destacar que tanto la entrada como la salida se producen por “circulación natural”, los gases de escape pasan al PCCS a través de una abertura en la contención, por la línea de alimentación, y la salida de los gases no condensables por medio de la diferencia de presiones, ya visto anteriormente. La Figura 27 muestra un esquema de este tipo de circulación.

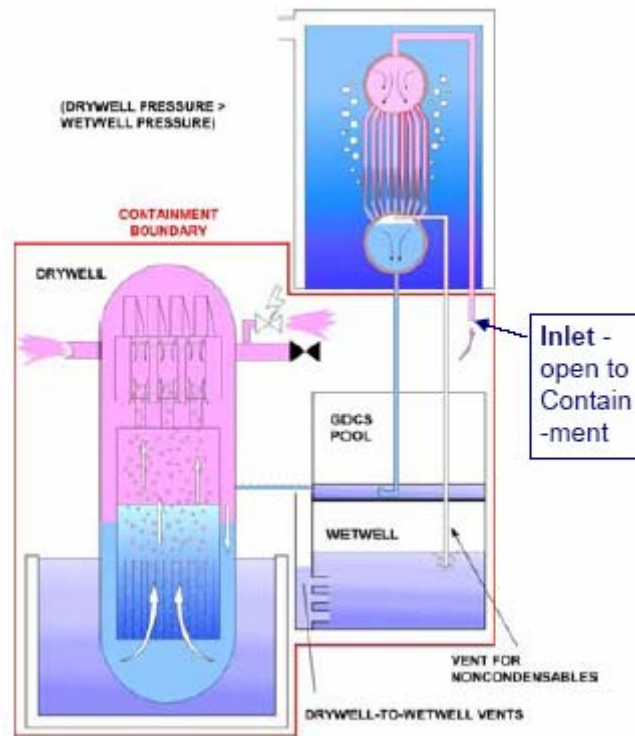


Figura 27. Circulación natural.

En este sistema no se requiere el uso de válvulas de aislamiento, ya que los elementos del PCCS están diseñados para soportar temperaturas de diseño y presiones dos veces la presión de diseño de la contención. Sencillamente se requiere que las líneas de drenaje y vertido estén siempre disponibles. Debido a que no se necesita ninguna válvula, el sistema entra en funcionamiento acto seguido de que se produzca un LOCA, consiguiendo en un plazo de 72 horas unos límites de presión y temperatura menores que los de diseño.

Cuando se produce un LOCA, el agua de las piscinas PCC e IC disminuye, debido a la ebullición, si el nivel de agua es demasiado bajo se accionan dos válvulas que conectan estas piscinas con el depósito separador/secador, manteniendo siempre un nivel de agua que permita una perfecta refrigeración.

Una tobera se encuentra en las líneas de vertido y drenaje permitiendo realizar pruebas de fugas después del mantenimiento, independientemente de las pruebas de fuga de la contención.

Es importante destacar el sistema de sellado localizado sobre la línea de drenaje, aguas arriba del punto de descarga a la piscina GDCS. Este sistema previene el posible retorno de la mezcla de gas-vapor del pozo seco a la línea de vertido. De este modo, se garantiza a largo plazo que el llenado del PCCS se realice mediante la línea de alimentación.

Cada PCCS está provisto de un subcompartimento que se comunica en la zona más baja de las piscinas PCC/IC, permitiendo el completo uso del inventario de agua colectivo, independientemente del estado operacional de cualquier PCCS. No hay conexión entre dos piscinas PCC/IC. Este sistema nos permite el vaciado de agua de un PCCS cualquiera para operaciones de mantenimiento, manteniendo los demás sistemas intactos.

El agua de la piscina puede calentarse alrededor de las 100 °C (214 °F). El vapor formado no es radiactivo y tiene una pequeña presión relativa positiva (con el ambiente), por lo que se vierte a la atmósfera a través de respiraderos de gran diámetro, situados por encima de cada segmento del condensador PCCS.

En la entrada de las líneas de vertido hay instalado un separador de humedad para impedir el arrastre de una humedad excesiva y la pérdida de agua en las piscinas PCC/IC.

### ***3.2 Requerimientos***

En este apartado se mostrarán los requerimientos que tiene que cumplir el condensador PCCS. Deberá ser capaz de resistir tanto cargas estáticas propias del funcionamiento, como cargas dinámicas producidas por terremotos, por descarga de válvulas, etc. Estos niveles de operación serán los que marquen las tensiones admisibles para el análisis estructural del condensador PCCS.

### Presión y temperatura de diseño. Nivel de diseño

La presión de diseño que tiene que soportar el condensador PCCS es de 758.5 kPa.

La temperatura de diseño que tiene que soportar es de 171 °C. Este valor se obtiene de la temperatura que se alcanza en el pozo seco después de un accidente con pérdida de refrigerante (LOCA).

### Operaciones Normales. Nivel A

Las condiciones de operación normales en la contención son una presión que oscila de 0 a 13.8 kPa, una temperatura oscilante entre 10 °C y 60 °C de aire o nitrógeno con una humedad relativa del 50% en las tuberías, y de 10 °C a 60 °C en el agua situada en el exterior de los tubos.

### Operaciones alteradas, transitorios de frecuencia moderada. Nivel B

Se aplicará el código ASME Sección III, Subsección NC, Nivel B para estas condiciones de servicio, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- a. Dos ciclos de calentamiento de la mezcla de vapor y gas (vapor, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno), el cual incrementa la presión en las tuberías a 310 kPa y la temperatura a 144.7°C. El agua refrigerante de la piscina en el exterior de las tuberías aumenta su temperatura de 10 °C a 100°C en un mínimo de 10 minutos.
- b. Se tendrán en cuenta las cargas dinámicas SRVD y LOCA.

### Operaciones de fallo, caso 1. Nivel C

Este caso de condición de fallo será analizado (pero no probado) teniendo en cuenta las máximas cargas obtenidas por combinación de SSE, DPV/SRV y LOCA, con una presión y temperatura de 310 kPa y 144.7 °C, teniendo en cuenta las condiciones de servicio para esta combinación de carga de la Sección III, Subsección NC, Nivel C del código ASME. Las cargas SSE se basarán en los requerimientos sísmicos dentro de las especificaciones de diseño para sismos de categoría I.



Este tipo de condiciones se darán en una frecuencia menor o igual a  $1 \cdot 10^{-6}$  sucesos/año.

#### Operaciones de fallo, caso 2. Nivel D

Esta caso de condición de fallo será analizado (pero no probado) teniendo en cuenta el incremento de presión y temperatura de la mezcla de vapor y gas (vapor, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno) en las tuberías, como en el ciclo anterior durante 6 minutos. Después, la presión y temperatura se incrementa a 785.5 kPa y 171.1 °C en 72 horas. En este apartado se utilizará la misma sección del código ASME que en el caso anterior.

La temperatura del agua refrigerante de las piscinas que se encuentra en el exterior de las tuberías aumenta de 10 °C a 100 °C en un mínimo de de 10 minutos.

Este tipo de condiciones se darán en una frecuencia menor o igual a  $1 \cdot 10^{-6}$  sucesos/año.

#### Operaciones de prueba. Condiciones Test

- a. Ciclos de presión neumática de prueba de la contención a 448.2 kPa y una temperatura ambiental máxima de 48.9 °C. Deberá realizarse 5 veces en toda la vida de la central.
- b. Pruebas de fuga neumáticas de la contención a 310 kPa y temperatura ambiental máxima de 48.9 °C. Deberá realizarse 30 veces en toda la vida de la central.
- c. Pruebas de pos-mantenimientos en fugas neumáticas del PCC a 758.2 kPa y temperatura ambiental máxima de 60 °C. Deberá realizarse 60 veces en toda la vida de la central.

La siguiente tabla muestra un resumen con las diferentes especificaciones para cada nivel de operación:

	Nivel de diseño	Condiciones normales . Nivel A	Condiciones alteradas (transitorios de frec. moderada). Nivel B	Condiciones de fallo (accidentes)- Caso 1. Nivel C	Condiciones de fallo (accidentes)- Caso 2. Nivel D	Test
<b>P (kPa)</b>	758.5	0 - 13.8	310	310	758.5	758.2
<b>T (°C) (dentro de las tuberías)</b>	171	10 - 60	144.7	144.7	171.1	60
<b>T (°C) (fuera de las tuberías)</b>	-	10 - 60	10 - 100	-	10 - 100	60

Tabla 2. Requerimientos para los niveles de servicio.

### 3.3 Descripción geométrica

En este apartado se van a definir las distintas partes de las que consta el condensador PCCS, desde el punto de vista geométrico. En el Anexo A se muestran los planos con las dimensiones reales de los condensadores PCCS. Estos planos se han realizado mediante Autocad, a partir de una revisión anterior (año 1991) que se encontraba en formato papel y que fue proporcionada por el cliente.

En apartados posteriores se mostrará el diseño del modelo real que se utiliza en el análisis, ya que como en cualquier modelo de simulación, omite y simplifica detalles que son prescindibles y que no añaden información.

A continuación se describen los componentes que se van a utilizar para realizar el modelo del condensador PCCS:

- **Steam line:** es la tubería que lleva los gases de escape producidos por un LOCA, a través de la contención hasta el condensador PCCS, es la única línea de alimentación.
- **Steam distributor:** distribuye los gases de escape desde la steam line a los dos módulos del condensador.

- **Feed line:** recoge los gases procedentes del steam distributor y lo conduce hacia los headers (tambores) superiores.
  
- **Header (tambor):** son cuatro, dos superiores y dos inferiores. En los superiores se recogen los gases procedentes de la feed line y se conducen al empaquetamiento de tubos verticales (tube bundle), para proceder a su condensación. Y en el inferior se recoge la mezcla de condensado y de no condensado procedente del empaquetamiento de tubos verticales y la conduce a la condensate line.
  
- **Condensate line:** tubería que comienza en los tambores inferiores y evacua la mezcla de condensado y no condensado a las piscinas GDCS y de relajación, cerrando así el recorrido de los gases de escape por el condensador PCCS. En el plano incluido en el Anexo A, este elemento correspondería a las tuberías drain y vent line.
  
- **Header cover:** son las tapas de los tambores, unidas a estos mediante pernos (header bolts)
  
- **Steam line sleeve (manguito):** parte de la tubería steam line que se encuentra empotrada en la contención.
  
- **Condensate line sleeve (manguito):** parte de la tubería condensate line que se encuentra empotrada en la contención.
  
- **Steam line head fitting:** parte cónica que une la steam line con la steam line sleeve.
  
- **Condensate line head fitting:** parte cónica que une la condensate line con la condensate line sleeve.
  
- **Support saddle:** soportes de los tambores inferiores.
  
- **Support saddle base plates:** base de los soportes anteriores unida a la contención mediante pernos.

- **Tubes bundle:** es el denominado empaquetamiento de tubos verticales, donde se produce la condensación de los gases, y une los tambores superiores con los inferiores.
  
- **Dinamic support structure:** es la estructura de soportado dinámico. Cabe destacar que esta estructura no formaba parte del sistema del condensador PCCS, pero después de comprobar los efectos de las cargas dinámicas, se tuvo que diseñar este sistema de sujeción. Por lo tanto, se analizará la estructura con este componente justificando en el punto 6.4 la necesidad de su uso.
  
- **Soportes superiores:** son los seis soportes superiores (cuatro en las esquinas y dos centrales) que unen a los headers superiores con la estructura de soportado dinámico.
  
- **Pernos soportes superiores:** pernos de los soportes superiores, hay ocho en cada uno de los seis soportes, cuatro en cada extremo (dos en el header superior y dos en la estructura de soportado dinámico).
  
- **Base plates de la dinamic support structure:** base de la estructura de soportado dinámico donde se une a la contención.

### ***3.4 Materiales empleados***

Los materiales empleados en el condensador PCCS variarán dependiendo de la función del componente. Por lo tanto habrá que diferenciar entre materiales para los componentes propiamente dichos, los soportes y los pernos. En la Tabla 3 se puede observar qué material corresponde a cada parte del condensador PCCS. Cabe destacar que los materiales designados con la letra F, son materiales que han sido conformados mediante forja (en este caso).

<b>Elemento</b>	<b>Material</b>
Header	SA 182 F304L
Tube bundle	SA 213 Tp 304L
Feed line	SA 312 Tp 304L
Steam Distributor	SA 312 Tp 304L
Steam line	SA 312 Tp 304L
Head fitting	SA 182 F304L
Condensate line	SA 312 Tp 304L
Header cover	SA 182 F304L
Header bolt	SA 193 B8
Condensate fitting	SA 182 F304L
Support Saddle	SA 240 Tp 304L
Estruc. sop. din.	SA 479 Tp 304L
Sleeves	SA 312 Tp 304L
Soportes superiores	SA 240 Tp 304L
Pernos soportes superiores	SA 564 Tp 630 Class H1150

*Tabla 3. Relación de materiales.*

Los materiales correspondientes a los componentes del condensador PCCS, la estructura de soportado dinámico y los header bolt, corresponden a aceros inoxidable que el código ASME recomienda para componentes de centrales nucleares. El acero de los pernos de los soportes superiores, SA 564 Tp 630 Class H1150, es un acero de alta resistencia, como se puede observar en la Tabla 24, debido a que en los soportes superiores se dan unos esfuerzos elevados (llegando a 31 kN) y lo tienen que soportar entre 4 pernos.

Hay que tener en cuenta que el condensador PCCS está expuesto a temperaturas cambiantes, por lo que habrá que obtener las propiedades de cada material para un número determinado de temperaturas. Para ello se hará uso del código ASME, donde las propiedades de cada material están tabuladas para cada temperatura, aunque no proporciona ninguna expresión analítica de variación de las propiedades con la temperatura.

Las temperaturas a las cuales va a trabajar el condensador PCCS serán obtenidas de las condiciones de operación dadas en los requerimientos. Las propiedades de los materiales a distinta temperatura se pueden observar en la Tabla 4.

		<b>Aleaciones de acero</b>					
<b>Clase del Acero</b>	<b>SA-312 Tp304L, SA-182 F304L, SA-213 Tp304L, SA-240 Tp304L, SA-479 Tp 304L, SA-193 Grade B8 Class 1</b>						
<b>Temperatura T, (°C)[°F]</b>	(-73.3)[-100]	(21.1)[70]	(93.3)[200]	(148.9)[300]	(204.4)[400]	(260.0)[500]	
<b>Modulo Young E, N/m<sup>2</sup></b>	2.013E+11	1.951E+11	1.896E+11	1.861E+11	1.820E+11	1.786E+11	
<b>Coef. Poisson <math>\gamma</math></b>	0.3						
<b>Coef. dilatación térmica <math>\alpha</math>, °C<sup>-1</sup></b>	1.530E-05	1.530E-05	1.602E-05	1.656E-05	1.710E-05	1.746E-05	
<b>Conductividad térmica k, W/m°C</b>	14.87	14.87	16.08	16.94	17.98	18.85	
<b>Densidad <math>\rho</math>, kg/m<sup>3</sup></b>	7850						

Tabla 4. Propiedades de los materiales en función de la temperatura.

Las propiedades en este caso son las mismas para todas las clases de acero empleadas, debido a que en el código ASME se encuentran dentro del mismo grupo.

### 3.5 Hipótesis de cálculo

Para el cálculo estructural del estado tensional se han considerado una serie de hipótesis sobre el comportamiento del condensador PCCS. Estas hipótesis se muestran a continuación:

- Se supone un comportamiento elástico del material para deformaciones y desplazamientos pequeños.

- Como se verá en apartados posteriores, el diseño de la estructura de soportado dinámico está condicionada por la expansión entre el condensador PCCS y la propia estructura, cuando incrementa la temperatura dentro del condensador PCCS. Este hecho hace necesario la utilización de holguras (2.5 mm) en las cuatro esquinas del soporte, en ambas direcciones horizontales. Entonces se producen condiciones de contacto no lineal en estas esquinas bajo el efecto de sucesos dinámicos. Las no linealidades producidas en las holguras no se tomarán en cuenta, se supondrá un contacto totalmente lineal en las direcciones N-S, permitiendo analizar el condensador por medio de análisis de espectros de respuesta, en vez de tener que utilizar métodos de análisis de transitorios de altos costes. Se debería realizar un análisis final en el caso de que se agotará la holgura, ya fuera por la deformación del empaquetamiento de tubos, la línea de vapor o los codos de las líneas de alimentación (feed line elbows).
- El vapor siempre estará a mayor temperatura que el agua de la piscina, el calentamiento y la expansión de la estructura de soportado dinámico siempre serán más lentos que los del condensador PCCS.
- Aunque los tres soportes de cada tambor se monten inicialmente en contacto con la estructura de soportado dinámico en dirección E-O, se asume que únicamente los dos soportes centrales recogerán las cargas dinámicas en dirección E-O, dado que las cuatro esquinas del soporte perderán dicho contacto cuando el condensador PCCS se dilate por efecto de la temperatura.
- Hay que realizar otra hipótesis relativa al nivel de agua en el condensador PCCS, desde el punto de vista dinámico. Desde que se produce la condensación, principalmente en el empaquetamiento de tubos, es muy conservativo suponer que el nivel de agua aumenta en la mitad inferior de la altura de los tubos empaquetados, cuya elevación media sería 28945 mm. Es razonable esperar que en este caso se produzcan las tensiones y deformaciones máximas.
- Debido a que el condensador PCCS está sumergido en una piscina con agua, hay que considerar los efectos dinámicos de la masa equivalentes de agua. El

condensador PCCS está construido básicamente por cilindros, por lo tanto los efectos de la masa de agua serán añadidos a los cilindros.

- En este proyecto no se han realizado análisis térmicos. La peor condición desde el punto de vista térmico se considera para obtener la holgura necesaria para permitir la expansión libre máxima. Se considera que la temperatura de los distintos elementos del condensador PCCS es la misma que la temperatura del vapor. Los efectos de la temperatura también son tomados en cuenta para la reducción de las propiedades del material.

### 3.6 Definición de las cargas

Las cargas que se han considerado en el análisis del condensador PCCS son las siguientes:

- Peso propio y empuje,  $D$ .
- Presión de diseño,  $P_d$ .
- Temperatura de diseño,  $T_d$ .
- Parada de seguridad frente a terremotos,  $SSE$ .
- Descarga de las válvulas de seguridad,  $SRVD$ .
- Accidente con pérdida de refrigerante,  $LOCA$ .

La siguiente tabla muestra los tipos de carga que se utilizarán en el estudio estructural de cada nivel de servicio.

Nivel de servicio	Combinación de cargas
Condición test	$D + P_t + T_t$
Condición de diseño	$D + P_d + T_d$
Nivel A, B	$D + P_d + T_d + SRV + LOCA$
Nivel C, D	$D + P_d + T_d + SSE + SRV + LOCA$

Tabla 5. Cargas asociadas a cada nivel de servicio.



### **3.6.1 *Peso propio y empuje***

Junto al peso propio del condensador PCCS es necesario considerar además el empuje, debido a que la estructura está sumergida en una piscina llena de agua. Para cuantificar la importancia del empuje hay que considerar el volumen de agua desplazado, que será obtenido de forma aproximada mediante el método de elementos finitos. El volumen de agua total es de  $7.39 \text{ m}^3$  (7390 kg), y una masa total de acero de la estructura del condensador PCCS de 12510 kg.

Por lo tanto, el efecto del empuje se debe considerar, por ejemplo, para el cálculo de los pernos de anclaje para el soporte de los tambores inferiores (support saddles). Con respecto al análisis de tensiones, el efecto del empuje es siempre favorable pero generalmente insignificante con respecto a las cargas dinámicas, por lo que no será tomado en cuenta en el análisis.

### **3.6.2 *Carga debida a la presión de diseño ( $P_d$ )***

El condensador PCCS será diseñado para resistir una presión de diseño de 758,5 kPa (ver Tabla 2).

Las diferentes secciones que tienen que soportar esta presión de diseño han sido consideradas y verificadas de acuerdo con la norma NE-3300 del código ASME.

Las propiedades de los materiales se considerarán a temperatura de diseño, 171 °C.

### **3.6.3 *Carga debida a la temperatura de diseño ( $T_d$ )***

El condensador PCCS será considerado para resistir una temperatura de diseño de 171°C.

La temperatura del agua de la piscina fuera de las tuberías aumenta de 10 a 100 °C, como se puede observar en la Tabla 2.

Se asume una temperatura de 15,5 °C cuando el sistema está libre de cargas.

La configuración de los soportes del condensador PCCS se diseña de tal forma que se permita la mayor expansión libre posible. El único impedimento a la expansión libre se encuentra en los dos empotramientos de las condensate line (el empotramiento entre la contención y la condensate line sleeve).

El pero caso que se produce desde el punto de vista térmico, ocurre para una temperatura de 171 °C en el condensador PCCS y 15,5 °C en la estructura de soportado dinámico. Esta condición hace que se produzca la máxima diferencia de expansión entre el condensador PCCS y la estructura de soportado dinámico. Por consiguiente, esta condición se utilizará para obtener la holgura necesaria entre los tambores superiores y los seis soportes superiores de las estructura de soportado dinámico. A su vez, se utilizará también para obtener la separación necesaria entre los agujeros de los pernos para la base de los soportes inferiores anclada al suelo de la piscina.

También se tendrá en cuenta un segundo caso térmico, cuando el condensador PCCS se encuentre a una temperatura de 171 °C y a 100 °C la estructura de soportado dinámico. Este análisis se utilizará para obtener la separación necesaria entre los agujeros de los pernos de los cuatro anclajes de la estructura de soportado dinámico anclados al suelo de la piscina.

#### ***3.6.4 Cargas producidas por la parada de seguridad frente a terremotos (SSE)***

El condensador PCCS será diseñado para resistir las cargas SSE utilizando un amortiguamiento estructural (damping) del 3%. Este amortiguamiento viene dado por la norma *Regulatory Guide 1.61 (octubre 2006)*, donde aplica un amortiguamiento del 3%

para intercambiadores de calor y vasijas a presión, para componentes mecánicos de centrales nucleares.

Los espectros de respuesta han sido realizados en la central nuclear para ciertas alturas, en el emplazamiento de Estados Unidos y se han medido bajo condiciones muy severas, para poder instalar la central nuclear en numerosos países. Los espectros de respuesta que se muestran a continuación son proporcionados por el cliente.

Las piscinas IC y PCC están localizadas a una elevación de 27000. La información del espectro de respuesta vendrá dada para dos puntos del sistema, el nodo 108 localizado en el RBFB y el nodo 208 localizado en el RCCV. En este caso, se proporcionan espectros de respuesta en dos puntos de la central, por lo que habrá que realizar la envolvente de cada dirección. Se han proporcionado cuatro respuestas espectrales para la dirección horizontal (dos nodos, dos direcciones horizontales X e Y) y dos en la dirección vertical. A continuación se muestran los espectros de respuesta de las cargas SSE medidos en la central.

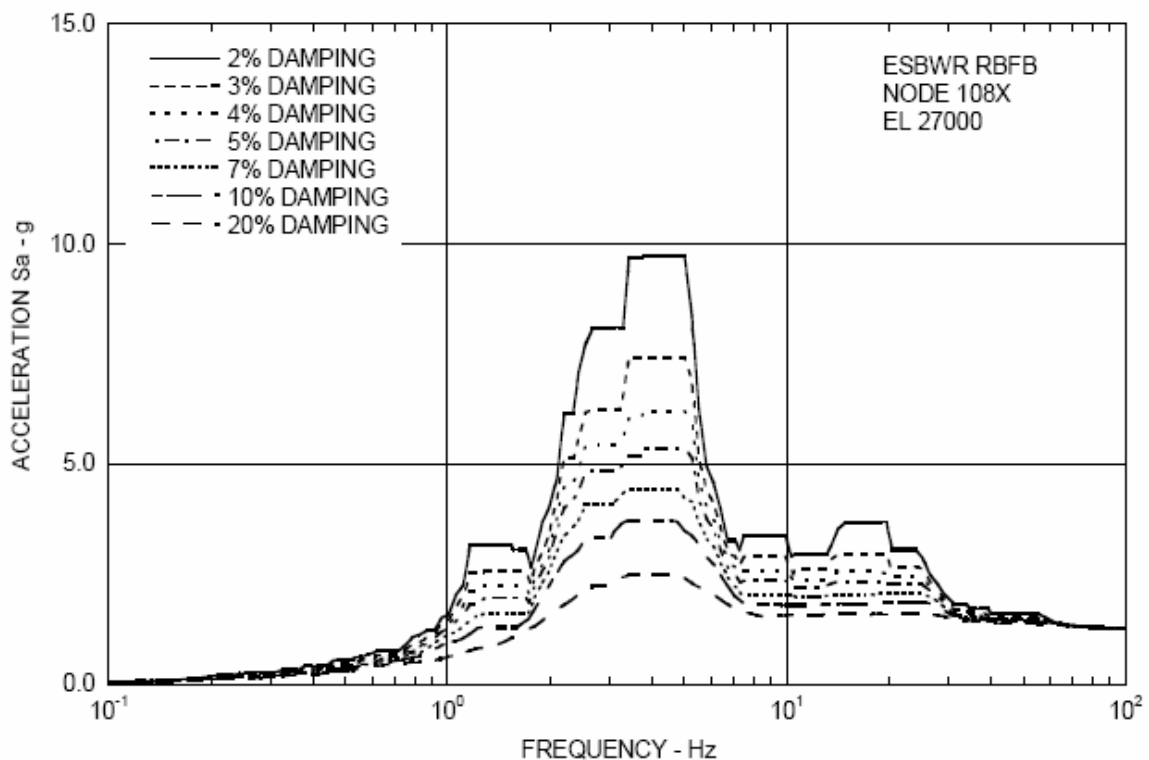


Figura 28. Espectro de respuesta en dirección X, nodo 108 (RBFB).

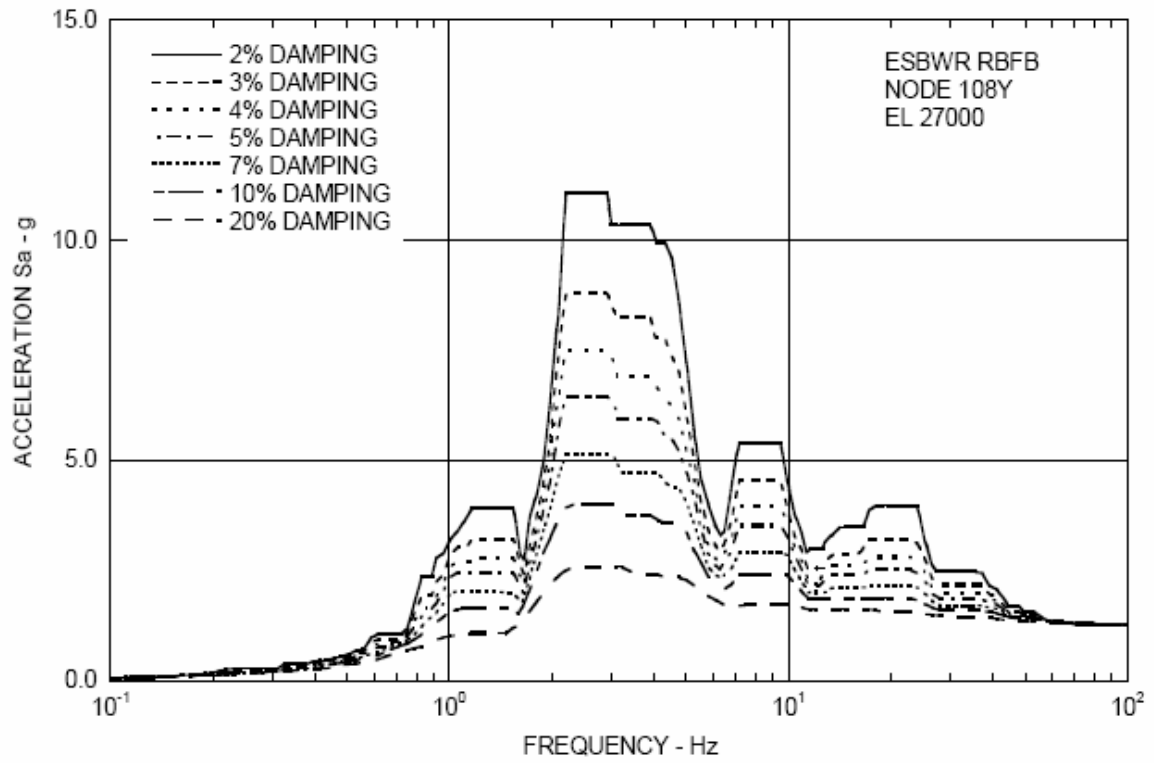


Figura 29. Espectro de respuesta en dirección Y, nodo 108 (RFB).

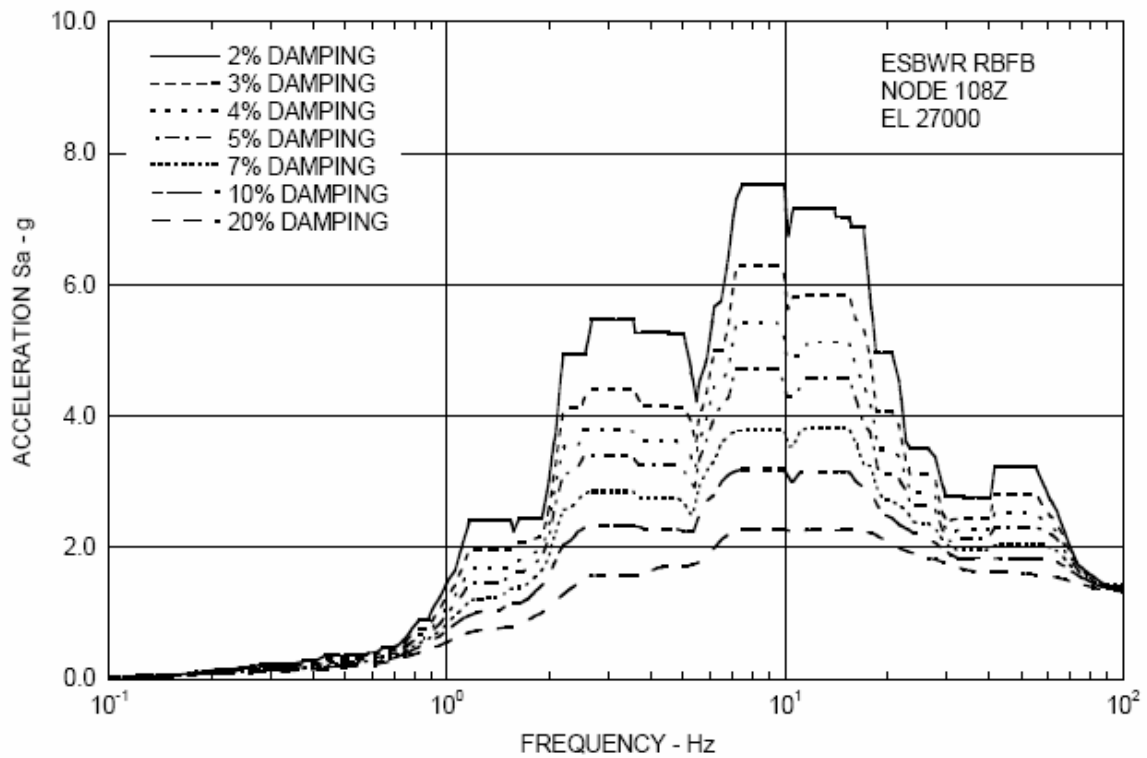


Figura 30. Espectro de respuesta en dirección Z, nodo 108 (RFB).

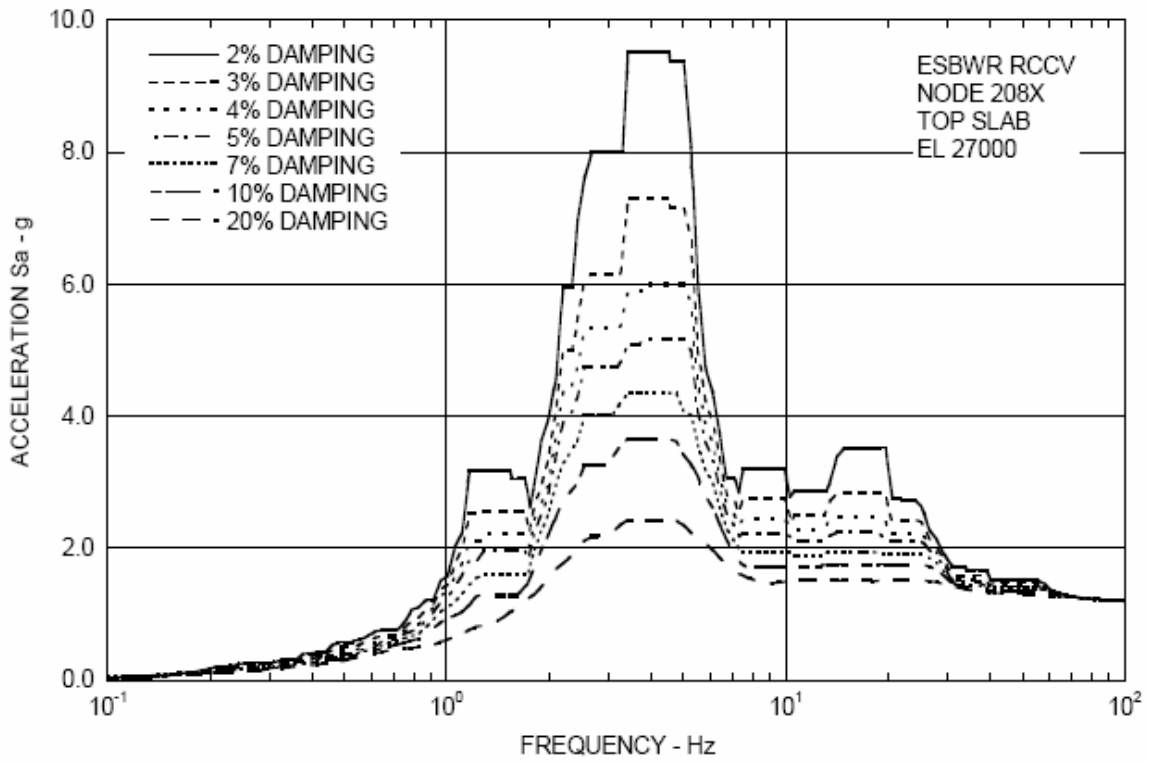


Figura 31. Espectro de respuesta en dirección X, nodo 208 (RCCV).

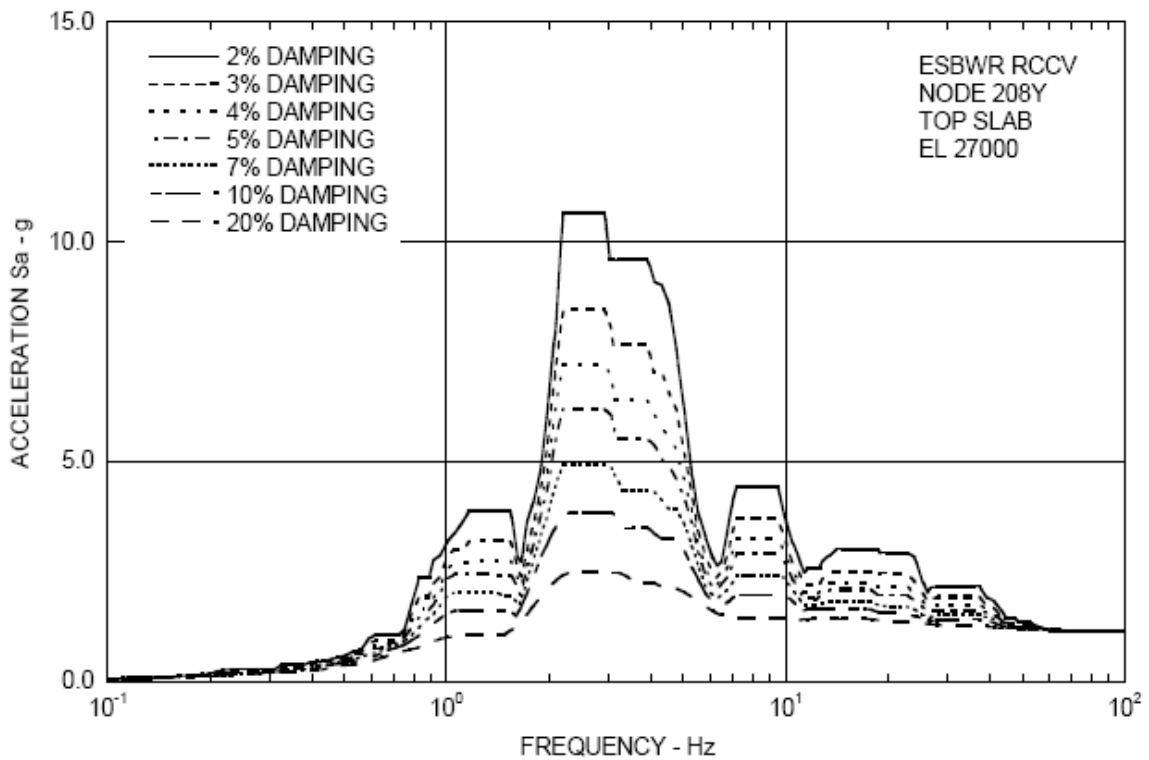


Figura 32. Espectro de respuesta en dirección Y, nodo 208 (RCCV).

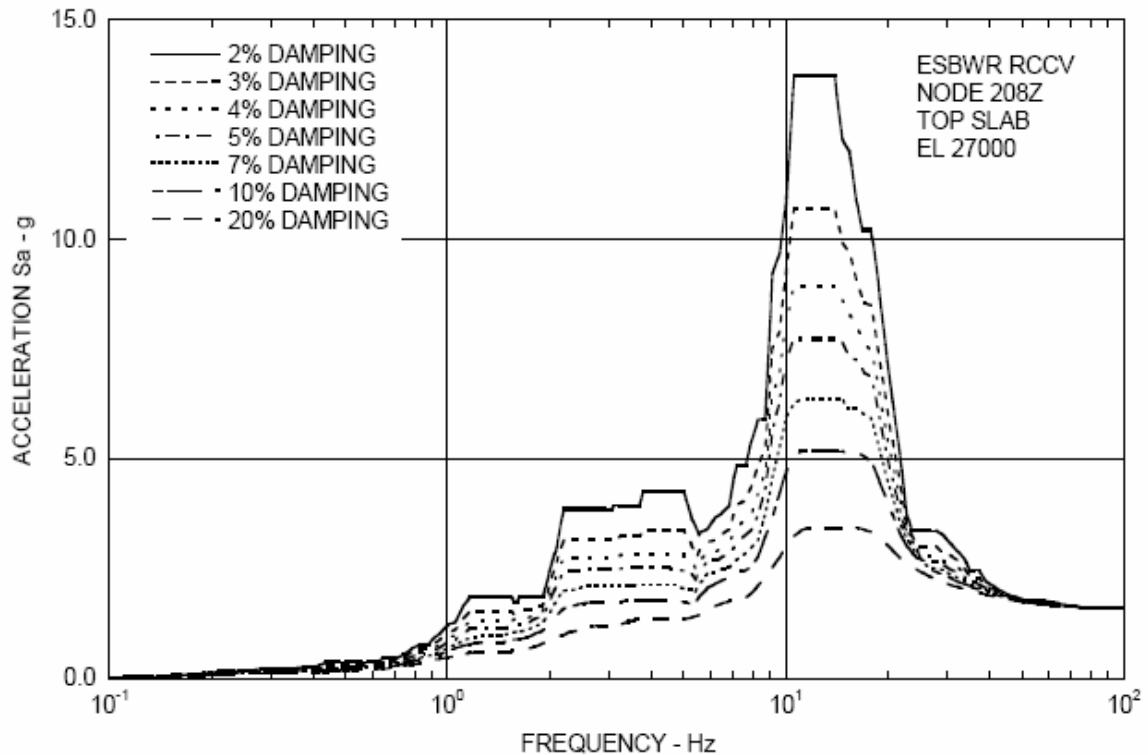


Figura 33. Espectro de respuesta en dirección Z, nodo 208 (RCCV).

Para poder analizar el efecto de estas cargas hay que obtener la envolvente de estos espectros de respuesta en dos gráficas, una horizontal para ver los efectos en la dirección X e Y, y otra envolvente vertical para los efectos en dirección Z.

Estas envolventes serán las entradas del análisis dinámico para el método de elementos finitos. Se definen mediante rectas unidas por puntos, y simulan de forma conservativa las respuestas mostradas en las figuras anteriores (siempre por encima de cualquier tramo). Cabe destacar que no se deben superar los 20 puntos, ya que es el máximo permitido en el código numérico de elementos finitos que se utilizará a continuación.

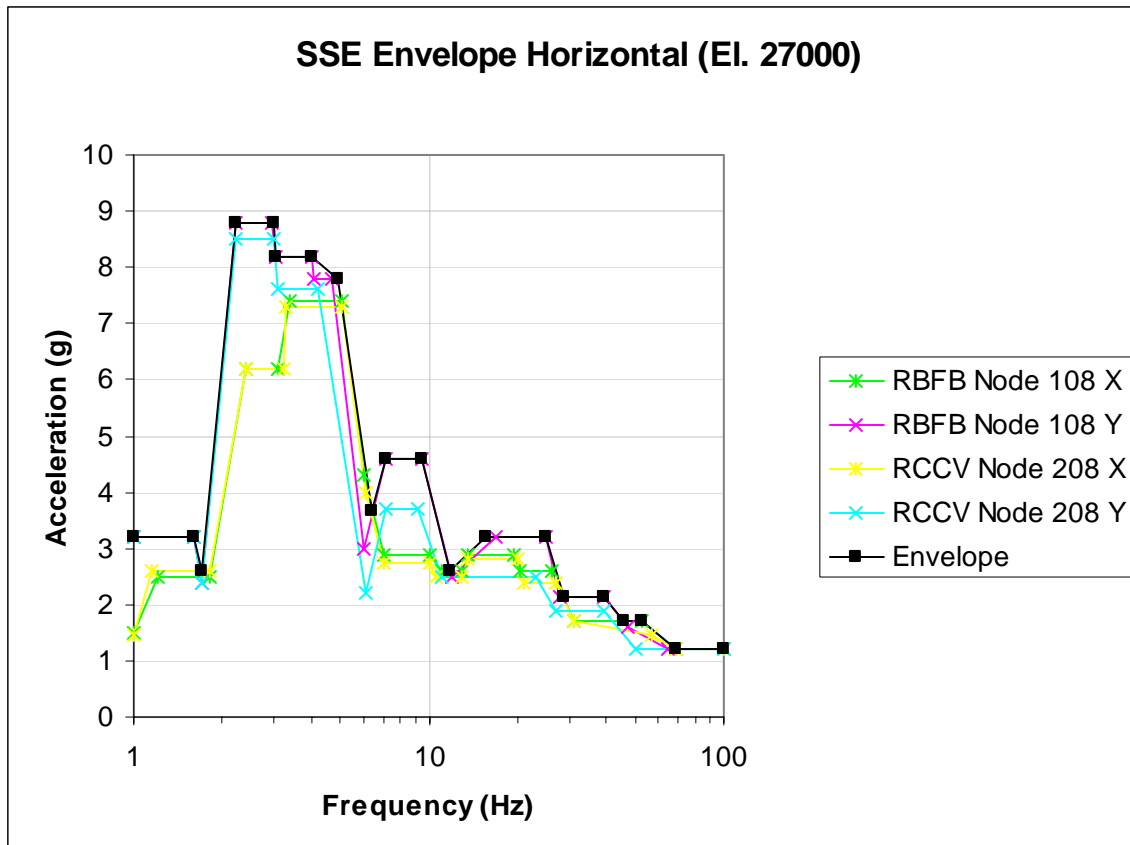


Figura 34. Envoltente SSE en dirección horizontal.

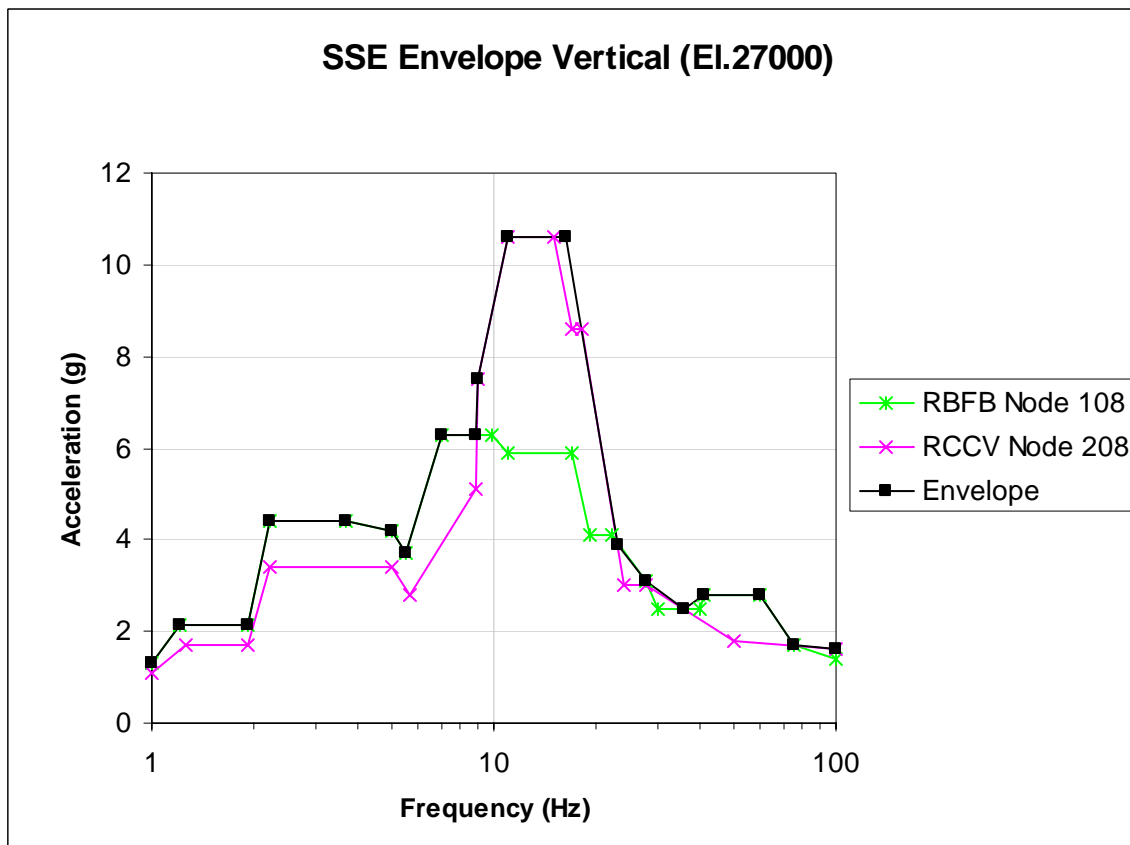


Figura 35. Envoltente SSE en dirección vertical.

### 3.6.5 Cargas producidas por la descarga de las válvulas de seguridad (SRVD)

El condensador PCCS será diseñado para resistir las cargas SRVD, con un amortiguamiento estructural del 3% (al igual que en el caso anterior). En este caso el espectro de respuesta corresponderá al nodo 1149, localizado sobre el muro de las piscinas IC/PCC a una elevación de 29400. En este caso sólo tenemos una gráfica por cada dirección.

Al igual que en el caso de las cargas SSE, se mostrarán los espectros de respuesta proporcionados por el cliente y las envolventes para su análisis mediante el método de elementos finitos.

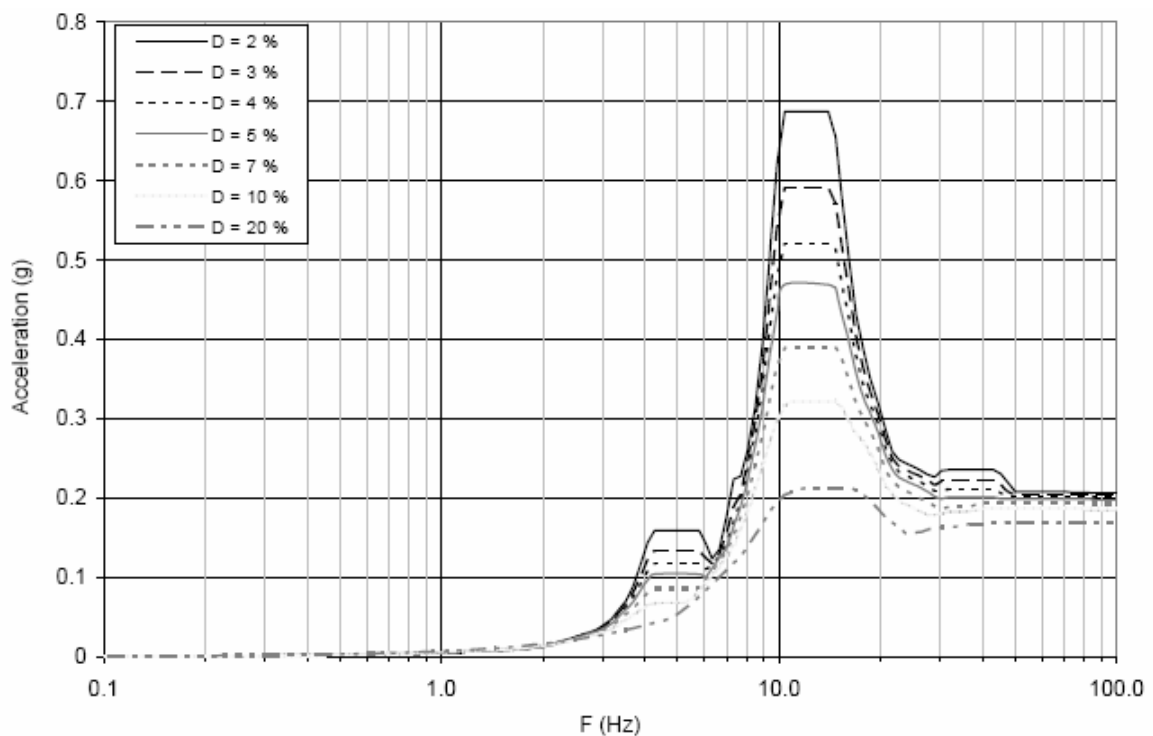


Figura 36. Espectro de respuesta en dirección X e Y, nodo 1149.



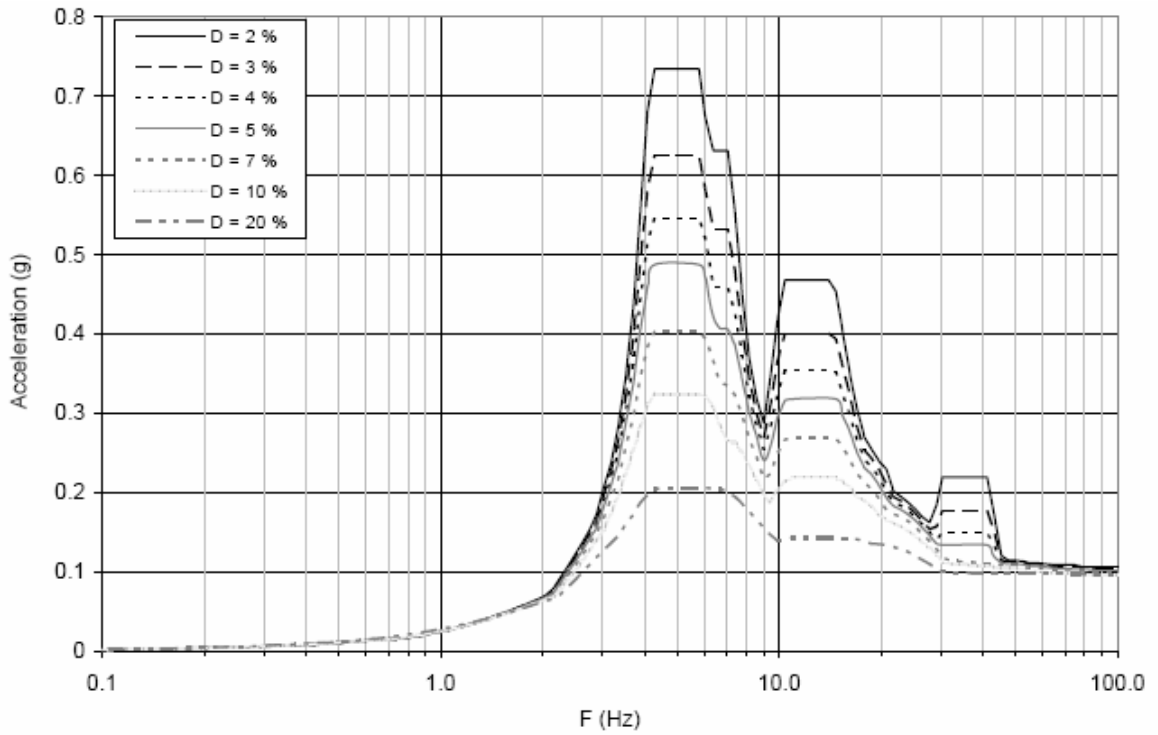


Figura 37. Espectro de respuesta en dirección Z, nodo 1149.

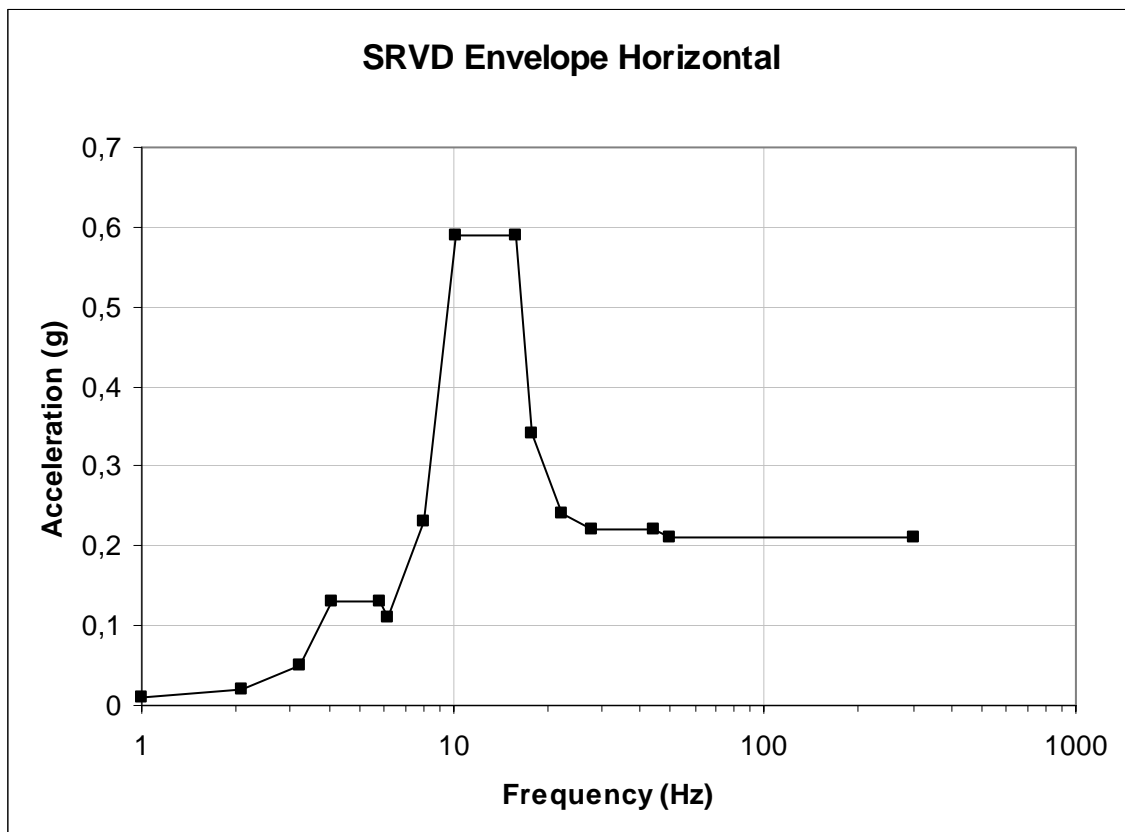


Figura 38. Envoltura SRVD en dirección horizontal.

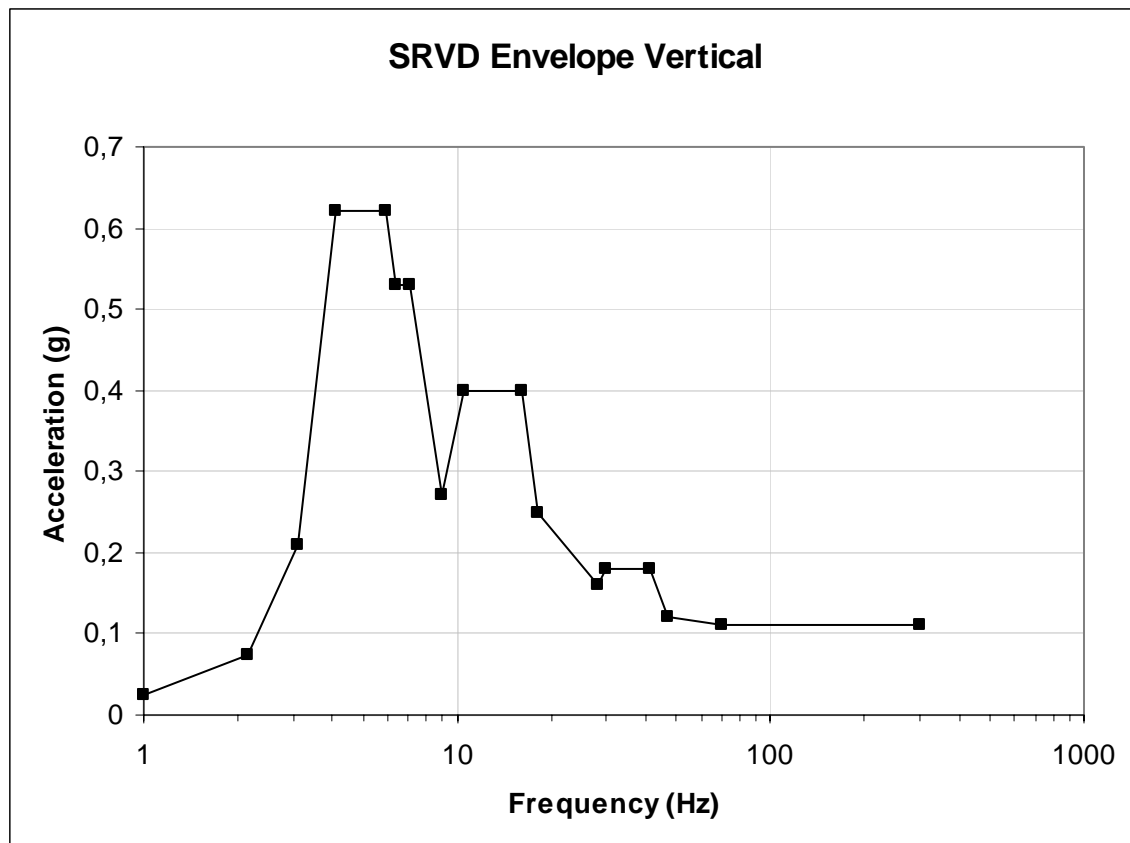


Figura 39. Envoltente SRVD en dirección vertical.

### 3.6.6 Cargas producidas por accidente con pérdida de refrigerante (LOCA)

El condensador PCCS será diseñado para resistir las cargas SRVD con un amortiguamiento estructural del 3%. Los espectros de respuesta corresponderán al nodo 1149, localizado sobre el muro de las piscinas IC/PCC a una elevación de 29400 (al igual que en caso anterior).

Al igual que en el caso de las cargas SSE y SRVD, se mostrarán los espectros de respuesta proporcionados por el cliente y las envoltentes para su análisis mediante el método de los elementos finitos.

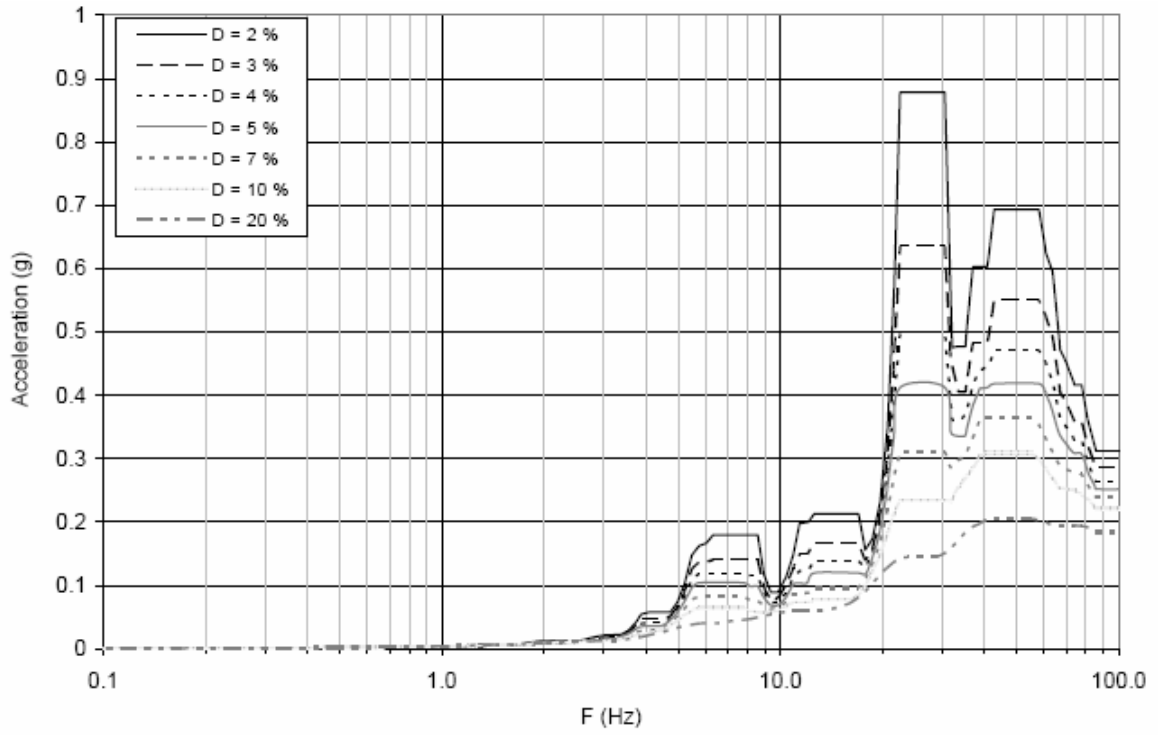


Figura 40. Espectro de respuesta en dirección X e Y, nodo 1149.

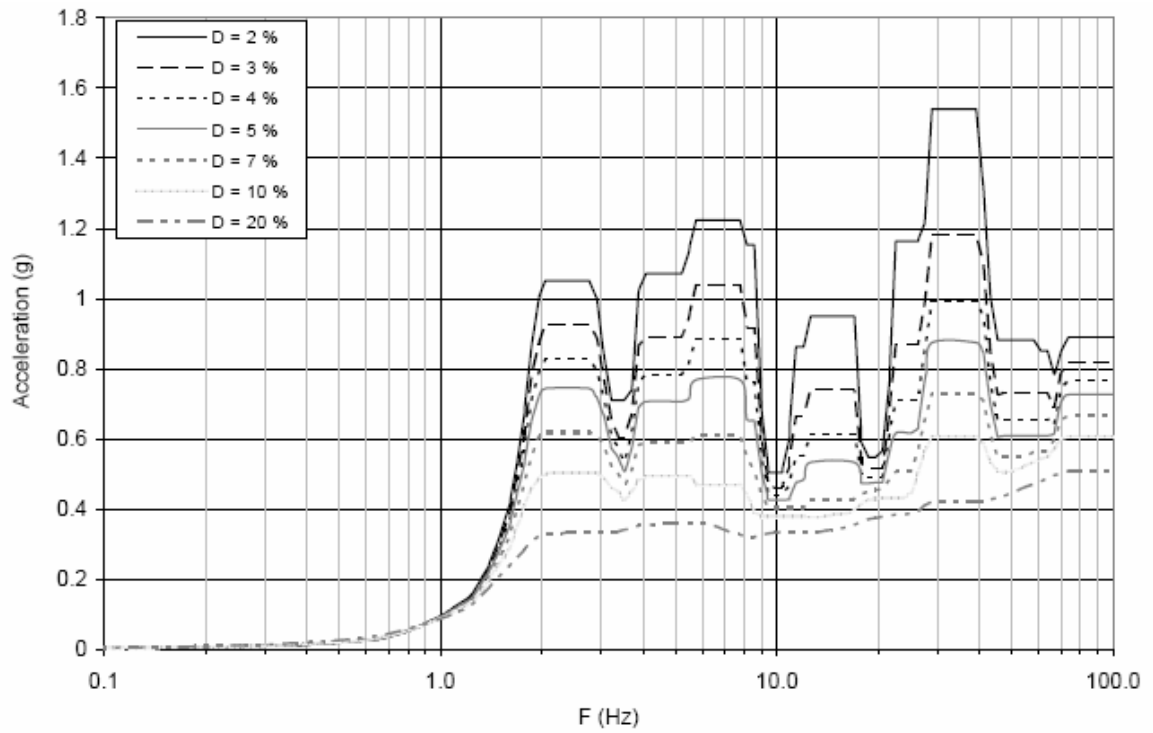


Figura 41. Espectro de respuesta en dirección Z, nodo 1149.

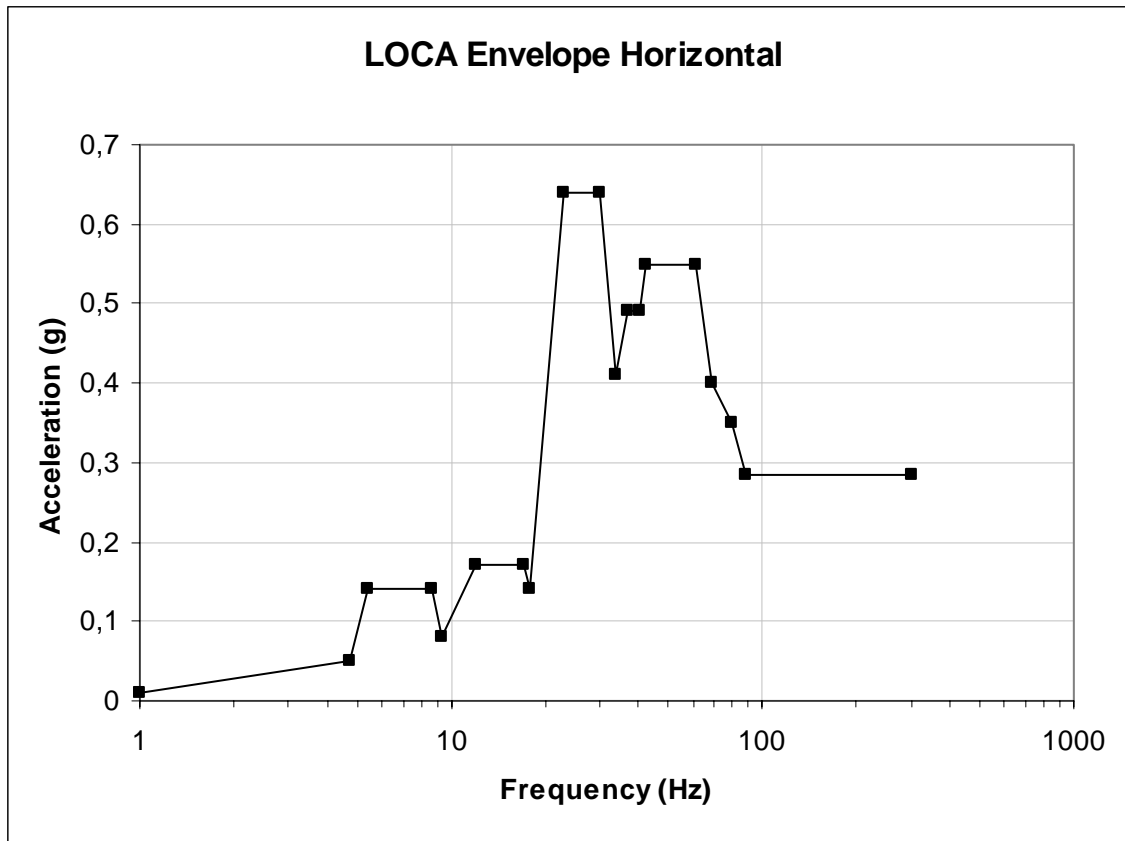


Figura 42. Envoltura LOCA en dirección horizontal.

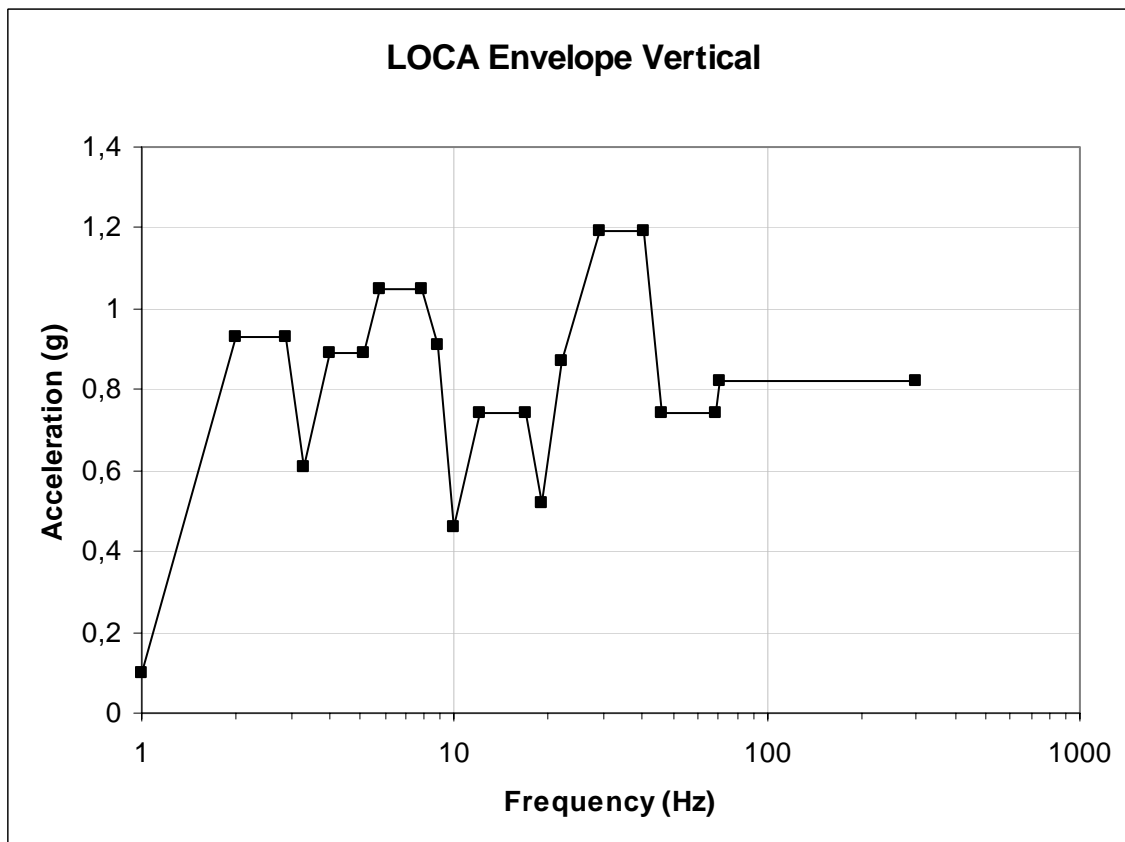


Figura 43. Envoltura LOCA en dirección vertical.

## ***4 Cálculo Analítico***

---

En esta primera parte del cálculo se evaluará el condensador PCCS mediante simplificaciones analíticas. Se comprobará que las diferentes secciones resisten las cargas a presión y temperatura de diseño, es decir, las solicitaciones correspondientes a las operaciones de diseño y de test.

En este estudio se utilizará el código ASME, y para ello, a continuación se muestra una breve introducción para familiarizarse con este código.

#### ***4.1 Código ASME***

El código ASME es el código internacional creado por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (American Society of Mechanical Engineers), utilizado en el diseño de calderas y vasijas sometidas a presión, denominado Boiler & Pressure Vessel Code.

Es necesaria la utilización de este código, ya que proporciona una serie de normas para el diseño, la fabricación y la inspección de los componentes de una central nuclear.

Estas reglas aseguran que los componentes tengan una vida operativa con un margen de deterioro, de modo que su funcionamiento sea de forma segura. Debido a los permanentes avances tecnológicos, el código ASME está en continua actualización.

El campo de aplicación del código ASME engloba multitud de casos, por lo que se divide en varias secciones agrupando así los temas comunes. En este proyecto se utilizarán la Sección II y Sección III. La Sección II se ha utilizado para obtener datos acerca de los materiales, como propiedades del material en función de la temperatura, datos de tensiones límite, etc. La Sección III proporciona requerimientos para los materiales, el diseño, la fabricación, la revisión y medición, inspección, instalación, sellado y protección frente a sobrepresiones.

Además de la sección hay que tener en cuenta la naturaleza funcional del componente a estudiar, ya que a su vez, el código ASME está dividido en subsecciones que agrupan las normas en base a la función que tenga cada elemento. En este proyecto se ha tenido en cuenta la subsección NE para los componentes, y dentro de esta subsección se ha considerado la clase MC, debido a que son componentes que pertenecen a la contención. Otra subsección empleada es la NF, utilizada para el estudio de los soportes. Dentro de la subsección NE hay que destacar dos tipos de normas: las NE-3300 se han utilizado para el cálculo analítico, mientras que las NE-3200 se han utilizado para la obtención de los valores admisibles de tensiones y poder contrastarlos con los resultados obtenidos mediante ANSYS.

## **4.2 Dimensionado**

A continuación se mostrarán las expresiones utilizadas para obtener las tensiones en los componentes del condensador PCCS. Se muestra el procedimiento de cálculo para cada sección. Se verán algunas consideraciones del análisis aunque los resultados tensionales muestran en el capítulo 6.

Las tensiones calculadas siguen el criterio de Tresca. El código ASME proporciona expresiones y valores de tensiones de “*stress intensity*”, o intensidad de tensión, y consiste en la tensión equivalente obtenida del valor doble del cortante máximo, o en otras palabras, la tensión de Tresca.

### **4.2.1 Líneas de tubería, tube bundle y sleeves (manguitos)**

La fórmula genérica que se muestra a continuación, obtenida de la norma NE-3324.3, se emplea para superficies cilíndricas, como es el caso de los siguientes elementos: steam line sleeve, steam line, steam distributor, feed lines, empaquetamiento de tubos, drain line y drain line sleeve.

$$\sigma_C = \frac{P \cdot R}{t} + 0.6 \cdot P$$

$$\sigma_L = \frac{P \cdot R}{2 \cdot t} - 0.2 \cdot P$$

donde:

- $\sigma_C$  = tensión circunferencial (MPa)  
 $\sigma_L$  = tensión longitudinal (MPa)  
 $P$  = presión de diseño = 0.7585 MPa  
 $R$  = radio interior (mm)  
 $t$  = espesor de la superficie (mm)

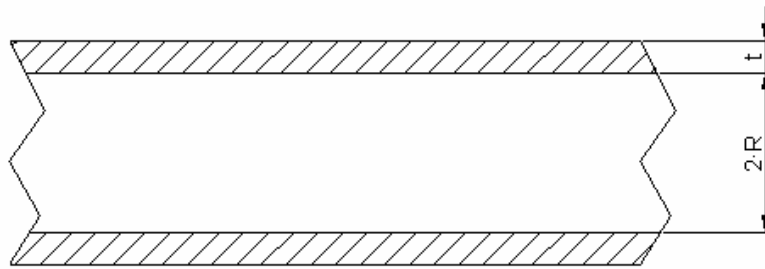


Figura 44. Detalle tubería estándar

#### 4.2.2 Headers (tambores)

En el caso de los headers superiores e inferiores, hay que modificar la fórmula anterior debido a que la superficie cilíndrica tiene numerosos agujeros debido al acoplamiento de los tambores con el empaquetamiento de tubos verticales.

$$\sigma_C = \frac{p_C}{p_C - d} \cdot \frac{P \cdot R}{t} + 0.6 \cdot P$$

$$\sigma_L = \frac{p_L}{p_L - d} \cdot \frac{P \cdot R}{2 \cdot t} - 0.2 \cdot P$$

donde:

- $p_C$  = paso circunferencial de los agujeros del empaquet. de tubos = 100 mm  
 $p_L$  = paso longitudinal de los agujeros del empaquet. de tubos = 80 mm



d = diámetro del agujero del empaquetamiento de tubos = 50.8 mm

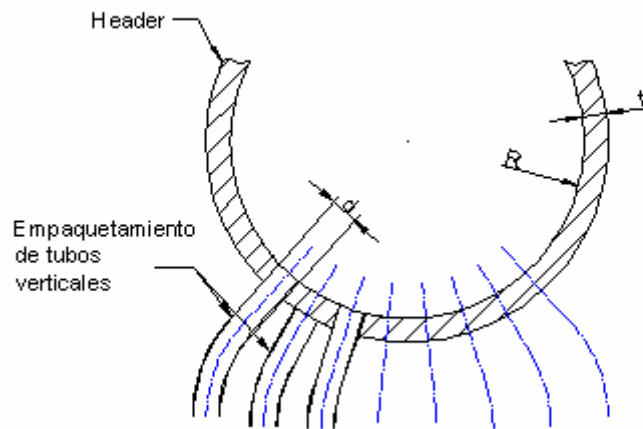


Figura 45. Detalle de header y tubos

De acuerdo a la norma NE-3332.1, la superficie cilíndrica de los tambores no requiere refuerzo en las aberturas del empaquetamiento de tubos verticales, debido a que el diámetro del agujero es menor de 64 mm. En cualquier caso, el espesor del tambor es sobredimensionado, tal y como se muestra a continuación.

El área requerida en el refuerzo entre el tambor y la abertura de la línea de condensado (condensate drain line) se calcula de acuerdo la a norma NE-3332.2:

$$A = d \cdot t_r \cdot F$$

Donde:

- A = sección total del área transversal del refuerzo (mm<sup>2</sup>)  
d = diámetro de la abertura = 303 mm  
F = factor de corrección = 1  
P = presión de diseño = 0.7585 MPa  
1.1S = tensión permisible (NE-3311)= 123.93 MPa  
R = radio interior = 330 mm  
t<sub>r</sub> = espesor requerido para presión de diseño =  $P \cdot R / (1.1 \cdot S - 0.6 \cdot P) = 2.02$  mm

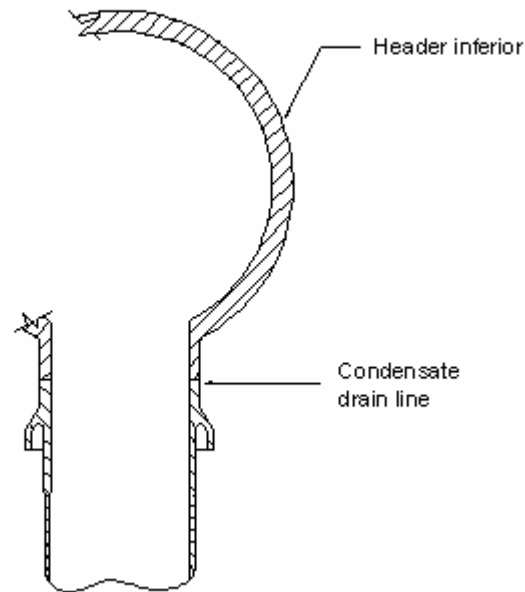


Figura 46. Detalle header inferior y condensate line

Entonces:

$$A = 303 \cdot 2.02 \cdot 1 = 612 \text{ mm}^2$$

El espesor de la tobera de la línea de condensado (drain line) es de 9.53 mm con una longitud de  $612 / (2 \cdot 9.53) = 32 \text{ mm} < 76 \text{ mm}$ , por lo que es suficiente para cumplir este requerimiento.

De forma similar, para la abertura entre los tambores superiores y la steam feed line:

$$d = 202.5 \text{ mm}$$

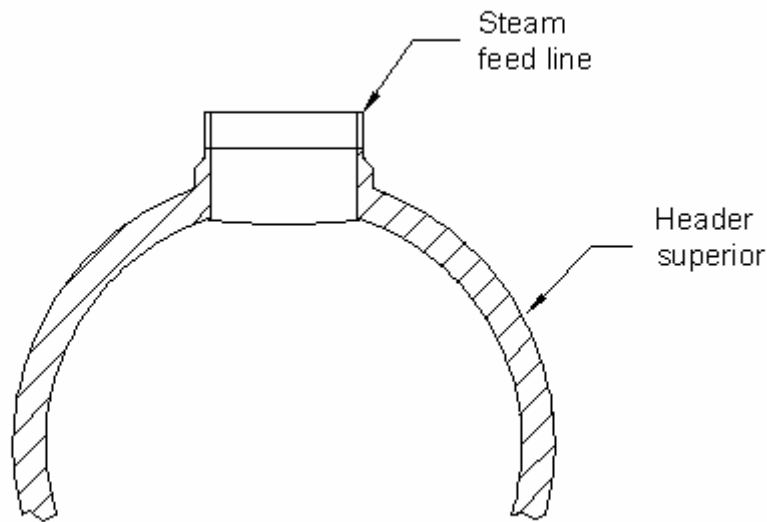


Figura 47. Detalle header superior y steam feed line

Entonces:

$$A = 202.5 \cdot 2.02 \cdot 1 = 409 \text{ mm}^2$$

El espesor de la tobera de la feed line es de 8.18 mm con una longitud de  $409 / (2 \cdot 8.18) = 25 \text{ mm} < 49 \text{ mm}$ , por lo que es suficiente para cumplir este requerimiento.

### 4.2.3 Head fittings

La siguiente fórmula, obtenida de la norma NE-3324.9, se utilizará para el cálculo de superficies cónicas, como es el caso de la parte cónica steam line head fitting y condensate line head fitting.

$$\sigma = \frac{P \cdot D}{2 \cdot t \cdot \cos \alpha} + 0.6 \cdot P$$

donde:

- P = presión de diseño = 0.7585 MPa  
 D = diámetro interior = 381 mm  
 t = espesor = 15 mm  
 $\alpha$  = semiángulo = 30°

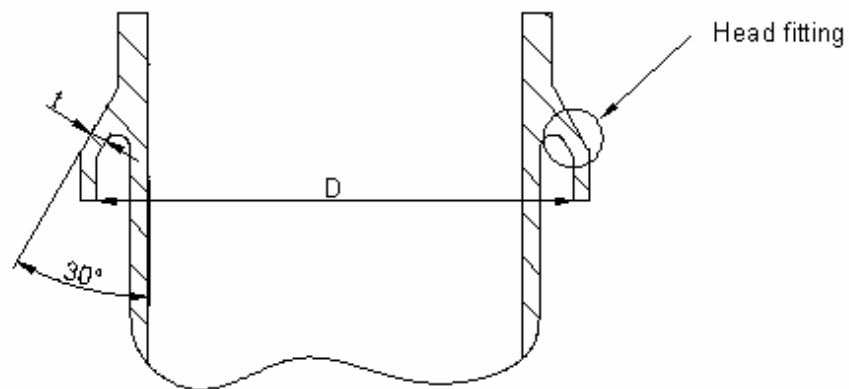


Figura 48. Detalle head fitting

Entonces:

- $\sigma$  = tensión máxima = 11.58 Mpa

#### 4.2.4 Header covers

La siguiente fórmula, obtenida mediante la norma NE-3325, se utilizará para superficies circulares, tales como los header covers (tapas de los tambores):

$$\sigma = \frac{C \cdot P \cdot d^3 + 1.27 \cdot W \cdot h_G}{d \cdot t^2}$$

Donde:

- C = 0.2, para tapas empernadas a la vasija  
 P = presión de diseño = 0.7585 MPa  
 d = diámetro de la junta = 698 mm  
 t = espesor = 40 mm  
 G = diámetro donde está localizada la carga de reacción de la junta = 698 mm  
 w = ancho utilizado para determinar el asiento de junta básico = 12 mm  
 b = ancho efectivo de junta =  $w/8 = 1.5$  mm (estimado)  
 m = factor de junta = 6 (estimado)  
 $h_G$  = distancia radial desde la carga de reacción al perno = 36 mm  
 $W = W_{m1}$  = carga total sobre el perno =  $0.785 \cdot G^2 \cdot P + 2 \cdot b \cdot 3.14 \cdot G \cdot m \cdot P = 320016$  N

Entonces:

- $\sigma$  = tensión máxima = 59.3 Mpa

Para obtener el anterior resultado se han tenido que estimar algunos parámetros debido a que no hay información precisa sobre la junta. Por lo tanto, las tensiones en las tapas de los tambores se evalúan por medio de la siguiente fórmula, obtenida a partir de "ROARK'S Formulas for Stress & Strain. Warren C Young", para placas lisas de soportado circular bajo presión:

$$M_C = \frac{P \cdot r^2 \cdot (3 + \nu)}{16}$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot M_C}{t^2}$$

Donde:

- P = presión de diseño = 0.7585 MPa  
 r = envolvente radial de los pernos = 385 mm  
 $\nu$  = coeficiente de Poisson = 0.3  
 t = espesor = 40 mm

Entonces:

$M_C$  = momento flector unitario en el centro de la placa = 23188 N mm/mm

$\sigma$  = tensión máxima = 87 MPa

Ambos valores deberían ser muy parecidos, esto no es así debido a que los parámetros estimados deberían ser más precisos. De todas formas, como no se tiene toda la información para poder aplicar la expresión obtenida de NE-3325 se tomará el último valor.

#### 4.2.5 Header Bolts

La siguiente expresión ha sido empleada para los header bolts (pernos de los tambores):

$$F_B = \frac{P \cdot \pi \cdot D^2 / 4}{n}$$

$$A_B = \frac{\pi \cdot d_B^2}{4}$$

$$\sigma = \frac{F_B}{A_B}$$

Donde:

P = presión de diseño = 0.7585 MPa

D = diámetro de la envolvente de los pernos = 770 mm

n = número de pernos = 16

$d_B$  = mínimo diámetro de sección del perno = 20 mm

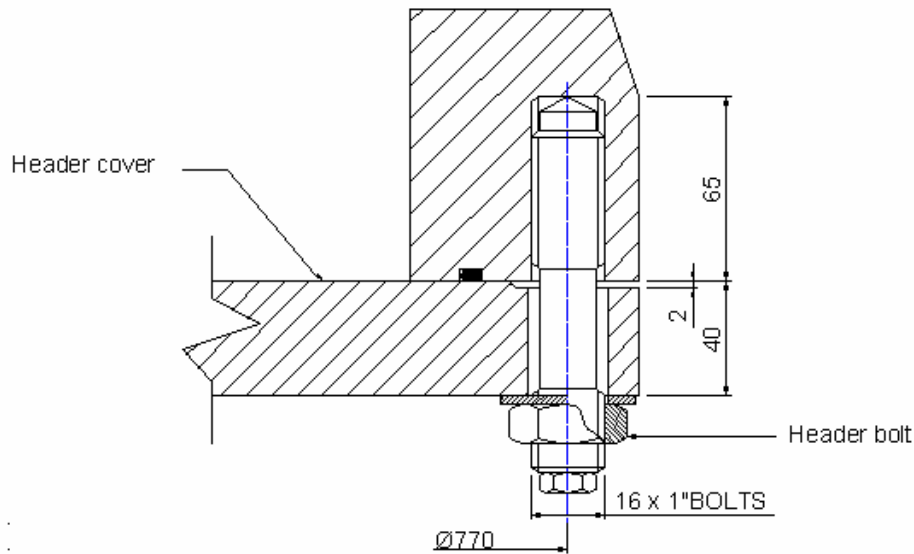


Figura 49. Detalle sección transversal entre header cover y header bolt

Entonces:

- $F_B$  = fuerza axial por perno = 22075 N  
 $A_B$  = mínima sección transversal del perno = 314.16 mm<sup>2</sup>  
 $\sigma$  = máxima tensión en el perno = 70.3 Mpa

Por otro lado, se obtiene otra expresión obtenida del código ASME, norma XI-3223:

$$W_{m1} = 0.785 G^2 \cdot P + 2 \cdot b \cdot 3.14 \cdot G \cdot m \cdot P$$

$$\sigma = \frac{W_{m1}}{n \cdot A_B}$$

Donde:

- $W_{m1}$  = carga total sobre el perno = 320016N

Entonces:

- $s$  = máxima tensión del perno = 63.7 MPa

En este caso pasa igual que en el anterior, la expresión obtenida del código ASME requiere unos parámetros que no han sido proporcionados, por lo que se considerará el primer resultado.



## ***5 Cálculo mediante el método de elementos finitos***

---

En este apartado se harán los cálculos para los diferentes casos de cargas que actúan sobre el condensador PCCS, y que no han sido posibles de realizar por medio de simplificaciones analíticas (capítulo 4).

Hay numerosos códigos numéricos que aplican el método de los elementos finitos (MEF), pero en este proyecto se utilizará ANSYS. Este código numérico nos proporciona valores de tensión atendiendo a varios criterios, en este caso, los valores tensionales obtenidos seguirán el criterio de Tresca.

Para tener una noción sobre la base de funcionamiento de este tipo de programas, a continuación se muestra una breve introducción del método de elementos finitos, MEF.

### ***5.1 Introducción al método de elementos finitos***

El procedimiento para realizar cualquier estudio se centra, generalmente, en separar los sistemas en elementos o componentes individuales cuyo comportamiento pueda conocerse sin dificultad, y a continuación reconstruir el sistema original para estudiarlo a partir de sus componentes.

Con excepción de las estructuras de barras, la mayor parte de las estructuras de arquitectura e ingeniería son de naturaleza continua, y por tanto no pueden expresarse en forma precisa en función de un número pequeño de variables discretas. Un análisis riguroso de dichas estructuras precisa la integración de ecuaciones diferenciales que expresan el equilibrio de un elemento diferencial genérico de las mismas.

El método de los elementos finitos es un procedimiento de aproximación de problemas continuos de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes o elementos cuyo comportamiento se especifica mediante un número concreto de parámetros.

- La solución del sistema completo como ensamblaje de los elementos que sigue las mismas reglas que se aplican a los problemas discretos.

Aunque las estructuras continuas son inherentes tridimensionalmente, en algunos casos su comportamiento puede describirse adecuadamente por modelos matemáticos bidimensionales o incluso unidimensionales.

El método de los elementos finitos es hoy día el procedimiento más potente para el análisis de estructuras de carácter uni, bi o tridimensional, sometidas a las acciones exteriores más diversas. Las etapas básicas del análisis son las siguientes:

- 1- Seleccionar un modelo matemático apropiado para describir el comportamiento de la estructura, definiendo las propiedades mecánicas de cada uno de los materiales que lo componen, así como el carácter de deformación del mismo.
- 2- Discretización de la estructura en porciones no intersectantes entre sí, denominadas “*elementos finitos*”, dentro de las cuales se interpolan variables principales, en función de sus valores en una serie de puntos discretos del elemento denominados “*nodos*”. Los elementos se conectan entre sí por los nodos situados en su contorno. Esta es la parte fundamental de este preproceso.
- 3- A partir de la expresión del Principio de los Trabajos Virtuales, se obtienen las matrices de rigidez,  $k$ , y el vector de cargas,  $f$ , para cada elemento.
- 4- Ensamblaje de las matrices de rigidez y el vector de carga elementales en la matriz de rigidez global de toda la malla de elementos finitos,  $K$ , y el vector de cargas sobre los nodos,  $F$ .
- 5- El sistema de ecuaciones resultante  $k \cdot a = f$  se resuelve para calcular las variables incógnitas (movimientos de todos los nodos de la malla).
- 6- Cálculo de las deformaciones y tensiones de cada elemento, así como las reacciones en los nodos con movimientos prescritos.

Una vez realizadas las distintas etapas, tenemos que interpretar y presentar los resultados numéricos obtenidos.

Las etapas 3 a 6 son las que implementamos en el ordenador con el método de los elementos finitos. Una vez estudiados los resultados, pueden efectuarse modificaciones de cualquiera de las etapas anteriores.

Las estructuras a estudiar tienen infinitos grados de libertad y, por tanto, para conocer cuál sería su comportamiento frente a la acción de cargas exteriores debería ser necesario integrar las correspondientes ecuaciones diferenciales de equilibrio. Sin embargo, este tipo de análisis es con frecuencia de gran dificultad o imposible, debido a la geometría de la estructura, la naturaleza de las condiciones de contorno, la distribución de las propiedades mecánicas de los materiales, el tipo de cargas, etc., y en la práctica es necesario utilizar métodos simplificados que nos permitan analizar la estructura de manera aproximada.

El método de los elementos finitos es uno de los procedimientos que existen para aproximar el comportamiento de una estructura con infinitos grados de libertad por el de otra, con prácticamente las mismas propiedades físicas y geométricas, pero con un número finito de grados de libertad, cuyas ecuaciones de equilibrio pueden expresarse por un sistema algebraico de ecuaciones simultáneas con un número limitado de incógnitas. De esta forma sustituimos la estructura por un modelo teórico formado por una serie de elementos finitos, conectados entre sí a través de sus nodos y sometidos a una serie de acciones externas.

Una vez discretizada la estructura obtendremos las ecuaciones matriciales de la misma, a partir del estudio del equilibrio de los elementos que la componen.

## ***5.2 Introducción a ANSYS***

ANSYS se utiliza para la resolución de una gran variedad de problemas, ya sean estáticos, dinámicos, lineales, no lineales, térmicos, electromagnéticos, etc.

El funcionamiento básico de ANSYS al igual que en el caso de la mayoría de los programas de elementos finitos, se puede resumir en tres etapas fundamentales:

#### A) Preproceso

En esta etapa se incluye todo lo referente a la geometría del problema, materiales, secciones, acciones externas, condiciones de contorno y mallado. Esta etapa a su vez se puede dividir en las siguientes fases:

- Dibujo del modelo, ya sea mediante el propio ANSYS o importado de otro programa, como puede ser el AUTOCAD, SOLID EDGE, etc.
- Elección el tipo de elemento, que será función de la geometría y del tipo de cálculos a realizar.
- Elección de los materiales. Este programa cuenta con una librería donde están numerados una gran cantidad de materiales, aunque también pueden ser definidos por el usuario.
- Asignación a cada componente del modelo el tipo de elemento y material previamente definidos.
- Mallado de los componentes. En fase es donde se realiza la discretización, dividiendo así el componente continuo en una serie de nodos y elementos finitos.
- Aplicación de las cargas.
- Definición de las condiciones de contorno y condiciones iniciales.

### B) Solución

En esta etapa se calcula el modelo generado anteriormente, mediante la resolución del sistema de ecuaciones a partir de los datos introducidos.

Se resuelven las ecuaciones algebraicas, ya sean lineales como no lineales, para obtener un resultado discretizado (desplazamientos, temperaturas, tensiones, etc., en los nodos). Para obtener el resultado final, el programa sigue una serie de pasos que se muestran a continuación:

- Definición del tipo de estudio a realizar (estático, dinámico, térmico, etc.).
- Configuración de los parámetros de cálculo.
- Inicio del cálculo, donde el programa empieza por transmitir las cargas al modelo, generando así las matrices de rigidez. Después se produce la triangulación de la matriz resolviendo el sistema de ecuaciones y generando la solución.

### C) Postproceso

Una vez que se ha generado la solución el siguiente paso es observar y analizar los resultados. En el caso de ANSYS, en el “*postprocesador*” hay numerosos comandos para mostrar de formas muy diversas los resultados, desde la deformada y el campo de tensiones, hasta videos donde se aprecia los modos principales de deformación, pudiendo así comprobar si los resultados son correctos.

## **5.3 Características del modelo de elementos finitos**

El modelo realizado para el MEF representa la geometría actual del condensador PCCS y los soportes, mostrados en los planos del Anexo A. Incluye todos los componentes

comprendidos entre la entrada de vapor, por el steam line sleeve, hasta la salida de la mezcla de condensado y no condensado, el condensate line sleeve.

Las tuberías de vertido, interiores a las líneas de condensado, no se han incluido en este estudio ya que no tienen influencia sobre el comportamiento estructural del condensador PCCS.

Debido a que el condensador PCCS está sumergido en una piscina con agua, y que por su interior también se condensa el vapor, hay que considerar en el estudio la aportación de estas masas de agua desplazadas debido al movimiento de la estructura. Por tanto, este fenómeno se incluye en el modelo mediante el incremento de la densidad del material. Todos los componentes del condensador PCCS son cilíndricos. Para cada componente habrá que tener en cuenta la masa de agua interna,  $M_{iw}$ , masa de agua externa,  $M_{ew}$ , la masa del acero,  $M_s$  y la densidad ficticia que tendrán al considerar los efectos de las masas anteriores,  $\rho'$ . Estos factores son calculados de la siguiente manera:

$M_{iw} = \rho_w \cdot \pi \cdot R_i^2 \cdot L$ , donde  $\rho_w$  es la densidad del agua,  $R_i$  es el radio interior del cilindro y  $L$  es la longitud del cilindro.

$M_{ew} = \rho_w \cdot \pi \cdot R_e^2 \cdot L$ , donde  $R_e$  es el radio externo del cilindro.

$M_s = \rho_s \cdot \pi \cdot (R_e^2 - R_i^2) \cdot L$  donde  $\rho_s$  es la densidad del acero.

$\rho_t' = (M_{iw} + M_{ew} + M_s) \cdot \rho_s / M_s$  para los componentes de la mitad superior.

$\rho_b' = (M_{ew} + M_s) \cdot \rho_s / M_s$  para los componentes de la mitad inferior.

Se hace esta distinción sobre ambas mitades, ya que como la condensación se empieza a producir en el empaquetamiento de tubos verticales, se asume que a partir de la mitad inferior de estos tubos, estos están llenos de agua, por tanto, es una suposición muy conservativa.

La siguiente tabla muestra las densidades ficticias calculadas para cada componente.

Componente	Re, m	Ri, m	Área de acero, m <sup>2</sup>	Área de agua externa, m <sup>2</sup>	Área de agua interna, m <sup>2</sup>	Densidad ficticia, kg/m <sup>3</sup>
<b>Header inferior</b>	0.375	0.33	0.099667	0.441786467	0.34211944	15715
<b>Mitad inferior de tubes bundle</b>	0.0254	0.02375	0.000255	0.00202683	0.00177205	22761
<b>Header superior</b>	0.375	0.33	0.099667	0.441786467	0	12283
<b>Mitad superior de tubes bundle</b>	0.0254	0.02375	0.000255	0.00202683	0	15805
<b>Feed lines</b>	0.10954	0.1036	0.003977	0.037696007	0	17328
<b>Steam line</b>	0.1365	0.12723	0.00768	0.05853494	0	15471
<b>Steam distributor</b>	0.1619	0.152375	0.009404	0.082346201	0	16606

Tabla 6. Densidades del acero incluyendo las masas de agua.

El sistema de coordenadas adoptado en el MEF es el sistema de coordenadas cartesiano. La dirección X corresponde a la dirección horizontal E-W de la central, la dirección Y a la dirección horizontal N-S de la central y la dirección Z corresponde a la dirección vertical.

Las unidades utilizadas en el MEF del condensador PCCS son kilogramos para la masa, metro para la longitud y segundos para el tiempo.

En la siguiente figura se puede observar la masa para cada sistema.

	Masa, kg
<b>Condensador PCCS, acero</b>	12510
<b>Agua interna</b>	2779
<b>Agua externa</b>	7390
<b>Dynamic Support Structure</b>	2017
<b>Masa total</b>	24696

Tabla 7. Masas separadas.

En el Anexo B se muestra la entrada de datos para el MEF introducido en ANSYS.



## 5.4 Aplicación de las cargas

A continuación se procede a explicar la segunda parte del análisis estructural, realizado mediante ANSYS. En este caso se estudiarán las cargas dinámicas más el peso propio del sistema, sin incluir las tensiones a presión de diseño, calculadas mediante las expresiones vistas en el punto 4.

El caso de carga estática debida al peso (D) se resuelve por análisis estático aplicando la gravedad, aceleración de 9.81 m/s<sup>2</sup>. Para este caso no se tiene en cuenta la masa de agua externa desplazada, ya que no se produce desplazamiento (o es insignificante), por lo tanto hay que considerar las densidades sin tener en cuenta este factor.

Componente	Re, m	Ri, m	Área de acero, m <sup>2</sup>	Área de agua interna, m <sup>2</sup>	Densidad ficticia, kg/m <sup>3</sup>
<b>Header inferior</b>	0.375	0.33	0.099667	0.34211944	11283
<b>Mitad inferior de tubes bundle</b>	0.0254	0.02375	0.000255	0.00177205	14806
<b>Header superior</b>	0.375	0.33	0.099667	0	7850
<b>Mitad superior de tubes bundle</b>	0.0254	0.02375	0.000255	0	7850
<b>Feed lines</b>	0.10954	0.1036	0.003977	0	7850
<b>Steam line</b>	0.1365	0.12723	0.00768	0	7850
<b>Steam distributor</b>	0.1619	0.152375	0.009404	0	7850

*Tabla 8. Densidades sin tener en cuenta la masa de agua externa*

La expansión térmica se evalúa a través de análisis estáticos introduciendo las temperaturas antes definidas en el apartado 3.6.3.

Para realizar en análisis dinámico, primero se realiza un análisis modal para obtener los modos propios del sistema completo, donde se tienen en cuenta los 10 modos propios principales.

A continuación se realiza un análisis de espectros de respuesta, considerando los eventos dinámicos de cada nivel con cada una de sus direcciones X, Y y Z (por lo tanto 9 casos para el nivel C/D y 6 casos para el nivel A/B). Por lo tanto hay que introducir

las envolventes obtenidas de los espectros de respuesta mostrados en los apartados 3.6.4, 3.6.5 y 3.6.6. Ansys realiza este análisis y nos muestra la significatividad de cada modo propio en cada caso.

Para comprender mejor el procedimiento del análisis en la siguiente tabla se observa el archivo de salida para el caso de carga dinámica SSE con dirección X (se verá este caso como ejemplo). El resto del archivo de salida se incluye en el Anexo D.

MODE MASS	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO	EFFECTIVE
1	14.73	30.183	0.6986	0.2461E-02	0.006562	0.488017
2	15.34	31.146	111.9	0.3750	1.000000	12520.7
3	17.28	31.392	-7.245	-0.1929E-01	0.051429	52.4875
4	25.71	28.822	-0.1058	-0.1168E-03	0.000311	0.111911E-01
5	31.26	21.091	-4.724	-0.2582E-02	0.006887	22.3192
6	37.77	21.091	-0.3492	-0.1308E-03	0.000349	0.121931
7	38.55	21.091	0.7194	0.2586E-03	0.000690	0.517536
8	38.56	21.091	0.1219	0.4378E-04	0.000117	0.148522E-01
9	38.59	21.091	-0.8068E-02	-0.2895E-05	0.000008	0.650891E-04
10	38.60	21.091	0.3872E-03	0.1389E-06	0.000000	0.149909E-06

Tabla 9. Resultados análisis de espectros de respuesta. SSE dirección X.

Como se puede observar en la tabla anterior, mirando los coeficientes, factores de participación y masa efectiva que participa en cada modo, se obtienen los modos propios más significativos. En este análisis, ANSYS toma los modos propios con un “M.C. Ratio” mayor a 0.001, aunque este factor puede variarse. Por lo tanto los modos que se considerarán para este caso serán los siguientes.

```

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE      FREQUENCY      DAMPING      SV      MODE COEF.
1         14.73          0.0000      30.183   0.2461E-02
2         15.34          0.0000      31.146   0.3750
3         17.28          0.0000      31.392  -0.1929E-01
5         31.26          0.0000      21.091  -0.2582E-02
    
```

Tabla 10. Modos propios significativos. SSE dirección X.

El paso siguiente consiste en unificar las aportaciones de estos modos en un sólo caso, y esto se realiza por el “grouping method”. Este método se obtiene del Regularoy Guide 1.92, y fundamentalmente consiste en la suma cuadrática de cada aportación, con la salvedad de que en el caso de tener frecuencias comprendidas en un radio del 10% de la frecuencia menor, se suman directamente y luego se realiza el cuadrado. El propio ANSYS también nos da información sobre la suma cuadrática empleada por este método.

```

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

1          FREQUENCY  14.732      HERTZ PART OF CLOSELY SPACED GROUP
1          FREQUENCY  15.343      HERTZ PART OF CLOSELY SPACED GROUP
          MODE=    3  FREQUENCY=    17.283  COUPLING COEF.=    1.000
          MODE=    5  FREQUENCY=    31.263  COUPLING COEF.=    1.000
    
```

Tabla 11. Combinación de los modos.

En la tabla anterior se observa que los modos propios 1 y 2 se suman directamente. Es debido a que el 10% de 14.732 nos da un valor de 16.021, por lo tanto, la frecuencia del modo propio 2, 15.343, está dentro del rango. En cambio, la siguiente frecuencia está por encima de 16.021, por lo que se sumaría por separado, a no ser que la siguiente

frecuencia a ella estuviera dentro del 10% tomando como menor frecuencia 16.021, pero no es el caso. De este modo la aportación de los modos propios significativos quedaría de la siguiente forma:

$$SSE_x = \sqrt{(MP(1) + MP(2))^2 + MP(3)^2 + MP(5)^2}$$

Donde MP(i) correspondería a cada uno de los modos propios que se consideran en el análisis.

Este sería el procedimiento para cada uno de los casos del análisis de espectros de respuesta.

Como con los modos propios incluidos en el análisis (los significativos) no desplazan el 90% del total de la masa, hay que considerar un análisis estático denominado, ZPA. Aquí se analiza cada uno de los casos anteriores, cuando se estabiliza la aceleración a altas frecuencias (generalmente a partir de 100 Hz), considerando sólo la fracción de masa pérdida (no desplazada) en el análisis de espectros de respuesta. Esta norma viene especificada en “*Standard Review Plan 3.7.2 Seismic System Analysis*”.

Por último, se suman todas estas combinaciones mediante el método SRSS, que es simplemente la suma cuadrática de cada aportación.

El archivo de entrada para el análisis en ANSYS, correspondiente a los niveles de servicio C/D de combinación de cargas, se incluyen en el Anexo C.

## **5.5 Modelo en ANSYS**

En este punto se mostrará la modelización en ANSYS del condensador PCCS, así como los tipos de elementos utilizados y se mostrará con detalle los componentes principales de los que consta el sistema.

### 5.5.1 Tipos de elementos utilizados

En el modelizado del condensador PCCS se han tenido que utilizar dos tipos de elementos distintos, SHELL 63 y BEAM 44. La elección del tipo de elemento dependerá de la geometría de cada elemento. A continuación se definen ambos elementos.

#### SHELL 63

El elemento SHELL 63 tiene capacidades tanto de membrana como de flexión, permitiendo cargas sobre el plano y normales a él. Este elemento tiene seis grados de libertad en cada nodo: tres en las direcciones X, Y y Z, y otros tres debidos a las rotaciones según los ejes anteriores.

Este elemento tiene las características de permitir grandes deformaciones y el endurecimiento del material por aplicación de tensiones. También nos permite la opción de utilizar una matriz de rigidez tangencial muy consistente para el caso de análisis de grandes deformaciones. La siguiente figura muestra la geometría de un elemento SHELL 63.

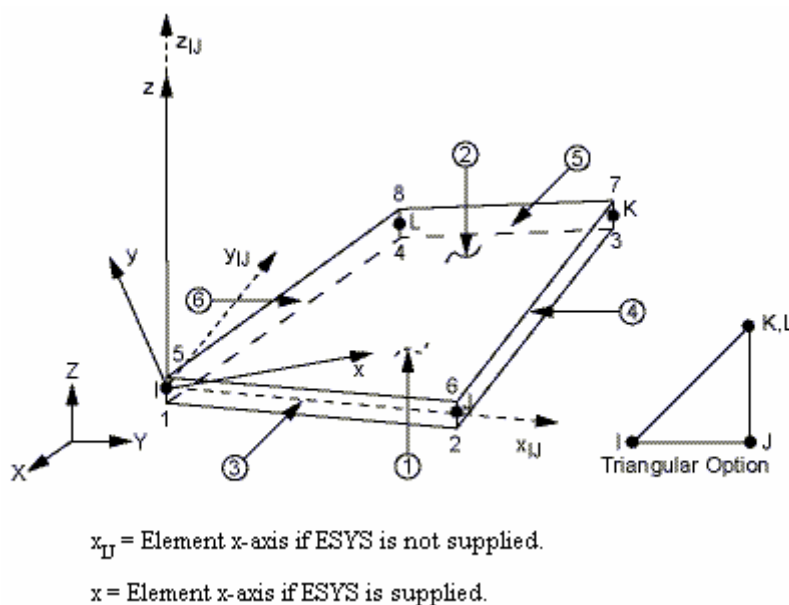


Figura 50. Geometría de un elemento SHELL 63.

En la siguiente tabla se muestran los componentes modelizados con el elemento SHELL 63 y su correspondiente dato geométrico que lo define. En este caso, como se ha visto anteriormente, sólo se necesita el espesor de la pared, una vez que se ha dibujado el componente mediante una magnitud media (por ejemplo, en el caso de una tubería se daría el diámetro medio, y en el caso de un disco, se dibujaría éste en el espesor medio).

<b>Componente</b>	<b>Espesor (mm)</b>
Headers	45
Header covers	40
Steam line	9.27
Feed line	8.18
Steam distributor	9.52
Steam line sleeve	12.7
Steam line head fitting	15
Condensate line	9.525
Condensate line sleeve	12.7
Condensate line head fitting	15
Support saddle	30
Support saddle base plates	35

*Tabla 12. Componentes modelados con SHELL 63.*

### **BEAM 44**

El elemento BEAM 44 es un elemento uniaxial que permite la tensión, compresión, torsión y flexión. Este elemento tiene seis grados de libertad para cada nodo: tres en las direcciones X, Y y Z, y otros tres para las rotaciones sobre los ejes antes mencionados. Este tipo de elemento se utiliza para modelar aquellos elementos más complejos.

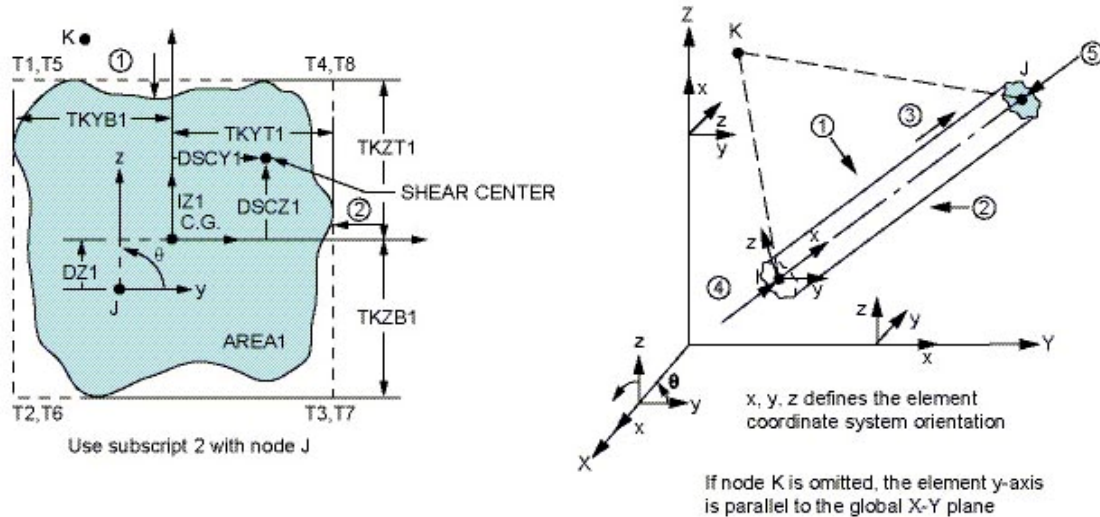


Figura 51. Geometría del elemento BEAM 44.

Los componentes modelados con el elemento BEAM 44 son los siguientes:

Tubes Bundle

Los parámetros utilizados para definir los tubes bundle (empaquetamiento de tubos verticales) son los siguientes:

Diámetro exterior,  $D_p = 0.0508 \text{ m}$

Espesor de la pared,  $T_p = 0.00165 \text{ m}$

Distancia desde la fibra externa al centro = Radio exterior,  $R_e = D_p/2 = 0.0254 \text{ m}$

Radio interior,  $R_i = R_e - T_p = 0.02375 \text{ m}$

Momento de inercia,  $I_p = \pi/4 \cdot (R_e^4 - R_i^4) = 0.7702E-7 \text{ m}^4$

Área transversal,  $A_p = \pi \cdot (R_e^2 - R_i^2) = 0.25478E-3 \text{ m}^2$

Momento de inercia polar,  $I_o = 2 \cdot I_p = 0.154E-6 \text{ m}^4$

Factor de tensión torsional,  $TSF = R_e/I_o = 164892 \text{ m}^{-3}$

Área de esfuerzo cortante,  $A_s = 3/4 \cdot A_p = 0.19108E-3 \text{ m}^2$

Estructura de soportado dinámico

La estructura de soportado dinámico consiste en vigas de tipo cuadrado de  $6 \times 6 \times 0.375$ .

Los parámetros para definir esta estructura mediante BEAM 44 son los siguientes:

Momento de inercia,  $I_t = 0.17315E-7 \text{ m}^4$

Área transversal,  $A_t = 0.52129E-2 \text{ m}^2$

Momento de inercia polar,  $J = 0.28512E-4 \text{ m}^4$

Distancia desde la fibra externa al centro = 0.0762 m

Factor de tensión torsional,  $TSF = 1/(6 \cdot 6 \cdot 0.375 \cdot 0.0254^3) = 4520.3 \text{ m}^{-3}$

Área de esfuerzo cortante,  $A_s = 3/4 \cdot A_p = 0.2606E-2 \text{ m}^2$

### 5.5.2 Modelizado de los componentes

En este apartado se muestra el modelo en ANSYS utilizado para definir cada elemento por separado.

#### Header

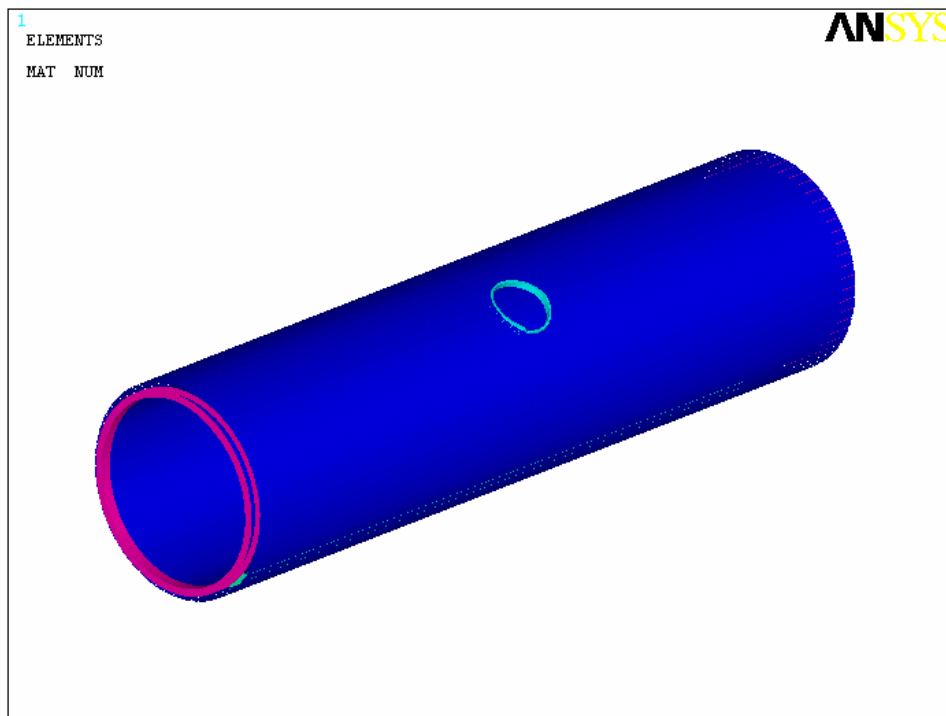


Figura 52. Detalle de un header.



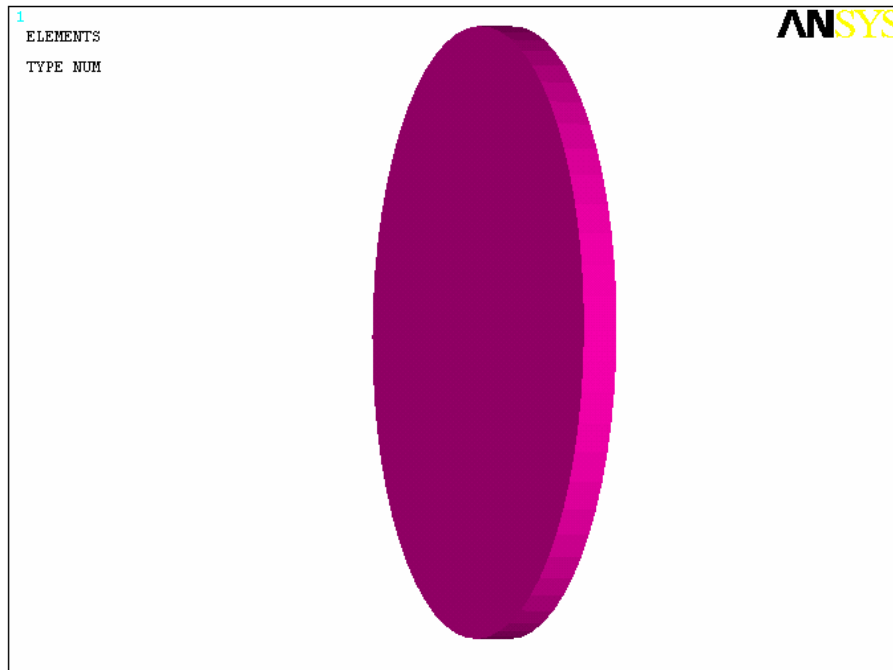
Header cover

Figura 53. Detalle de header cover.

Tubes bundle

En las siguientes figuras se muestra el modelado del empaquetamiento de tubos verticales. A priori parece que están diseñadas mediante estructuras cuadradas, pero en realidad son tuberías cilíndricas. Esto es debido a que el ANSYS muestra así los elementos tipo BEAM 44, descrito anteriormente.

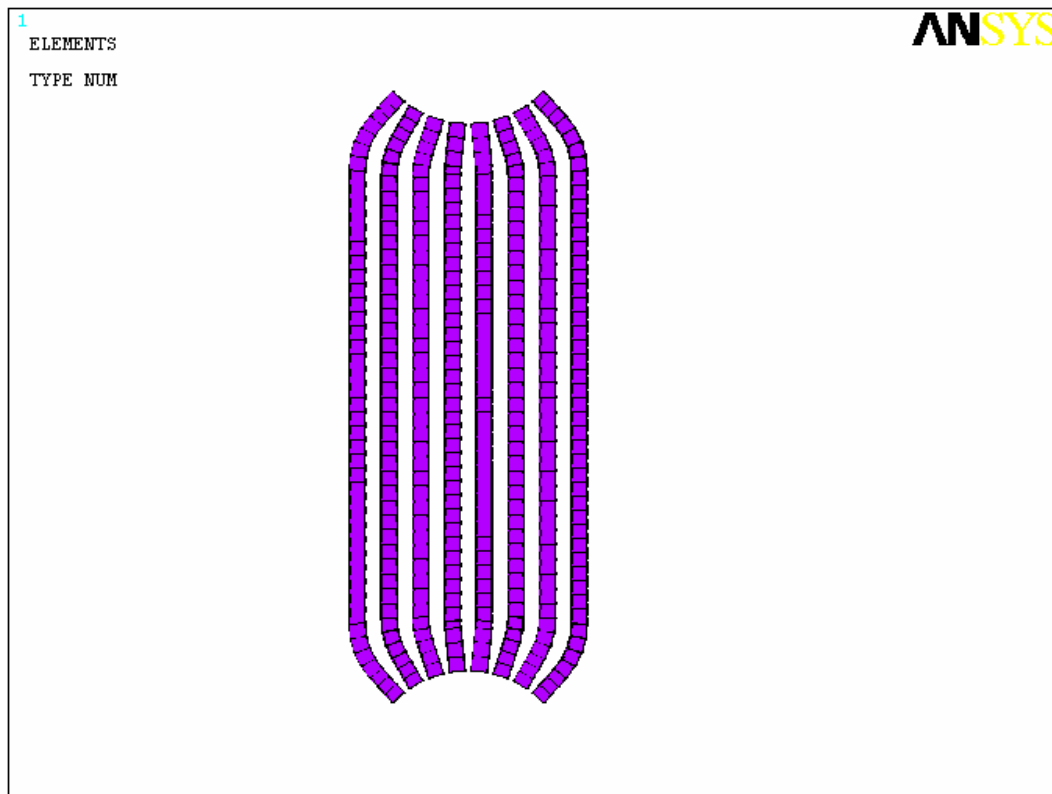


Figura 54. Detalle frontal de tubes bundle.

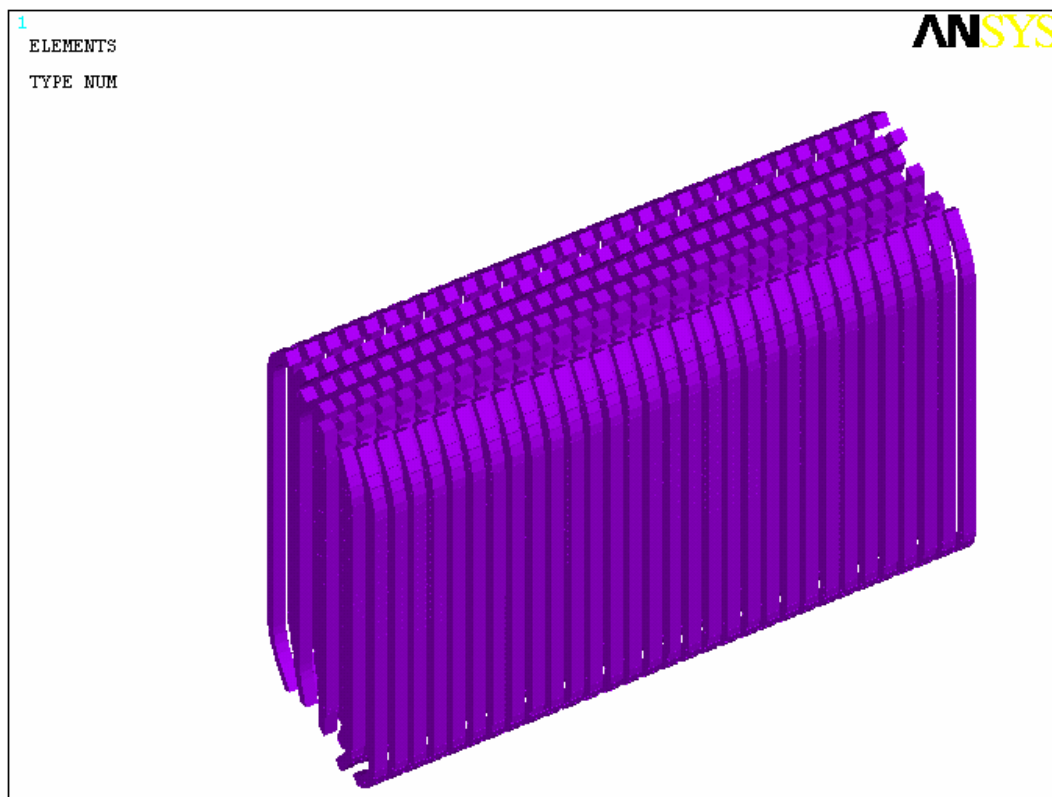
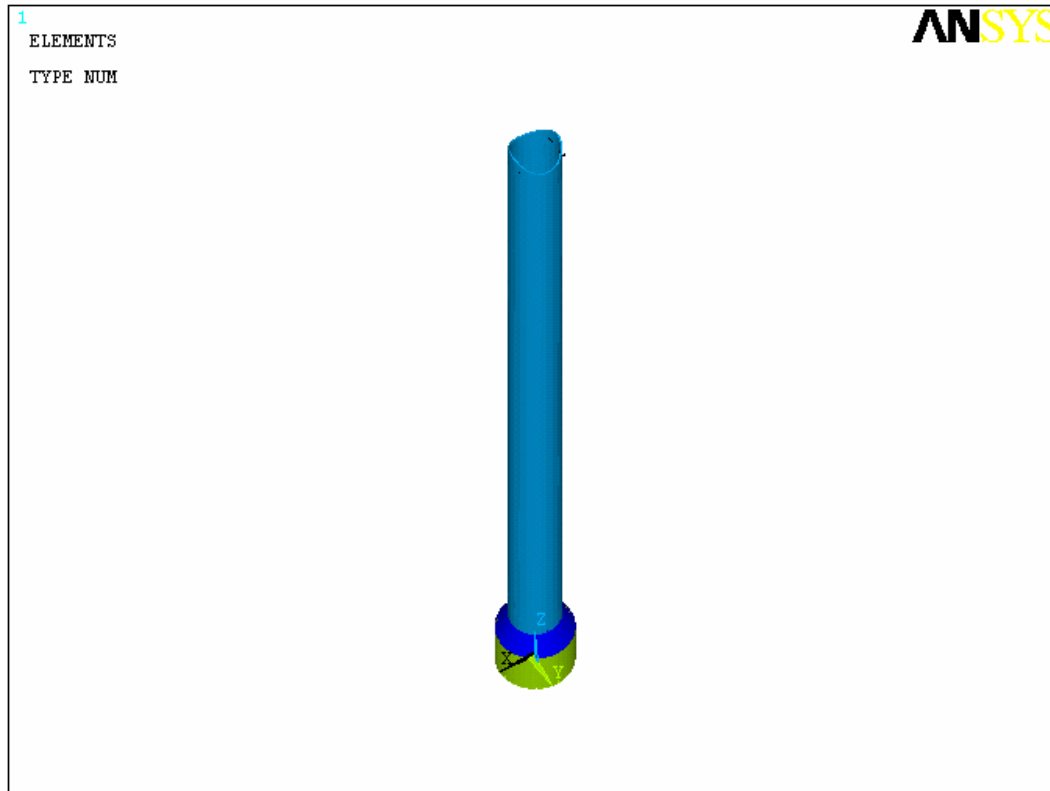


Figura 55. Detalle isométrico de tubes bundle.

### Steam line

A continuación se muestra la steam line (color azul claro) junto con el steam line head fitting (color azul oscuro) y el steam line sleeve (color verde).



*Figura 56. Detalle conjunto steam line.*

Steam distributor

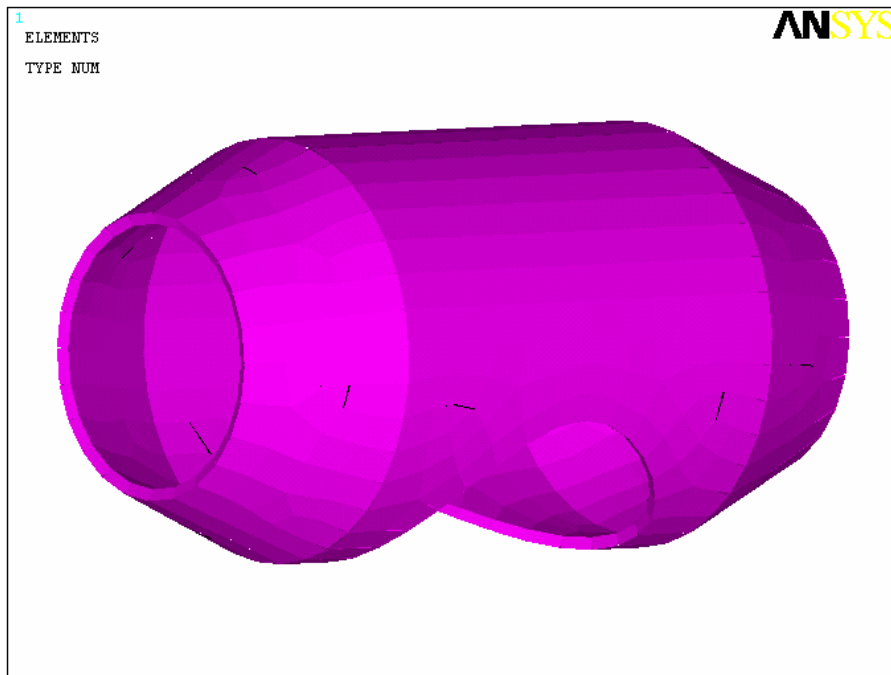


Figura 57. Detalle de steam distributor.

Feed line

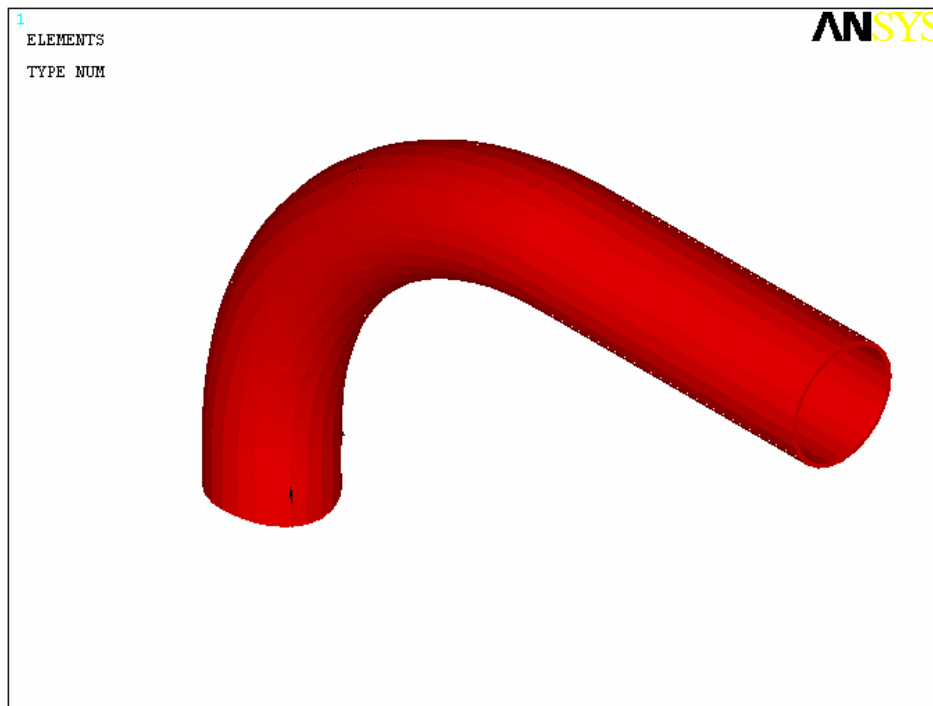
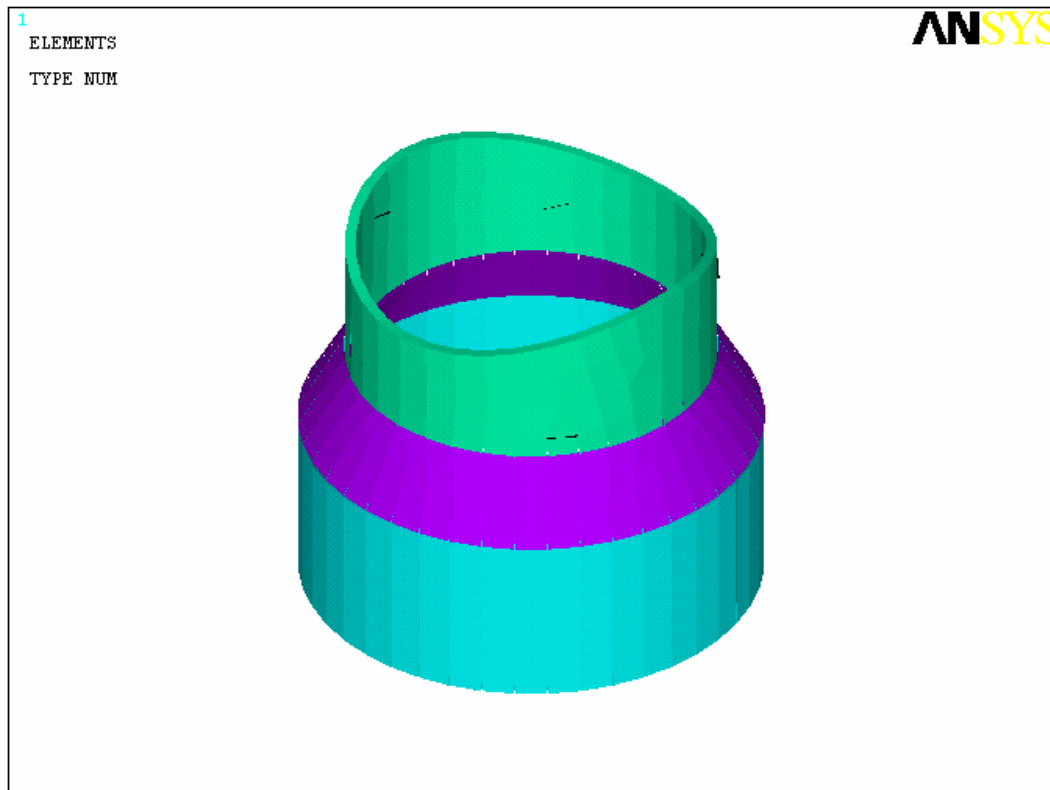


Figura 58. Detalle de feed line.

### Condensate line

A continuación se muestra el conjunto formado por la condensate line (color verde), el condensate line head fitting (color violeta), y el condensate line sleeve (color azul-verde).



*Figura 59. Detalle del conjunto condensate line.*

### Support saddle

En el siguiente detalle se muestran los soportes de los headers inferiores, los support saddle (color verde y naranja) y la base de estos soportes, support saddle base plate (color rojo).

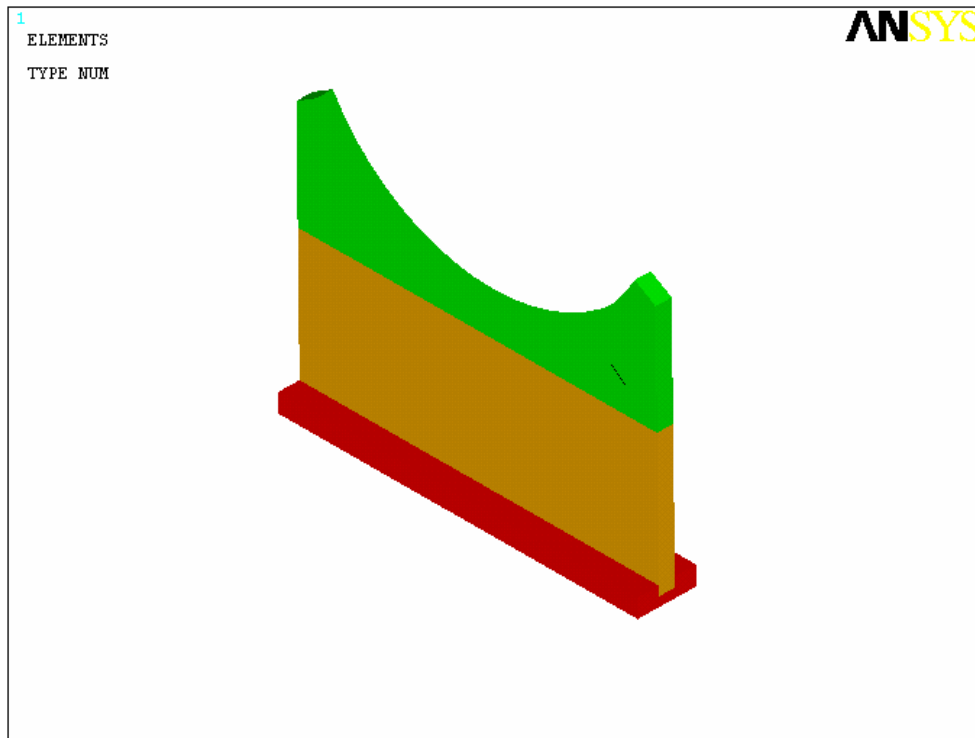


Figura 60. Detalle de support saddle.

Estructura de soportado dinámico

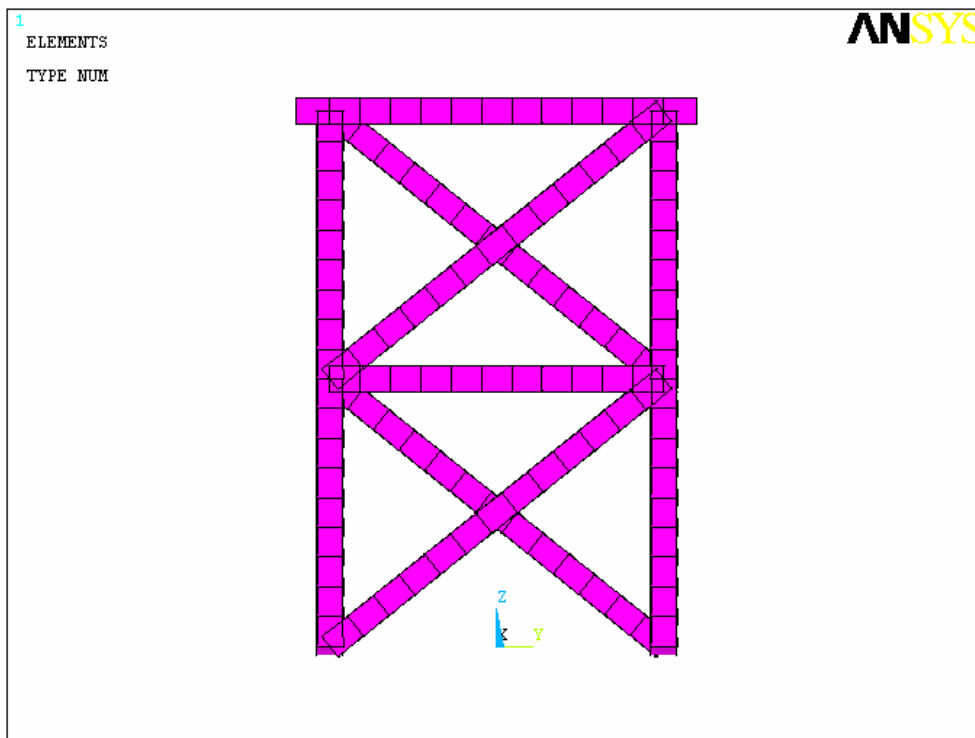


Figura 61. Detalle estructura soportado dinámico, vista lateral.

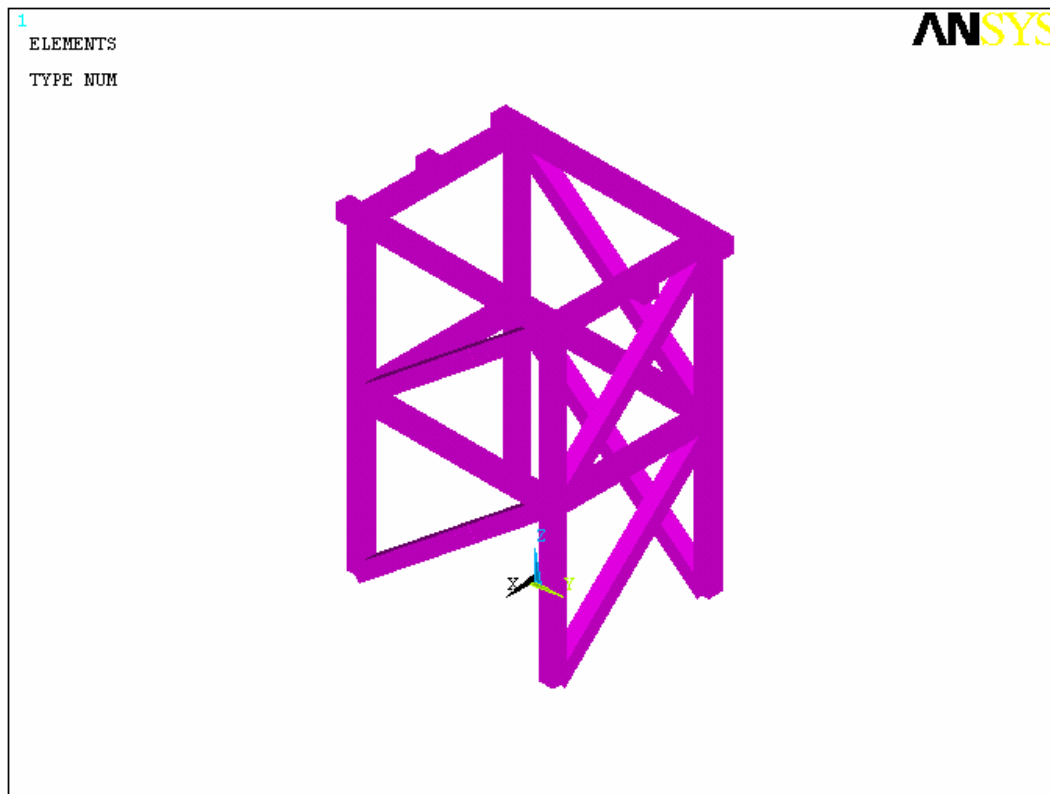


Figura 62. Detalle estructura soportado dinámico, vista isométrica.

### 5.5.3 Modelo ensamblado

El modelo del condensador PCCS completo se muestra a continuación desde varios puntos de vista.

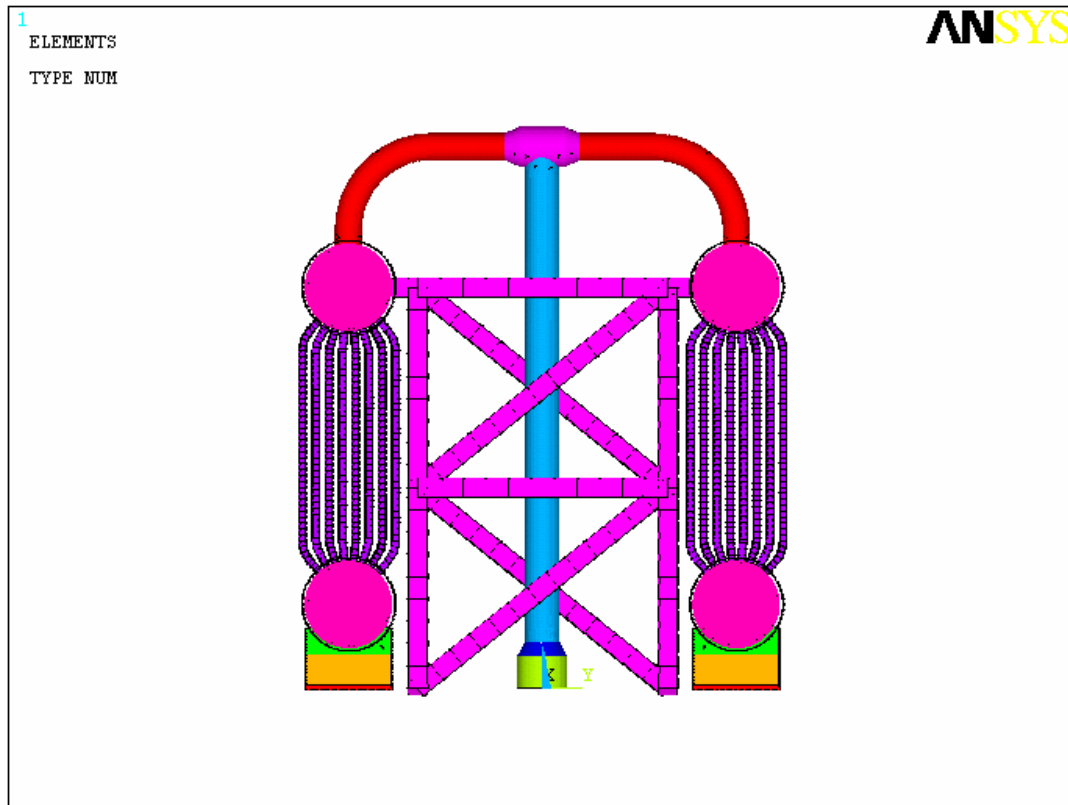


Figura 63. Vista frontal.

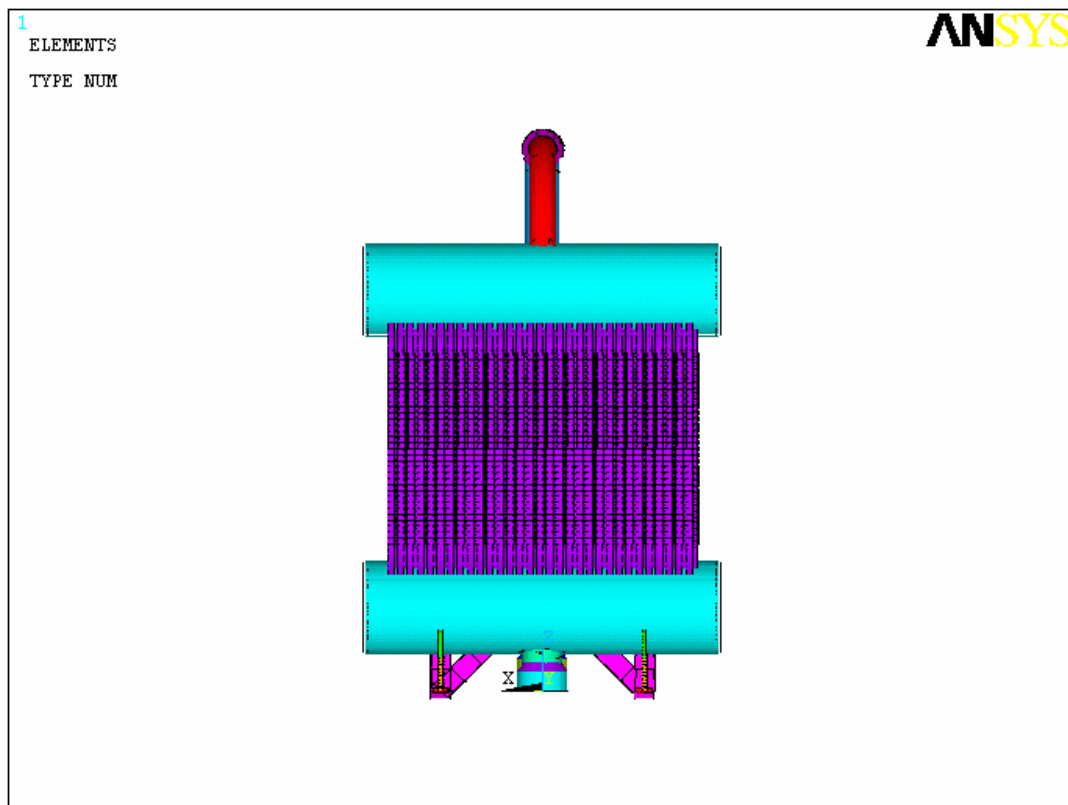


Figura 64. Vista lateral.



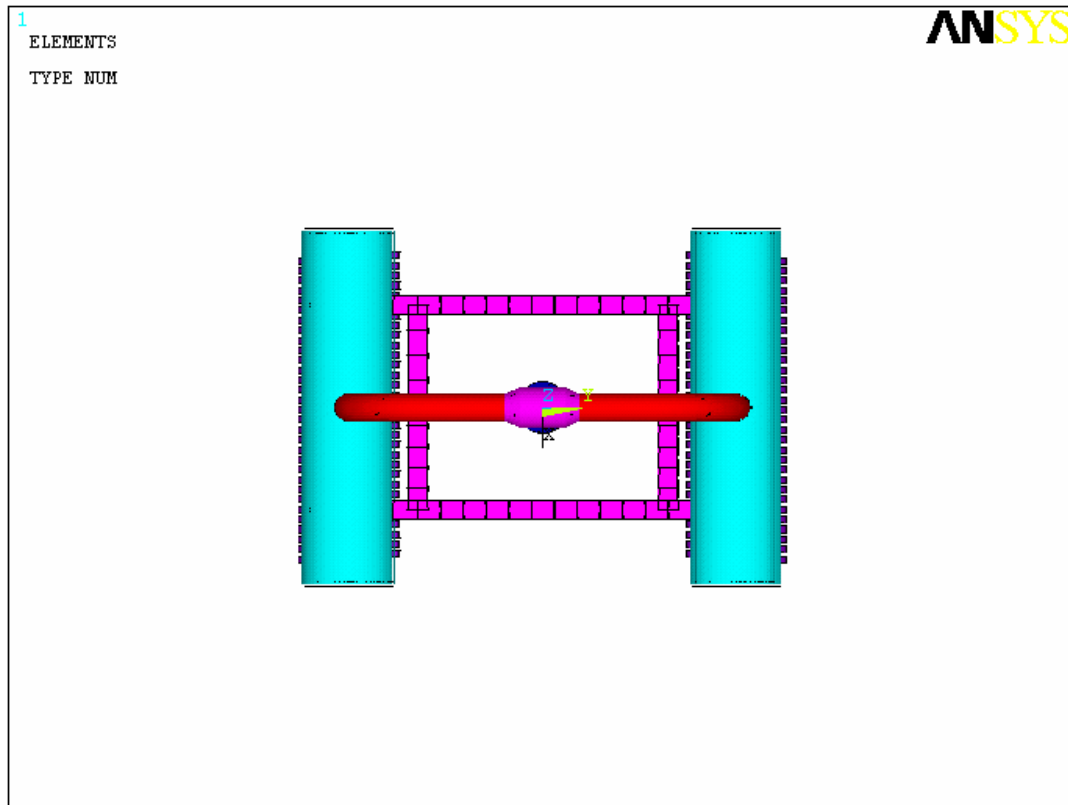


Figura 65. Vista en planta.

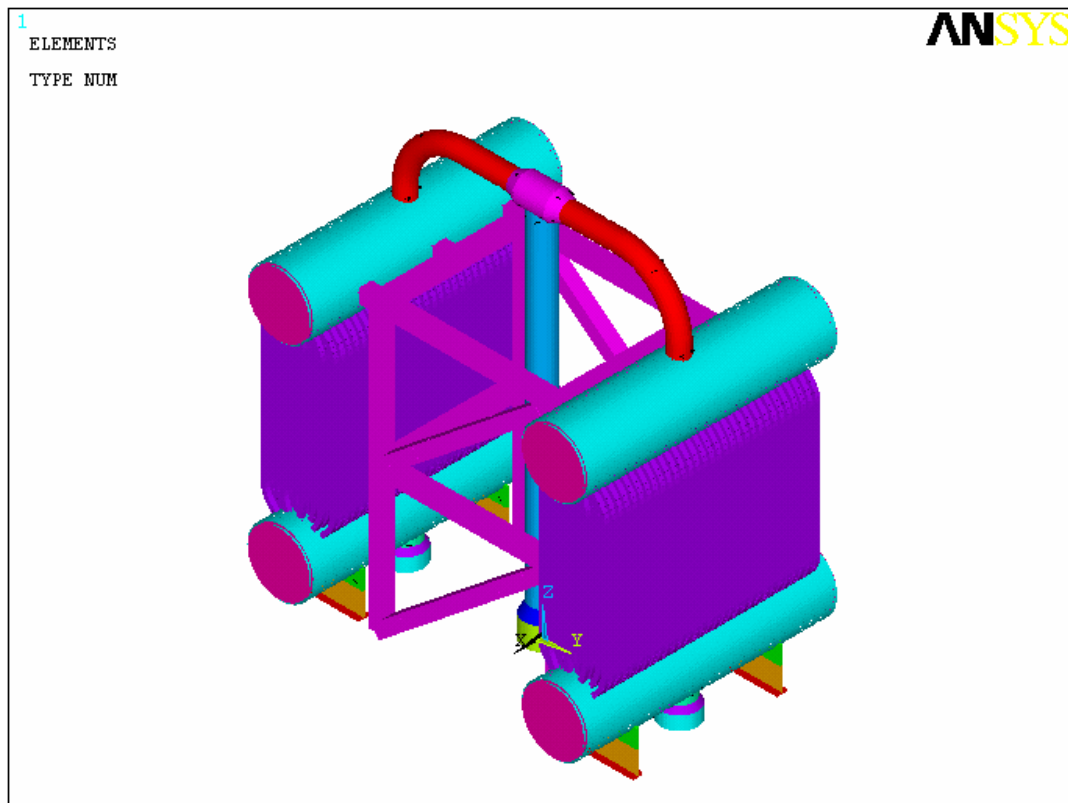


Figura 66. Vista en isométrico.

## ***6 Análisis de los resultados***

---

## 6.1 Definición de los parámetros

Antes de empezar con el análisis de los resultados obtenidos, conviene antes dedicar este apartado a la definición de los parámetros que se van a utilizar en este capítulo, para tener así una mejor comprensión.

Estos parámetros se dividen en dos grupos principales, los relacionados con las propiedades intrínsecas del material, y los relacionados con las tensiones que se generan por acción de las cargas. Es una denominación del código ASME.

Intensidad de tensión: es la tensión equivalente de la combinación de tensiones. También se define como el doble del cortante máximo, o en otras palabras, como la diferencia entre las tensiones principales máxima y mínima.

Tensión de membrana: es la tensión que se produce en la fibra media del espesor del elemento.

### **Propiedades del material**

$S$  : máxima tensión admisible.

$S_m$  : intensidad de tensión de diseño.

$S_{mc}$  : intensidad de tensión admisible.

$S_{m1}$  : intensidad de tensión admisible.

$S_y$  : límite elástico.

$S_u$  : tensión última.

### **Tensiones generadas**

$P_L$  : tensión de membrana local obtenida en las secciones donde se produce cambio de geometría.

$P_m$  : tensión de membrana general obtenida en las secciones donde no hay cambios geométricos

$P_b$  : tensión de flexión general en zonas donde no hay cambios geométricos.

$Q$  : tensión de flexión local obtenida en las secciones con cambio de geometría.

## 6.2 Tensiones admisibles

En este apartado se mostrarán las tensiones admisibles para cada uno de los componentes que forman el condensador PCCS y la estructura de soportado dinámico, incluyendo cualquier elemento, pernos, tuberías, etc.

Para la obtención de estos límites de tensiones y demás parámetros se ha utilizado el código ASME, como en el punto 3. Para ello se han utilizado las normas NE y NF 3000's.

La Tabla 13 muestra los valores de intensidad de tensión y propiedades de resistencia para los materiales del condensador PCCS para ciertas temperaturas de interés.

<b>Materiales: SA-182 F304L, SA-312 Tp 304L, SA-213 Tp304L</b>			
<b>T (°C) [°F]</b>	(60)[140]	(144.7)[292.4]	(171)[340]
<b>S (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>mc</sub> (MPa)</b>	126.6	120.1	114.9
<b>S<sub>m</sub> (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>m1</sub> (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>y</sub> (MPa)</b>	159.7	133.4	127.7
<b>S<sub>u</sub> (MPa)</b>	471.8	424.5	415.0

Tabla 13. Valores de tensiones a diferentes temperaturas.

$S_{mc} = \min(1.1S; 0.9S_y)$  y  $S_{m1} = S_m$  de acuerdo con NE-3134.6 y NE-3112.4

### **Límites para componentes clase MC**

A continuación se muestra un resumen de los límites de intensidad de tensión aplicables a los componentes de clase MC, de acuerdo a la norma NE-3220, para todos los componentes del condensador PCCS excepto pernos.

COMPONENTES MC (EXCEPTO PERNOS)	Diseño	A	B	C	D	Test
$P_m$	$1.0S_{mc}$	$1.0S_{mc}$	$1.0S_{mc}$	$\max(1.2S_{mc}; 1.0S_y)$	$\max(0.85\min(2.4S_m, 0.7S_u), \max(1.2S_{mc}, 1.0S_y))$	$0.75S_y$
				$1.0S_{mc}$ (tobera empernada)	$\max(1.2S_{mc}, 1.0S_y)$ (tobera empernada)	
$P_L$	$1.5(P_m \text{ limit})$	$1.5(P_m \text{ limit})$	$1.5(P_m \text{ limit})$	$1.5(P_m \text{ limit})$	$1.5(P_m \text{ limit})$	$1.15S_y$
$P_L+P_b$	$\alpha(P_m \text{ limit})$	$\alpha(P_m \text{ limit})$	$\alpha(P_m \text{ limit})$	$\alpha(P_m \text{ limit})$ (if $P_m < 0.67S_y$ )	$\alpha(P_m \text{ limit})$ (if $P_m < 0.67S_y$ )	$1.15S_y$
$P_L+P_b+Q$	-	$3.0S_{m1}$	$3.0S_{m1}$	-	-	-

Tabla 14. Límites de intensidad de tensión para materiales clase MC excepto pernos.

La Tabla 15 muestra los valores del factor  $\alpha$  para sólidos con sección no rectangular, como es el caso.

	<b>Header</b>	<b>Tube bundle</b>	<b>Feed Line</b>	<b>Steam distributor</b>	<b>Steam Line</b>
<b>R<sub>o</sub></b>	0.375	0.0254	0.10954	0.161925	0.136525
<b>R<sub>i</sub></b>	0.33	0.02375	0.10136	0.152395	0.127255
<b><math>\alpha</math></b>	1.350846015	1.314995468	1.32129913	1.311040211	1.316901079
<b><math>\alpha</math> mínimo</b>	1.31				

Tabla 15. Factor  $\alpha$  para secciones no rectangulares.

Donde:

$$\alpha = (16R_o / (3\pi)) \cdot ((R_o^3 - R_i^3) / (R_o^4 - R_i^4)) \text{ (sin unidades)}$$

$R_o$  = Radio exterior (m)

$R_i$  = Radio interior (m)

La Tabla 16 presenta los límites de intensidad de tensión obtenidos de las tablas anteriores.

	<b>Diseño</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Test</b>
<b>P<sub>m</sub></b>	114.9	114.9	114.9	137.9	229.7	119.8
				114.9 (tobera empernada)	137.9 (tobera empernada)	
<b>P<sub>L</sub></b>	172.4	172.4	172.4	206.9	344.6	183.7
<b>P<sub>L</sub>+P<sub>b</sub></b>	150.6	150.6	150.6	180.7	300.9	183.7
<b>P<sub>L</sub>+P<sub>b</sub>+Q</b>	-	337.8	337.8	-	-	-

Tabla 16. Límites de intensidad de tensión

Unidades: MPa

**Límites para header bolts**

Los valores de tensión permisibles para el material de los header bolts (pernos de los tambores) del condensador PCCS a una temperatura de 171°C es de 100.1 MPa. La siguiente tabla muestra un resumen de los límites de intensidad de tensión aplicables a la clase MC para componentes tipo pernos, de acuerdo a la norma NE-3230, para los header bolts del condensador PCCS.

<b>Material SA-193 Grade B8 Class 1</b>		
<b>Diseño</b>	<b>Tensión de servicio media</b>	<b>Tensión de servicio máxima</b>
1.1S = 110.1 MPa	2.2S = 220.2 MPa	3.3S = 330 MPa

*Tabla 17. Intensidades de tensión permisibles para los headers bolts.*

S = 100.1 MPa, at 171°C

**Límites para los soportes (support saddles y soportes superiores)**

La Tabla 18 muestra los valores de tensión y propiedades de resistencia para el material de los support saddle (soportes de los tambores inferiores) y los soportes superiores de la estructura de soportado dinámico, a temperaturas de interés.

<b>Material: SA-240 Tp 304L</b>			
<b>T (°C) [°F]</b>	(60)[140]	(144.7)[292.4]	(171)[340]
<b>S (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>m</sub> (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>y</sub> (MPa)</b>	159.7	133.4	127.7
<b>S<sub>u</sub> (MPa)</b>	471.8	424.5	415.0

*Tabla 18. Intensidades de tensión para los soportes.*

A continuación se muestra un resumen de límites de tensión aplicables a soportes tipo placa y corteza de componentes clase MC, de acuerdo con la norma NF-3250, para los support saddle y soportes superiores del condensador PCCS.



COMPONENTES MC, SOPORTES (PLATE AND SHELL)	Diseño	B	A	C	D	Test
$P_m$	1.0S	1.33S	1.0S	$\min(1.5S, 0.7S_u)$	$\min(\max(1.2S_y, 1.5S_m), 0.7S_u)$	1.33S
$P_m+P_b$	1.5S	2.0S	1.5S	2.25S	1.5( $P_m$ limit)	2.0S
$P_s$ (valor medio)	0.6S	$\min(0.8S, 0.42S_u)$	0.6S	$\min(0.9S, 0.42S_u)$	0.42 $S_u$	$\min(0.8S, 0.42S_u)$

Tabla 19. Intensidades de tensión permisibles para los soportes.

La siguiente tabla muestra los límites de tensión obtenidos de las tablas anteriores.

	Diseño	A	B	C	D	Test
$P_m$	112.6	112.6	149.8	168.9	168.9	153.1
$P_m+P_b$	168.9	168.9	225.2	253.4	253.4	230.2
$P_s$ (valor medio)	67.6	67.6	90.1	101.3	174.3	92.1

Tabla 20. Límites de tensión para los soportes.

Unidades: MPa.

### Límites para la estructura de soportado dinámico

La Tabla 21 presenta los valores de tensión y propiedades de resistencia para el material empleado en la estructura de soportado dinámico del condensador PCCS a temperaturas de interés.

Material: SA-479 Tp 304L			
T (°C) [°F]	(60)[140]	(144.7)[292.4]	(171)[340]
<b>S (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>m</sub> (MPa)</b>	115.1	115.1	112.6
<b>S<sub>y</sub> (MPa)</b>	159.7	133.4	127.7
<b>S<sub>u</sub> (MPa)</b>	471.8	424.5	415.0

Tabla 21. Valores de tensiones a diferentes temperaturas

La Tabla 22 muestra un resumen de los límites de tensión aplicables a los soportes lineales de los componentes clase MC, de acuerdo a la norma NF-3553, para la estructura del soportado dinámico del condensador PCCS.

COMPONENTES MC, SOPORTES (LINEAL)	Diseño	A	B	C	D	Test
<b>Tension <math>F_t</math></b>	$\min(0.6S_y, 0.5S_u)$	$\min(0.6S_y, 0.5S_u)$	$1.33\min(0.6S_y, 0.5S_u)$	$1.5\min(0.6S_y, 0.5S_u)$	$\min(1.2S_y, 0.7S_u)$	$1.33\min(0.6S_y, 0.5S_u)$
<b>Cortante <math>F_v</math></b>	$0.4S_y$	$0.4S_y$	$1.33 \cdot 0.4S_y$	$1.5 \cdot 0.4S_y$	$\min(0.72S_y, 0.42S_u)$	$1.33 \cdot 0.4S_y$
<b>Compresión <math>F_a</math></b>	$(0.47 - (Kl/r)/444)S_y$	$(0.47 - (Kl/r)/444)S_y$	$1.33 \cdot (0.47 - (Kl/r)/444)S_y$	$1.5 \cdot (0.47 - (Kl/r)/444)S_y$	$1.5 \cdot (0.47 - (Kl/r)/444)S_y$	$1.33 \cdot (0.47 - (Kl/r)/444)S_y$
<b>Flexión <math>F_b</math></b>	$0.66S_y$	$0.66S_y$	$1.33 \cdot 0.66S_y$	$1.5 \cdot 0.66S_y$	$1.3S_y$	$1.33 \cdot 0.66S_y$

*Tabla 22. Intensidades de tensión permisibles para los soportes de la estructura de soportado dinámico.*

$K$  = factor de longitud efectiva = 1

$l$  = longitud máxima de la viga = 2.428 m

$r$  = radio de giro = 0.057658 m

$Kl/r = 42 < 120$

$f_a$  = tensión axial computada

$f_b$  = máxima tensión de flexión computada

$F_e = \pi^2 E / (2.15(Kl/r)^2) = 494 \text{ MPa}$

La Tabla 23 presenta los límites de intensidad de tensión obtenidos de las tablas anteriores.

<b>COMPONENTES MC, SOPORTES (LINEAL)</b>	<b>Diseño</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Test</b>
<b>Tension <math>F_t</math></b>	76.6	76.6	101.9	114.9	153.2	127.4
<b>Cortante <math>F_v</math></b>	51.1	51.1	67.9	76.6	91.9	85.0
<b>Compresión <math>F_a</math></b>	47.9	47.9	63.8	71.9	71.9	79.7
<b>Flexión <math>F_b</math></b>	84.3	84.3	112.1	126.4	166.0	140.2

Tabla 23. Límites de tensión para los soportes de la estructura de soportado dinámico

Unidades: MPa.

### Límites para los pernos de los soportes superiores

La Tabla 24 presenta los valores de tensiones y propiedades de resistencia para el material de los pernos de los soportes superiores de la estructura de soportado dinámico, a diferentes temperaturas de interés.

<b>Material: SA-564 Type630 Class H1150</b>			
<b>T (°C) [°F]</b>	(60)[140]	(144.7)[292.4]	(171)[340]
<b><math>S_y</math> (MPa)</b>	694.7	643.3	632.1
<b><math>S_u</math> (MPa)</b>	930.8	930.8	920.3

Tabla 24. Valores de tensión para los pernos de los soportes superiores

La siguiente tabla muestra un resumen de los límites de tensión aplicables a los pernos de los soportes para componentes clase MC, de acuerdo la norma NF-3555, para los pernos de los soportes superiores.

	<b>Diseño</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Test</b>
<b>Tensión <math>F_{tb}</math></b>	$S_u/3.33$	$S_u/3.33$	$1.15S_u/3.33$	$1.25S_u/3.33$	$\min(0.7S_u, S_y)$	$1.25S_u/3.33$
<b>Cortante <math>F_{vb}</math></b>	$0.62S_u/5$	$0.62S_u/5$	$1.15*0.62S_u/5$	$1.25*0.62S_u/5$	$\min(0.42S_u, 0.6S_y)$	$1.25*0.62S_u/5$
<b>Combinación de tensión y cortante</b>	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$

*Tabla 25. Intensidades de tensión permisibles para los pernos de los soportes superiores*

De acuerdo con NF-3555 [4].

$f_t$  = tensión normal

$f_v$  = cortadura

La siguiente tabla muestra los límites de intensidad de tensión obtenidos de las tablas anteriores.

	<b>Diseño</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>Test</b>
<b>Tensión <math>F_{tb}</math></b>	276.4	276.4	317.8	345.5	632.1	349.4
<b>Cortante <math>F_{vb}</math></b>	114.1	114.1	131.2	142.6	379.3	144.3
<b>Combinación de tensión y cortante</b>	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$	$f_t^2 / F_{tb}^2 + f_v^2 / F_{vb}^2 \leq 1$

*Tabla 26. Límites de tensión para los pernos de los soportes superiores.*

*Unidades: MPa*



## **6.3 Resultados obtenidos**

En este apartado se mostrarán todos los resultados obtenidos de los diferentes análisis, y se compararán con los valores límites, comprobando así que el condensador PCCS es apto para los requerimientos definidos por el cliente.

### **6.3.1 Resultados del análisis analítico**

La siguiente tabla muestra un resumen de las tensiones obtenidas del cálculo analítico, obteniendo las tensiones en dirección circunferencial,  $\sigma_C$ , y en dirección longitudinal,  $\sigma_L$ , de los niveles de diseño y test. No se hace distinción entre ambos niveles ya que tienen la misma presión de trabajo, 758.5 kPa.

La contribución de estas tensiones a los demás niveles se realiza tomando la tensión mayor,  $\sigma_C$  o  $\sigma_L$ .

Descripción	Elemento (ver Anexo A)	Geometría	Dimensiones	Diámetro exterior (in)	Diámetro exterior (mm)/ Diámetro calculado (mm)	Espesor (in)	Espesor (mm)	Radio interior (mm)	Presión de diseño $P_D$ (MPa)	$\sigma_C$ (MPa)
										$\sigma_L$ (MPa)
Header	1	Superf. cilíndrica	660 I.D, 45 t	-	750.00	-	45.00	330.00	0.7585	11.76
										7.47
Tube bundle	2	Superf. cilíndrica	50.8 O.D, 1.65 t	-	50.80	-	1.65	23.75	0.7585	11.37
										5.31
Feed Line	3	Superf. cilíndrica	8" Sch. 40S	8.625	219.08	0.322 (1)	8.18	101.36	0.7585	9.86
										4.55
Steam Distributor	4	Superf. cilíndrica	12" Sch. 40S	12.75	323.85	0.375 (1)	9.53	152.40	0.7585	12.59
										5.92
Steam Line	5	Superf. cilíndrica	10" Sch.40S	10.75	273.05	0.365 (1)	9.27	127.25	0.7585	10.87
										5.05
Condensate Line	8	Superf. cilíndrica	12" Sch.40S	12.75	323.85	0.375 (1)	9.53	152.40	0.7585	12.59
										5.92
Header Cover	10	Placa circular	820 D, 40 t	-	770.00	-	40.00	-	0.7585	86.96
Header Bolt	11	Perno	1" D	-	20.00	-	-	-	0.7585	70.27

Tabla 27. Tensiones bajo presión de diseño. Niveles de diseño y test.

### 6.3.2 Resultados del análisis mediante elementos finitos

#### 6.3.2.1 Expansión térmica

Las siguientes figuras muestran los desplazamientos máximos del MEF para cada dirección X, Y y Z, al aplicar una temperatura de 171°C en todos los componentes del condensador PCCS y 15.5 °C en la estructura de soportado dinámico.

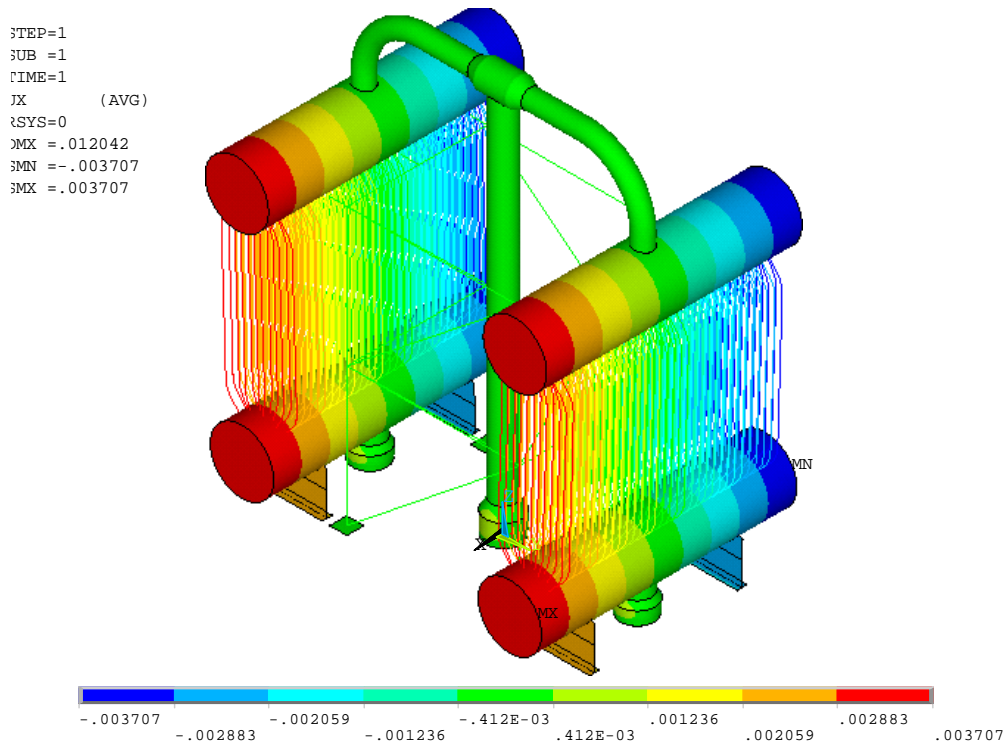


Figura 67. Expansión térmica. Desplazamientos en dirección X.

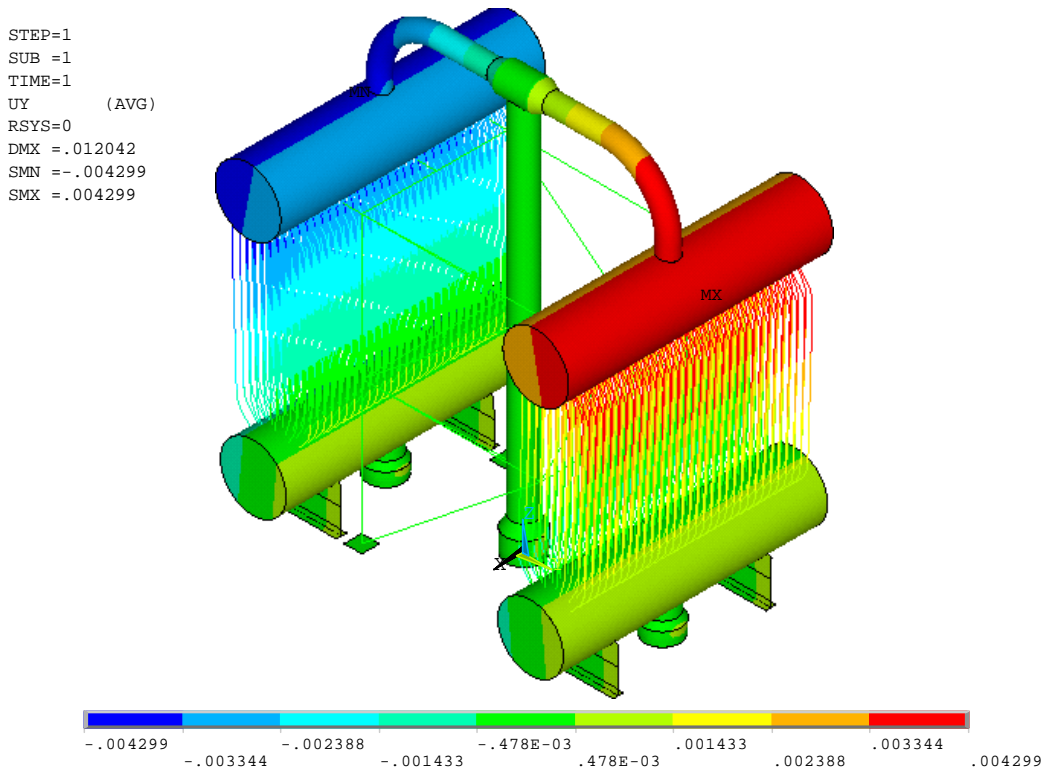


Figura 68. Expansión térmica. Desplazamientos en dirección Y.

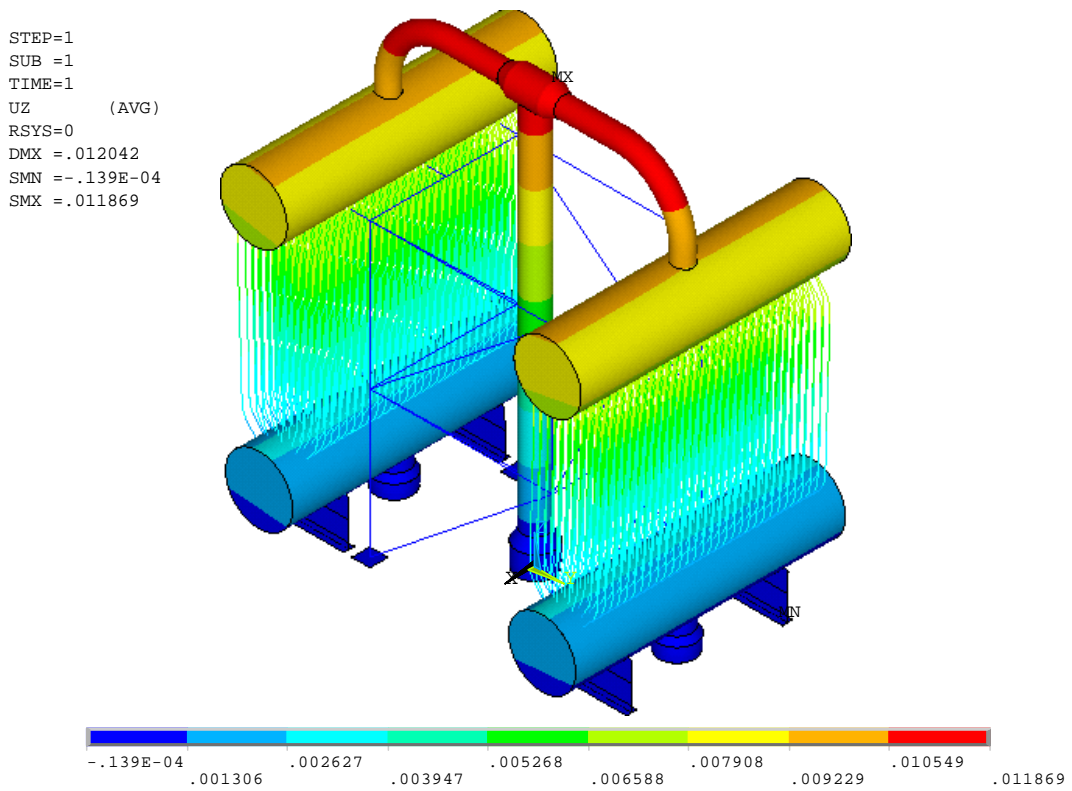


Figura 69. Expansión térmica. Desplazamientos en dirección Z.

En la figura 70 se puede observar la deformada para después de la expansión térmica.

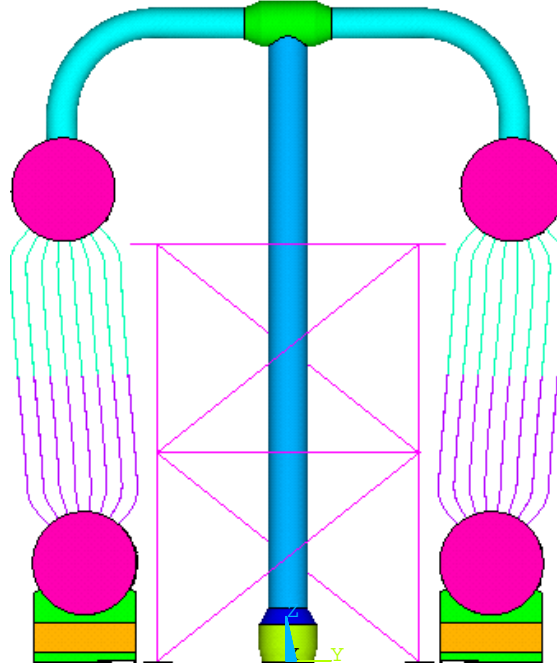


Figura 70. Expansión térmica. Deformada.

El desplazamiento vertical en los puntos de los headers superiores, donde están situados los soportes superiores, es de 8.5 mm. Por lo tanto, no se considerará restricción vertical en esos puntos.

El desplazamiento horizontal en dirección Y en los mismos puntos es de 2.4 mm. Por consiguiente, una holgura de 2.5 en los 4 soportes superiores de las esquinas es suficiente para no generar tensiones en esos puntos. Los soportes superiores centrales tienen una holgura ilimitada en esa dirección.

El desplazamiento horizontal en dirección X en los cuatro soportes superiores de las esquinas es de 2.1 mm. Por lo tanto, una holgura de 2.5 mm es suficiente para no

generar tensiones. En cambio, en los soportes superiores centrales no hay ninguna holgura.

El máximo desplazamiento horizontal en los support saddle es de 2.3 mm en dirección X, y 1 mm en dirección Y. Por lo tanto, una holgura de 2.5 mm entre los agujeros y pernos es suficiente para evitar que se generen tensiones significantes.

Los resultados del análisis para la segunda condición térmica, 100 °C en la estructura de soportado dinámico y 171 °C en el condensador PCCS, son los siguientes: El máximo desplazamiento horizontal en los soportes a la contención de la estructura de soportado dinámico es de 1.3 mm en dirección X, y 1.5 mm en dirección Y. Por lo tanto, una holgura de 1.5 mm entre los agujeros y pernos es suficiente para evitar que se generen tensiones significativas.

Bajo estas condiciones, las holguras entre el diámetro del perno de anclaje y el diámetro del agujero son suficientes para absorber la expansión máxima estimada. De este modo, las tensiones debidas a la expansión térmica se producen únicamente por el anclaje de la condensate line a la contención. La Figura 71 muestra la intensidad de tensión máxima obtenida para los support saddle, donde se observa que los valores de tensión no son significativos.

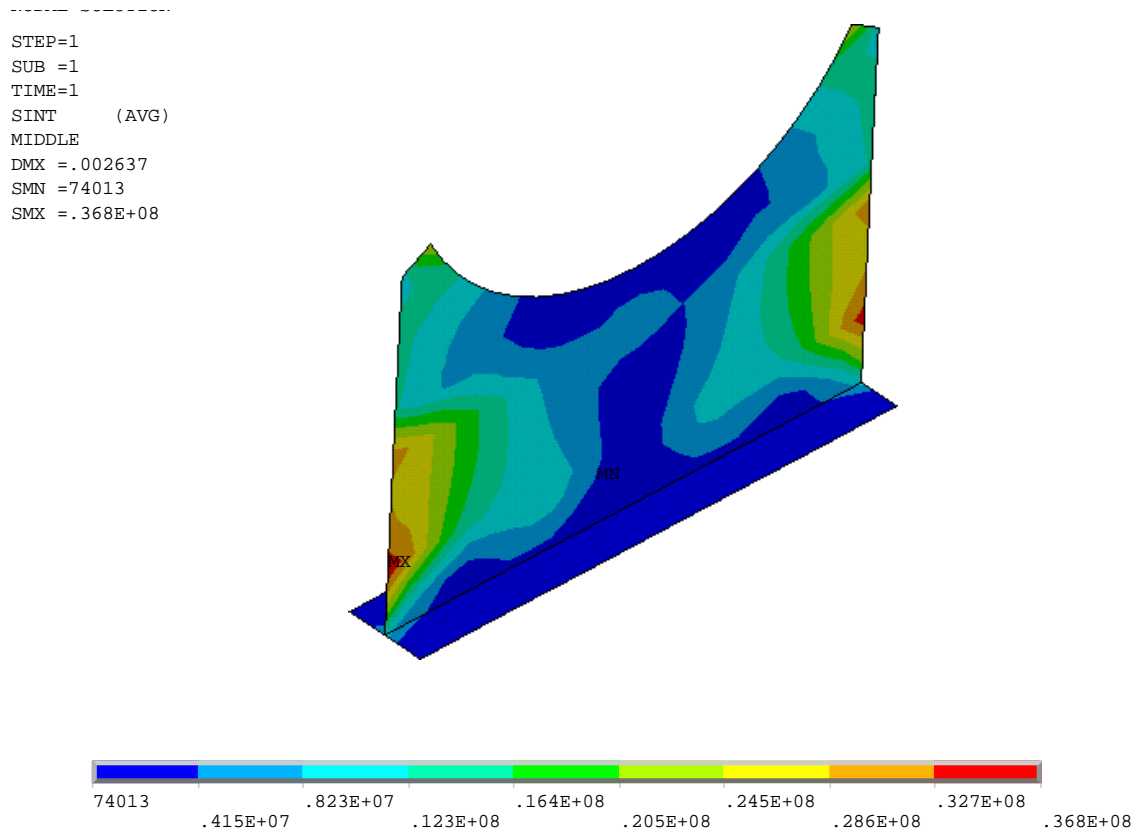


Figura 71. Valores de tensión máximos para el support saddle (Pa).

Con todas estas holguras conseguimos que el efecto de la temperatura no genere tensiones, y por lo tanto, la podemos excluir del estudio estructural, facilitando así en gran medida el análisis.

### 6.3.2.2 Análisis dinámico

En este apartado se ha realizado el análisis del nivel C/D que es el caso más restrictivo, ya que si el condensador PCCS cumple las condiciones límites de tensión para ese nivel, también lo hará para el nivel A/B (sería el mismo procedimiento de análisis, pero sin incluir la carga dinámica SSE).

La Tabla 28 presenta los diez primeros modos propios, obtenidos a partir del análisis modal, y la masa efectiva asociada a cada uno de ellos. Se puede observar que los dos modos propios principales corresponden al segundo y tercero, coincidiendo con los principales modos de flexión del MEF, los cuales mueven una importante cantidad de masa. El resto de modods propios mueven una masa efectiva insignificante, y por tanto,

tienen una baja contribución en la solución. Para la frecuencia de 38.5 Hz, el MEF presenta una gran flexión localizada en el empaquetamiento de tubos verticales.

<b>Modo propio</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>	<b>Masa efectiva (kg)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Nº Figura</b>
<b>1</b>	14.7	Despreciable	Torsión en Z	72
<b>2</b>	15.2	12524	Flexión en Y	73
<b>3</b>	17.2	13671	Flexión en X	74
<b>4</b>	25.6	Despreciable	Mixto	75
<b>5</b>	31.4	Despreciable	Flexión en Y de Steam Line	76
<b>6</b>	37.4	3872	Flexión en X de las líneas	77
<b>7</b>	38.5	Despreciable	Flexión tubes bundle	78
<b>8</b>	38.5	Despreciable	Flexión tubes bundle	-
<b>9</b>	38.5	Despreciable	Flexión tubes bundle	-
<b>10</b>	38.5	Despreciable	Flexión tubes bundle	-

*Tabla 28. Modos propios principales.*

Las deformadas de los primeros siete modos propios se muestran desde la Figura 72 a la Figura 78.





DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =1  
FREQ=14.685  
DMX = .014228

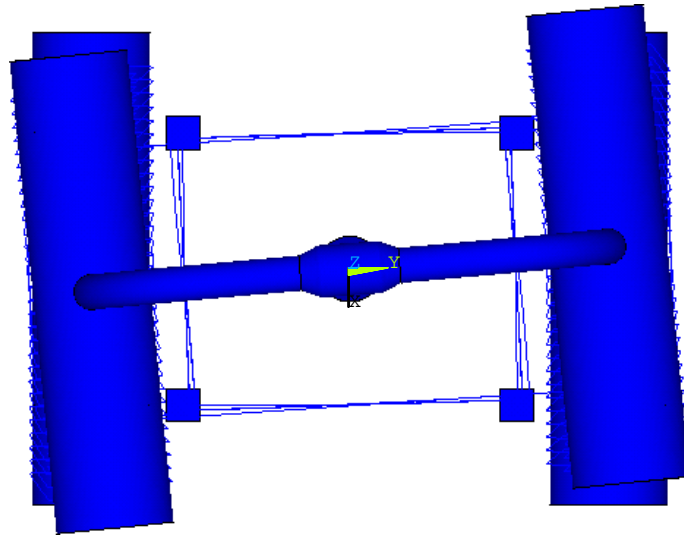


Figura 72. Modo propio 1. Deformada.



DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =2  
FREQ=15.242  
DMX = .013566

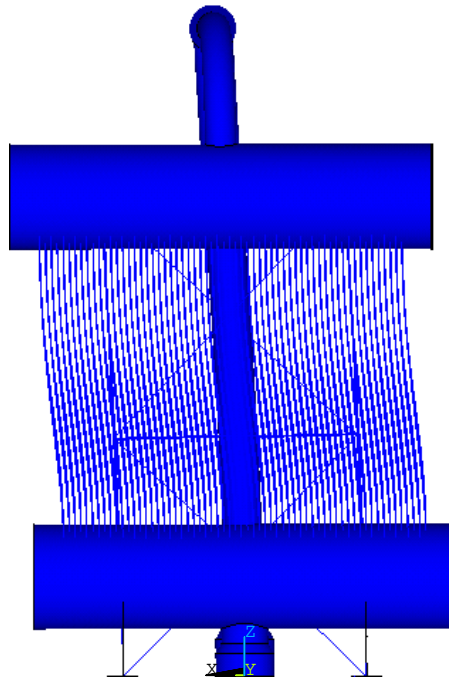


Figura 73. Modo propio 2. Deformada.

DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =3  
FREQ=17.151  
DMX =.011296

ANSYS

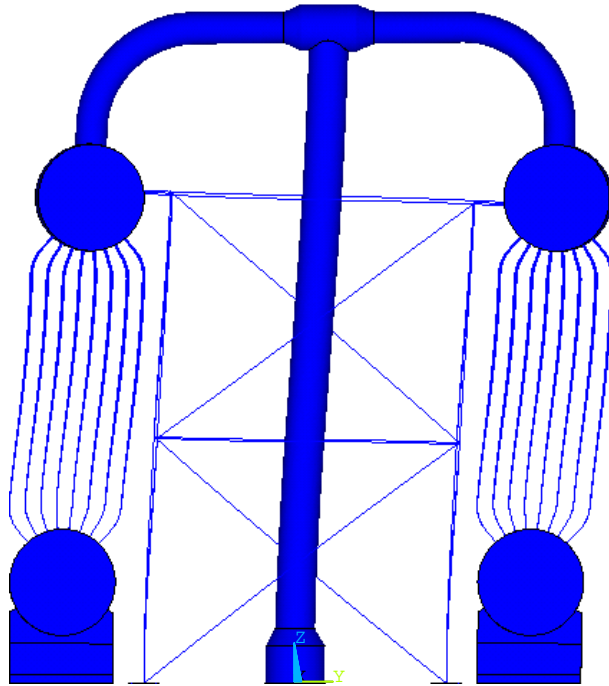


Figura 74. Modo propio 3. Deformada.

DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =4  
FREQ=25.604  
DMX =.016051

ANSYS

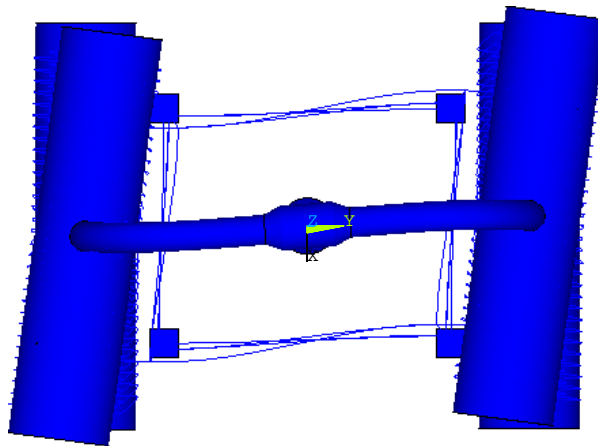


Figura 75. Modo propio 4. Deformada.

DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =5  
FREQ=31.446  
DMX =.054199

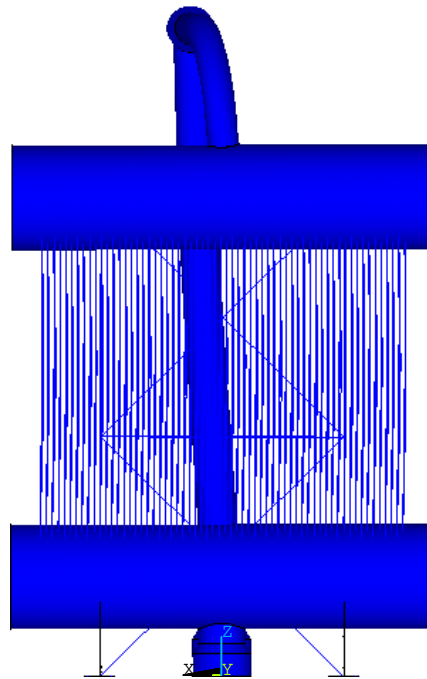


Figura 76. Modo propio 5. Deformada.

DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =6  
FREQ=37.386  
DMX =.021301

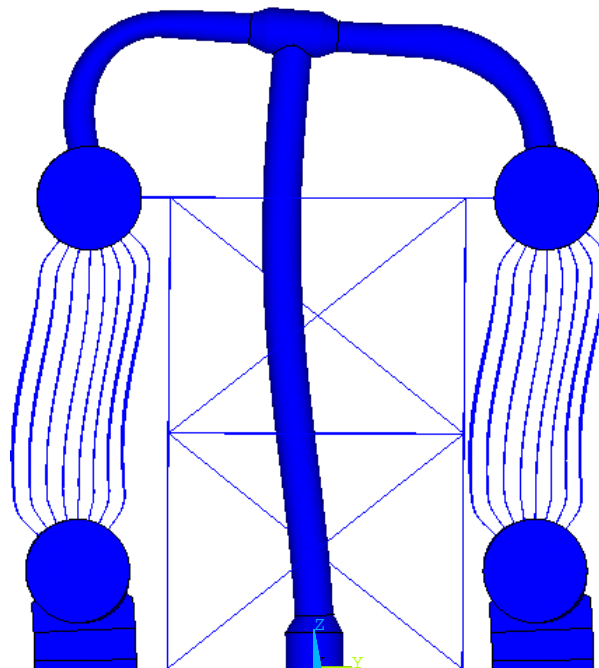


Figura 77. Modo propio 6. Deformada.

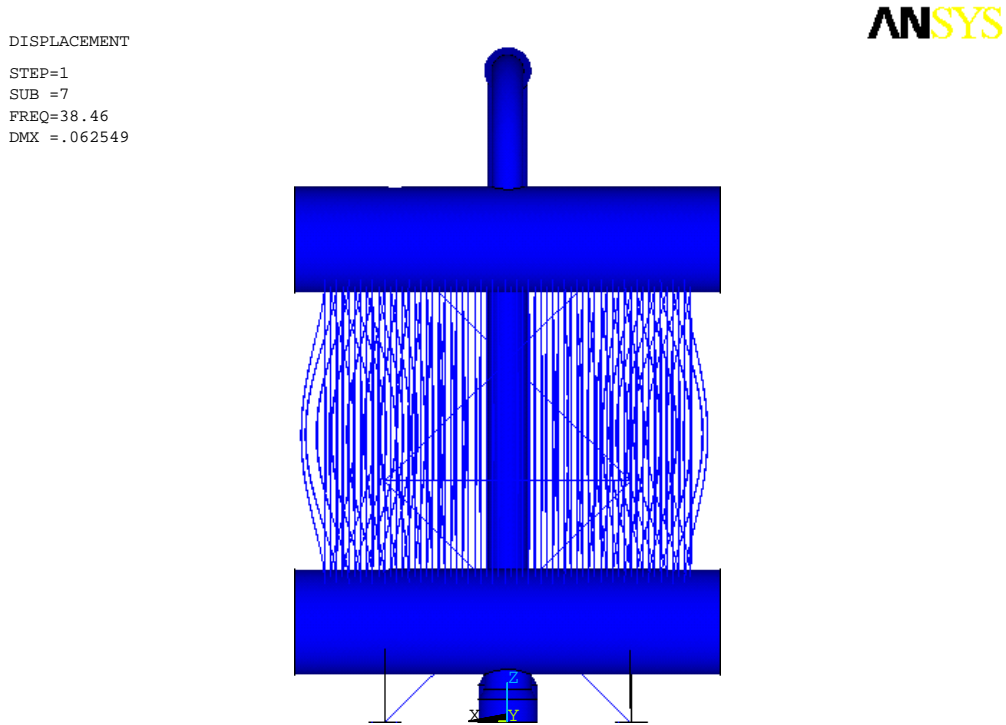


Figura 78. Modo propio 7. Deformada.

La Tabla 29 indica la cantidad de masa considerada en la combinación modal y el correspondiente porcentaje respecto a la masa total.

Evento	Dirección X		Dirección Y		Dirección Z	
	Masa (kg)	(%)	Masa (kg)	(%)	Masa (kg)	(%)
Cualquiera	12600	51	17600	71	1	0

Tabla 29. Masa efectiva considerada

La Tabla 30 indica la aceleración considerada para el análisis estático del ZPA, con el correspondiente porcentaje de masa perdida (masa no desplazada en el análisis de espectros de respuesta).

Evento	Dirección X		Dirección Y		Dirección Z	
	Aceleración (g)	(%)	Aceleración (g)	(%)	Aceleración (g)	(%)
SSE	2.15	49	2.15	29	2.8	100
LOCA	0.55	49	0.55	29	1.19	100
SRVD	0.22	49	0.22	29	0.18	100

Tabla 30. Aceleraciones y masas pérdidas.

El archivo de salida de ANSYS para el análisis espectral, correspondiente al nivel de servicio C/D, se incluye en el Anexo D. En este archivo se incluyen los parámetros de salida espectrales y los modos propios principales.

Los máximos desplazamientos horizontales del MEF del condensador PCCS es de 5.4 mm en dirección X, y 4 mm en dirección Y (ver figura 19), ambos se dan lugar en la steam distributor. El máximo desplazamiento vertical, 1 mm, tiene lugar en la estructura de soportado dinámico.

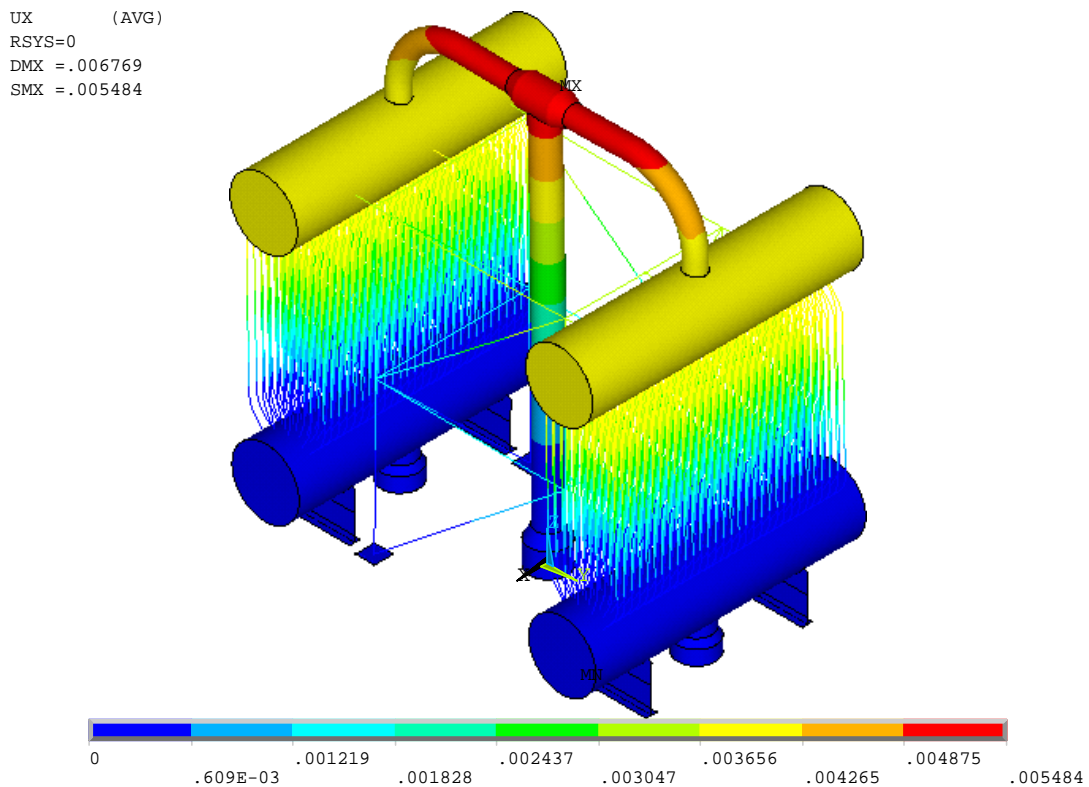


Figura 79. Condiciones de fallo. Desplazamientos en dirección X.

UY (AVG)  
RSYS=0  
DMX = .006769  
SMX = .00399

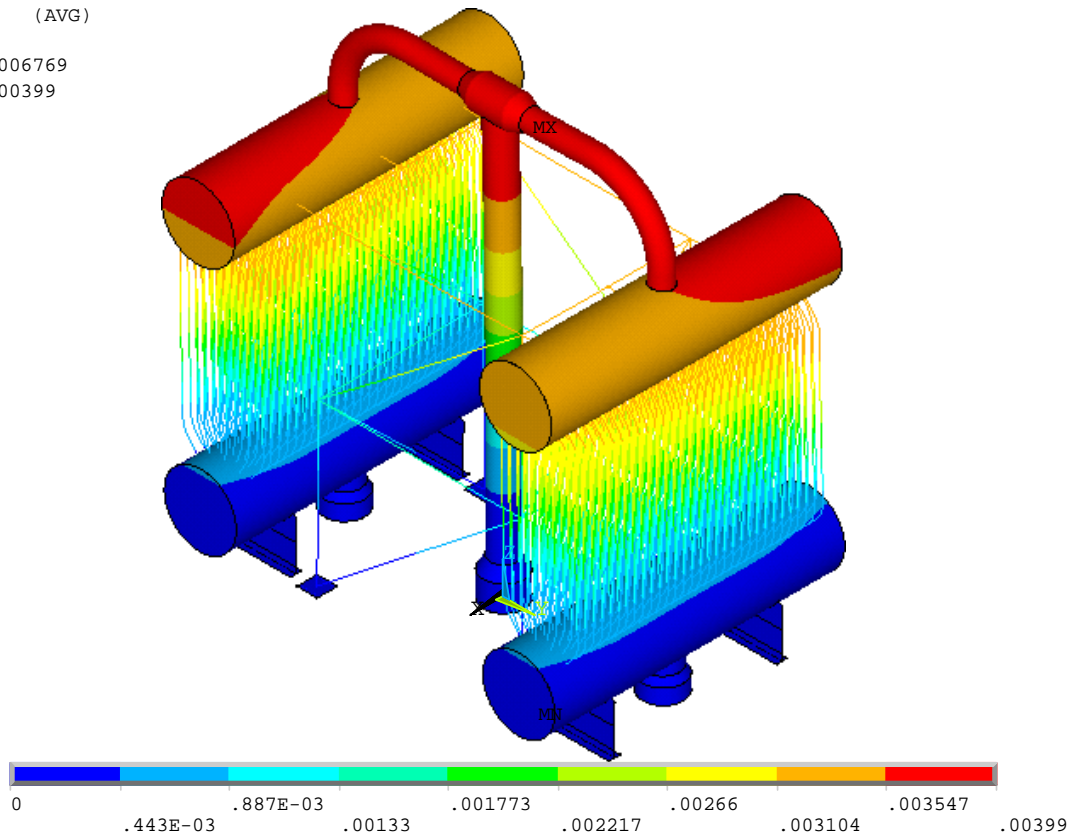


Figura 80. Condiciones de fallo. Desplazamientos en dirección Z.

UZ (AVG)  
RSYS=0  
DMX = .006769  
SMX = .943E-03

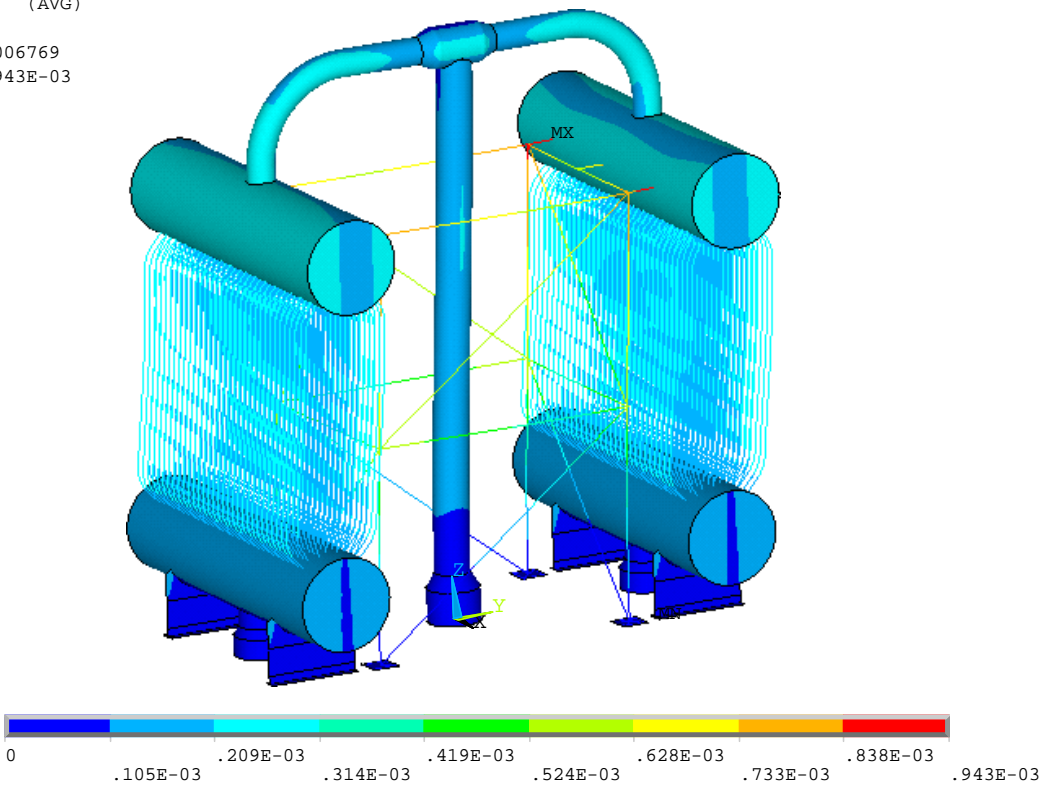


Figura 81. Condiciones de fallo. Desplazamientos en dirección Z.

### **6.3.3 Comparación de resultados obtenidos y valores admisibles**

Los resultados obtenidos para cada combinación de cargas se comprueban para las secciones más críticas en los diferentes componentes del condensador PCCS y soportes. La Tabla 31 resume las tensiones calculadas (sumando todas las contribuciones, tanto estáticas como dinámicas) y las compara con las correspondientes tensiones admisibles. **Todas las tensiones calculadas están por debajo de las tensiones permisibles.**

En la tabla se pueden observar distintos datos de tensiones: donde  $P_m$  denota la tensión de membrana (en la fibra media), por lo tanto sin tener en cuenta la flexión;  $P_L + P_b$  nos da la tensión de membrana más la contribución de la flexión.

En ANSYS para obtener sólo la tensión de membrana se utiliza el comando MIDDLE, y el comando TOP o BOTTOM para la contribución de ambas tensiones. A veces estos valores son iguales, y se debe a que no hay flexión en esa sección.

Componente	Tipo de tensión	Test			Diseño			Nivel de servicio A/B			Nivel de servicio C/D		
		Tensión calculada (MPa)	Tensión permisible (MPa)	Margen de tensión (%)	Tensión calculada (MPa)	Tensión permisible (MPa)	Margen de tensión (%)	Tensión calculada (MPa)	Tensión permisible (MPa)	Margen de tensión (%)	Tensión calculada (MPa)	Tensión permisible (MPa)	Margen de tensión (%)
Header superior	P <sub>m</sub>	11.8	119.8	90	11.8	114.9	90	16.8	114.9	85	37.8	137.9	73
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	11.8	183.7	94	11.8	150.6	92	16.8	150.6	89	39.8	180.7	78
Header inferior	P <sub>m</sub>	11.8	119.8	90	11.8	114.9	90	24.8	114.9	78	47.8	137.9	65
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	11.8	183.7	94	11.8	150.6	92	26.8	150.6	82	55.8	180.7	69
Tubes bundle	P <sub>m</sub>	11.4	119.8	91	11.4	114.9	90	15.4	114.9	87	19.4	137.9	86
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	11.4	183.7	94	11.4	150.6	92	33.4	150.6	78	66.4	180.7	63
Feed Line	P <sub>m</sub>	9.9	119.8	92	9.9	114.9	91	23.9	114.9	79	79.9	137.9	42
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	9.9	183.7	95	9.9	150.6	93	29.9	150.6	80	110.9	180.7	39
Steam line	P <sub>m</sub>	10.9	119.8	91	10.9	114.9	91	25.9	114.9	77	80.9	137.9	41
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	10.9	183.7	94	10.9	150.6	93	31.9	150.6	79	112.9	180.7	38
Steam Distributor	P <sub>m</sub>	12.6	119.8	89	12.6	114.9	89	24.6	114.9	79	67.6	137.9	51
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	12.6	183.7	93	12.6	150.6	92	26.6	150.6	82	73.6	180.7	59
Condensate Lines	P <sub>m</sub>	12.6	119.8	89	12.6	114.9	89	31.6	114.9	73	66.6	137.9	52
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	12.6	183.7	93	12.6	150.6	92	37.6	150.6	75	80.6	180.7	55
Header Cover	P <sub>m</sub>	87.0	119.8	27	87.0	114.9	24	89.0	114.9	23	92.0	114.9	20
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>	87.0	183.7	53	87.0	150.6	42	89.0	150.6	41	92.0	180.7	49
Header Bolt	Tensión media	70.3	144.7	51	70.3	110.1	36	70.3	220.2	68	70.3	220.2	68
Support Saddle	P <sub>m</sub>	Despreciable						29.0	112.6	74	87.0	168.9	48
	P <sub>L</sub> + P <sub>b</sub>							30.0	168.9	82	88.0	253.4	65
	Cortante							9.0	67.6	87	26.0	101.3	74
Soporte superior	Tensión							14.0	76.6	82	69.0	114.9	40
	Cortante							3.0	51.1	94	12.0	76.6	84
	Compresión							14.0	47.9	71	69.0	71.9	4
	Flexión							14.0	84.3	83	70.0	126.4	45

Tabla 31. Resumen de tensiones



En las siguientes figuras se observan algunos de los resultados tensionales correspondientes a las cargas dinámicas más la contribución del peso propio, lo que correspondería al nivel C/D sin la contribución de las presiones internas.

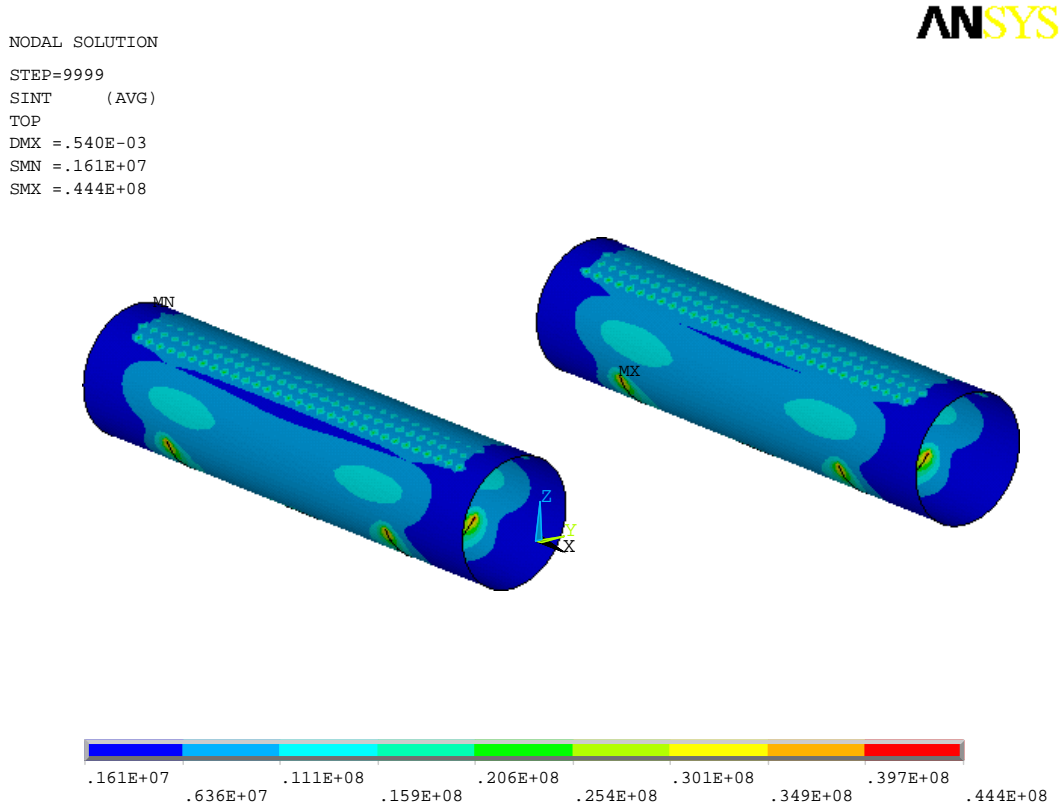


Figura 82. Headers inferiores. Intensidad de tensión bajo operación de fallo (Pa).

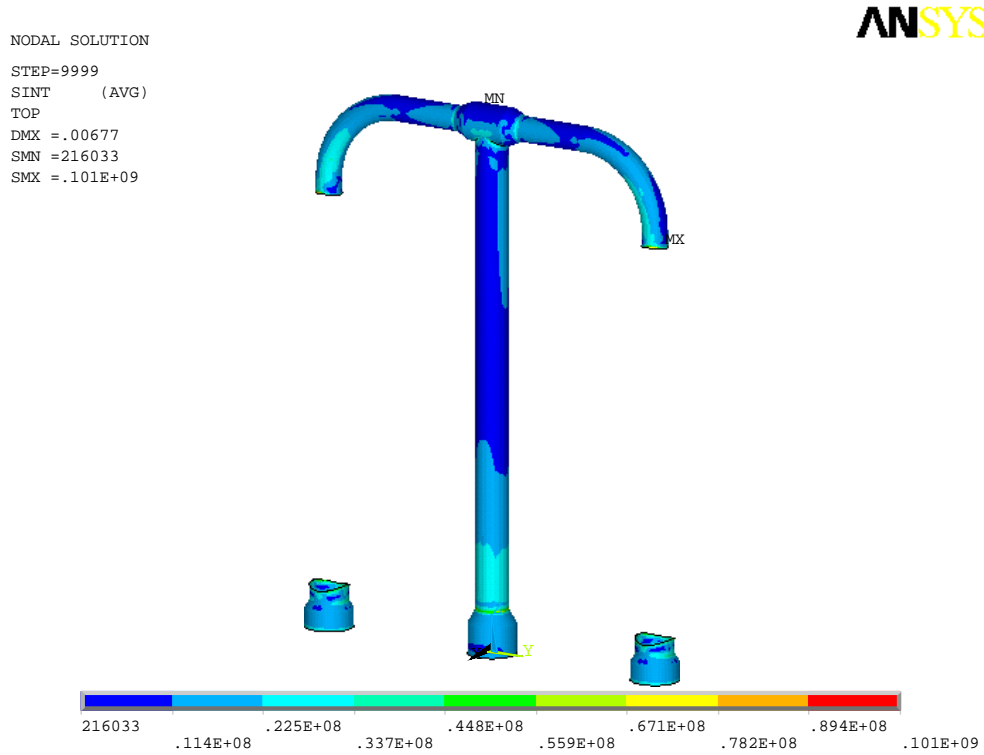


Figura 83. Steam, feed and condensate lines. Intensidad de tensión bajo condiciones de fallo (Pa).

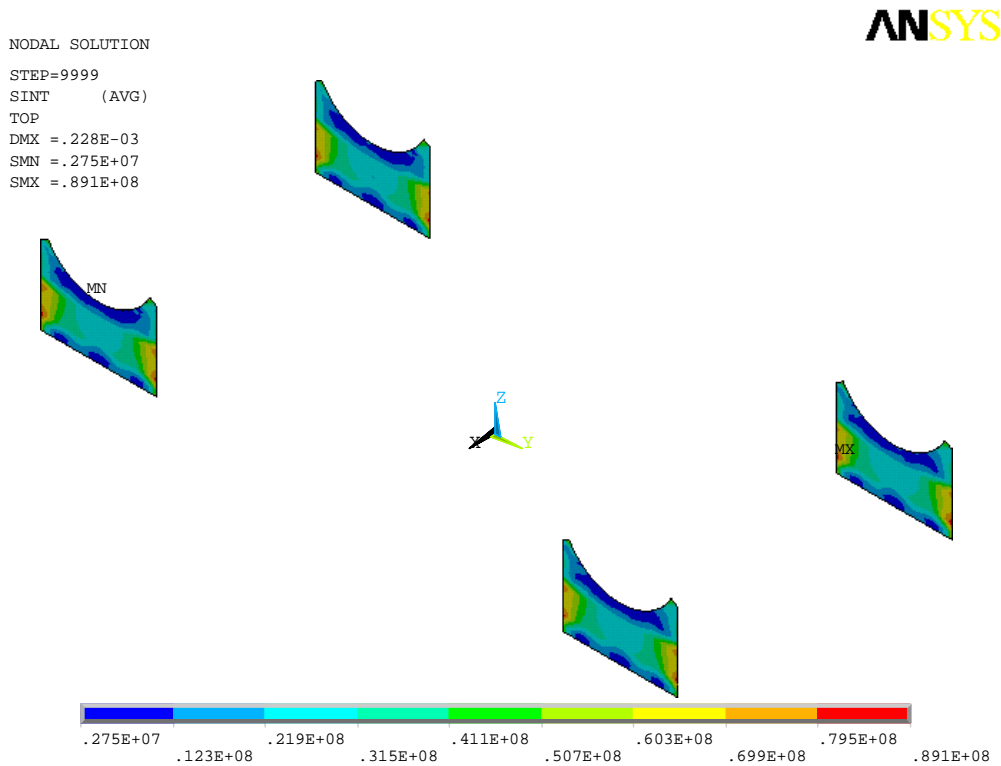


Figura 84. Support Saddles. Intensidad de tensión bajo condición de fallo (Pa).

NODAL SOLUTION  
STEP=9999  
SINT (AVG)  
DMX =.00677  
SMN =499480  
SMX =.609E+08

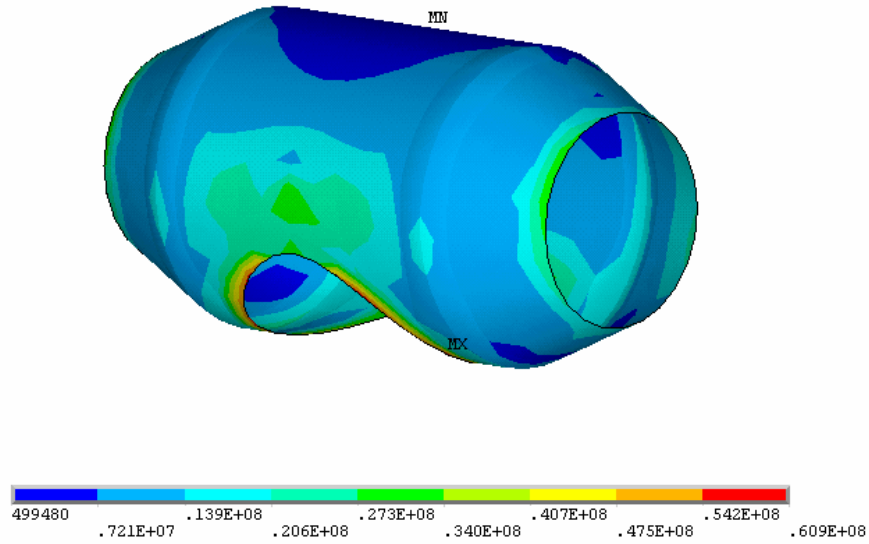


Figura 85. Steam distributor. Intensidad de tensión bajo condición de fallo (Pa).

ELEMENT SOLUTION  
STEP=9999  
SX (NOAVG)  
TOP  
DMX =.005307  
SMN =634808  
SMX =.824E+07

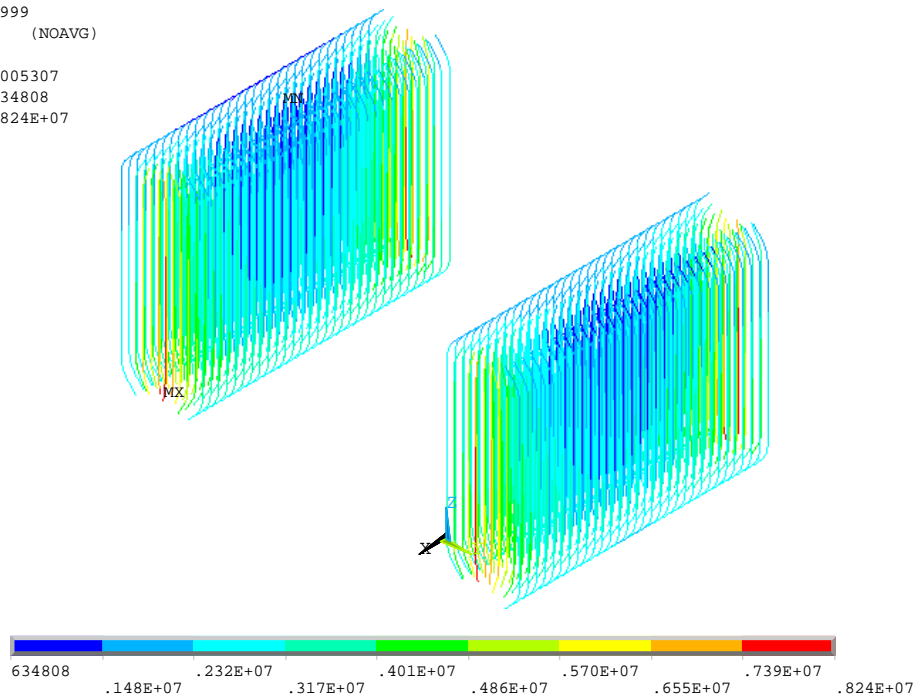


Figura 86. Tubes bundle. Intensidad de tensión bajo condición de fallo (Pa)

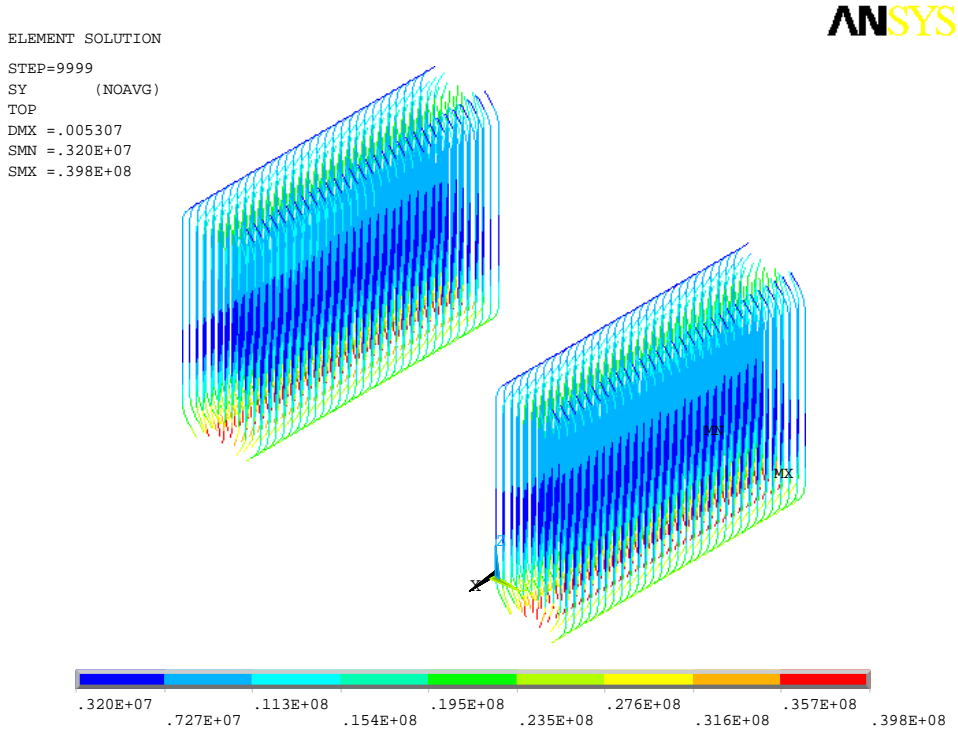


Figura 87. Tubes bundle. Intensidad de tensiones bajo condición de fallo (Pa).

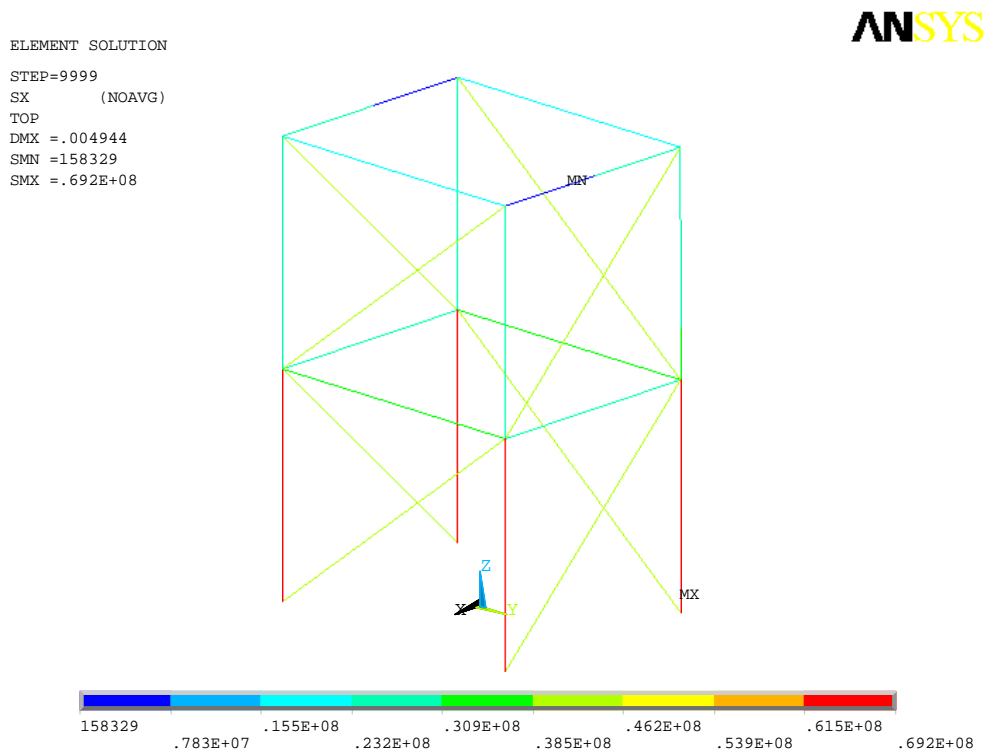


Figura 88. Estructura de soportado dinámico. Intensidad de tensiones bajo condición de fallo (Pa).



ELEMENT SOLUTION  
 STEP=9999  
 SY (NOAVG)  
 TOP  
 DMX = .004944  
 SMN = .181E+07  
 SMX = .703E+08

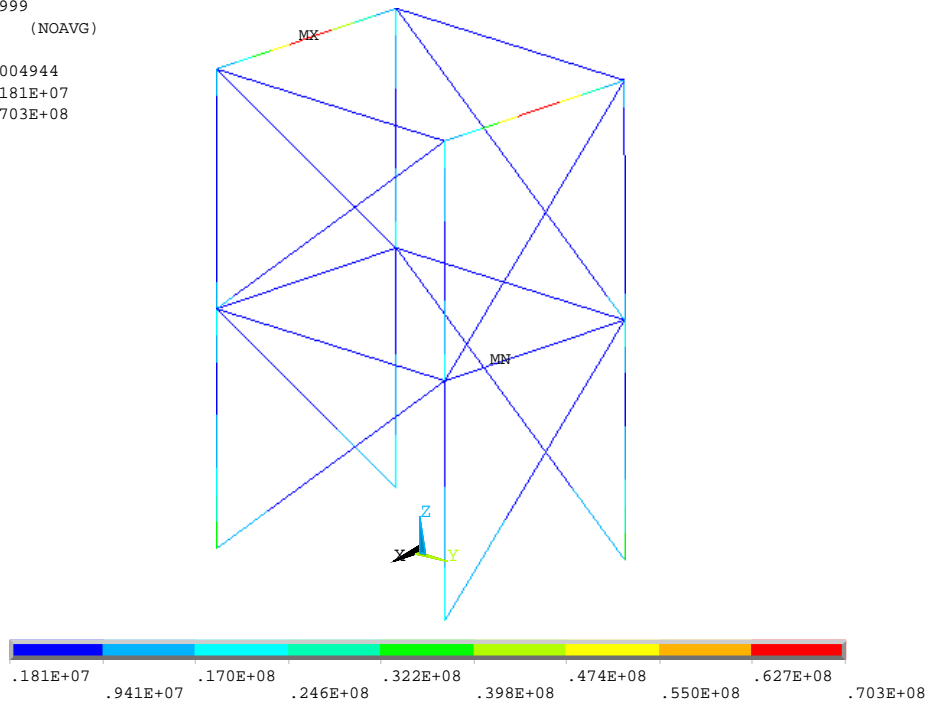


Figura 89. Estructura de soportado dinámico. Intensidad de tensiones bajo condición de fallo (Pa).

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos para los pernos de los soportes superiores.

Soporte superior	Nivel de servicio	Fuerza transmitida (N)		Tensión calculada (MPa)		Tensión permisible (MPa)	Margen (%)
				Cortante	Flexión		
Central	A/B	Fx	31260	Cortante	19.5	67.6	71
				Flexión	44.0		168.9
Esquina		Fy	16970	Cortante	9.4	67.6	86
				Flexión	28.3		168.9
Central	C/D	Fx	156600	Cortante	97.9	101.3	3
				Flexión	220.2		253.4
Esquina		Fy	96190	Cortante	53.4	101.3	47
				Flexión	160.3		253.4

Tabla 32. Tensiones en los soportes superiores

Soporte superior	Nivel de servicio	Fuerza transmitida (N)		Tensión calculada (MPa)		Tensión permisible (Mpa)	Margen (%)
Central	A/B	Fx	31260	Cortante	26.2	114.1	77
				Tensión	12.5	276.4	95
				Combinada	0.1	1.0	95
Esquina		Fy	16970	Tensión	14.2	276.4	95
Central	C/D	Fx	156600	Cortante	131.1	142.6	8
				Tensión	62.4	345.5	82
				Combinada	0.9	1.0	12
Esquina		Fy	96190	Tensión	80.5	345.5	77

*Tabla 33. Tensiones en los pernos de los soportes superiores*

La Tabla 32 muestra el resumen de las tensiones calculadas en las secciones más críticas de los dos soportes superiores centrales y los cuatro de las esquinas, y los compara con las tensiones permisibles correspondientes. Como se puede observar, todas las tensiones están por debajo de los límites de tensión permitidos.

La Tabla 33 muestra un resumen de las tensiones calculadas en los pernos de los dos soportes superiores centrales y de los cuatro de las esquinas, y los compara con las tensiones permisibles correspondientes. Como se puede observar, en este caso también están por debajo de las tensiones permisibles.

Para obtener las diferentes tensiones (tensión, cortante y flexión), tanto de los soportes como de los pernos, se han empleado las expresiones fundamentales que relacionan fuerza, superficie y tensión. A continuación se muestra un ejemplo del procedimiento de cálculo para la tensión en el perno del nodo central del nivel A/B para la fuerza  $F_x$ .

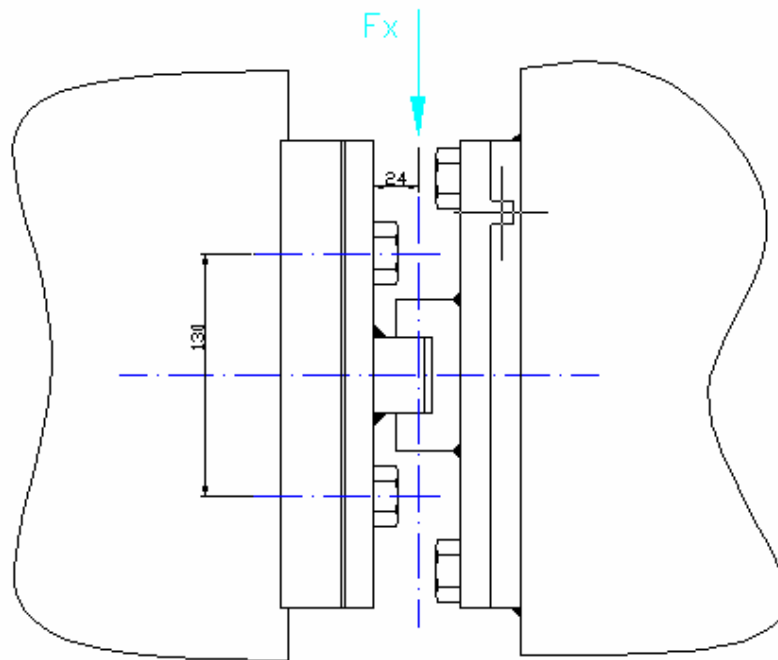


Figura 90. Soporte superior central. Esfuerzo  $F_x$  nivel A/B.

$$\text{Cortante} = \frac{F_x}{n \cdot A}$$

$$\text{Tensión} = \frac{F_x \cdot \text{Brazo}}{A}$$

Donde:

A = Área transversal del perno

n = nº de pernos = 4

Brazo =  $130/2 = 65$  mm

Las demás tensiones se obtienen de forma similar.

La tabla 34 resume las cargas de reacción de los soportes y la contención, tanto de los soportes del condensador (support saddle base plates) como los de la estructura de soportado dinámico.

Nivel de servicio	Soporte base estructura		Support Saddle	
	Tensión (kN)	Cortante (kN)	Tensión (kN)	Cortante (kN)
A/B	28	10	11	1.3
C/D	146	54	31	5

Tabla 34. Reacciones en la contención.

### 6.4 Justificación de la estructura de soportado dinámico

En un principio, la estructura completa que había que estudiar estaba desprovista de la estructura de soportado dinámico, por lo tanto había que comprobar el efecto de las diferentes cargas únicamente sobre el condensador PCCS.

Como se puede observar en las figuras que se incluyen en este apartado, las cargas dinámicas aplicadas únicamente sobre el condensador PCCS, hacen que se produzcan unas frecuencias muy pequeñas, con lo que se generan unas aceleraciones mayores que 7g, aplicadas en dirección horizontal.

DISPLACEMENT  
 STEP=1  
 SUB =1  
 FREQ=5.147  
 RSYS=0  
 DMX =.01091

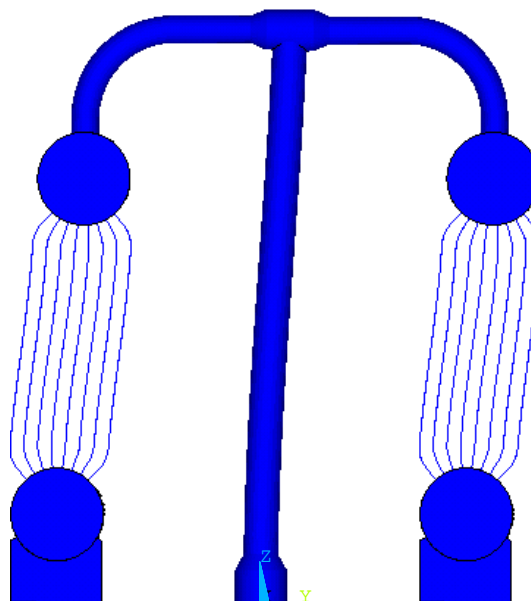
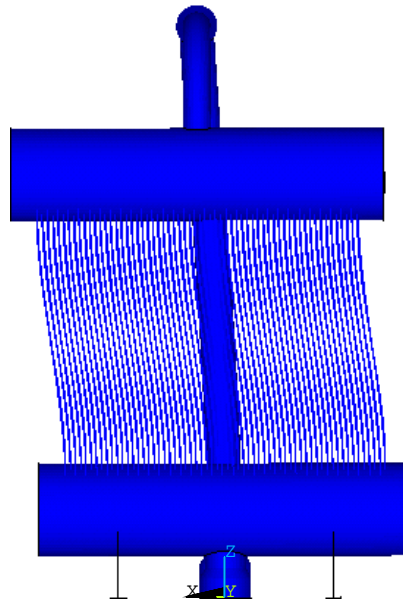


Figura 91. Modo propio.



```
DISPLACEMENT  
STEP=1  
SUB =2  
FREQ=5.302  
RSYS=0  
DMX = .010722
```

**ANSYS**

*Figura 92. Modo propio.*

Debido a esto, se generan unas tensiones demasiado elevadas, creando la necesidad de incorporar una estructura que palie los efectos de estas cargas dinámicas. Por eso se ha diseñado la estructura de soportado dinámico, y como se ha mostrado en los apartados anteriores, en su conjunto, condensador PCCS y estructura, cumplen con las restricciones impuestas por el código ASME. A continuación se muestran las tensiones que se generan en el caso de nivel C/D (caso más restrictivo), sin tener en cuenta las presiones internas.



```

NODAL SOLUTION
STEP=9999
SINT (AVG)
DMX =.101594
SMN =637468
SMX =.143E+10
    
```

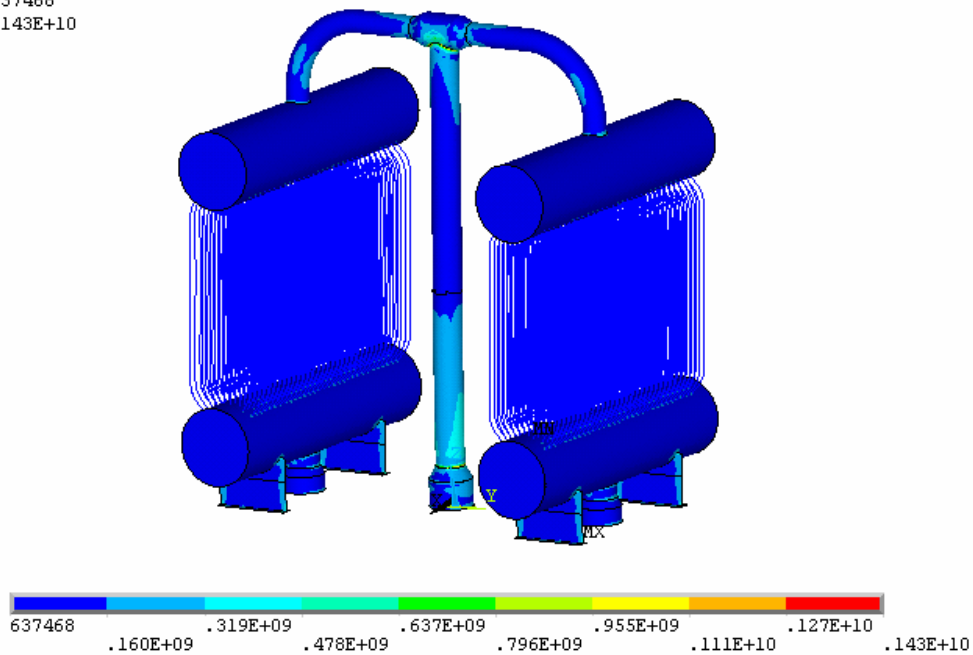


Figura 93. Intensidad de tensión máxima en condición de fallo (Pa)

Como se puede observar en la figura anterior, la tensión máxima supera con creces la tensión admisible. Ésta se da en el support saddle y su valor es de 1430 MPa, siendo la tensión admisible 253.4 MPa. Otro componente donde se superan las tensiones admisibles, se observa en la Figura 94. En los header inferiores la tensión admisible es de 180.7 MPa y se aplica una tensión máxima de 379 MPa.

NODAL SOLUTION  
 STEP=9999  
 SINT (AVG)  
 DMX =.00415  
 SMN =.602E+07  
 SMX =.379E+09

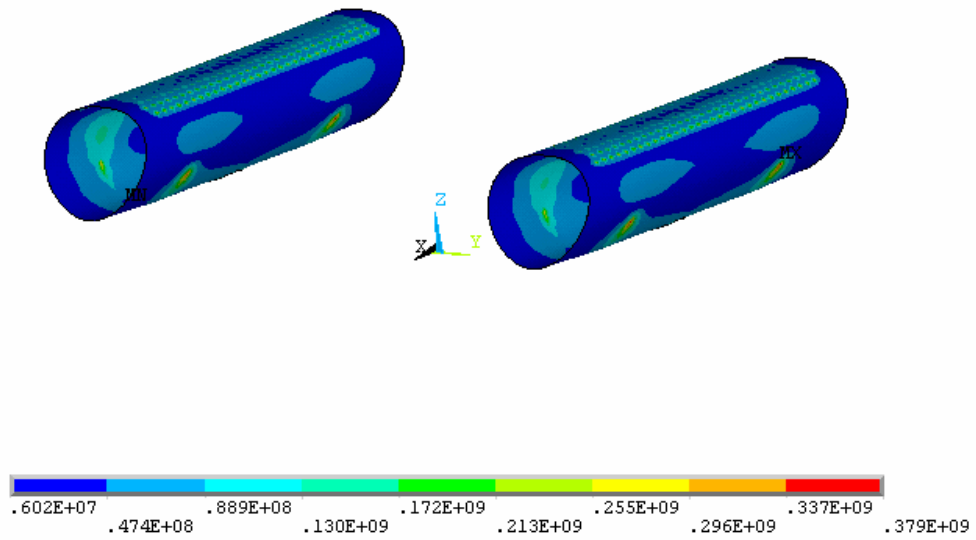


Figura 94. Headers inferiores. Intensidad de tensión máxima en condición de fallo (Pa)

## ***7 Conclusiones***

---

Para la elaboración de este proyecto se ha modelizado el condensador PCCS y su estructura de soportado dinámico, a partir de una geometría ya impuesta, para obtener las diferentes tensiones generadas en los distintos niveles de operación del mismo. Este condensador forma parte de los sistemas de seguridad de la central nuclear ESBWR, que se está desarrollando en Estados Unidos.

El objetivo principal de este proyecto se ha centrado en la comprobación estructural de este sistema a partir de una geometría dada y no del diseño del condensador PCCS. Este estudio estructural se ha realizado en dos pasos fundamentales. El primero ha consistido en el estudio de los niveles de operación de diseño y test mediante simplificaciones analíticas obtenida del código ASME. En segundo lugar, se ha procedido a evaluar los niveles A/B y C/D mediante ANSYS, analizando el peso propio y el ZPA mediante análisis estáticos y las cargas dinámicas SSE, SRVD y LOCA mediante análisis dinámicos.

Después de obtener los resultados tensionales y combinarlos según el nivel de operación, se ha comprobado que el condensador PCCS y la estructura de soportado dinámico cumplen con los requerimientos, teniendo en cuenta las tensiones admisibles proporcionadas por el código ASME. Esto no hubiera sido posible sin tener en cuenta la aportación de la estructura de soportado dinámico, ya que las tensiones obtenidas con el condensador PCCS sin esta estructura son demasiado altas, llegando a sobrepasar las tensiones admisibles en un 500%.

En la suma de las contribuciones de las distintas cargas se ha seguido un procedimiento muy conservativo, debido a que el condensador PCCS es un elemento de seguridad de la central nuclear. Las tensiones generadas mediante el análisis dinámico siempre son valores positivos, en cambio las tensiones generadas en el análisis estático del peso propio generan tensiones en ambos sentidos (tensiones y compresiones). A la hora de sumar las dos contribuciones en ANSYS, se realizó primero el valor absoluto de las tensiones obtenidas del peso propio, por lo tanto todas las tensiones son sumadas. También a la hora de sumar la contribución de la presión de diseño (tensiones obtenidas por cálculo analítico) con la contribución de las cargas dinámicas se ha sido muy conservativo, ya que se ha tomado en cada elemento la tensión mayor de ambas

componentes, longitudinal o circunferencial. También cabe destacar que las tensiones proporcionadas por el código ASME están mayoradas en un factor que se considera suficiente para componentes a presión de centrales nucleares.

En el nivel de servicio C/D (cargas más críticas) el margen de tensiones obtenidos para cada sección está entorno el 50% (en media), por lo tanto, un factor de seguridad de 2 con respecto a las tensiones ya mayoradas.

El caso de cargas más desfavorable resulta del nivel de operación C/D, en el cual se combinan todos los casos de carga posibles. De todas las posibles cargas que tiene que soportar el condensador PCCS, las cargas dinámicas son las cargas que mayores tensiones generan. Por lo tanto a la hora de elaborar la estructura de soportado dinámico, había que comprobar que con la estructura disminuían en gran medida las tensiones en el análisis dinámico.

En cuanto al análisis térmico, se ha realizado por separado, sin tener en cuenta el resto de cargas, y así se han obtenido las deformaciones en los soportes, donde podían generarse esfuerzos debidos a las reacciones (bases plates tanto de soportes superiores, como los support saddle, y los soportes superiores). Entonces una vez obtenidas estas deformaciones, se han dejado en estos puntos ciertas holguras, mayores a las deformaciones máximas, para evitar así la generación de tensiones de origen térmico. De este modo se eliminan las cargas térmicas y no hay que considerar este caso como contribución de tensiones.

El análisis estructural realizado se podría profundizar considerando un análisis detallado del condensador PCCS y los soportes, teniendo en cuenta las tensiones secundarias debidas a estados transitorios de presión y temperatura. Para hacer un estudio más completo también se podría profundizar en el diseño de la estructura de soportado dinámico, las soldaduras y los anclajes a la contención.

## ***8 Trabajos futuros***

---

En todo proyecto se pueden incorporar mejoras de cara al futuro, de forma que se obtengan soluciones que se ajusten más a la realidad.

En relación al análisis mediante elementos finitos se puede mejorar el modelo de la siguiente forma:

- Introduciendo un modelo más detallado
- Realizar análisis dinámicos más precisos, ya que en este caso, sólo se han podido crear envolventes de los espectros de respuesta de las cargas dinámicas con la representación de veinte puntos únicamente.
- Realizar un mallado más fino.
- Simplificación de la programación del modelo de elementos finitos, ya que a menor número de órdenes, mayor rapidez de cálculo.

Estos cambios anteriores siempre mejorarán la calidad de los resultados obtenidos, aunque también hay que tener en cuenta los resultados que se quieren obtener. Debido a que el objetivo de este proyecto es probar la validez estructural del condensador PCCS, lo más importante es que las tensiones obtenidas sean lo más inferiores posibles. Entonces no importa tanto si las tensiones son menos precisas siempre que los resultados obtenidos sean mayores que los reales, ya que en este tipo de análisis hay que ser muy conservativo, y más teniendo en cuenta la naturaleza de la estructura.

Como se ha visto en las conclusiones, para mejorar y hacer más preciso el estudio estructural del condensador PCCS, se podrían realizar análisis más detallados de zonas que en este proyecto no se han tenido en cuenta (soldaduras, anclajes, etc.).

También sería interesante analizar la condensación de los gases dentro del condensador, y realizar el análisis considerando una variación respecto a la altura (no puntual) de las densidades, así se mejoraría la precisión de los resultados.



## ***9 Bibliografía***

---

- [1] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II Materials, Part A Ferrous Material Specifications, 2001 Edition with Add. 2003.
- [2] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section II Materials, Part D Properties (Customary), 2001 Edition with Add. 2003.
- [3] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 1, Subsection NE, Class MC Components, 2004 Edition.
- [4] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 1, Subsection NF, Supports, 2001 Edition with Add. 2003.
- [5] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 1, Appendices, 2001 Edition with Add. 2003.
- [6] Regulatory Guide 1.61. Damping Values for seismic Design of Nuclear Power Plants.
- [7] Regulatory Guide 1.92. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis.
- [8] ANSYS 10.0 Documentation (User Manual, Theoretical Manual)
- [9] ROARK'S Formulas for Stress & Strain. Warren C Young.
- [10] ESBWR General Arrangement Drawings no.105E3908, Rev. 2.
- [11] ESBWR General Description April 2007.
- [12] 092-134-D-M-03835 Rev.0, ESBWR PCCS Condenser and supports. Drawing.

- [13] Dynamics for ANSYS 8.1. Training Manual. Ingeciber s.a.
  
- [14] 092-134-F-M-03822 RCCV Top Slab Mechanical Penetration Type B. Design Report.
  
- [15] 092-134-D-M-03822 RCCV Mechanical Penetration (Top Slab). Drawing.
  
- [16] Energía nuclear. El recorrido de la energía. Foro nuclear.
  
- [17] Energía nuclear y garantía de suministro. Foro nuclear.
  
- [18] Energía nuclear y cambio climático. Foro nuclear.
  
- [19] Competitividad de la energía nuclear. Foro nuclear.
  
- [20] Teoría General del Método de los Elementos Finitos. Francisco Beltrán, Curso de doctorado, 1998-1999
  
- [21] Standar Review Plan 3.7.2 Seismic System Análisis. U.S. Nuclear Regulatory Commission. August 1989.

### **Internet**

- [www.foronuclear.org](http://www.foronuclear.org)
- [www.cne.es](http://www.cne.es)
- [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org)
- [www.csn.es](http://www.csn.es)
- [www.enresa.es](http://www.enresa.es)
- [www.nea.fr](http://www.nea.fr)

## ***Anexo A. Planos PCCS***

---





***Anexo B. Archivo de entrada del  
modelo***

---

```
fini
/cle
/filn,pccs
/prep7
/pnum,mat,1
/number,1
!
!SA-312 Tp.304L ; SA-182 F304L
mptemp,1,-73.3,21.1,93.3,148.9,204.4,260.0
mpdata,ex,1,1,2.013e11,1.951e11,1.896e11,1.861e11,1.820e11,1.786e11
*rep,30,,1
mpdata,alpx,1,1,1.530e-5,1.530e-5,1.602e-5,1.656e-5,1.710e-5,1.746e-5
*rep,30,,1
mpdata,kxx,1,1,14.87,14.87,16.08,16.94,17.98,18.85
*rep,30,,1
nuxy,1,0.3
*rep,30,1
dens,1,15715
dens,2,22761
!dens,3,25805
dens,4,15471
dens,5,7850
dens,6,7850
dens,7,7850
!dens,8,24362
dens,9,7850
dens,10,7850
dens,11,7850
dens,12,7850
dens,13,7850
dens,14,7850
!dens,15,7850
!dens,16,7850
dens,17,7850
dens,21,12283
dens,22,15805
dens,23,17328
!dens,24,15471
dens,28,16606

dens,30,7850

!
et,1,63
r,1,.,045 !Header
et,2,44      !!Tubes
PI=3.14159265359
Dp=0.0508
Tp=0.00165
Re=Dp/2
```



$R_i = R_e - T_p$   
 $I_p = \pi/4 * (R_e^{**4} - R_i^{**4})$   
 $A_p = \pi * (R_e^{**2} - R_i^{**2})$   
 $l_o = 2 * I_p$   
 $T_{SF} = R_e / l_o$   
 $A_s = 3/4 * A_p$   
r,2,Ap,Ip,Ip,Re,Re,lo  
rmod,2,25,As,As,,,TSF !Tubes  
et,3,63  
r,3,.00818 !Feed Line  
et,4,63  
r,4,.00927 !Steam Line  
et,5,63  
r,5,.04 !Header Cover  
et,6,63  
r,6,.03 !Support saddle(Thick part)  
et,7,63  
r,7,.01 !Support saddle(de 10)!!!!!!!!!!!!!!  
et,8,63  
r,8,.00952 ! T  
et,9,63  
r,9,.0127 !Steam Line Sleeve  
et,10,63  
r,10,.015 !Steam Line Flued Head  
et,11,63  
r,11,.009525 !Condensate Line  
et,12,63  
r,12,.0127 !Condensate Line Sleeve  
et,13,63  
r,13,.015 !Condensate Line Flued Head  
et,14,63  
r,14,.035 !Placa Base soporte  
!et,15,63  
!r,15,.010 !Placa soporte Muro  
!et,16,63  
!r,16,.025 !Placa anclaje soporte Muro  
et,17,63  
r,17,0.035 !Placa base estructura  
  
!Square Tube 6x6x0.375  
IN=0.0254  
A=8.08\*IN\*\*2  
I=41.6\*IN\*\*4  
J=68.5\*IN\*\*4  
TK=6/2\*IN  
TSF=1/(6\*6\*.375\*IN\*\*3)  
et,30,44  
r,30,A,I,I,TK,TK,J !Viga soporte Muro  
rmod,30,25,A/2,A/2,,,TSF

/vup,1,z  
 k,1,2.98/2-.27,1.56,.67  
 k,2,2.98/2-.27-.040,1.56,.67  
 k,3,2.98/2-.27,1.56,0  
 l,1,2  
 circle,1,.66/2+.045/2,2,3,360,60  
 adra,all,,,,,1

L, 1, 37  
 L, 1, 41  
 L, 2, 95  
 L, 2, 99  
 L, 1, 33  
 L, 2, 91  
 L, 1, 29  
 L, 2, 87

k,,2.98/2-.27-.040,1.56+.107/2,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27,1.56+.107/2+.107,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27-.040,1.56+.107/2+.107\*2,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27,1.56+.107/2+.107\*3,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27,1.56-.107/2,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27-.040,1.56-.107/2-.107,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27,1.56-.107/2-.107\*2,.67+2.55/2  
 k,,2.98/2-.27-.040,1.56-.107/2-.107\*3,.67+2.55/2

LEXTND,184,95,1,1  
 LEXTND,182,37,1,1  
 LEXTND,185,99,1,1  
 LEXTND,183,41,1,1  
 LEXTND,186,33,1,1  
 LEXTND,187,91,1,1  
 LEXTND,188,29,1,1  
 LEXTND,189,87,1,1

ksel,,,,124,131  
 kgen,2,all,,,,-2,20  
 l,124,144  
 \*rep,8,1,1  
 alls  
 L, 132, 95  
 L, 133, 37  
 L, 134, 99  
 L, 135, 41  
 L, 136, 33  
 L, 137, 91  
 L, 138, 29  
 L, 139, 87

FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,198  
FITEM,2,206  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,199  
FITEM,2,207  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,200  
FITEM,2,208  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,201  
FITEM,2,209  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,202  
FITEM,2,210  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,203  
FITEM,2,211  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,204  
FITEM,2,212  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,2,4,ORDE,2  
FITEM,2,205  
FITEM,2,213  
LOVLAP,P51X  
FLST,2,32,4,ORDE,4  
FITEM,2,182  
FITEM,2,-197  
FITEM,2,216  
FITEM,2,-231  
LDELE,P51X  
LFILLT,215,214,.25, ,  
LFILLT,206,198,0.25, ,  
LFILLT,207,199,0.25, ,  
LFILLT,208,200,0.25, ,  
LFILLT,209,201,0.25, ,  
LFILLT,210,202,0.25, ,  
LFILLT,211,203,0.25, ,  
LFILLT,212,204,0.25, ,  
  
alls  
numm,kp  
esiz,.05

```
type,1
mat,1
real,1
ames,all
Isla
Isel,inve
Isel,u,,,1
FLST,5,8,4,ORDE,2
FITEM,5,182
FITEM,5,-189
LSEL,U, , ,P51X
type,2
mat,2
real,2
Imes,all
FLST,5,8,4,ORDE,2
FITEM,5,182
FITEM,5,-189
LSEL,S, , ,P51X
type,2
mat,2
real,2
Imes,all
alls

cm,a1,area
agen,6,all,,,04
cmsel,,a1
agen,66,all,,,04
alls
Isla
Isel,inve
Isel,u,,,1
Igen,31,all,,,08

Isel,,loc,x,1.42
asel,inve
al,all
type,5
real,5
mat,5
esiz,.08
ames,all
local,11,0,0,1.56,.67+2.55/2
arsym,x,all
alls
cm,agua,elem
arsym,z,all
Isla
Isel,inve
```

```

lsel,u,,1
lsym,z,all
alls
cmsel,u,agua
esel,r,mat,,1
emod,all,mat,21
alls
cmsel,u,agua
esel,r,mat,,2
emod,all,mat,22
alls
!
csys
numm,node
numm,kp
*GET,K1,KP,,NUM,MAX           !Keypoints for beams
*GET,L1,LINE,,NUM,MAX         !Keypoints for beams
!FEED PIPES
lsel,inve
k,K1+1,,.3,.67+2.55+.41+.72
k,K1+2,,1.56,.67+2.55+.41+.72
k,K1+3,,1.56,.67+2.55
numst,line,l1+1
l,K1+1,K1+2
l,K1+2,K1+3
lfil,L1+1,L1+2,.67
circle,K1+1,.105375,K1+2,,360, !32
asel,inve
adra,all,,,,,L1+1,L1+3,L1+2
cm,a1,area
alls

FLST,5,90,5,ORDE,20
FITEM,5,6123
FITEM,5,-6127
FITEM,5,6178
FITEM,5,-6187
FITEM,5,6238
FITEM,5,-6247
FITEM,5,6298
FITEM,5,-6307
FITEM,5,6358
FITEM,5,-6367
FITEM,5,6418
FITEM,5,-6427
FITEM,5,6478
FITEM,5,-6487
FITEM,5,6538
FITEM,5,-6547
FITEM,5,6598

```

```

FITEM,5,-6607
FITEM,5,6658
FITEM,5,-6662
ASEL,S,,P51X
Isla
acle,all
adel,all
ldel,all
local,12,1,0,1.56,.67+2.55,,,-90
al,all
cmsel,a,a1

aovl,all
csys
adel,6178,6182
type,1
real,1
mat,21
esiz,.03
ames,6183
asel,u,,6183
type,3
real,3
mat,23
csys
ames,all
alls
numm,node
numm,kp
!
!Support
csys
*GET,K2,KP,,NUM,MAX           !Keypoints for beams
k,K2+1,.82,1.56-.69/2,0
k,K2+2,.82,1.56+.69/2,0
k,K2+3,-.82,1.56-.69/2,0
k,K2+4,-.82,1.56+.69/2,0
kgen,2,K2+1,K2+4,,,,.265,4
kgen,2,K2+5,K2+8,,,,.47-.265,4
asel,inve
a,K2+1,K2+2,K2+6,K2+5
a,K2+3,K2+4,K2+8,K2+7
type,7
real,7
mat,7
ames,all
alls
asel,inve
FLST,2,25,3
FITEM,2,K2+5

```

FITEM,2,K2+6  
FITEM,2,K2+10  
FITEM,2,1833  
FITEM,2,1835  
FITEM,2,1837  
FITEM,2,1839  
FITEM,2,1841  
FITEM,2,1843  
FITEM,2,1845  
FITEM,2,1847  
FITEM,2,1849  
FITEM,2,1851  
FITEM,2,1735  
FITEM,2,1734  
FITEM,2,1737  
FITEM,2,1739  
FITEM,2,1741  
FITEM,2,1743  
FITEM,2,1745  
FITEM,2,1747  
FITEM,2,1749  
FITEM,2,1751  
FITEM,2,1753  
FITEM,2,K2+9  
A,P51X  
FLST,2,25,3  
FITEM,2,K2+7  
FITEM,2,K2+8  
FITEM,2,K2+12  
FITEM,2,6753  
FITEM,2,6755  
FITEM,2,6757  
FITEM,2,6759  
FITEM,2,6761  
FITEM,2,6763  
FITEM,2,6765  
FITEM,2,6767  
FITEM,2,6769  
FITEM,2,6771  
FITEM,2,6655  
FITEM,2,6654  
FITEM,2,6657  
FITEM,2,6659  
FITEM,2,6661  
FITEM,2,6663  
FITEM,2,6665  
FITEM,2,6667  
FITEM,2,6669  
FITEM,2,6671  
FITEM,2,6673

```

FITEM,2,K2+11
A,P51X
type,6
real,6
mat,6
ames,all
alls
!Placa base
kgen,2,K2+1,K2+4,,.055,,,100
kgen,2,K2+1,K2+4,,-.055,,,110
alls
asel,inve
a,K2+1,K2+2,K2+2+100,K2+1+100
a,K2+3,K2+4,K2+4+100,K2+3+100
a,K2+1,K2+2,K2+2+110,K2+1+110
a,K2+3,K2+4,K2+4+110,K2+3+110
aatt,14,14,14
ames,all
alls

!METER T
*GET,K3,KP,,NUM,MAX           !Keypoints for beams
*GET,L3,LINE,,NUM,MAX         !Keypoints for beams
k,K3+1,,,.67+2.55+.41+.72+.157165
k,K3+2,,.18,.67+2.55+.41+.72+.157165
k,K3+3,,.3,.67+2.55+.41+.72+.105375
k,K3+4,,,.67+2.55+.41+.72
numst,line,L3+1
l,K3+1,K3+2
l,K3+2,K3+3
local,13,1,0,0,.67+2.55+.41+.72,,-90
asel,inve
arot,L3+1,L3+2,,,,,K3+4,K1+1
cm,at,area
alls

!!!!!!

!Steam line
csys
*GET,K4,KP,,NUM,MAX           !Keypoints for beams
*GET,L4,LINE,,NUM,MAX         !Keypoints for beams
numst,line,L4+1
k,K4+1,
k,K4+2,(.4064-.0127)/2
k,K4+3,(.4064-.0127)/2,.,250
k,K4+4,(.273-.00927)/2,.,250+.115
k,K4+5,(.273-.00927)/2,.,67+2.55+.41+.72
l,K4+2,K4+3

```



```
l,K4+3,K4+4
l,K4+4,K4+5
alls
asel,inve
arot,L4+1,,,,,K4+1,K3+4,180
aatt,9,9,9
ames,all
alls
asel,inve
arot,L4+2,,,,,K4+1,K3+4,180
aatt,10,10,10
ames,all
alls
asel,inve
arot,L4+3,,,,,K4+1,K3+4,180
aatt,4,4,4
```

```
cmsel,a,at
aovlap,all
FLST,2,4,5,ORDE,4
FITEM,2,6300
FITEM,2,-6301
FITEM,2,6303
FITEM,2,6305
ADELE,P51X
```

```
FLST,5,8,5,ORDE,8
FITEM,5,6186
FITEM,5,-6187
FITEM,5,6239
FITEM,5,6241
FITEM,5,6242
FITEM,5,-6243
FITEM,5,6306
FITEM,5,-6307
ASEL,S, , ,P51X
type,8
real,8
mat,28
ames,all
```

```
asel,,,6302
asel,a,,,6304
type,4
real,4
mat,4
ames,all
!esel,,real,,4
!nsle
!nsel,r,loc,z,.67+2.55/2,10
```

```

!esln,,1
!emod,all,mat,24
alls

!Condensate line
csys
*GET,K5,KP,,NUM,MAX           !Keypoints for beams
*GET,L5,LINE,,NUM,MAX         !Keypoints for beams
numst,line,L5+1
k,K5+1,,1.56
k,K5+2,,1.56,1

k,K5+3,(.4064-.0127)/2,1.56
k,K5+4,(.4064-.0127)/2,1.56,.150
k,K5+5,(.3238-.009525)/2,1.56,.150+.071
k,K5+6,(.3238-.009525)/2,1.56,.67
l,K5+3,K5+4
l,K5+4,K5+5
l,K5+5,K5+6
alls
asel,inve
arot,L5+1,,,,,K5+1,K5+2,360
aatt,12,12,12
ames,all
alls
asel,inve
arot,L5+2,,,,,K5+1,K5+2,360
aatt,13,13,13
ames,all
alls
asel,inve
arot,L5+3,,,,,K5+1,K5+2,360
aatt,11,11,11
cm,con,area

FLST,5,90,5,ORDE,20
FITEM,5,1861
FITEM,5,-1865
FITEM,5,1916
FITEM,5,-1925
FITEM,5,1976
FITEM,5,-1985
FITEM,5,2036
FITEM,5,-2045
FITEM,5,2096
FITEM,5,-2105
FITEM,5,2156
FITEM,5,-2165
FITEM,5,2216
FITEM,5,-2225

```

```
FITEM,5,2276
FITEM,5,-2285
FITEM,5,2336
FITEM,5,-2345
FITEM,5,2396
FITEM,5,-2400
ASEL,S,, ,P51X
Isla
acle,all
adel,all
ldel,all
local,14,1,0,1.56,.67,,,-90
al,all

cmsel,a,con
aovlap,all
csys
adel,1917
adel,1919,1920
adel,1863,1865,2
type,1
real,1
mat,1
esiz,.03
ames,1921
asel,u,, ,1921
type,11
real,11
mat,11
ames,all
alls
numm,node
numm,kp
!!!2PCCS
alls
csys
arsym,y,all
Isla
Isel,inve
Isel,u,, ,1
lsym,y,all
alls
numm,node
numm,kp

save,qq,db
!
nse,loc,z
nse,r,loc,x,-.5,.5
d,all,all
```

FLST,5,32,1,ORDE,32  
FITEM,5,32119  
FITEM,5,32121  
FITEM,5,32129  
FITEM,5,32136  
FITEM,5,32167  
FITEM,5,32169  
FITEM,5,32177  
FITEM,5,32184  
FITEM,5,32215  
FITEM,5,32217  
FITEM,5,32225  
FITEM,5,32232  
FITEM,5,32263  
FITEM,5,32265  
FITEM,5,32273  
FITEM,5,32280  
FITEM,5,43555  
FITEM,5,43557  
FITEM,5,43565  
FITEM,5,43572  
FITEM,5,43603  
FITEM,5,43605  
FITEM,5,43613  
FITEM,5,43620  
FITEM,5,43734  
FITEM,5,43736  
FITEM,5,43744  
FITEM,5,43751  
FITEM,5,43782  
FITEM,5,43784  
FITEM,5,43792  
FITEM,5,43799  
NSEL,, , P51X

d,all,ux  
d,all,uy  
d,all,uz  
d,all,rotx  
d,all,roty  
alls

!d,19238,ux  
!d,46781,ux

!d,16718,uy,0  
!d,21638,uy,0  
!d,41773,uy,0  
!d,47932,uy,0

```

qq=0.001
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,1.56-(.66/2+.045/2)-qq,1.56-(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,-.02-qq,-.02+qq
nslk
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,1.56-(.66/2+.045/2)-qq,1.56-(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,-.02-20*.04-qq,-.02-20*.04+qq
nslk,a
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,1.56-(.66/2+.045/2)-qq,1.56-(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,.02+20*.04-qq,.02+20*.04+qq
nslk,a
!nsl,,19238
!nsl,a,,16718
!nsl,a,,21638
ksln
cm,k1,kp
kgen,2,all,,,,,22000
cmsel,u,k1
cm,k11,kp
kgen,2,all,,,,-.2,,1
cmsel,u,k11
cm,k111,kp

```

### !Estructura soporte

```

qq=0.001
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,-1.56+(.66/2+.045/2)-qq,-1.56+(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,-.02-qq,-.02+qq
nslk
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,-1.56+(.66/2+.045/2)-qq,-1.56+(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,-.02-20*.04-qq,-.02-20*.04+qq
nslk,a
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,-1.56+(.66/2+.045/2)-qq,-1.56+(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,.02+20*.04-qq,.02+20*.04+qq
nslk,a
!nsl,,41773
!nsl,a,,46781
!nsl,a,,47932
ksln
cm,k2,kp
kgen,2,all,,,,,22000
cmsel,u,k2
cm,k22,kp
kgen,2,all,,,,-.2,,1
cmsel,u,k22

```

cm,k222,kp

cmsel,a,k111  
kgen,3,all,,,,-3.22/2,1

lsel,all  
lsel,inve  
L, 33304, 35824  
L, 35824, 38224  
L, 38224, 38059  
L, 38059, 35757  
L, 35757, 33165  
L, 33165, 33304  
lgen,2,all,,,,-3.22/2,1

L, 33304, 33305  
L, 33305, 33306  
L, 38224, 38225  
L, 38225, 38226  
L, 38059, 38060  
L, 38060, 38061  
L, 33165, 33166  
L, 33166, 33167  
L, 33305, 38224  
L, 38225, 38059  
L, 38060, 33165  
L, 33166, 33304  
L, 33306, 38225  
L, 38226, 38060  
L, 38061, 33166  
L, 33167, 33305

ksel,all  
L, 33304, 33303  
L, 35824, 35823  
L, 38224, 38223  
L, 38059, 38058  
L, 35757, 35756  
L, 33165, 33164

latt,30,30,30

esiz,.2

lmes,all

!!!!CP

ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq  
ksel,r,loc,y,1.56-(.66/2+.045/2)-qq,1.56-(.66/2+.045/2)+qq  
ksel,r,loc,x,-.02-qq,-.02+qq  
nslk  
cpin,ux  
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq  
ksel,r,loc,y,1.56-(.66/2+.045/2)-qq,1.56-(.66/2+.045/2)+qq

```

ksel,r,loc,x,-.02-20*.04-qq,-.02-20*.04+qq
nslk,
cpin,uy
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,1.56-(.66/2+.045/2)-qq,1.56-(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,.02+20*.04-qq,.02+20*.04+qq
nslk,
cpin,uy
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,-1.56+(.66/2+.045/2)-qq,-1.56+(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,-.02-qq,-.02+qq
nslk
cpin,ux
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,-1.56+(.66/2+.045/2)-qq,-1.56+(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,-.02-20*.04-qq,-.02-20*.04+qq
nslk,
cpin,uy
ksel,,loc,z,.67+2.55-qq,.67+2.55+qq
ksel,r,loc,y,-1.56+(.66/2+.045/2)-qq,-1.56+(.66/2+.045/2)+qq
ksel,r,loc,x,.02+20*.04-qq,.02+20*.04+qq
nslk,
cpin,uy

esel,,real,,30
nsle
ksln
ksel,r,loc,z
ksel,u,loc,x,-.02-qq,-.02+qq
cm,cuatro,kp
!nslk
!d,all,all
numst,kp,40000
kgen,2,all,,,1,.1
cmsel,,cuatro
kgen,2,all,,,1,-.1
cmsel,,cuatro
kgen,2,all,,,1,-.1
cmsel,,cuatro
kgen,2,all,,,1,.1
asel,all
asel,inve
ksel,all
FLST,2,3,3
FITEM,2,33306
FITEM,2,40001
FITEM,2,40013
A,P51X
FLST,2,3,3
FITEM,2,33306

```

FITEM,2,40013  
FITEM,2,40009  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,33306  
FITEM,2,40009  
FITEM,2,40005  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,33306  
FITEM,2,40005  
FITEM,2,40001  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38226  
FITEM,2,40003  
FITEM,2,40015  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38226  
FITEM,2,40015  
FITEM,2,40011  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38226  
FITEM,2,40011  
FITEM,2,40007  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38226  
FITEM,2,40007  
FITEM,2,40003  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,33167  
FITEM,2,40000  
FITEM,2,40012  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,33167  
FITEM,2,40012  
FITEM,2,40008  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,33167  
FITEM,2,40008  
FITEM,2,40004  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,33167



FITEM,2,40004  
FITEM,2,40000  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38061  
FITEM,2,40002  
FITEM,2,40014  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38061  
FITEM,2,40014  
FITEM,2,40010  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38061  
FITEM,2,40010  
FITEM,2,40006  
A,P51X  
FLST,2,3,3  
FITEM,2,38061  
FITEM,2,40006  
FITEM,2,40002  
A,P51X  
aatt,17,17,17  
esiz,.03  
ames,all  
ksel,,,,40000,40015  
nslk  
d,all,ux  
d,all,uy  
d,all,uz  
d,all,rotx  
d,all,roty  
alls  
esel,,real,,7  
nsle  
nsel,r,loc,z,,.06  
esln,,1  
emod,all,real,6  
emod,all,type,6  
emod,all,mat,6  
alls  
  
mat,30  
type,30  
rlis,30  
r,31,.00001,0.001,.001,.01,.01  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62167  
FITEM,2,62146

E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62146  
FITEM,2,62138  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62138  
FITEM,2,62183  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62183  
FITEM,2,62167  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62167  
FITEM,2,61914  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62146  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62138  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62183  
E,P51X  
FLST,2,8,2,ORDE,2  
FITEM,2,52527  
FITEM,2,-52534  
EDELE,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62106  
FITEM,2,62059  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62059  
FITEM,2,62067  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62067  
FITEM,2,62086  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62086  
FITEM,2,62106  
E,P51X  
FLST,2,2,1

FITEM,2,61897  
FITEM,2,62059  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61897  
FITEM,2,62067  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61897  
FITEM,2,62086  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61897  
FITEM,2,62106  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62183  
FITEM,2,62138  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62138  
FITEM,2,62146  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62146  
FITEM,2,62167  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62167  
FITEM,2,62183  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62138  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62146  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62167  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61914  
FITEM,2,62183  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62341  
FITEM,2,62296

E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62296  
FITEM,2,62304  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62304  
FITEM,2,62322  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62322  
FITEM,2,62341  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62341  
FITEM,2,61931  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61931  
FITEM,2,62296  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61931  
FITEM,2,62304  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61931  
FITEM,2,62322  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62262  
FITEM,2,62215  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62215  
FITEM,2,62223  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62223  
FITEM,2,62243  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,62243  
FITEM,2,62262  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61948  
FITEM,2,62215  
E,P51X  
FLST,2,2,1

FITEM,2,61948  
FITEM,2,62223  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61948  
FITEM,2,62243  
E,P51X  
FLST,2,2,1  
FITEM,2,61948  
FITEM,2,62262  
E,P51X

save,pccs,db

***Anexo C. Archivo de entrada del  
análisis dinámico***

---

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
C***
C*** ANALISIS MODAL
C***
fini
/cle
/filn,SSE-LOCA-SRVD
/outp,D-B-SSE-LOCA-SRVD,sal
resu,pccs,db
alls
/solu
tunif,171
tref,171
antype,modal
modopt,subsp,10
mxpand,10,,yes
outpr,all,none
solve
finish
!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
C***
C*** 3% DE AMORTIGUAMIENTO
C***
/solu
tunif,171
tref,171
antype,spectr
spopt,sprs,10,yes
GRP,
C***
C*** SSE
C***
sed,1,0,0
svtype,2,9.81
outpr,nsol,all
freq
freq,1,1.6,1.7,2.2,2.97,3.05,4,4.95,6.45
freq,7.1,9.4,11.85,15.5,25,28.5,39,45.5,53
freq,69,300
sv,,3.2,3.2,2.6,8.8,8.8,8.2,8.2,7.8,3.65
sv,,4.6,4.6,2.6,3.2,3.2,2.15,2.15,1.7,1.7
sv,,1.2,1.2
lswr,1

sed,0,1,0
svtype,2,9.81
outpr,nsol,all
lswr,2

```

```
sed,0,0,1
svtype,2,9.81
outpr,nsol,all
freq
freq,1,1.2,1.9,2.2,3.7,5.02,5.5,7,8.9
freq,9,11,16.2,23.2,28,36,41,60,75
freq,100,300
sv,,1.3,2.15,2.15,4.4,4.4,4.2,3.7,6.3,6.3
sv,,7.5,10.6,10.6,3.9,3.1,2.5,2.8,2.8,1.7
sv,,1.6,1.6
lswr,3

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!
C***
C***    3% DE AMORTIGUAMIENTO
C***
C***
C***    LOCA
C***
sed,1,0,0
svtype,2,9.81
outpr,nsol,all
freq
freq,1,4.7,5.4,8.7,9.4,12,17,18,23
freq,30.2,34,37,40.5,42,61,69,80,88
freq,300
sv,,0.01,0.05,0.14,0.14,0.08,0.17,0.17,0.14,0.64
sv,,0.64,0.41,0.49,0.49,0.55,0.55,0.4,0.35,0.285
sv,,0.285
lswr,4

sed,0,1,0
svtype,2,9.81
outpr,nsol,all
lswr,5

sed,0,0,1
svtype,2,9.81
outpr,nsol,all
freq
freq,1,2,2.9,3.3,4,5.1,5.8,7.9,8.9
freq,10,12,17,19,22,29,40.2,46,69
freq,71,300
sv,,0.1,0.93,0.93,0.61,0.89,0.89,1.05,1.05,0.91
sv,,0.46,0.74,0.74,0.52,0.87,1.19,1.19,0.74,0.74
sv,,0.82,0.82
lswr,6
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```





```
/filn,ZPA
resu,pccs,db
alls
g=9.81
/solu
!!!!!!!!!!!!!!a >>>38 Hz
acel,2.15*12/24*g
lswr,1
acel,,2.15*17/24*g
lswr,2
acel,,2.8*1*g
lswr,3
acel,.55*12/24*g
lswr,4
acel,,.55*17/24*g
lswr,5
acel,,1.19*1*g
lswr,6
acel,.22*12/24*g
lswr,7
acel,,.22*17/24*g
lswr,8
acel,,.18*1*g
lswr,9
```

```
lssolve,1,9
/post1
lcde,1,1
*rep,9,1,1
lcas,1
lcp,srss,2
lcp,srss,3
lcp,srss,4
lcp,srss,5
lcp,srss,6
lcp,srss,7
lcp,srss,8
lcp,srss,9
lcwr,1
```

```
/outp
```

```
/out,DYNAMIC,sal
lcfi,1,SSE-LOCA-SRVD,I01
lcfi,2,ZPA,I01
lcas,1
lcp,srss,2
lcwr,10,DYNAMIC
/out
```

***Anexo D. Archivo de salida de ANSYS  
del análisis dinámico***

---

\*\*\*\*\* PARTICIPATION FACTOR CALCULATION \*\*\*\*\* X DIRECTION

CUMULATIVE MODE MASS FRACTION	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
1 0.634399E-04	14.6851	0.68096E-01	0.89442	0.007992	0.799981
2 0.993233	15.2424	0.65607E-01	111.91	1.000000	12523.9
3 0.997402	17.1509	0.58306E-01	-7.2514	0.064796	52.5824
4 0.997404	25.6036	0.39057E-01	-0.12444	0.001112	0.154843E-01
5 0.999932	31.4463	0.31800E-01	-5.6470	0.050460	31.8882
6 0.999941	37.3862	0.26748E-01	-0.33303	0.002976	0.110908
7 0.999945	38.4605	0.26001E-01	0.20483	0.001830	0.419536E-01
8 1.00000	38.5406	0.25947E-01	0.83432	0.007455	0.696090
9 1.00000	38.5881	0.25915E-01	0.14486E-01	0.000129	0.209831E-03
10 1.00000	38.5962	0.25909E-01	0.51772E-01	0.000463	0.268034E-02
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					12610.0

\*\*\*\*\* PARTICIPATION FACTOR CALCULATION \*\*\*\*\* Y DIRECTION

CUMULATIVE MODE MASS FRACTION	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
1 0.224882E-07	14.6851	0.68096E-01	0.19893E-01	0.000170	0.395716E-03
2 0.295121E-02	15.2424	0.65607E-01	7.2063	0.061633	51.9310
3 0.779867	17.1509	0.58306E-01	116.92	1.000000	13671.1
4 0.779867	25.6036	0.39057E-01	-0.14337E-01	0.000123	0.205548E-03
5 0.779904	31.4463	0.31800E-01	0.80958	0.006924	0.655419
6 0.999950	37.3862	0.26748E-01	-62.226	0.532194	3872.07
7 0.999950	38.4605	0.26001E-01	0.26338E-02	0.000023	0.693698E-05
8 0.999951	38.5406	0.25947E-01	-0.12804	0.001095	0.163946E-01
9 1.00000	38.5881	0.25915E-01	0.92880	0.007944	0.862671
10 1.00000	38.5962	0.25909E-01	0.93787E-02	0.000080	0.879595E-04
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					17596.6

\*\*\*\*\* PARTICIPATION FACTOR CALCULATION \*\*\*\*\* Z DIRECTION

CUMULATIVE MODE MASS FRACTION	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
1 0.933821	14.6851	0.68096E-01	-1.1122	1.000000	1.23705
2 0.933889	15.2424	0.65607E-01	0.95146E-02	0.008555	0.905279E-04
3 0.933889	17.1509	0.58306E-01	0.12332E-03	0.000111	0.152077E-07
4 0.962601	25.6036	0.39057E-01	-0.19503	0.175347	0.380350E-01
5 0.962611	31.4463	0.31800E-01	-0.36932E-02	0.003321	0.136396E-04

6	37.3862	0.26748E-01	0.95031E-03	0.000854	0.903082E-06
0.962612					
7	38.4605	0.26001E-01	0.92707E-01	0.083352	0.859450E-02
0.969099					
8	38.5406	0.25947E-01	-0.15926E-01	0.014319	0.253645E-03
0.969291					
9	38.5881	0.25915E-01	-0.13591E-05	0.000001	0.184708E-11
0.969291					
10	38.5962	0.25909E-01	-0.20170	0.181343	0.406810E-01
1.00000					
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					1.32472

\*\*\*\*\* PARTICIPATION FACTOR CALCULATION \*\*\*\*\*ROTX DIRECTION

CUMULATIVE MODE MASS FRACTION	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
1	14.6851	0.68096E-01	-0.54794E-01	0.000160	0.300240E-02
0.249189E-07					
2	15.2424	0.65607E-01	-19.900	0.058249	396.018
0.328685E-02					
3	17.1509	0.58306E-01	-341.64	1.000000	116717.
0.972001					
4	25.6036	0.39057E-01	0.40713E-01	0.000119	0.165751E-02
0.972001					
5	31.4463	0.31800E-01	-2.3374	0.006842	5.46345
0.972047					
6	37.3862	0.26748E-01	57.999	0.169767	3363.90
0.999966					
7	38.4605	0.26001E-01	-0.50463E-02	0.000015	0.254650E-04
0.999966					
8	38.5406	0.25947E-01	-0.68105	0.001993	0.463827
0.999970					
9	38.5881	0.25915E-01	-1.8899	0.005532	3.57180
1.00000					
10	38.5962	0.25909E-01	0.23864	0.000699	0.569475E-01
1.00000					
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					120487.

\*\*\*\*\* PARTICIPATION FACTOR CALCULATION \*\*\*\*\*ROTY DIRECTION

CUMULATIVE MODE MASS FRACTION	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
1	14.6851	0.68096E-01	2.6878	0.007994	7.22432
0.635777E-04					
2	15.2424	0.65607E-01	336.22	1.000000	113042.
0.994888					
3	17.1509	0.58306E-01	-20.251	0.060232	410.102
0.998498					
4	25.6036	0.39057E-01	-0.36682	0.001091	0.134559
0.998499					
5	31.4463	0.31800E-01	12.978	0.038601	168.437
0.999981					
6	37.3862	0.26748E-01	-0.46218	0.001375	0.213612
0.999983					
7	38.4605	0.26001E-01	0.16000	0.000476	0.255996E-01
0.999983					
8	38.5406	0.25947E-01	1.3804	0.004106	1.90563
1.00000					
9	38.5881	0.25915E-01	0.45746E-02	0.000014	0.209274E-04
1.00000					
10	38.5962	0.25909E-01	0.48541E-01	0.000144	0.235619E-02
1.00000					
SUM OF EFFECTIVE MASSES=					113630.

\*\*\*\*\* PARTICIPATION FACTOR CALCULATION \*\*\*\*\*ROTZ DIRECTION

CUMULATIVE

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS
1	14.6851	0.68096E-01	188.95	1.000000	35702.3
0.993743					
2	15.2424	0.65607E-01	-1.4972	0.007924	2.24152
0.993805					
3	17.1509	0.58306E-01	0.57838E-01	0.000306	0.334526E-02
0.993805					
4	25.6036	0.39057E-01	14.904	0.078879	222.138
0.999988					
5	31.4463	0.31800E-01	0.14087E-01	0.000075	0.198456E-03
0.999988					
6	37.3862	0.26748E-01	0.57468E-01	0.000304	0.330257E-02
0.999988					
7	38.4605	0.26001E-01	0.53182	0.002815	0.282833
0.999996					
8	38.5406	0.25947E-01	0.15797E-02	0.000008	0.249546E-05
0.999996					
9	38.5881	0.25915E-01	0.49774E-01	0.000263	0.247741E-02
0.999996					
10	38.5962	0.25909E-01	0.37160	0.001967	0.138083
1.00000					

SUM OF EFFECTIVE MASSES= 35927.1

\*\*\* NOTE \*\*\*

CP = 16255.672 TIME= 05:05:30

Solution is done!

\*\*\* PROBLEM STATISTICS

ACTUAL NO. OF ACTIVE DEGREES OF FREEDOM = 311052

R.M.S. WAVEFRONT SIZE = 2828.8

\*\*\* ANSYS BINARY FILE STATISTICS

BUFFER SIZE USED= 16384

36.375 MB WRITTEN ON ELEMENT MATRIX FILE: SSE-LOCA-SRVD.emat

82.750 MB WRITTEN ON ELEMENT SAVED DATA FILE: SSE-LOCA-SRVD.esav

112.000 MB WRITTEN ON ASSEMBLED MATRIX FILE: SSE-LOCA-SRVD.full

26.438 MB WRITTEN ON MODAL MATRIX FILE: SSE-LOCA-SRVD.mode

917.562 MB WRITTEN ON RESULTS FILE: SSE-LOCA-SRVD.rst

FINISH SOLUTION PROCESSING

\*\*\*\*\* ROUTINE COMPLETED \*\*\*\*\* CP = 16255.859

\*\*\* NOTE \*\*\*

CP = 16255.859 TIME= 05:05:30

A total of 2 warnings and errors written to C:\Fjp\ESBWR\PCCS MC Component\modelo\21\placarigida\file.err.

C\*\*\*

C\*\*\* 3% DE AMORTIGUAMIENTO

C\*\*\*

\*\*\*\*\* ANSYS SOLUTION ROUTINE \*\*\*\*\*

UNIFORM TEMPERATURE= 171.000 (TREF= 171.000)

REFERENCE TEMPERATURE= 171.000 (TUNIF= 171.000)

PERFORM A SPECTRUM ANALYSIS

THIS WILL BE A NEW ANALYSIS

\*\*\* NOTE \*\*\*

CP = 16255.859 TIME= 05:05:30

Some analysis options have been reset to their defaults. Please verify current settings or respecify as required.

USE SINGLE POINT EXCITATION RESPONSE SPECTRUM  
 USE THE FIRST 10 MODES FROM THE MODAL ANALYSIS  
 INCLUDE STRESS RESPONSES IN THE CALCULATIONS

COMBINE MODES USING THE GROUPING METHOD  
 WHOSE SIGNIFICANCE LEVEL EXCEEDS THE THRESHOLD OF 0.10000E-02  
 TYPE OF QUANTITIES TO BE COMBINED IS DISP

C\*\*\*

C\*\*\* SSE

C\*\*\*

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 1.0000 0.0000 0.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL  
 FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

FREQ= 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00  
 0.00

SPECTRUM TABLE INITIALIZED

FREQ= 1.00 1.60 1.70 2.20 2.97 3.05 4.00 4.95  
 6.45

NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 9

FREQ= 7.10 9.40 11.9 15.5 25.0 28.5 39.0 45.5  
 53.0

NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 18

FREQ= 69.0 300. 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00  
 0.00

NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 20

DAMPING= 0.0000 SV= 3.2000 3.2000 2.6000  
 8.8000 8.8000 8.2000  
 8.2000 7.8000 3.6500

DAMPING= 0.0000 SV= 4.6000 4.6000 2.6000  
 3.2000 3.2000 2.1500  
 2.1500 1.7000 1.7000

DAMPING= 0.0000 SV= 1.2000 1.2000 0.0000  
 0.0000 0.0000 0.0000  
 0.0000 0.0000 0.0000

NUMBER OF ENTRIES IN RESPONSE SPECTRUM TABLE = 20

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s01

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 0.0000 1.0000 0.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL  
 FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s02

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 0.0000 0.0000 1.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL  
 FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

FREQ= 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00  
 0.00

SPECTRUM TABLE INITIALIZED

```

FREQ= 1.00      1.20      1.90      2.20      3.70      5.02      5.50      7.00
8.90
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 9

FREQ= 9.00      11.0      16.2      23.2      28.0      36.0      41.0      60.0
75.0
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 18

FREQ= 100.      300.      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 20

DAMPING= 0.0000      SV= 1.3000      2.1500      2.1500
4.4000      4.4000      4.2000
3.7000      6.3000      6.3000

DAMPING= 0.0000      SV= 7.5000      10.600      10.600
3.9000      3.1000      2.5000
2.8000      2.8000      1.7000

DAMPING= 0.0000      SV= 1.6000      1.6000      0.0000
0.0000      0.0000      0.0000
0.0000      0.0000      0.0000
NUMBER OF ENTRIES IN RESPONSE SPECTRUM TABLE = 20

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s03

C***

C***      3% DE AMORTIGUAMIENTO

C***

C***

C***      LOCA

C***

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 1.0000      0.0000      0.0000
SPECTRUM TYPE KEY= 2      FACTOR= 9.81000
PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

FREQ= 0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00

SPECTRUM TABLE INITIALIZED

FREQ= 1.00      4.70      5.40      8.70      9.40      12.0      17.0      18.0
23.0
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 9

FREQ= 30.2      34.0      37.0      40.5      42.0      61.0      69.0      80.0
88.0
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 18

FREQ= 300.      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 19

DAMPING= 0.0000      SV= 0.10000E-01      0.50000E-01      0.14000
0.14000      0.80000E-01      0.17000
0.17000      0.14000      0.64000

DAMPING= 0.0000      SV= 0.64000      0.41000      0.49000
0.49000      0.55000      0.55000
0.40000      0.35000      0.28500
    
```



```

DAMPING= 0.0000      SV= 0.28500      0.0000      0.0000
                0.0000      0.0000      0.0000
                0.0000      0.0000      0.0000

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s04

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 0.0000      1.0000      0.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s05

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 0.0000      0.0000      1.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

FREQ= 0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00

SPECTRUM TABLE INITIALIZED

FREQ= 1.00      2.00      2.90      3.30      4.00      5.10      5.80      7.90
8.90
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 9

FREQ= 10.0      12.0      17.0      19.0      22.0      29.0      40.2      46.0
69.0
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 18

FREQ= 71.0      300.      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 20

DAMPING= 0.0000      SV= 0.10000      0.93000      0.93000
                0.61000      0.89000      0.89000
                1.0500      1.0500      0.91000

DAMPING= 0.0000      SV= 0.46000      0.74000      0.74000
                0.52000      0.87000      1.1900
                1.1900      0.74000      0.74000

DAMPING= 0.0000      SV= 0.82000      0.82000      0.0000
                0.0000      0.0000      0.0000
                0.0000      0.0000      0.0000
NUMBER OF ENTRIES IN RESPONSE SPECTRUM TABLE = 20

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s06

C***

C*** 3% DE AMORTIGUAMIENTO

C***

C***

C*** SRVD

C***

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 1.0000      0.0000      0.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000
    
```

```

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

FREQ= 0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00

SPECTRUM TABLE INITIALIZED

FREQ= 1.00      2.10      3.20      4.10      5.80      6.20      8.00      10.2
16.0
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 9

FREQ= 18.0      22.3      28.0      44.0      50.0      300.      0.00      0.00
0.00
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 15

DAMPING= 0.0000      SV= 0.10000E-01  0.20000E-01  0.50000E-01
0.13000      0.13000      0.11000
0.23000      0.59000      0.59000

DAMPING= 0.0000      SV= 0.34000      0.24000      0.22000
0.21000      0.21000      0.0000
0.0000      0.0000      0.0000

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s07

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 0.0000      1.0000      0.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s08

SEISMIC EXCITATION DIRECTION = 0.0000      0.0000      1.0000

SPECTRUM TYPE KEY= 2 FACTOR= 9.81000

PRINT NSOL ITEMS WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

FREQ= 0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00      0.00
0.00

SPECTRUM TABLE INITIALIZED

FREQ= 1.00      2.15      3.10      4.10      5.90      6.40      7.02      9.00
10.5
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 9

FREQ= 16.0      18.0      28.0      30.0      41.0      47.0      70.0      300.
0.00
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 17

DAMPING= 0.0000      SV= 0.25000E-01  0.75000E-01  0.21000
0.62000      0.62000      0.53000
0.53000      0.27000      0.40000

DAMPING= 0.0000      SV= 0.40000      0.25000      0.16000
0.18000      0.18000      0.12000
0.11000      0.11000      0.0000

WRITE ANSYS LOADS DATA AS FILE=SSE-LOCA-SRVD.s09
ANSYS RELEASE 10.0 UP20050718 05:05:31 02/22/2008
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 16
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 20
NUMBER OF ENTRIES IN RESPONSE SPECTRUM TABLE = 20

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 1. Begin solution ...

***** ANSYS SOLVE COMMAND *****

```

S O L U T I O N O P T I O N S

PROBLEM DIMENSIONALITY. . . . .3-D  
 DEGREES OF FREEDOM. . . . . UX UY UZ ROTX ROTY ROTZ  
 ANALYSIS TYPE . . . . .SPECTRUM  
 SPECTRUM TYPE. . . . .SINGLE POINT  
 NUMBER OF MODES TO BE USED. . . . . 10  
 ELEMENT RESULTS CALCULATION . . . . .ON  
 GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX . . . . .SYMMETRIC

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 1  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . .ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 1.0000 0.0000 0.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . .DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
   ITEM       FREQUENCY   COMPONENT  
   ALL        NONE  
   NSOL       ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . .ALL DATA WRITTEN

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621            VERSION=INTEL NT            05:05:37 FEB 22, 2008 CP= 16258.562

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
EFFECTIVE MASS					
1	14.69	30.108	0.8944	0.3163E-02	0.008366
0.799981					
2	15.24	30.988	111.9	0.3781	1.000000
12523.9					
3	17.15	31.392	-7.251	-0.1960E-01	0.051845
52.5824					
4	25.60	29.199	-0.1244	-0.1404E-03	0.000371
0.154843E-01					
5	31.45	21.091	-5.647	-0.3051E-02	0.008069
31.8882					
6	37.39	21.091	-0.3330	-0.1273E-03	0.000337
0.110908					
7	38.46	21.091	0.2048	0.7398E-04	0.000196
0.419536E-01					
8	38.54	21.091	0.8343	0.3001E-03	0.000794
0.696090					
9	38.59	21.091	0.1449E-01	0.5197E-05	0.000014
0.209831E-03					
10	38.60	21.091	0.5177E-01	0.1857E-04	0.000049
0.268034E-02					
				SUM OF EFFECTIVE MASSES=	
12610.0					

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621            VERSION=INTEL NT            05:05:37 FEB 22, 2008 CP= 16258.578

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE	FREQUENCY	DAMPING	SV	MODE COEF.
1	14.69	0.0000	30.108	0.3163E-02
2	15.24	0.0000	30.988	0.3781
3	17.15	0.0000	31.392	-0.1960E-01
5	31.45	0.0000	21.091	-0.3051E-02

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

FREQUENCY	14.685	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
FREQUENCY	15.242	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
MODE= 3	FREQUENCY=	17.151	COUPLING COEF.=	1.000
MODE= 5	FREQUENCY=	31.446	COUPLING COEF.=	1.000

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

\*\*\* NOTE \*\*\* CP = 16258.578 TIME= 05:05:37  
 Solution is done!

\*\*\* PROBLEM STATISTICS  
 ACTUAL NO. OF ACTIVE DEGREES OF FREEDOM = 311052  
 R.M.S. WAVEFRONT SIZE = 2828.8

\*\*\* ANSYS BINARY FILE STATISTICS  
 BUFFER SIZE USED= 16384  
 ANSYS RELEASE 10.0 UP20050718 05:05:31 02/22/2008  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 16  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 20  
 NUMBER OF ENTRIES IN RESPONSE SPECTRUM TABLE = 20

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 2. Begin solution ...

\*\*\*\*\* ANSYS SOLVE COMMAND \*\*\*\*\*

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 2  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 0.0000 1.0000 0.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
 ITEM FREQUENCY COMPONENT  
 ALL NONE  
 NSOL ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:38 FEB 22, 2008 CP= 16260.141

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
EFFECTIVE MASS					
1	14.69	30.108	0.1989E-01	0.7035E-04	0.000223
0.395716E-03					
2	15.24	30.988	7.206	0.2435E-01	0.077029
51.9310					
3	17.15	31.392	116.9	0.3161	1.000000
13671.1					

4	25.60	29.199	-0.1434E-01	-0.1618E-04	0.000051
0.205548E-03					
5	31.45	21.091	0.8096	0.4374E-03	0.001384
0.655419					
6	37.39	21.091	-62.23	-0.2378E-01	0.075251
3872.07					
7	38.46	21.091	0.2634E-02	0.9513E-06	0.000003
0.693698E-05					
8	38.54	21.091	-0.1280	-0.4605E-04	0.000146
0.163946E-01					
9	38.59	21.091	0.9288	0.3332E-03	0.001054
0.862671					
10	38.60	21.091	0.9379E-02	0.3364E-05	0.000011
0.879595E-04					

SUM OF EFFECTIVE MASSES=

17596.6

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:38 FEB 22, 2008 CP= 16260.141

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE	FREQUENCY	DAMPING	SV	MODE COEF.
2	15.24	0.0000	30.988	0.2435E-01
3	17.15	0.0000	31.392	0.3161
5	31.45	0.0000	21.091	0.4374E-03
6	37.39	0.0000	21.091	-0.2378E-01
9	38.59	0.0000	21.091	0.3332E-03

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

MODE= 2 FREQUENCY= 15.242 COUPLING COEF.= 1.000  
 MODE= 3 FREQUENCY= 17.151 COUPLING COEF.= 1.000  
 MODE= 5 FREQUENCY= 31.446 COUPLING COEF.= 1.000  
 FREQUENCY 37.386 HERTZ PART OF CLOSELY SPACED GROUP 1  
 FREQUENCY 38.588 HERTZ PART OF CLOSELY SPACED GROUP 1

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

\*\*\* NOTE \*\*\* CP = 16260.141 TIME= 05:05:38  
 Solution is done!  
 ANSYS RELEASE 10.0 UP20050718 05:05:31 02/22/2008  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 16  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 20  
 NUMBER OF ENTRIES IN RESPONSE SPECTRUM TABLE = 20

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 3. Begin solution ...

\*\*\*\*\* ANSYS SOLVE COMMAND \*\*\*\*\*

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 3  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 0.0000 0.0000 1.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
 ITEM FREQUENCY COMPONENT  
 ALL NONE  
 NSOL ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:40 FEB 22, 2008 CP= 16261.734

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE MODE EFFECTIVE MASS	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
1	14.69	103.99	-1.112	-0.1358E-01	1.000000
1.23705					
2	15.24	103.99	0.9515E-02	0.1079E-03	0.007941
0.905279E-04					
3	17.15	88.717	0.1233E-03	0.9421E-06	0.000069
0.152077E-07					
4	25.60	33.921	-0.1950	-0.2556E-03	0.018817
0.380350E-01					
5	31.45	27.535	-0.3693E-02	-0.2605E-05	0.000192
0.136396E-04					
6	37.39	25.346	0.9503E-03	0.4365E-06	0.000032
0.903082E-06					
7	38.46	25.979	0.9271E-01	0.4124E-04	0.003036
0.859450E-02					
8	38.54	26.027	-0.1593E-01	-0.7069E-05	0.000520
0.253645E-03					
9	38.59	26.054	-0.1359E-05	-0.6024E-09	0.000000
0.184708E-11					
10	38.60	26.059	-0.2017	-0.8937E-04	0.006579
0.406810E-01					
					SUM OF EFFECTIVE MASSES=
1.32472					

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:40 FEB 22, 2008 CP= 16261.734

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE	FREQUENCY	DAMPING	SV	MODE COEF.
1	14.69	0.0000	103.99	-0.1358E-01
2	15.24	0.0000	103.99	0.1079E-03
4	25.60	0.0000	33.921	-0.2556E-03
7	38.46	0.0000	25.979	0.4124E-04
10	38.60	0.0000	26.059	-0.8937E-04

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

FREQUENCY	14.685	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
FREQUENCY	15.242	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
MODE=	4	FREQUENCY=	25.604	COUPLING COEF.= 1.000
FREQUENCY	38.460	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	2
FREQUENCY	38.596	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	2

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

\*\*\* NOTE \*\*\* CP = 16261.734 TIME= 05:05:40  
 Solution is done!  
 ANSYS RELEASE 10.0 UP20050718 05:05:31 02/22/2008  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 16

NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 19

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 4. Begin solution ...

\*\*\*\*\* ANSYS SOLVE COMMAND \*\*\*\*\*

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 4  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 1.0000 0.0000 0.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
 ITEM FREQUENCY COMPONENT  
 ALL NONE  
 NSOL ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:42 FEB 22, 2008 CP= 16263.328

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
EFFECTIVE MASS					
1	14.69	1.6677	0.8944	0.1752E-03	0.008610
0.799981					
2	15.24	1.6677	111.9	0.2035E-01	1.000000
12523.9					
3	17.15	1.6184	-7.251	-0.1011E-02	0.049664
52.5824					
4	25.60	6.2784	-0.1244	-0.3019E-04	0.001484
0.154843E-01					
5	31.45	5.3934	-5.647	-0.7801E-03	0.038340
31.8882					
6	37.39	4.8069	-0.3330	-0.2901E-04	0.001426
0.110908					
7	38.46	4.8069	0.2048	0.1686E-04	0.000829
0.419536E-01					
8	38.54	4.8069	0.8343	0.6839E-04	0.003361
0.696090					
9	38.59	4.8069	0.1449E-01	0.1184E-05	0.000058
0.209831E-03					
10	38.60	4.8069	0.5177E-01	0.4232E-05	0.000208
0.268034E-02					
				SUM OF EFFECTIVE MASSES=	
12610.0					

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:42 FEB 22, 2008 CP= 16263.328

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE FREQUENCY DAMPING SV MODE COEF.

1	14.69	0.0000	1.6677	0.1752E-03
2	15.24	0.0000	1.6677	0.2035E-01
3	17.15	0.0000	1.6184	-0.1011E-02
4	25.60	0.0000	6.2784	-0.3019E-04
5	31.45	0.0000	5.3934	-0.7801E-03
6	37.39	0.0000	4.8069	-0.2901E-04
8	38.54	0.0000	4.8069	0.6839E-04

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

FREQUENCY	14.685	HERTZ	PART OF	CLOSELY SPACED GROUP	1
FREQUENCY	15.242	HERTZ	PART OF	CLOSELY SPACED GROUP	1
MODE=	3	FREQUENCY=	17.151	COUPLING COEF.=	1.000
MODE=	4	FREQUENCY=	25.604	COUPLING COEF.=	1.000
MODE=	5	FREQUENCY=	31.446	COUPLING COEF.=	1.000
FREQUENCY	37.386	HERTZ	PART OF	CLOSELY SPACED GROUP	2
FREQUENCY	38.541	HERTZ	PART OF	CLOSELY SPACED GROUP	2

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

\*\*\* NOTE \*\*\* CP = 16263.328 TIME= 05:05:42  
 Solution is done!  
 ANSYS RELEASE 10.0 UP20050718 05:05:31 02/22/2008  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 16  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 19

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 5. Begin solution ...

\*\*\*\*\* ANSYS SOLVE COMMAND \*\*\*\*\*

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 5  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 0.0000 1.0000 0.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
 ITEM FREQUENCY COMPONENT  
 ALL NONE  
 NSOL ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:43 FEB 22, 2008 CP= 16264.922

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE	MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
EFFECTIVE MASS						
	1	14.69	1.6677	0.1989E-01	0.3897E-05	0.000239
0.395716E-03	2	15.24	1.6677	7.206	0.1310E-02	0.080412
51.9310	3	17.15	1.6184	116.9	0.1629E-01	1.000000
13671.1	4	25.60	6.2784	-0.1434E-01	-0.3478E-05	0.000213
0.205548E-03	5	31.45	5.3934	0.8096	0.1118E-03	0.006864
0.655419						







NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 15

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 7. Begin solution ...

\*\*\*\*\* ANSYS SOLVE COMMAND \*\*\*\*\*

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 7  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 1.0000 0.0000 0.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
   ITEM       FREQUENCY    COMPONENT  
   ALL        NONE  
   NSOL       ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621            VERSION=INTEL NT            05:05:47 FEB 22, 2008 CP= 16268.094

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
EFFECTIVE MASS					
1	14.69	5.7879	0.8944	0.6081E-03	0.008610
0.799981					
2	15.24	5.7879	111.9	0.7062E-01	1.000000
12523.9					
3	17.15	4.1817	-7.251	-0.2611E-02	0.036975
52.5824					
4	25.60	2.2333	-0.1244	-0.1074E-04	0.000152
0.154843E-01					
5	31.45	2.1326	-5.647	-0.3085E-03	0.004368
31.8882					
6	37.39	2.0949	-0.3330	-0.1264E-04	0.000179
0.110908					
7	38.46	2.0888	0.2048	0.7327E-05	0.000104
0.419536E-01					
8	38.54	2.0884	0.8343	0.2971E-04	0.000421
0.696090					
9	38.59	2.0881	0.1449E-01	0.5145E-06	0.000007
0.209831E-03					
10	38.60	2.0881	0.5177E-01	0.1838E-05	0.000026
0.268034E-02					
				SUM OF EFFECTIVE MASSES=	
12610.0					

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621            VERSION=INTEL NT            05:05:47 FEB 22, 2008 CP= 16268.094

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE	FREQUENCY	DAMPING	SV	MODE COEF.
------	-----------	---------	----	------------

1	14.69	0.0000	5.7879	0.6081E-03
2	15.24	0.0000	5.7879	0.7062E-01
3	17.15	0.0000	4.1817	-0.2611E-02
5	31.45	0.0000	2.1326	-0.3085E-03

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

FREQUENCY	14.685	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
FREQUENCY	15.242	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
MODE=	3	FREQUENCY=	17.151	COUPLING COEF.= 1.000
MODE=	5	FREQUENCY=	31.446	COUPLING COEF.= 1.000

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

\*\*\* NOTE \*\*\* CP = 16268.094 TIME= 05:05:47  
 Solution is done!  
 ANSYS RELEASE 10.0 UP20050718 05:05:32 02/22/2008  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12  
 NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 15

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 8. Begin solution ...

\*\*\*\*\* ANSYS SOLVE COMMAND \*\*\*\*\*

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER. . . . . 8  
 SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION  
 EXCITATION DIRECTION. . . . . 0.0000 1.0000 0.0000  
 MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP  
 RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT  
 SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02  
 PRINT OUTPUT CONTROLS  
 ITEM FREQUENCY COMPONENT  
 ALL NONE  
 NSOL ALL  
 DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

1

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:48 FEB 22, 2008 CP= 16269.672

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE	MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
EFFECTIVE MASS						
	1	14.69	5.7879	0.1989E-01	0.1352E-04	0.000321
0.395716E-03						
	2	15.24	5.7879	7.206	0.4547E-02	0.108008
51.9310						
	3	17.15	4.1817	116.9	0.4210E-01	1.000000
13671.1						
	4	25.60	2.2333	-0.1434E-01	-0.1237E-05	0.000029
0.205548E-03						
	5	31.45	2.1326	0.8096	0.4422E-04	0.001050
0.655419						
	6	37.39	2.0949	-62.23	-0.2362E-02	0.056110
3872.07						
	7	38.46	2.0888	0.2634E-02	0.9421E-07	0.000002
0.693698E-05						
	8	38.54	2.0884	-0.1280	-0.4560E-05	0.000108
0.163946E-01						

```

      9      38.59      2.0881      0.9288      0.3299E-04      0.000784
0.862671
      10     38.60      2.0881      0.9379E-02      0.3330E-06      0.000008
0.879595E-04
                                                    SUM OF EFFECTIVE MASSES=
17596.6
1

```

```

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM  RELEASE 10.0      *****
ANSYS Professional
00265621      VERSION=INTEL NT      05:05:48  FEB 22, 2008 CP= 16269.672

```

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE	FREQUENCY	DAMPING	SV	MODE COEF.
2	15.24	0.0000	5.7879	0.4547E-02
3	17.15	0.0000	4.1817	0.4210E-01
5	31.45	0.0000	2.1326	0.4422E-04
6	37.39	0.0000	2.0949	-0.2362E-02

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

MODE=	2	FREQUENCY=	15.242	COUPLING COEF.=	1.000
MODE=	3	FREQUENCY=	17.151	COUPLING COEF.=	1.000
MODE=	5	FREQUENCY=	31.446	COUPLING COEF.=	1.000
MODE=	6	FREQUENCY=	37.386	COUPLING COEF.=	1.000

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

```

*** NOTE ***                      CP = 16269.672  TIME= 05:05:48
Solution is done!
ANSYS RELEASE 10.0  UP20050718      05:05:32  02/22/2008
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 4
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 8
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 12
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 16
NUMBER OF FREQUENCIES IN TABLE = 17

```

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

Load step file number 9. Begin solution ...

```

***** ANSYS SOLVE  COMMAND *****

```

L O A D S T E P O P T I O N S

```

LOAD STEP NUMBER. . . . . 9
SPECTRUM LOADING TYPE . . . . . ACCELERATION
EXCITATION DIRECTION. . . . . 0.0000 0.0000 1.0000
MODE COMBINATION TYPE . . . . . GRP
RESPONSE TYPE . . . . . DISPLACEMENT
SIGNIFICANCE LEVEL FOR COMBINATIONS. . . . . 0.10000E-02
PRINT OUTPUT CONTROLS
  ITEM      FREQUENCY  COMPONENT
  ALL       NONE
  NSOL      ALL
DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN

```

1

```

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM  RELEASE 10.0      *****
ANSYS Professional
00265621      VERSION=INTEL NT      05:05:50  FEB 22, 2008 CP= 16271.266

```

\*\*\*\*\* RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY \*\*\*\*\*

CUMULATIVE MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO
1	14.69	3.9240	-1.112	-0.5126E-03	1.000000
1.23705					
2	15.24	3.9240	0.9515E-02	0.4071E-05	0.007941
0.905279E-04					
3	17.15	2.9740	0.1233E-03	0.3158E-07	0.000062
0.152077E-07					
4	25.60	1.7181	-0.1950	-0.1295E-04	0.025256
0.380350E-01					
5	31.45	1.7658	-0.3693E-02	-0.1670E-06	0.000326
0.136396E-04					
6	37.39	1.7658	0.9503E-03	0.3041E-07	0.000059
0.903082E-06					
7	38.46	1.7658	0.9271E-01	0.2803E-05	0.005468
0.859450E-02					
8	38.54	1.7658	-0.1593E-01	-0.4796E-06	0.000936
0.253645E-03					
9	38.59	1.7658	-0.1359E-05	-0.4082E-10	0.000000
0.184708E-11					
10	38.60	1.7658	-0.2017	-0.6056E-05	0.011814
0.406810E-01					
				SUM OF EFFECTIVE MASSES=	
1.32472					
1					

\*\*\*\*\* ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 10.0 \*\*\*\*\*  
 ANSYS Professional  
 00265621 VERSION=INTEL NT 05:05:50 FEB 22, 2008 CP= 16271.266

SIGNIFICANCE FACTOR FOR COMBINING MODES = 0.10000E-02

SIGNIFICANT MODE COEFFICIENTS (INCLUDING DAMPING)

MODE	FREQUENCY	DAMPING	SV	MODE COEF.
1	14.69	0.0000	3.9240	-0.5126E-03
2	15.24	0.0000	3.9240	0.4071E-05
4	25.60	0.0000	1.7181	-0.1295E-04
7	38.46	0.0000	1.7658	0.2803E-05
10	38.60	0.0000	1.7658	-0.6056E-05

MODAL COMBINATION COEFFICIENTS

FREQUENCY	14.685	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
FREQUENCY	15.242	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	1
MODE= 4	FREQUENCY=	25.604	COUPLING COEF.=	1.000
FREQUENCY	38.460	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	2
FREQUENCY	38.596	HERTZ	PART OF CLOSELY SPACED GROUP	2

GROUPING COMBINATION INSTRUCTIONS WRITTEN ON FILE SSE-LOCA-SRVD.mcom

\*\*\* NOTE \*\*\* CP = 16271.266 TIME= 05:05:50

Solution is done!