

Universidad de **Cádiz**

Proyectos de fin de carrera de **Ingeniería Química**

Facultad: CIENCIAS

Titulación: INGENIERÍA QUÍMICA

Título: Sistema de un recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono (cfrp) de uso en el sector aeronáutico

Autora: Cristina ALCANTARILLA PARRA

Fecha: Junio 2004





ÍNDICE GENERAL

1.- MEMORIA DESCRIPTIVA

2.- MEMORIA DE CÁLCULO

3.- PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

4.- PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES

5.- PRESUPUESTO

6.- PLANOS

MEMORIA

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

“**Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica**”

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

MEMORIA DESCRIPTIVA

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

“**Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica**”

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

**SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
MEMORIA DESCRIPTIVA**

| | |
|---|----|
| <u>MEMORIA DESCRIPTIVA</u> | 2 |
| 1.-Titulo..... | 2 |
| 2.- Peticionario..... | 3 |
| 3.- Objeto del proyecto..... | 4 |
| 4.- Antecedentes..... | 7 |
| 5.- Justificación..... | 24 |
| 6.- Descripción técnica de los equipos..... | 25 |
| 7.-Materias primas..... | 38 |
| 8.- Mantenimiento del sistema y régimen de operación..... | 40 |
| 9.-Control y seguridad en el sistema.-..... | 47 |
| 10.-Estudio económico..... | 74 |
| 11.-Normativa..... | 79 |
| 12.- Bibliografía.-..... | 80 |

1. TITULO

Cristina Alcantarilla Parra presenta el proyecto “ Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el sector aeronáutico” como proyecto fin de carrera de la titulación de Ingeniería Química en la Facultad de Ciencias (Universidad de Cádiz) siendo los tutores del mismo Daniel Araujo Gay y Antonio J. García Fuentes

2. PETICIONARIO

El documento del Proyecto Fin de Carrera que contiene las especificaciones del mismo se encuentra adjunto en la siguiente página.

3. OBJETO DEL PROYECTO:

El mecanizado de los plásticos reforzados con fibra (FRP) difiere significativamente del mecanizado de metales convencionales. En éste, el comportamiento del material depende de las propiedades de la fibra y la matriz, orientación de las fibras y el volumen relativo entre la fibra y la matriz. La herramienta se encuentra alternativamente matriz y fibra, cuya respuesta al mecanizado varía mucho. Por ejemplo, en un material compuesto epoxy-fibra de vidrio, la herramienta se encuentra a baja temperatura una matriz epoxy blanda y frágiles fibras de vidrio. Es esta variación de los requerimientos del corte lo que hace que el material compuesto sea difícil de mecanizar.

A la vista de un alto desgaste de herramienta y, por lo tanto, un alto coste de la misma, un proceso que no necesita contacto como el mecanizado por láser ofrece una atractiva alternativa. Puede también minimizar polvo y ruido, la deformación extensiva de plástico y consecuentemente, la generación de calor con mecanizado convencional de compuestos FRP.

El objeto de este proyecto es, por lo tanto, diseñar una herramienta de recantado de fibra de carbono, que permita cortar la misma sin necesidad de cambiar la herramienta y sin los gastos que generaría el continuo reemplazamiento de la misma, mediante un generador láser de dióxido de carbono, cuyo rayo se va a dirigir mediante espejos planos, y que va a ser enfocado por lentes apropiadas, que sean transparentes a la longitud de onda de este láser que es 10.59 μm . Este sistema óptico del láser va a constar de 4 lentes (tres lentes convexo-planas y una de menisco positivo) y 5 espejos.

También va a constar de un sistema de refrigeración de nitrógeno líquido para paliar los efectos del calentamiento excesivo en la fibra de carbono, que provoca una zona afectada por el calor (ZAC), que es una zona dañada de la fibra de carbono alrededor de donde se ha realizado el corte desprovista del material de la matriz y que provoca fracturas en la misma.

El fluido refrigerante se encuentra almacenado en un depósito Dewar de unos 1000 l de capacidad. El fluido refrigerante es impulsado al ejercer presión sobre el nivel de líquido a través de nitrógeno gaseoso proveniente de una botella de gas nitrógeno.

El nitrógeno líquido sale impulsado a través de una tubería de teflón resistente a las bajas temperaturas y flexible para acceder a todos los puntos de la fibra de carbono.

El sistema criogénico incluye en el entorno del proceso un sistema de aspiración del polvo de carbono procedente del perforado. El polvo de carbono queda acumulado en sedimentadores, en este caso dos ciclones, que descargan el polvo por gravedad.

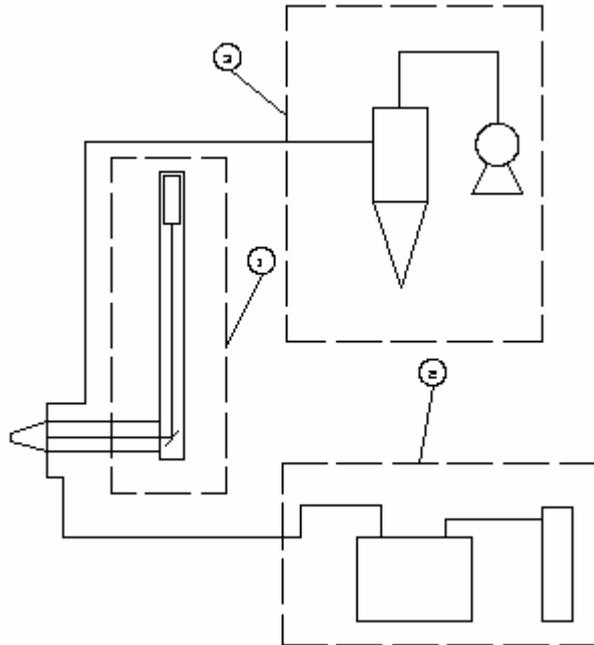
También tiene lugar la succión de los gases de combustión provenientes de la sublimación de la fibra de carbono y del nitrógeno que se ha vaporizado utilizado en la refrigeración.

Los gases de combustión quedan absorbidos en una campana de gas, mientras que el nitrógeno gaseoso es descargado a la atmósfera.

En definitiva el proyecto se centra en:

1. Un sistema óptico, que permita transformar y dirigir el haz láser proveniente del generador, de manera que se focalice en el plano medio de la pieza de la fibra de carbono y se consiga un spot de 300 μ en la superficie de la misma, consiguiéndose así un corte de la calidad deseada
2. La instalación de un equipo criogénico para controlar, por debajo de los valores de rugosidad estipulados en las normas, la ZAC generada durante el corte láser.
3. Un sistema de aspiración para que el sistema cumpla con los requisitos de seguridad e higiene.

Diagrama de flujo del sistema:



Esquemáticamente, este es el diagrama del sistema.

El sistema óptico está constituido por el generador láser, las lentes y espejos que modifican el tamaño del haz y su dirección, el cabezal láser y la boquilla.

El sistema de refrigeración está constituido por un dewar que contiene el fluido refrigerante, que no es otro que nitrógeno líquido, que es impulsado por nitrógeno gaseoso que proviene de unas botellas de N₂.

El nitrógeno líquido circula por una conducción de teflón recubierta por un aislante hasta que llega a la boquilla, ya que este fluido va a enfriar la pieza de carbono para que el corte tenga la calidad deseada.

El sistema de absorción consta de una bomba de vacío (por seguridad se pondrán dos) que absorbe el polvo desde la boquilla que va a separarse de la corriente de gas gracias a un ciclón (por seguridad se pondrán dos también).

La gestión del polvo generado corre a cargo de otra empresa destinada a este fin.

4. ANTECEDENTES

4.1 ¿QUÉ ES UN LÁSER?

Desde que a principios de del siglo XX se postuló que la transición entre estados de energía al excitar un átomo puede emitir un fotón, hasta nuestros días, ha variado en gran medida el uso que se ha dado a la energía láser. El haz de luz coherente obtenido a la salida de un resonador óptico por excitación del medio activo en un haz láser (acrónimo de "*Light Amplification by the Stimulated Emisión of Radiation*", que debidamente tratado se convertirá en una fuente de energía de alto aprovechamiento. Las características propias de la energía láser posibilitan su utilización de una manera muy directa en aplicaciones industriales actuales de procesamiento de materiales en general y de corte de fibra de carbono en particular.

4.2 PROPIEDADES DE UN LÁSER.

La radiación láser está caracterizada por ciertas propiedades que no están presentes en otro tipo de radiación.

Monocromaticidad: Es decir, 1 color en sentido teórico, que recibe el nombre de línea espectral, significa que la radiación láser emite una longitud de onda λ_0 . En realidad, cada línea espectral tiene una anchura espectral finita ($\Delta\lambda$) en torno a su longitud de onda central (λ_0).

Direccionalidad: Esta propiedad representa una importante diferencia con respecto a las fuentes de luz convencionales, que emiten en todas las direcciones del espacio, por lo que su intensidad luminosa (energía por unidad de tiempo y unidad de superficie) disminuye según la ley de la inversa del cuadrado de la distancia. Por el contrario, en el caso del láser, al ir concentrada toda la energía luminosa en una sola dirección, la intensidad apenas varía con la distancia a la fuente.

Coherencia: Ondas coherentes son aquellas que mantienen la fase relativa entre ellas. La radiación láser está compuesta por ondas de la misma longitud de onda, que empiezan al mismo tiempo y mantienen la fase relativa mientras avanzan.

4.3 ¿CÓMO FUNCIONA UN SISTEMA LÁSER?

El láser puede describirse como compuesto de cuatro unidades estructurales:

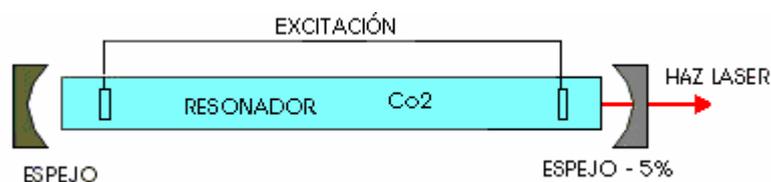
a) **Medio activo:** Puede ser sólido, líquido o gas. Es un conjunto de átomos o moléculas que pueden excitarse de manera que se crea una situación de inversión de población y puede obtenerse radiación electromagnética mediante emisión estimulada.

b) **Mecanismo de excitación:** Fuente de energía que conduce a los átomos del medio activo a su estado excitado, provocando una inversión de población.

Existen varios mecanismos de excitación:

- **Bombeo óptico- Excitación por fotones.**
- **Excitación eléctrica de un gas.**
- **Colisiones con átomos:** Este es el mecanismo estándar de excitación de los láseres de gas comerciales, como el de CO₂.

c) **Mecanismo de retroalimentación:** Devuelve parte de la radiación coherente del láser que se crea dentro del medio activo. Normalmente la retroalimentación se consigue colocando espejos en ambos extremos del medio activo. Estos espejos están alineados de forma que la radiación se mueve yendo y viniendo entre ellos. De esta forma se crea una cavidad óptica. La parte de la radiación que no es reflejada dentro de la cavidad óptica se transmite fuera, constituyendo la salida del láser.



d) Acoplador de salida: Es la forma de transmitir la radiación electromagnética fuera del láser.

4.4 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN LÁSER

La energía de la radiación se describe con diferentes términos para la radiación pulsada y continúa.

Para un láser continuo -es una buena medida la potencia del láser (P):

$$P = \frac{E}{\Delta t}$$

La energía no es suficiente para describir a este láser, debido a que puede transmitirse la misma cantidad de energía en un tiempo corto con un láser de alta potencia, o con un láser de baja potencia en un tiempo largo. Para un láser pulsado - son importantes los parámetros detallados de los pulsos, y la potencia media no es suficiente para describir a este láser.

Los parámetros comunes son:

Energía por pulso (E_p).

Duración del pulso (Delta t), que se denomina anchura de pulso.

Numero de pulsos por segundo (PPS), que se denomina frecuencia de pulsos.

La medida de los pulsos de radiación electromagnética se realiza mediante su absorción en la materia (detector), y midiendo los cambios producidos en los parámetros físicos del detector.

4.4.1 Potencia del Láser

En muchas aplicaciones, la potencia del láser es el parámetro más importante, ya que determina la cantidad de energía emitida como radiación en la unidad de tiempo. Para algunas aplicaciones, se requiere que la potencia del láser se mantenga estable, de modo

que la estabilidad de la potencia es un parámetro importante en esos casos. La salida del láser está determinada por el tipo de láser:

Para un tipo específico de láser no es posible conseguir todos los niveles de potencia. Para cada tipo de láser hay un específico rango de potencia limitado.

Para el láser de CO₂ es posible conseguir decenas de Kilowatios de forma continua.

4.4.2 Rendimiento del Láser

Una de las propiedades más importantes de un láser es su máxima potencia, que es la máxima cantidad de radiación electromagnética emitida por unidad de tiempo. Para conseguir potencia de salida, se necesita suministrar energía. La relación entre la energía obtenida y la suministrada, es lo que define el rendimiento. Es habitual expresar el rendimiento en porcentaje.

$$\text{Rendimiento Láser} = (\text{Potencia de Salida}) / (\text{Potencia de Entrada})$$

La mayoría de los láseres tienen un rendimiento muy bajo, incluso menor de unidades de porcentaje.

4.4.3 Rendimiento Total del Láser

El rendimiento total depende de varios factores, los cuáles se consideraron para los láseres de gas. La energía eléctrica suministrada a la fuente, puede transformarse en parte, como corriente eléctrica en el gas. Parte de la energía cinética de los electrones acelerados en el tubo de gas, se transfiere por colisión a las moléculas de gas. Parte de la energía transferida a las moléculas de gas se invierte en excitarlas, y producir una inversión de población. En el proceso de emisión estimulada, parte de la energía se invierte en producir radiación láser.

El rendimiento total del láser es el producto de los rendimientos de todos los procesos mencionados:

Rendimiento total del láser = (rendimiento eléctrico de la fuente)*(rendimiento de la transferencia de energía a las moléculas del gas)*(rendimiento de excitación)*(parte de la energía empleada en las transiciones láser)*(parte de la energía en emisión estimulada)*(parte de la energía emitida por el acoplador de salida)

Sustituyendo los valores numéricos en cada caso, se deduce por qué el rendimiento del láser es bajo.

En algunos láseres el rendimiento es muy bajo (incluso sólo del 0.01 % !).

Resumen de los rendimientos de algunos de los láseres comerciales más comunes:

| Tipo de Láser | Longitud de onda [μm] | Rendimiento Típico [%] |
|-----------------|------------------------------------|------------------------|
| CO ₂ | 10.6 | 15 |
| He-Ne | 0.6328 | 0.1 |
| He-Cd | 0.442, 0.325 | 0.01-0.02 |
| Nd-YAG | 1.06 | 0.1-2.0 |
| FEL | Amplio rango | 30 |
| Láser de Diodo | 0.7-1.5 | 20 |

En nuestro caso, el láser de CO₂, el rendimiento típico es un 15%

4.4.5 Distribución espacial de la radiación emitida por el acoplador de salida: Modos láser

Cada modo del haz láser tiene una distribución de energía en tres dimensiones. Es conveniente diferenciar entre:

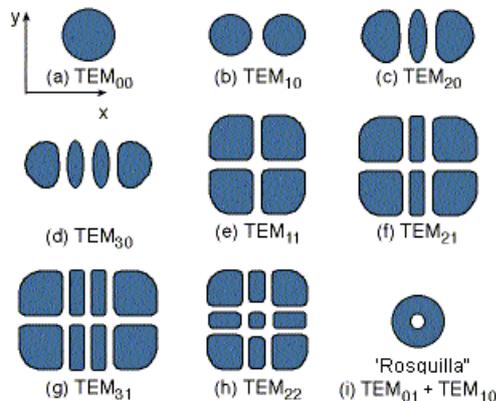
1. **Modos longitudinales:** Son ondas estacionarias a lo largo del eje óptico del láser. La importancia de los modos longitudinales está determinada por las aplicaciones específicas del láser. En las aplicaciones de más alta potencia, como para el procesamiento de materiales, el láser se utiliza para transferir la energía a un blanco, por lo tanto, en este caso, no son importantes los modos longitudinales del láser.
2. **Modos transversales:** Es la distribución transversal de la intensidad en la sección perpendicular al haz, perpendicular al eje óptico del láser. En la sección perpendicular, la radiación láser tiene una distribución específica en regiones con alta intensidad y regiones con ninguna radiación.

La sección perpendicular de la radiación láser está descrita por los:

TEM_{mn} = Modos Electromagnéticos Transversales

m = El número de nodos de la distribución de la radiación en el eje x .

n = El número de nodos de la distribución de la radiación en el eje y . En la figura se muestran algunos de los primeros modos transversales de la radiación.



Modos Electromagnéticos Transversales.

Las áreas oscuras marcan zonas donde se observa radiación electromagnética en el plano, y las áreas en blanco delimitan zonas en las que no hay radiación electromagnética.

Caso particular importante:

El modo más importante es el modo básico transversal TEM_{00} . Cuando la radiación láser se emite en un modo transversal único, normalmente se trata del modo básico transversal TEM_{00} . En el modo único básico transversal, la forma de la radiación en un plano perpendicular, es un círculo en el cuál la intensidad en el centro es mayor que en los bordes. En la figura se muestra la distribución de intensidad en el modo láser básico transversal, a lo largo de la sección transversal del haz.

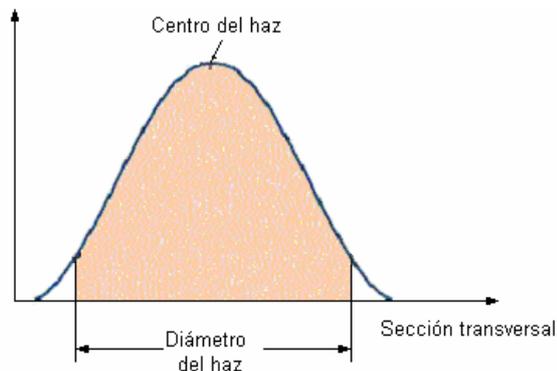


Figura: Haz Láser Gaussiano.

La distribución de intensidad del modo básico transversal tiene la forma de una curva Gaussiana y es el único modo en el cual toda la radiación está en fase a lo largo de la sección perpendicular al haz. Por ello, el modo básico transversal es llamado "Modo Gaussiano".

Propiedades del haz Gaussiano:

- ⇒ Tiene el menor ángulo de divergencia de todos los modos transversales.
- ⇒ Puede enfocarse con la proyección más pequeña que la de todos los demás modos.
- ⇒ Tiene la máxima coherencia espacial comparada con los otros modos.

⇒ La distribución espacial de un haz gaussiano permanece gaussiano mientras el haz se propaga a través del espacio.

⇒ La imagen de un haz Gaussiano que pasa a través de una lente u otro elemento óptico produce otro haz Gaussiano.

Aplicaciones que requieren el Modo Básico Transversal de la Radiación Láser

- Aplicaciones basadas en patrones de interferencia de la radiación láser. Esto es debido a que se requiere un alto grado de coherencia espacial: Holografía, Medidas de interferencia.
- Aplicaciones que requieren la transmisión de la radiación a largas distancias. En estos casos se necesita una divergencia muy baja. Posicionadores, instrumentos de detección remota - para medidas espectroscópicas, desplazamiento Doppler, etc.
- Aplicaciones que requieren el enfoque del haz a un punto muy pequeño. Por ejemplo, para el corte de materiales o para taladrar agujeros con precisión. En las páginas siguientes, se explica que el haz Gaussiano se puede enfocar en una región muy pequeña.

4.5 TIPOS DE LÁSER.

Los láseres pueden dividirse en varios grupos, de acuerdo con distintos criterios.

1. El estado de la materia del medio activo: Sólido, líquido, gas o plasma.
2. El rango espectral de la longitud de onda del láser: Espectro visible, espectro Infrarrojo...
3. El método de excitación (bombeo) del medio activo: bombeo óptico, bombeo eléctrico...
4. Las características de la radiación emitida por el láser.
5. El número de niveles de energía que participan en el proceso láser.

Según estos criterios, el láser de CO₂ es un láser de gas, que emite en el espectro IR (1=9-11 μm), por excitación eléctrica, que puede emitir de forma continua o pulsada y que tiene 4 niveles de energía.

Además, entre las propiedades del láser de CO₂ están:

⇒ Elevada potencia de salida. Los láseres comerciales de CO₂ producen más de 10000 W en continuo.

⇒ Rendimiento muy alto, más del 30%.

⇒ Es muy fácil de manejar, y los gases no son tóxicos.

4.6- APLICACIONES

Los posibles usos del láser son casi ilimitados. El láser se ha convertido en una herramienta valiosa en la industria, la investigación científica, la tecnología militar o el arte.

1. INDUSTRIA

Es posible enfocar sobre un punto pequeño un haz de láser potente, con lo que se logra una enorme densidad de energía. Los haces enfocados pueden calentar, fundir o vaporizar materiales de forma precisa.

Por ejemplo, los láseres se usan para taladrar diamantes, modelar máquinas herramientas, recortar componentes microelectrónicos, calentar chips semiconductores, cortar patrones de moda, sintetizar nuevos materiales o intentar inducir la fusión nuclear controlada. El potente y breve pulso producido por un láser también hace posibles fotografías de alta velocidad con un tiempo de exposición de algunas billonésimas de segundo. En la construcción de carreteras y edificios se utilizan láseres para alinear las estructuras.

2. INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Los láseres se emplean para detectar los movimientos de la corteza terrestre y para efectuar medidas geodésicas. También son los detectores más eficaces de ciertos tipos de contaminación atmosférica. Los láseres se han empleado igualmente para determinar con precisión la distancia entre la Tierra y la Luna y en experimentos de relatividad. Actualmente se desarrollan conmutadores muy rápidos activados por láser para su uso en aceleradores de partículas, y se han diseñado técnicas que emplean haces de láser para atrapar un número reducido de átomos en un vacío con el fin de estudiar sus espectros con una precisión muy elevada. Como la luz del láser es muy direccional y monocromática, resulta fácil detectar cantidades muy pequeñas de luz dispersa o modificaciones en la frecuencia provocadas por materia. Midiendo estos cambios, los científicos han conseguido estudiar las estructuras moleculares.

Los láseres han hecho que se pueda determinar la velocidad de la luz con una precisión sin precedentes; también permiten inducir reacciones químicas de forma selectiva y detectar la existencia de trazas de sustancias en una muestra.

3. COMUNICACIONES

La luz de un láser puede viajar largas distancias por el espacio exterior con una pequeña reducción de la intensidad de la señal. Debido a su alta frecuencia, la luz láser puede transportar, por ejemplo, 1.000 veces más canales de televisión de lo que transportan las microondas.

Por ello, los láseres resultan ideales para las comunicaciones espaciales. Se han desarrollado fibras ópticas de baja pérdida que transmiten luz láser para la comunicación terrestre, en sistemas telefónicos y redes de computadoras.

También se han empleado técnicas láser para registrar información con una densidad muy alta. Por ejemplo, la luz láser simplifica el registro de un holograma, a partir del cual puede reconstruirse una imagen tridimensional mediante un rayo láser.

4. MEDICINA

Con haces intensos y estrechos de luz láser es posible cortar y cauterizar ciertos tejidos en una fracción de segundo sin dañar al tejido sano circundante.

El láser se ha empleado para 'soldar' la retina, perforar el cráneo, reparar lesiones y cauterizar vasos sanguíneos. También se han desarrollado técnicas láser para realizar pruebas de laboratorio en muestras biológicas pequeñas.

5. TECNOLOGÍA MILITAR

Los sistemas de guiado por láser para misiles, aviones y satélites son muy comunes. La capacidad de los láseres de colorante sintonizables para excitar de forma selectiva un átomo o molécula puede llevar a métodos más eficientes para la separación de isótopos en la fabricación de armas nucleares.

4.7 EL CORTE POR LÁSER

El láser es adecuado para el corte debido a ciertas características en comparación con la luz ordinaria. La luz ordinaria se propaga en todas las direcciones, llenando e iluminando un área completa y disminuyendo la intensidad de la energía a medida que aumenta la distancia al foco emisor.

Por su parte, el láser proporciona una longitud de onda definida con una intensidad excepcional, así como la posibilidad de enfoque en un determinado punto, incluso a distancias elevadas manteniendo sus características prácticamente intactas.

El uso del láser para el corte puede ser entendido del mismo modo en el que la luz del sol es concentrada mediante una lente.

Mientras que la luz del sol puede provocar la aparición de algunos agujeros en el papel, el láser proporciona una fuente de energía con un elevado potencial en el procesado de materiales.

El láser puede ser usado para el corte exponiendo al material a la intensa energía térmica desarrollada por su haz. Si el calor que llega el material es mayor que lo que el material es

capaz de reflejar, dispersar o acumular se provocará un aumento de la temperatura del material en ese punto. Si el aumento de temperatura es lo suficientemente elevado, ésta energía podrá iniciar un agujero por evaporación o fusión del material.

La gran ventaja que presenta el corte por láser es que prácticamente todos los materiales pueden ser procesados. Puede tratarse de materiales dúctiles, frágiles, conductores y no conductores eléctricos, duros, blandos... Únicamente los materiales reflectivos pueden presentar problemas pero con un adecuado control del haz se pueden cortar satisfactoriamente.

4.7.1 Las grandes ventajas del corte por láser:

Son las siguientes:

- Es uno de los métodos de corte más rápidos
- Se trata de un proceso de corte sin contacto, por lo que no se hace necesaria ninguna herramienta.
- Puede cortar prácticamente todos los materiales conocidos.
- Puede ser fácilmente automatizado.

4.7.2 El proceso de corte por láser:

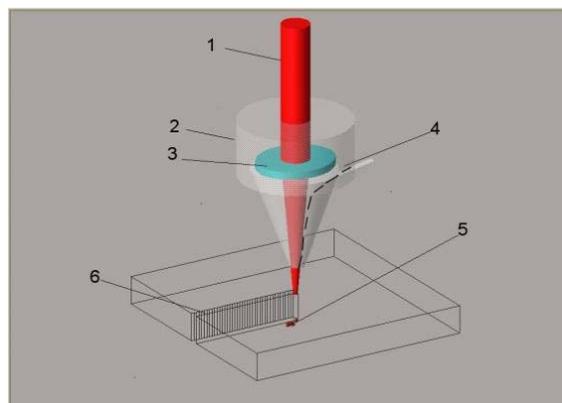
El proceso consiste en la focalización del haz láser en un punto del material que se desea tratar, para que éste funda y evapore lográndose así el corte.

El haz láser, con una determinada potencia procedente del generador y de un sistema de conducción (1), llegará al cabezal (2). Dentro de éste un grupo óptico (3) se encarga de focalizar el haz con un diámetro determinado, sobre un punto de interés del material a tratar.

El posicionamiento del punto focal del rayo respecto de la superficie que se desea cortar es un parámetro crítico.

El proceso requiere de un gas de asistencia (4), que se aplica mediante la propia boquilla del cabezal, coaxial al propio rayo láser.

Este gas puede ser inerte para evitar oxidaciones o activo para catalizar el proceso. A su vez, favorece la eliminación de material fundido, vapor y plasma de la zona de corte (5). Es típica la aparición de ciertas estrías o rugosidades en las superficies cortadas (6). La conjunción de todos estos factores, junto con otros como la velocidad de relativa entre el cabezal y la pieza, producen una densidad de energía (con valores característicos en orden de magnitud de MW/cm²), que origina el corte para cada tipo de material.



4.8-TIPOS DE LÁSER PARA EL CORTE

Los láseres para corte más utilizados son:

4.8.1- Láser de CO2

a) Osciladores láser de CO2 para corte fino.

El oscilador láser de CO2 que se use para el corte fino debe presentar las siguientes funciones:

a.1.)- Salida en forma de onda rectangular: Una salida rectangular es adecuada para el corte, ya que su elevada potencia la hace adecuada para un corte de buenas características.

a.2.)- Potencia de salida estable: Un control preciso de la potencia de salida es importante para la realización de un corte de elevada calidad del material. A menor fluctuación en la potencia de salida, se consigue un espesor de corte más uniforme y un mejor acabado superficial en la zona del corte.

a.3.)- Modo de haz estable y modo de selección del haz: La consistencia del tipo de haz es importante en la calidad del corte, porque el cambio en el tipo de haz provoca un cambio en el enfoque y por lo tanto, una disminución de la calidad.

b) Tipo de láser de CO2: El Láser de flujo cruzado en 3 ejes SD (silent discharge)

Este tipo de láser es uno de los ejemplos que satisface las funciones básicas para el corte fino. Presenta un rango de potencia de salida de 0.8 KW a 10 KW y un rango de repetición de 10 Hz a 3 Hz. Asimismo, es adecuado para obtener una elevada razón de pico de pulso.

El láser de flujo cruzado en 3 ejes SD está equipado con un sensor de alta velocidad que permite mantener la fluctuación de potencia de salida por debajo del 1 %. Este sensor de potencia monitoriza la potencia de salida para asegurar que en todo momento la fluctuación se mantiene dentro del 1%.

4.8.2 Láser -Nd-YAG

El láser Nd-YAG emite un haz a una longitud de onda de 1.06 μm que es 1/10 la del láser de CO₂, y su enfoque se hace en un círculo de 0.01 mm de diámetro en el caso de un haz de difracción limitada (sólo el láser de potencia menor a 10 W se produce esta difracción limitada).

Tipos de láser Nd-Yag:

a.- Láser convencional Nd-YAG: Un láser de Nd-YAG de baja potencia (de unas cuantas decenas de vatios) se usa principalmente para la reparación de semiconductores. Los de potencia superior a 100 W se usan para el corte y la soldadura en procesos industriales.

b.- Láser Nd-YAG de enfoque preciso: Para el enfoque preciso del haz se usan técnicas para limitar la difracción del haz. Técnicas que son efectivas para éste propósito son:

- Excitación uniforme del cristal de YAG por radiación uniforme con la luz de la lámpara.
- Disipación del calor uniforme mediante enfriamiento uniforme.

4.9- GASES LICUADOS A BAJA TEMPERATURA MÁS FRECUENTEMENTE UTILIZADOS

Hay once gases básicos que pueden licuarse a temperaturas inferiores a -100°C, de los cuales los más comunes son el argón, helio, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, y cuyas características físicas quedan recogidas en la Tabla 1.

Asimismo, hay también que citar al CO₂ cuya temperatura de ebullición a presión atmosférica es de 78 °C.

| CARACTERÍSTICAS FÍSICAS | He | H | N | Ar | O |
|--|-------|-------|-------|------|-------|
| TEMPERATURA DE EBULLICIÓN A 1 ATM. EN °C | -259 | -253 | -196 | -186 | -183 |
| DENSIDAD DEL LÍQUIDO A 1 ATM. EN Kg/L | 0'125 | 0'071 | 0'808 | 1'40 | 1'142 |
| DENSIDAD DEL GAS A 15°C Y 1 ATM. EN kg/m ³ | 0'167 | 0'084 | 1'17 | 1'67 | 1'34 |
| DENSIDAD RELATIVA CON RESPECTO AL AIRE A 15°C Y 1 ATM | 0'136 | 0'068 | 0'95 | 1'36 | 1'09 |
| VOLUMEN DEL GAS OBTENIDO DE 1 LITRO DE LÍQUIDO Y 1 ATM | 749 | 842 | 691 | 836 | 854 |

Tabla 4.1: Características físicas de los principales gases utilizados en forma licuada a baja temperatura.

De dichos gases, además del citado CO₂ se dispone en abundancia de helio, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno: El primero se obtiene por licuación y fraccionamiento de gases naturales que lo contienen, el hidrógeno de procesos químicos y electroquímicos, el oxígeno y nitrógeno por licuación y fraccionamiento del aire, y el CO₂ a partir de gases residuales en distintos procesos y de combustión.

La elección de uno u otro viene condicionado por la técnica a utilizar, la temperatura requerida y el comportamiento físico-químico del gas, debiéndose tener en cuenta que el oxígeno es un gas oxidante que favorece la combustión y el hidrógeno es altamente combustible.

Asimismo hay que indicar que el nitrógeno es de fácil manejo, limpieza, gran rapidez de enfriamiento, versatilidad funcional y moderado coste de producción a gran escala, características estas que hacen de dicho gas el que sea el más utilizado como fuente de frío, jugando el papel de acumulador de frigorías.

4.9.1 Aplicaciones de gases licuados a baja temperatura

La utilización de gases licuados a baja temperatura fue objeto de experimentación en los años 30, al utilizarse el nitrógeno licuado en la congelación de alimentos, si bien hubo de desecharse por las cantidades limitadas de gas de que se disponía.

Desde aquellos experimentos, los avances en las técnicas y el número y la cantidad de gas de que se dispone actualmente, han hecho que se apliquen en muy diversos campos y actividades, pudiéndose citar como ejemplo los siguientes:

- Refrigeración y congelación de alimentos o de productos químicos termosensibles.
- Molturación de productos blandos, tales como alimentos, resinas, pigmentos, caucho, etc.
- Termorregulación de reacciones químicas en la industria química y farmacéutica.
- Recuperación de disolventes.
- Transporte frigorífico de productos perecederos.
- Desbarbado de piezas de caucho y trefilado y mecanizado de mangueras del mismo material.
- Limpieza criogénica de superficies.
- Refrigeración de matrices.
- Zunchado por contracción de piezas metálicas.
- Congelación de terrenos acuíferos en obras públicas.
- Congelación y conservación de productos biológicos.
- Combustible de cohetes, citándose como ejemplo el Ariane y sus depósitos de oxígeno e hidrógeno líquido.

5. JUSTIFICACIÓN

La operación de recantado de la fibra de carbono se lleva a cabo en la industria aeronáutica haciendo uso de pistolas neumáticas con brocas especialmente diseñadas para esta operación. Se realizan de modo conjunto las operaciones de perforado-escariado-avellanado.

Estas brocas permiten realizar la operación en un tiempo rentable para las industrias y con una muy alta precisión. Sin embargo plantean una serie de inconvenientes como es el alto coste de estas pistolas, su elevado desgaste así como dificultad de perforar estructuras sándwich de fibra de carbono/materiales metálicos (titanio y aluminio)

Mediante el recantado láser se pretende combinar las operaciones de perforado-escariado-avellanado, en una sola operación y con un solo útil. Los procesos de taladrado se realizarán, por perforación mediante láser y los procesos de escariado + avellanado con refrigeración por aire líquido, se sustituyen por un criomecanizado.

La implantación de este sistema de recantado por láser y criomecanizado permitiría una reducción de gasto de material fungible necesario durante la operación perforado-escariado-avellanado; así como el diseño de un sistema versátil y flexible que permita perforar diferentes tipos de materiales con el mismo útil; y finalmente la reducción de los tiempos necesarios para llevar a cabo la operación.

6. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS EQUIPOS

6.1-LENTE PARA EL SISTEMA ÓPTICO:

Este sistema tiene en total 4 lentes. Todas ellas son del mismo material: seleniuro de zinc. Las lentes de seleniuro de zinc son ideales para los láseres de CO₂ (10.59 μm), ya que tienen un coeficiente muy bajo de absorción (de 5*10⁻⁴ cm⁻¹ a esta longitud de onda). Transmiten desde 0.55 hasta 16 μm

Especificaciones:

Tolerancia de tamaño: + 0mm; - 0.25 mm

Tolerancia del grosor del centro/ extremos: ± 0.25 mm

Tolerancia de la distancia focal: ± 1%

Material: Estas lentes están hechas de un Vapor Químico Depositado (CVD) de Seleniuro de zinc en un material policristalino con una gran uniformidad y una baja absorbancia.

Índice de refracción a 10.59 μm: 2.403

Dureza (Knoop): 120 Kg/mm²

Módulo de Young: 6.7*10¹⁰ N/m²

El sistema óptico del láser cuenta a su vez con dos subsistemas: El de control de divergencia y el de enfoque.

Las lentes del subsistema de control de divergencia están separadas a una distancia de 75.8mm (Memoria de cálculo, Cap 3, 2.4, Métodos para el control de divergencia).

Estas lentes están en unos soportes que están fijos en un rail, por el que se desplazará un carrito con el primero de los espejos (Ver memoria de cálculo, Cap 2, Componentes del sistema óptico, 4.2: Los espejos en el sistema láser)

Las lentes del subsistema de enfoque se encuentran en el cabezal láser y están separadas entre sí 35.36mm (Ver memoria de cálculo, Capítulo 4, Cálculo del sistema de enfoque del haz láser).

Subsistema de control de divergencia:

Consta de dos lentes, una de menisco positivo y otra convexo-plana, ya que tienen la menor tasa de aberración esférica posible (Ver memoria de cálculo, Cap 5, Cálculo de las aberraciones del sistema).

Lente 1: Lente de menisco positivo

Diámetro (mm): 25.4 mm

Distancia focal a 10.6 μm (f): 50.9 mm

Distancia focal efectiva a 10.6 μm : 48.8 mm

F/#: 2

Lente 2: Lente convexo-plana

Diámetro (mm): 38.1 mm

Distancia focal a 10.6 μm (f): 126.7 mm

Distancia focal efectiva a 10.6 μm : 125.5 mm

F/#: 3.3

Subsistema de enfoque:

Consta de una lente de menisco positivo y otra convexo plana, minimizando así las aberraciones existentes (Ver memoria de cálculo, capítulo 5), separadas entre ellas por una distancia de 35.36mm (contando desde los planos principales). Están dentro del cabezal de corte

Lente 1: Lente de menisco positivo

Diámetro (mm): 38.1 mm

Distancia focal a 10.6 μm (f): 50.9 mm

Distancia focal efectiva a 10.6 μm : 49 mm

F/#: 1.3

Lente 2: Lente convexo-plana

Diámetro (mm): 25.4 mm

Distancia focal a 10.6 μm (f): 50.9 mm

Distancia focal efectiva a 10.6 μm : 48.8 mm

F/#: 2

6.2- ESPEJOS PARA EL SISTEMA ÓPTICO:

Hay 5 espejos en el sistema óptico del láser: 1 en línea con el subsistema de control de divergencia del haz y otros 4 en el cabezal láser.

El espejo que está en línea con las lentes de control de divergencia está en un soporte que está a su vez fijo en un carrito, que se desplaza horizontalmente por un raíl.

Todos los espejos son espejos revestidos de oro, ya que estos espejos son muy eficientes para el infrarrojo y están disponibles para uso con láseres de alta potencia.

Están hechos de un sustrato de cobre con un revestimiento de oro, ya que el oro es un excelente reflector desde los 800nm hasta los 30 μm (Ver memoria de cálculo, capítulo 4, Componentes del sistema óptico,4.3: Tipos de sustratos para los espejos)

Material sustrato:

El cobre tiene una gran conductividad térmica ($4 \text{ W cm}^{-1}\text{K}^{-1}$) y una difusividad térmica de $1.14 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$. Es, por lo tanto, un excelente sustrato para espejos para láseres de alta potencia.

El oro no se adhiere bien al cobre, por lo que primero se reviste el sustrato de níquel y después de oro.

Todos los espejos tienen estas especificaciones:

Diámetro (mm): 50 mm

Grosor: 10mm

Radio de curvatura: Son planos.

6.3. - SOPORTES PARA LAS LENTES:

Soportes para las lentes 1 y 2 del subsistema de control de divergencia. Estos soportes van a estar fijos en el rail por el que circula el carrito.

Las lentes de enfoque están en el cabezal láser.

Especificaciones técnicas:

Material: Aluminio HE30

Acabado: Anodizado negro.

Estos soportes tienen un perfil estrecho para poder posicionar varias lentes cerca.

Tiene ajustes independientes verticales y horizontales.

Vamos a tener dos soportes, uno para una lente de diámetro 25.4mm y otro para la lente de 38.1 mm

6.4. -SOPORTES PARA LOS ESPEJOS

Vamos a tener un soporte para el espejo que está en línea con el sistema de control de la divergencia ya que los otros 4 están incluidos el cabezal láser.

El soporte para el espejo va a ser de alta precisión, para que sea extremadamente estable y no tenga problema de desalineamiento debido a las vibraciones, ya que el espejo debe formar 45° con la horizontal.

Dimensiones:

Diámetro de espejos: 50 mm

Apertura: 48 mm

Grosor: 13 mm

Va a tener un accesorio para adaptar al espejo al ángulo de 45° que necesitamos.

6.5. - CARRIL

El carril del sistema óptico láser ha de ser rígido y que absorba vibraciones mecánicas y térmicas, ya que una vez alineado el sistema óptico del control de divergencia (lentes y el espejo con el carrito), cualquier variación afectaría de forma significativa en la calidad del corte. El carril va a estar fijo en el pórtico donde se encuentra el generador láser.

Estos raíles están fabricados de aluminio extruido y anodizado con una grueso y estable recubrimiento negro que está difundido en el aluminio, que da como resultado una superficie extremadamente dura, resistente y anti-corrosión.

Especificaciones técnicas:

Material: Aluminio extruido anodizado.

Estabilidad en el eje y: ± 0.001 in/ft

Estabilidad en el eje x: ± 0.0005 in/ft

Dimensiones: 12m de largo x 0.1 m de ancho x 0.021 m de alto

6.6. - CARRITO

El carrito va a ser necesario para que el espejo en línea con el haz láser se mueva horizontalmente y así poder desplazarse hasta la posición que deseamos cortar (Ver memoria de cálculo, Cap. 4, Componentes del sistema óptico).

Especificaciones técnicas:

Material: Aluminio extruido anodizado.

Dimensiones: 88.9 mm de largo x 116.8 mm de ancho x 20.6 mm de alto

6.7. -GENERADOR LÁSER:

Especificaciones técnicas:

Potencia nominal: 25 KW

Modo láser: TEM₀₀, para cortar materiales finos y de grosor medio.

Modo de operación: continuo.

Diámetro del haz (1/e²): 15 mm

Diámetro completo del haz: 18 mm

Divergencia (mitad del ángulo): <1.5 mrad

Consumo máximo de potencia: 30 KVA.

Refrigeración del generador láser:

Carga calorífica: 26.2 KW (89.320 BTU/hr.) a 40° temperatura ambiente

Mezcla refrigerante: Agua destilada 60%, propilenglicol 40%

Temperatura del refrigerante: 16°C

Caudal de refrigerante: 31 l/min como mínimo.

Gases del generador: Helio, Nitrógeno, Dióxido de carbono regulados a 4 bar cada gas

Consumo de gas para la generación del haz láser: 50 litros por hora

6.8. - CABEZAL LÁSER:

En el cabezal láser van a estar dispuestos los 4 restantes espejos, que van a dirigir el haz láser en las tres direcciones del espacio. Después el haz láser pasa por las dos lentes de enfoque, lo que hace que disminuya su spot y cortando el material. El cabezal láser elegido va a ser un cabezal de corte dirigido por un brazo robótico.

Aplicaciones:

Máquinas de procesamiento láser, robots láser y equipamientos para taladrar, cortar y soldar en diferentes ejes del espacio.

Diseñado para láseres de CO₂ y Nd: YAG.

Características:

Material: Aluminio y acero inoxidable

Provee de una posición en distintos ejes para el rayo láser, para partes planas o con 3 dimensiones.

Tiene un servo motor que hace que gire 360°

El eje del cabezal de corte gira $\pm 90^\circ$

Precisión en el posicionamiento del cabezal: $\pm 0.01^\circ$

6.9- BOTELLAS DE N₂ GAS COMPRIMIDO

Van a ser necesarias para impulsar el N₂ líquido que procede del Dewar. La botella de N₂ tiene una capacidad B10 de 10 litros (Ver memoria de cálculo, Cap 10, Cálculo del número de botellas de N₂ que necesita el equipo). La botella está equipada de un grifo manorreductor integrado "Altop" protegido por una tulipa especial. Presenta las siguientes características:

Seguridad

- Protección permanente del grifo.
- Cierre rápido.
- Gas disponible a la presión de utilización.

Facilidad

- Visualización permanente del contenido.
- Agarre perfecto.
- Disponibilidad del gas inmediata.
- Fácil conexión.

Economía

- Manorreductor protegido evitando roturas.
- Control permanente del contenido.
- Mayor rapidez de trabajo.

6.10- DEWAR

El recipiente criogénico del Dewar es un depósito constituido por una doble pared cuyo espacio anular se llena de aislante, como perlita expandida, colocado en múltiples capas y manteniendo bajo el vacío.

Los recipientes internos y externos se hacen de acero inoxidable, bronce, aleación de aluminio, cobre etc. Es decir que sean compatibles con el nitrógeno líquido. Tiene una capacidad de 1000 litros para una presión media de trabajo de 15'5 bar(Ver memoria de cálculo, Cap 9, cálculo del volumen del Dewar necesario)

6.11- BOMBA DE VACÍO

Bomba de dos etapas rotativa:

La función de la bomba es de succionar todo el nitrógeno gaseoso utilizado durante el proceso de perforación así como la fibra de carbono sublimada, como consecuencia de haber realizado el recantado con la utilización de un láser sobre las chapas de fibra de carbono especiales para aeronáutica

- Volumen desplazado a 50 Hz, 3 m³/h
- Volumen desplazado a 60 Hz, 3.2 m³/h
- Sección de aspiración: 9 mm
- Máxima presión permitida a la salida, 0'5 bar
- Peso, 5.4 Kg
- Potencia del motor de 50 Hz, 0'1 Kw.
- Potencia del motor de 60 Hz, 0'15 Kw.

6.12-CICLÓN.

La función del ciclón es la de separar el polvo de carbono generado por el recantado de la corriente que succiona la bomba.

El casco cilíndrico está fabricado en acero A316L, para evitar problemas de corrosión, de diámetro interno 138.4 mm y 276.8 mm de altura.

Tiene fondo superior plano y fondo inferior con forma de sección cónica de altura 276.8 mm.

El espesor de la envolvente así como la de los fondos es de 1/5 pulg (Ver memoria de cálculo, Cap 15, cálculo del espesor del ciclón)

El espesor de las conexiones de entrada y de salida de gases al sedimentador tendrá un mínimo de 1/16 pulg.

6.13- FILTRO DE CARBÓN ACTIVO.

El filtro de carbón activo es una estructura semicristalina que da lugar a una distribución de tamaños de poro bien determinada normalmente.

El carbón activo actúa eliminando las sustancias por adsorción. Esto se debe a su gran porosidad, que le confiere una gran superficie de contacto.

El filtro de carbón activo actúa como filtro químico, para eliminar por adsorción los gases de hidrocarburos gaseosos, provenientes de la sublimación de la fibra de carbono cuando se lleva a cabo la perforación mediante láser.

El carbón activo actúa también como filtro mecánico, impidiendo el paso del polvo de carbono que no haya sedimentado en los tanques. Esto se debe a que el tamaño de las partículas de polvo es superior a la del tamaño del poro del carbón activo.

El tiempo de vida media de un ciclo de este tipo depende de la cantidad de carbón activo, del flujo de agua a su través y de la concentración de sustancias a adsorber.

6.14- CONDUCCIONES

Se diferenciarán dos líneas básicamente: una línea criogénica conexiónada al depósito Dewar y el otro extremo a la herramienta; y una línea de vacío conectada al equipo básico de vacío y el otro extremo a la herramienta.

En la línea Criogénica.

Conducción de teflón: $D_i = 8 \text{ mm}$, $l = 25 \text{ m}$

Aislante térmico de poliuretano, $e = 2'4 \text{ cm}$

Se trabaja con una línea de teflón de 8'2 mm de diámetro externo, de 8 mm de diámetro interno y 25 m de longitud. (Ver memoria de cálculo 7, Diseño de la tubería de teflón)

El teflón es un material de resistencia química excelente y estable tanto a altas como a bajas temperaturas, luego es compatible con las condiciones criogénicas a la que se ve expuesto. Su principal característica y motivo de su selección es su carácter blando permitiendo deformarse fácilmente así como poseer un coeficiente de fricción muy bajo.

Se utiliza como aislante térmico el poliuretano. La línea de teflón está protegida de 2'5 cm de espesor de poliuretano para mantener las condiciones criogénicas y evitar fugas de calor.

El poliuretano está compuesto por poliol e isocianato procesado industrialmente, que forma una espuma rígida, con cerradas celdillas que le permiten una altísima eficacia como aislamiento e impermeabilizante.

Entre sus propiedades cabe destacar su flexibilidad cuando está sujeto a contracciones y elongaciones sin detrimento de sus propiedades, resistencia a cambios bruscos de temperatura, resistencia química y relación peso/aislamiento.

Su uso está extendido en equipos, conexiones, tuberías y cámaras frigoríficas que operen a baja temperatura.

En la línea de vacío.

Conducción de PVC: $D_i = 1'' = 0'0254 \text{ m}$, $l = 6'05 \text{ m}$

Conducción de elastómero reforzado: $D_i = 1'' = 0'0254 \text{ m}$, $l = 50 \text{ m}$.

La tubería de elastómero reforzado va desde la propia herramienta hasta donde se encuentra localizado el equipo básico de vacío (Ver memoria de cálculo, Cap 13, Cálculo de la presión de absorción en la boquilla)

La utilización del elastómero es debido a su bajo coste y su carácter flexible. La flexibilidad no solo proporciona una mayor movilidad sino también una disminución de las pérdidas de carga en el recorrido que comprende, debido a la reducción del número de codos como a su bajo coeficiente de fricción.

Las conducciones del equipo básico de vacío son de PVC. El PVC es un termoplástico industrial amorfo que puede ser transparente e incoloro pero se encuentra más comúnmente pigmentado.

Las tuberías de PVC presentan grandes ventajas en las instalaciones, por el excelente comportamiento en servicio y facilidad de instalación.

Las principales ventajas se consiguen por:

- Su ligereza: El reducido peso permite su traslado en obra sin necesidad de medios auxiliares.
- Facilidad de montaje.
- Resistencia a los suelos agresivos: por su elevada resistencia a los agentes químicos, se instalan sin recubrimientos.
- Baja rugosidad interna: El PVC no facilita la adherencia de solutos, manteniendo un buen coeficiente de fricción en el tiempo de servicio.

- Facilidad de mantenimiento: Son fáciles de mantener por la variedad de accesorios existentes.
- Elevada resistencia a fenómenos transitorios: Su moderada elasticidad hace que su comportamiento a fenómenos transitorios, p.e. Golpe de ariete, sea excelente.

6.15- VÁLVULAS

Las válvulas son sin duda el accesorio más importante y significativo dentro de un sistema de tuberías. Con su actuación se regula, controla, dosifica y mide.

En el sistema se hace uso de dos tipos de válvulas: válvula de compuerta y válvula de seguridad.

Válvula de compuerta:

- Función: Las válvulas de compuerta bloquean el sistema cuando lo requiere el proceso. Su diseño las hace especialmente aptas para producir un cierre total y, por sus características, deben estar en posición completamente abierta o cerrada, no siendo aconsejable su funcionamiento en posiciones intermedias.
- Ubicación: Existen 8 válvulas de compuerta ubicadas en la línea de vacío.

Válvulas localizadas a la entrada y salida de los ciclones así como de las bombas de vacío.

Con respecto a la línea criogénica, hay una válvula de compuerta localizada al principio de la tubería de teflón por donde se controla la impulsión del fluido criogénico proveniente del Dewar.

- Han de estar concebidas para la canalización de N₂ gaseoso, licuado o no, a temperatura criogénica. En consecuencia el cuerpo de la válvula será de acero inoxidable, bronce o latón mientras que el asiento de acero inoxidable A316L y las juntas de cerrado de vitón.
- Adecuadas para su incursión en un sistema de control, es decir, tendrán carácter electro-neumático. Por lo tanto serán electroválvulas.
- Posibilidad de introducción en la conducción vertical u horizontalmente.
- Presentan bridas de vacío NW25 para su conexión a las diferentes conducciones.

Válvula de seguridad

- Función: Protege el equipo evitando cualquier presión excesiva permaneciendo en posición cerrada, de manera que al producirse una fuerza superior por sobrepresión de la línea, se abre automáticamente la válvula, permitiendo así el deshogo del sistema.
- Ubicación: Ubicada al final de la línea criogénica, próxima a la boquilla.
- Diseñada para la canalización de N₂ gaseoso, licuado o no, a temperatura criogénica.
- Presión de regulación: 1'7 a 40 bar.
- Cuerpo y caperuza de latón, asiento de cuproaluminio para aplicación gases industriales.
- Obturador de PTFE grafitado.
- Obturador en posición sobreelevada para evitar que el hielo se bloquee.
- Escape canalizable de gran diámetro.
- Racor de salida para soldar y codo de salida roscado opcionales.
- Precisión de la presión de regulación: $\leq 3\%$ de la presión nominal.
- Presión de la estanqueidad al cierre: $\geq 90\%$ de la presión de regulación.

6.16-UNIONES

Las uniones entre tramos de tuberías se llevarán a cabo mediante codos estándar de 90°, mediante crucetas o conexiones estándar en T con flujo desviado a 90°.

Las uniones de los tramos de las tuberías de la instalación a los accesorios van a ser realizados mediante bridas según la norma ASA B.16.5.

El diámetro nominal de cada brida se hará coincidir con el diámetro nominal de la tubería en la que se sitúe.

Las bridas seleccionadas para llevar a cabo las uniones son del tipo NW25. El encaje de éstas bridas se realiza mediante el anillo de centrado y la junta de vitón. Una vez soldadas las bridas a los extremos de las conducciones, mediante el uso del anillo de centrado, se colocan en la misma posición y se finaliza el cierre usando una mordaza que las mantiene firmes, evitándose el escape de gases con la presencia del anillo de vitón.

6.17-SENSORES

Sensor de Temperatura

- Ubicación: En el recorrido de la tubería de teflón.
- Función: Mide la temperatura del fluido criogénico que recorre la tubería de teflón.
- Sonda de Temperatura PT100 tipo A.
- Material de la vaina y de la punta, acero inoxidable y la cabeza del terminal de Al.
- Temperatura de funcionamiento de -197°C a $+600^{\circ}\text{C}$.
- Precisión, $0'2^{\circ}\text{C}$.
- Tolerancia máxima del error, $0'1^{\circ}\text{C}$.
- Equipado para conexión en controlador PID.

Sensor de Presión

- Ubicación: A la entrada de la boquilla.
- Función: Controlar aumentos de la presión del sistema por obstrucción de la boquilla.
- Material compatible con las condiciones criogénicas.
- Presión de funcionamiento, de 5 bar a 30 bar.
- Precisión de 0'5 bar.
- Tolerancia máxima del error, 0'2 bar.
- Equipado para conexión en controlador PID

Sensor de nivel de líquido

Se utiliza un sistema de control en el depósito criogénico. Es de gran importancia para evitar sobrellenos, fugas y derrames de productos. Permite medir las existencias de producto almacenado y será del tipo electrónico automatizado.

El sistema de medición será el sistema de tipo de columna hidrostática (HTG) En dicho sistema la medición del nivel se hará mediante transmisores de presión diferencial, digitales, de acero inoxidable y salida lineal 4/20 mA.

7. MATERIAS PRIMAS.

7.1- SELENIURO DE ZINC:

Es la materia prima de las lentes del sistema óptico del láser. Sus propiedades son:

Propiedades físicas:

Coefficiente medio de expansión a $20^{\circ}(10^{-6}K^{-1})$: 7.6

Módulo de Young ($10^9 N/m^2$): 67.2

Dureza (kg/mm^2): 120

Densidad (g/cm^3): 5.27

Punto de fusión ($^{\circ}C$): 1100

Conductividad térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$): 18.0

Calor específico ($Jg^{-1}K^{-1}$): 0.34

Solubilidad en agua: es insoluble.

Propiedades ópticas:

Rango de transmitancia: $0.55 - \mu m^{16}$

Índice de refracción a $10.59 \mu m$: 2.403

7.2- NITRÓGENO

La materia prima que se utiliza en la parte criogénica del sistema es el N_2 en estado gaseoso y en estado líquido.

El N_2 en su estado natural, es un gas incoloro, inodoro e insípido; es poco soluble en agua y se halla en la atmósfera en una proporción del 78%. Es inerte en condiciones normales.

No es combustible ni mantiene la combustión. No es un gas tóxico, pero puede producir asfixia por desplazamiento de oxígeno.

| PROPIEDADES FÍSICAS | | <u>ESTADO</u> | | |
|----------------------------|--------------|----------------------|-----------------|---------------------|
| | | <u>Fase</u> | Temp.(K) | Presión (Pa) |
| Densidad (N_2) | $1.25kg/m^3$ | Gas | 293.15 | 101325 |
| Densidad (N_2) | $807kg/m^3$ | Líquido | 77.35 | 101325 |

7.3- DIMETIL FORMAMIDA

Es el reactivo que se utiliza como absorbedor de hidrocarburos, en la campana de burbujeo colocada al final de la línea de vacío.

Se trata de un disolvente enérgico de diversas resinas, incoloro y con un débil olor parecido al amoníaco.

7.4- FIBRA DE CARBONO

Material compuesto fabricado a base de fibras de carbono reforzando matrices resinosas de naturaleza plástica como las epoxi, se caracteriza por ser una combinación de escaso peso, alta resistencia y tenacidad. Éstas propiedades hacen a los materiales compuestos plásticos de fibras de carbono especialmente apropiados para aplicaciones aeroespaciales.

| PROPIEDADES TÉRMICAS DEL MATERIAL | | | | |
|--|--|--|---|--|
| Material | Densidad (kg/m³) | Conductividad, k (W/(mK)) | Difusividad, (m²/s) | Calor específico, (J/kgK) |
| Carbono | 1750 | 50 | | 710 |
| Epoxy | 1370 | 0.3 | | 1884 |
| Carbón/Epoxy | 1530 | Corte paralelo al eje de las fibras K ₁ = 25. K ₂ = 0.61 K ₃ = 0.6 | Corte paralelo al eje de las fibras a ₁ =1.296*10 ⁻⁵ a ₂ =3.099*10 ⁻⁷ a ₃ =3.099*10 ⁻⁷ | 1290 |
| | | Corte perpendicular al eje de las fibras K ₁ = 0.6 K ₂ = 25.1 K ₃ = 0.6 | Corte perpendicular al eje de las fibras a ₁ =3.099*10 ⁻⁷ a ₂ =1.296*10 ⁻⁵ a ₃ =3.099*10 ⁻⁷ | |

8. MANTENIMIENTO DEL SISTEMA Y RÉGIMEN DE OPERACIÓN.

8.1- MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

El objetivo del mantenimiento del sistema es conservar los equipos e instalaciones en perfectas condiciones de mantenimiento para proporcionar la seguridad de funcionamiento de los sistemas de producción.

8.1.1- Mantenimiento General del sistema

Se trata de actividades que conducen a preservar y aumentar la vida útil de los equipos de la instalación y a realizar las reparaciones necesarias.

Las actividades rutinarias de mantenimiento consistirán en prestar atención a la lubricación, engrases, reposición de niveles, comprobaciones de presiones y temperaturas de operación, comprobación del funcionamiento de las válvulas, bombas, inspecciones de ruido y vibraciones anómalas etc.

En general se comprobará el buen funcionamiento de todos los elementos que constituyen la instalación. Las actividades planificadas de servicio y reparación se llevarán a cabo con antelación, con el objeto de eliminar toda posible improvisación y disfunciones mediante un programa anual de mantenimiento basado en los históricos y en los costes reales de mantenimiento de cada máquina o instalación productiva.

8.1.2- Mantenimiento Específico del sistema

El mantenimiento del sistema se centra principalmente en un mantenimiento preventivo consistente en efectuar las intervenciones en las máquinas y equipos antes de que se produzca la avería, y a intervalos fijos previamente determinados. Con ello se pretende prevenir la avería antes de que ocurra.

En éste punto se detalla las actividades de mantenimiento que se deben de realizar los principales equipos constituyentes de la instalación;

Mantenimiento del sistema óptico:

Se lleva a cabo un mantenimiento preventivo por “inspecciones”, basado en comprobar el correcto funcionamiento del equipo cuando no está en funcionamiento por razones de seguridad. Las acciones de mantenimiento son las siguientes:

- Revisión de los espejos: Comprobación de que la distancia a la que están separados es la correcta.
- Revisión del aspecto superficial del espejo y de su correcta alineación con las lentes y que su ángulo sigue siendo de 45° con la horizontal.
- Comprobación de que no hay partículas de polvo que puedan interferir con el camino óptico del láser.
- Comprobación del correcto funcionamiento del generador láser.
- Revisión del carrito y del rail, engrasándolo para que no haya rozamiento excesivo y se desplace correctamente el carrito sobre éste. Es necesario ejercer atención sobre el soporte del espejo debiendo comprobar su posición, y eliminando todos los elementos adheridos en él o en las lentes.

Mantenimiento de las válvulas

Las válvulas están libres de mantenimiento, salvo las válvulas de seguridad, debido a que las juntas sufren un proceso natural de desgaste y envejecimiento, debiendo ser reemplazadas cuando sea necesario.

Se trata de un mantenimiento preventivo por “gamas”, que es cuando el conjunto de actividades de mantenimiento están encaminadas a la sustitución de piezas, componentes etc, cuando se cumpla el número de ciclos de operación óptima suministrada por el fabricante, independientemente de su estado.

Mantenimiento de la botella de N2 gas comprimido.

Todas las botellas llevan grabadas en su ojiva la fecha última de su prueba hidráulica. Las botellas se reprueban, de acuerdo con la legislación vigente, cada diez años.

Por otro lado, si la botella sobrepasase este período durante su utilización por el cliente, según la legislación vigente, la botella puede seguir utilizándose hasta consumir todo el producto contenido.

Mantenimiento de la bomba de vacío

Para evitar posibles paradas en el sistema, a causa de imprevisibles e inesperadas averías del funcionamiento de la bomba de vacío, se emplearan dos bombas de vacío colocadas paralelamente que funcionaran de forma alternativa, jugando con la baja probabilidad de que ambas bombas dejen de funcionar simultáneamente por avería, de ésta forma solo habrá que cortar la línea de la bomba que deje de funcionar, mediante una válvula de corte por presión.

En general las averías que pueden presentarse en las bombas se dividen en tres categorías: fallos eléctricos, mecánicos e hidráulicos. El mantenimiento rutinario de los equipos de bombeo incluye las siguientes actividades:

- Comprobación de los elementos de giro que se desplazan libremente y sin ruidos anormales.

- Comprobación del eje de impulsión.

- Comprobación del estado de los cojinetes de acoplamiento y reemplazamiento en caso de desgaste. Engrase de los mismos.

- Ajuste y empaquetado de las prensa-estopas en caso de detectar fugas.

- Anotación de los problemas y de las observaciones realizadas: horas de funcionamiento, medidas de la intensidad eléctrica, medida de los indicadores de presión.
- Comprobación de temperaturas y de las vibraciones de los motores.
- Comprobación del ajuste de la bomba, el motor y de la estanqueidad.
- Engrase de los rodamientos.
- Comprobación de los niveles de aceite.

De ésta forma se establece el mantenimiento preventivo que establezca el fabricante de la bomba, y uno correctivo en caso de avería.

Mantenimiento de los ciclones:

Se lleva a cabo un mantenimiento preventivo por “inspecciones”, basado en comprobar el correcto funcionamiento del equipo normalmente en marcha, mediante una inspección visual de la misma y su entorno o anotando alguno de sus parámetros característicos.

Las acciones de mantenimiento son las siguientes:

- Retirada de productos precipitados en el interior.
- Revisión del aspecto superficial.
- Revisión de conexiones en las tuberías.
- Inspección radiográfica de las soldaduras

8.2- RÉGIMEN DE OPERACIÓN

Se tomará como situación inicial de partida, el que todas las válvulas del sistema permanezcan cerradas y que el Dewar se encuentre lleno de nitrógeno criogénico. A continuación se seguirán los siguientes pasos:

1. Se abren las válvulas VV4, VV5, VV8 y VV9 correspondiente a la línea de vacío y se pone en funcionamiento la bomba de vacío.
2. Se abre la válvula de control VV1 de salida de nitrógeno procedente de la botella de N2 gas comprimido, se abre VV2.
3. Transcurrido el tiempo transitorio de enfriamiento de la tubería.
4. Actuación del láser y del caudal de nitrógeno líquido durante el tiempo de perforación de la fibra de carbono, mientras que la bomba de vacío retira el nitrógeno gas así como el material sublimado.
5. Terminada la operación de recantado, se desactiva el láser.
6. Desplazamiento del cabezal del láser de un punto a otro.
7. Repetición de las actividades 4 y 5, por cada operación.
8. Se cierran las válvulas de control VV1 y VV2.
9. Se apaga la bomba de vacío.
10. Se cierra VV4, VV5, VV8 y VV9.

8.3- FORMACIÓN DE LOS OPERARIOS, UBICACIÓN Y ABASTECIMIENTO DEL SISTEMA.

Formación de los operarios

La Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales y Real Decreto 773/1997 exige que la empresa proporcione información y organice cursos de formación sobre el uso correcto de los equipos de protección personal.

Es importante que los operarios estén informados de la naturaleza de los riesgos frente a los cuales se van a enfrentar.

Además, para poder utilizar el equipo de protección correctamente es necesario que se conozcan previamente las instrucciones de uso que incluyen detalles sobre su correcta colocación, mantenimiento y almacenamiento.

Como medida genérica en toda la instalación que implique contacto con gas licuado a baja temperatura, se utilizará protección personal y ropa adecuada.

Ubicación del sistema

En cuanto a la ubicación del sistema, tiene que cumplir los siguientes requisitos:

Todas las componentes del equipo deben de estar siendo suministrados por corriente eléctrica a través de una instalación eléctrica.

Es necesario trabajar con ventilación adecuada y local

Abastecimiento de N₂ al sistema.

Los gases se distribuyen desde las plantas de producción a los depósitos de almacenamiento situados en el cliente, mediante cisternas criogénicas debidamente preparadas.

Una amplia flota de camiones de diversos tamaños y capacidades suministran el producto requerido cubriendo la totalidad de la demanda del sistema, así como el resto de demandas.

Los camiones son apropiados para el transporte de Nitrógeno líquido a baja y media presión. Son construidos de acuerdo con el código ASME Sección VIII Div. 1, permitiendo su descarga por auto presurización del líquido transportado.

El Dewar es el equipo del sistema que necesita la reposición del N₂ licuado que almacena. El suministro del producto tiene lugar cuando la capacidad del Dewar está por debajo del 40 % de su volumen total. El llenado del recipiente puede realizarse por la parte superior del recipiente.

9. CONTROL Y SEGURIDAD EN EL SISTEMA.

9.1-SISTEMAS DE CONTROL

Con el objetivo de asegurar un funcionamiento seguro, correcto y continuo del sistema de recantado láser, se deben instalar sistemas de control de variables que son necesarias mantener entre unos valores determinados para conseguir óptimos resultados. Sin embargo, el control del proceso de recantado es muy complejo por lo que primero describiremos las técnicas a utilizar en el mismo y después se resumirán brevemente las actuaciones a tomar con control distribuido.

9.1.1.- Control del proceso de corte por láser:

El control sobre el corte por láser implica la coordinación de todos aquellos aspectos que de una u otra forma afectan al modo en que se realiza la transferencia de calor sobre la pieza. Esto puede realizarse ajustando la intensidad del láser y su posición sobre la pieza. El conjunto de variables que puede intervenir en el control del corte por láser son muchas, como, por ejemplo:

- Intensidad del haz láser (Modo, foco, posición, modulación...)
- Velocidad de corte
- Caudal de gas de aporte
- Composición del gas.

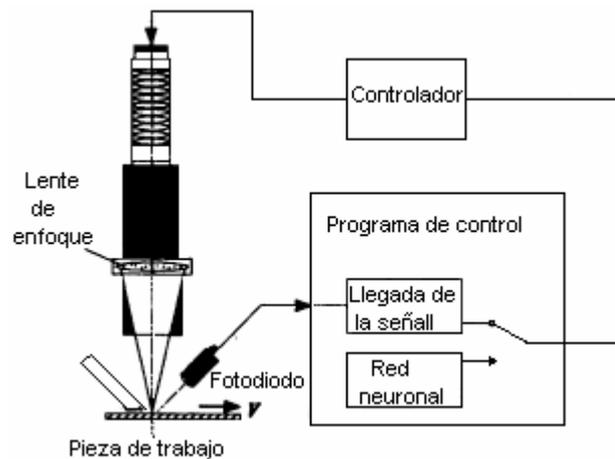
Una técnica común es modificar la potencia del láser en respuesta a los cambios de las condiciones del corte para llevar al sistema a un estado óptimo. Hay una técnica de control en la que se monitoriza el calor sobre la pieza y cuando la señal sobrepasa un determinado umbral la acción láser cesa. La capacidad de responder a cambios de señal inferiores a 1 mseg hace de él un control adaptativo real.

La estabilización de la salida del láser juega también un papel muy importante en el control del corte por láser, aunque las fluctuaciones siempre están presentes debido a la naturaleza aleatoria de las interacciones entre el rayo láser y la pieza.

Estas fluctuaciones son especialmente importantes cuando se sueldan materiales con un alto índice de reflexión. En este caso se necesita un sistema de control en lazo cerrado que toma la señal de un sensor piroeléctrico.

Existen métodos sofisticados de control que combinan la estabilización del láser mediante un sistema óptico adaptativo con el ajuste del movimiento de la pieza. Con este sistema se corrigen los problemas que aparecen en el corte 3D con las transiciones de velocidad en las curvas pronunciadas, así como en el arranque del proceso.

El mantenimiento de la posición focal es también un parámetro fundamental en el control de corte láser. Estas variaciones pueden obtenerse mediante ópticas adaptativas o moviendo el elemento de focalización como un todo. Se desarrolló un sistema de control de lazo cerrado de longitud focal basado en redes neuronales utilizando la señal de un fotodiodo.



Este sistema es capaz de identificar el punto focal máximo con un error medio de 0.18 mm y una desviación estándar de 0.36mm

Por último, un sistema de control más sofisticado de realizar el control consiste en lo que se denomina "control inteligente" en el cual las señales de entrada se comparan con una base de datos para optimizar la respuesta de salida. En estos sistemas suele dotarse al lazo de control de la inteligencia proveniente de redes neuronales.

El control distribuido:

Este tipo de control es el más adecuado para este sistema, ya que los sistemas de control distribuido se fundamentan en distribuir una aplicación de control de gran tamaño en diversos subsistemas, con capacidad de comunicarse entre sí, lo que permite una central de supervisión única con acceso a información de los diversos subsistemas.

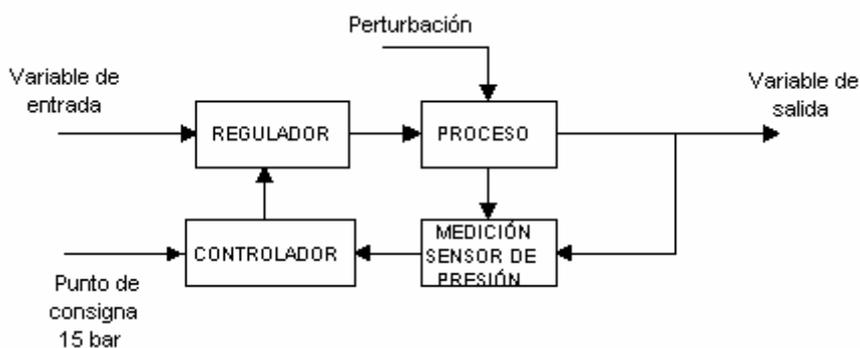
En este caso, los subsistemas serían:

Subsistema óptico.

Subsistema de aspiración.

Subsistema de refrigeración.

Por ejemplo, en el sistema de refrigeración, podría existir un lazo de control de presión de salida de nitrógeno líquido, ya que se necesita controlar la presión justo antes de la boquilla para prevenir posibles aumentos de la presión en el sistema por obstrucción de la boquilla, como consecuencia de la congelación del aire a la salida de ésta o una disminución de la presión debida a posibles fugas a lo largo de la tubería de teflón, entre una de las posibles causas. Este lazo de control tendría la forma:



Como se vio en el capítulo 20 de la memoria de cálculo, la presión ha de mantenerse en 15 bar “Cálculo de la presión de trabajo en la botella de nitrógeno” la presión en la boquilla debe mantenerse en 15 bar.

El sensor de presión (está realizando medidas de forma continua de la variable de salida, es decir, de la presión. El transmisor enviará el valor de dicha medición, en forma de señal

electrónica hacia el controlador donde se comparará con la medida deseada o punto de consigna, cuyo valor es de $15 \pm \Delta P$ bar, obteniéndose un error “ ξ ” y en función de éste, el regulador actuará de la siguiente forma:

Si se produce una disminución de la presión a causa, por ejemplo, de posibles pérdidas de fluido durante el trayecto recorrido del nitrógeno líquido a lo largo de la tubería de teflón, se ha de cerrar inmediatamente la válvula que permite la salida de gas procedentes de las la botellas de nitrógeno, para evitar la impulsión de más caudal de nitrógeno líquido, así como la válvula situada al principio de la tubería de teflón para evitar la salida del caudal de nitrógeno ya impulsado con anterioridad. Además de esto, habría que detener el proceso de recantado, ya que una disminución de la cantidad de nitrógeno líquido en la boquilla, produciría un aumento de temperatura en la fibra de carbono, con lo que habría un aumento de la zona afectada por el calor y la pieza de fibra de carbono quedaría completamente inservible.

Con el control distribuido, la señal del sensor de presión llegaría a la estación de control y se tomarían todas las actuaciones necesarias en todo el sistema de recantado. Ésta forma de actuación aumenta significativamente la disponibilidad del sistema, incluso alcanzándose valores hasta del 99%.

9.2 SEGURIDAD EN EL TRABAJO CON LASERES

9.2.1 Protección ocular contra radiaciones láser

El número de lesiones oculares y cutáneas, causadas por radiaciones accidentales de láser, está aumentando debido al creciente uso de láseres en aplicaciones industriales, quirúrgicas y científicas

Para comprender el funcionamiento de un equipo láser y las consecuencias en términos de daños oculares que la radiación pueda tener para los operarios, es preciso conocer el espectro electromagnético.

9.2.2 El espectro electromagnético

La luz se puede definir como radiación electromagnética, una forma de energía radiante. Hay varios tipos de ondas electromagnéticas, incluyendo los rayos ultravioleta, rayos infrarrojos, ondas de radio y rayos-X. Sólo percibimos una pequeña parte del espectro, la que llamamos luz visible. Cada tipo de radiación tiene su longitud de onda característica. La longitud de onda quiere decir la distancia, en la dirección de propagación de una onda electromagnética periódica, entre dos puntos consecutivos con la misma fase en un instante de tiempo. El símbolo que la designa usualmente es λ . La longitud de onda se expresa en metros.

La radiación ultravioleta es la banda de radiación óptica que presenta las longitudes de onda más cortas. Está dividida en varias partes:

| | | | |
|----------------|------|-----------------|------------------|
| UV cercano | UV-A | 315 nm - 380 nm | |
| UV medio | UV-B | 280 nm - 315 nm | |
| UV lejano | FUV | 200 nm - 280 nm | FUV + VUV = UV-C |
| UV en el vacío | VUV | 100 nm - 200 nm | FUV + VUV = UV-C |

La banda de radiación óptica visible por el ojo humano es el intervalo de longitudes de onda comprendidas entre 380 nm y 780 nm. La radiación de la parte perjudicial de la luz azul se encuentra en la banda espectral visible. Su intervalo de longitudes de onda está comprendido entre 400 nm y 480 nm.

La radiación infrarroja es la radiación óptica cuyas longitudes de onda son superiores a las de la radiación visible. Para la radiación infrarroja, la banda entre 780 nm y 1 mm, se divide generalmente en:

| | | |
|------------|------|---------------------|
| IR cercano | IR-A | 780 nm - 1.400 nm |
| IR medio | IR-B | 1.400 nm - 3.000 nm |
| IR lejano | IR-C | 3000 nm - 1 mm |

9.2.3 Cómo funciona el láser

El láser se basa en un medio activo líquido, sólido o gaseoso, que emite luz cuando es excitado por una fuente de energía. Esta fuente de excitación puede ser una reacción química, eléctrica u óptica, incluyendo el bombeo por otro láser.

Un láser de gas funciona de la siguiente manera:

1.-El interior del láser consiste en un tubo de vidrio lleno de gas excitado por una corriente eléctrica que lo atraviesa. El tubo de gas tiene un espejo en cada extremo.

2. - La corriente eléctrica excita los átomos del gas que pasan a emitir fotones, energía luminosa.

3.- Algunos de los fotones emitidos chocan con otros átomos excitados que como respuesta emiten fotones idénticos. (Emisión estimulada de radiación.)

4.- Cuando un fotón choca con un átomo excitado produce otro fotón idéntico, ambos fotones pueden a su vez chocar con otros átomos excitados y volver a producir más fotones que a su vez chocarán con otros átomos, y así sucesivamente. (Amplificación)

5.- Parte de los fotones chocan con los espejos y se reflejan hacia el interior del gas, donde continúan la amplificación y la emisión estimulada.

6.- El espejo situado en el extremo donde se emite el haz de láser es semirreflectante para así dejar pasar parte de la luz; siempre que refleje hacia el interior un número de fotones suficientes para mantener la amplificación.

7.- Sólo los fotones que se mueven paralelamente al eje del tubo chocan con los espejos y se amplifican produciendo así un haz de luz láser monocromática y coherente.

Un láser es un equipo que produce un haz extremadamente intenso. La radiación óptica de un láser es generalmente unidireccional, monocromática y coherente.

- Unidireccional significa que la energía o potencia de la radiación alcanza un objetivo a la vez con muy poca o sin ninguna divergencia, sobre largas distancias.

- Luz monocromática quiere decir radiación en el espectro que sólo contiene un pequeño rango de longitudes de onda. También puede estar caracterizada por una única longitud de onda. Las líneas espectrales de una radiación lineal en una banda estrecha pueden ser consideradas monocromáticas.

- Coherente es cuando las radiaciones emitidas mantienen una diferencia de fase constante.

Existen láseres muy diversos dependiendo de la aplicación para la cual están diseñados.

Resumiendo, los láseres pueden ser desde muy baja a muy alta potencia dependiendo de la aplicación y pueden emitir radiación desde la región ultravioleta hasta la región de infrarrojos lejanos. La energía de estas radiaciones puede causar lesiones oculares y cutáneas.

Los láseres suelen recibir el nombre del medio activo utilizado para generar la emisión, como argón, rubí y helio-neón. El nombre suele ser abreviado conforme al símbolo químico, como He-Ne en vez de helio-neón. El color de un haz de láser depende de las características del medio emisor. Por ejemplo el haz de argón es verde azulado y el haz de rubí es rojo.

9.2.4.- Tipos de láser

Los medios activos más utilizados para la generación de emisión láser pueden ser de estado sólido, gas, semiconductor y colorante.

Láser de estado sólido

Los láseres de estado sólido están contruidos con cristales sólidos como el neodimio, rubí o titanio-zafiro que se excitan con luz intensa. Láseres de este tipo se utilizan en la industria, medicina y aplicaciones científicas.

Láser de gas

En los láseres de este tipo el haz es producido en un gas o una mezcla de gases, como argón o helio-neón, que se excitan con una corriente eléctrica.

Láser de semiconductor

Son láseres diminutos contruidos con materiales sólidos denominados semiconductores. Emiten un haz fino cuando se excitan por una corriente eléctrica.

Láser de colorante

El medio activo en este tipo de láser es un colorante líquido, Se excitan normalmente con un láser de argón o lámparas de flash.

Dependiendo del tiempo de funcionamiento se distinguen dos clases de láser: Láser continuo y Láser pulsado. Desde el punto de vista de los efectos, tanto físicos como biológicos, es imposible trazar una línea de separación precisa entre ambas clases. El láser continuo es capaz de emitir radiación de forma continua mientras en láser pulsado libera su energía en forma de pulsos. La diferencia entre ambos es el tiempo de duración de la emisión láser.

De acuerdo con la Norma Europea EN 60825, la duración mínima de la emisión, para ser considerado continuo, es de 0,25 s, que es la duración del reflejo palpebral. (El reflejo palpebral es una característica del ojo humano consistente en el cubrimiento del ojo por el párpado en 0,25 s como consecuencia de un estímulo luminoso suficientemente intenso.)

La potencia de pico de un láser continuo es igual a su potencia media, mientras que en un láser pulsado, su potencia de pico es igual al cociente entre su potencia media y el producto de la anchura de pulso por la frecuencia de repetición. La potencia de pico, así como la

energía del pulso (Potencia de pico en vatios por anchura de pulso en segundos), son los parámetros más importantes desde el punto de vista de seguridad láser.

9.2.5.- Clasificación de láseres (EN 60825)

Los productos láser se agrupan en cuatro clases generales para las que se especifican los límites de emisión admisibles (LEAs).

| | Láser | Daño | Riesgo | Medida de control |
|-------------------|---|-------------------|--|--|
| Clase I | Sistemas láser que no pueden emitir radiación en exceso de los niveles máximos de exposición permitidos. | Ninguno | Ninguno | -Etiquetas de peligro |
| Clase II | Láseres emisores de luz visible que no tengan suficiente potencia para producir daños por accidente, pero pueden producir daños por una observación directa del haz durante un período superior a 0,25 segundos | Ocular | Crónico para exposiciones de 1.000 segundos | Carcasa protectora Etiquetas de peligro Indicadores de funcionamiento Gafas de protección |
| Clase IIIa | Láseres emisores de luz visible que no producen daños por observación indirecta, pero dañan la retina si se focalizan dentro del ojo | Ocular | Crónico para exposiciones mayores de 0,25 segundos | Controles de ingeniería Gafas de protección Controles administrativos Señales de peligro |
| Clase IIIb | Láseres que pueden producir daños por accidente si se observa directamente el haz o sus reflexiones en distintas ópticas | Ocular Cutáneo | Peligro agudo en contacto con el haz | Controles de ingeniería Gafas de protección Controles administrativos Señales de peligro |
| Clase IV | Sistemas láser que producen daños graves, por incidencia directa, indirecta ó reflexión difusa, en los ojos y la piel. | Ocular Cutáneo | Peligro agudo en contacto con el haz ó con su radiación difusa | Controles de ingeniería Gafas de protección Controles administrativos Señales de peligro |

9.2.6.- Cómo afecta la radiación al ojo humano

El cuadro muestra las distintas radiaciones con sus respectivos intervalos de longitud de onda y las lesiones que pueden causar al ojo humano.

Daños a los ojos de las radiaciones

| | |
|------------------------------|--|
| UV-A (315-380 nm) | Niveles altos o exposiciones prolongadas pueden causar cataratas |
| UV-B (280-315 nm) | Cataratas, quemaduras cutáneas |
| UV-C (100-280 nm) | Daño de la córnea y el cristalino. Pérdida de visión |
| Luz azul (400-480 nm) | Daño de la retina, pérdida de visión |
| IR-A (700-1400 nm) | Daño de la retina |
| IR-B (1400-3000 nm) | Daño de la córnea y el cristalino |
| IR-C (3000nm-1 mm) | Quemaduras, pérdida de visión |

La córnea es afectada por radiación ultravioleta - principalmente UV lejanos así como por IR medios. El cristalino se ve dañado por los efectos de UV cercanos y por los infrarrojos, principalmente medios. Otros tipos de radiaciones peligrosas no son absorbidos por la córnea o el cristalino, sino que se focalizan directamente en la retina. Este puede ser el caso de la luz visible (daño foto-químico) así como IR cercano. La retina tiene una capacidad muy limitada de cicatrización, incluso niveles bajos de energía pueden dañarla irreversiblemente. La radiación infrarroja puede actuar en conjunción con luz azul aumentando la posibilidad de daño foto-químico sobre la retina. Cuando el nivel de radiación es muy alto, si la temperatura de la córnea y el cristalino aumenta y su refrigeración mediante los vasos sanguíneos no es suficiente, los rayos infrarrojos pueden aumentar la posibilidad de daño de estos órganos por los rayos ultravioletas. Las enfermedades oftálmicas más comunes debido a estas radiaciones son queratitis, conjuntivitis y cataratas.

La queratitis es una inflamación de la córnea caracterizada por infiltración con matidez de la superficie y disminución de la transparencia. Sus síntomas son dolor, lagrimeo, fotofobia y disminución de la visión. Se distinguen tres variedades: superficial, profunda y úlcera de córnea. La conjuntivitis se produce cuando se inflama la conjuntiva, una delicada membrana que tapiza los párpados y cubre la porción anterior del globo ocular.

Sus síntomas son el enrojecimiento por inyección vascular, molestias, secreciones diversas y fotofobia. Fotofobia significa "horror a la luz". Se trata de una sensación ocular desagradable que se experimenta bajo el efecto de la luz. Puede manifestarse en caso de cualquiera de las enfermedades oftálmicas externas como queratitis y conjuntivitis. Las cataratas se producen cuando el cristalino se vuelve opaco a causa de un proceso degenerativo de su tejido constitutivo. Se caracteriza por la aparición de una opacidad blanca o grisácea y por la disminución de visión o visión de puntos y manchas negras. En casos extremos puede conducir a la pérdida completa de visión.

9.2.7.- Protección individual contra la radiación láser

Protectores oculares contra radiación láser deben ser utilizados por toda persona que permanezca en zonas donde se emplee un equipo láser. Los protectores han de ser adaptados al sistema de láser en uso. La no utilización de gafas de protección o la selección de unas gafas de protección inapropiadas para la aplicación específica puede causar una lesión ocular. Las gafas nunca deben utilizarse para la observación directa del haz láser.

La Norma Europea EN 207 se aplica a los filtros y protectores de los ojos utilizados contra la radiación láser en la banda espectral comprendida entre los 180 nm y 1 mm. Los filtros según esta norma permiten una atenuación de esta radiación de acuerdo con los valores especificados para los láseres de clase III y IV.

La Norma EN 208 se refiere a gafas de protección para los trabajos de ajuste de los láseres y los sistemas láser, en los que la radiación peligrosa producida en la banda espectral visible está comprendida entre los 400 nm y 700 nm. Los filtros, según esta norma, permiten una atenuación de esta radiación hasta los valores especificados para los láseres de clase II.

Protectores oculares contra sistemas láser deben aportar el grado de protección apropiado en la longitud específica de onda, con el fin de optimizar la protección y transmitancia de luz necesaria para que el usuario pueda realizar su trabajo de manera segura y eficaz. La acción filtrante es la capacidad de un filtro óptico para atenuar la radiación óptica en un intervalo determinado de longitudes de onda.

Existen diversas condiciones de ensayo según que el tipo de láser sea continuo ó pulsado. Todos los filtros de protección láser deben ensayarse según la condición de ensayo para láser continuo. Si debe garantizarse una protección complementaria contra láseres pulsantes, los filtros y gafas de protección láser deberán ensayarse según las condiciones de ensayo de pulsado.

En la tabla se indica el factor espectral máximo de transmisión para los diferentes grados de protección. Estos valores no deberán ser sobrepasados por los filtros y protectores de los ojos ante una radiación láser de la (las) longitud(es) de onda para las(s) que garantizan protección. El factor de transmisión espectral de un filtro (para la longitud de onda) es la razón entre el flujo energético transmitido y el flujo incidente. (EN 207)

| Grado de protección | Factor espectral máximo de transmisión para las longitudes de onda láser |
|----------------------------|---|
| L1 | 10 -1 |
| L2 | 10 -2 |
| L3 | 10 -3 |
| L4 | 10 -4 |
| L5 | 10 -5 |
| L6 | 10 -6 |
| L7 | 10 -7 |
| L8 | 10 -8 |
| L9 | 10 -9 |
| L10 | 10 -10 |

Para determinar el filtro apropiado hay que responder a las siguientes preguntas.

¿Cual es la longitud de onda del sistema de láser?

¿Qué potencia ó energía produce el sistema?

¿Es necesario ver una parte del haz reflejado para la aplicación?

¿Cual es la anchura del pulso y la frecuencia de repetición?

¿Cual es el diámetro del haz? (para calcular la irradiancia media de la radiación láser)

¿Qué tipo de riesgos de radiación secundario están involucrados? (pe. corte de metal y soldadura)

¿Qué tipo de protector es necesario, por ejemplo gafas panorámicas a usar sobre gafas correctoras?

¿Hay otras consideraciones a tener en cuenta cuando el láser está funcionando?

Una vez determinado el filtro apropiado es importante asegurar que las gafas a elegir estén certificadas por la CE, asegurando así una mínima garantía de calidad. (R.D. 1407/1992)

9.2.7.- Características gafas de protección contra la radiación láser

Como Equipo de Protección Individual, las gafas de protección contra radiaciones láser han de cumplir unas características generales. Entre ellas cabe destacar las siguientes:

- Las gafas no están previstas para proteger más que en caso de una exposición accidental
- El factor espectral de transmisión para las longitudes de onda láser no debe sobrepasar al factor espectral máximo de transmisión correspondiente al grado de protección indicado.
- El factor medio de transmisión en el visible de los filtros de protección láser debería ser el 20% como mínimo. Si resulta inferior, el fabricante ha de advertirlo en las instrucciones de uso y la iluminación del puesto de trabajo deberá aumentarse.
- Los filtros de protección láser no deben presentar defectos de masa ni superficie que puedan alterar su aptitud de uso, tales como burbujas, rayas, agujeros, marcas del molde y otros defectos debido a la fabricación
- Los filtros montados en las monturas no deben ser amovibles. Las monturas deben fabricarse de tal modo que impidan una penetración lateral accidental de la radiación láser
- Las monturas y los filtros no deben inflamarse, ni quedar incandescentes
- Las gafas deben permitir, en las direcciones horizontales y verticales, un campo de visión libre de 40° (ángulo lleno) como mínimo.

De acuerdo con la Norma Europea EN 207, el marcado de las gafas de protección láser incluirá los parámetros más importantes relativos al tipo de láser, nivel de atenuación óptica y resistencia mecánica.

Ejemplo de marcado

- - Tipos de láser
- - Longitud(es) de onda o banda espectral en nm para la(s) que el filtro garantiza protección
- - Grado de protección
- - Identificación del fabricante
- - Marca de certificación CE
- - Código de resistencia mecánica

En unas gafas de protección de calidad óptima, los absorbentes desarrollados para los filtros son integrados en polímeros como aditivos disueltos de manera homogénea, para absorber eficazmente la energía láser que pueda causar lesiones oculares. La energía láser es absorbida a un nivel molecular y convertida en calor que luego se disipa sin riesgo alguno. No hay riesgos de reflexión nocivos creados por los filtros y no importa el ángulo de incidencia en que el haz alcanza al filtro, no hay pérdida de protección porque la energía láser es totalmente absorbida por el filtro. Gracias a que la protección está integrada en todo el filtro, arañazos en la superficie no afectan a la protección. Los filtros llevan una capa de recubrimiento superficial por ambos lados para proteger contra arañazos asegurando así una larga duración.

El material idóneo para las lentes es policarbonato ya que ofrece poco peso y buena resistencia contra impactos. Siendo de policarbonato no se astillarán durante o después de una exposición a un haz láser, o por una caída accidental. Los protectores laterales han de tener el mismo grado de protección que el filtro y es importante que las gafas proporcionen un amplio campo de visión. El confort es otro aspecto fundamental a tener en cuenta a la hora de seleccionar unas gafas de protección. Deben ser de peso ligero y proporcionar una ventilación óptima.

Existen gafas de protección de policarbonato que llevan incorporado un sistema de alerta audiovisual. (AVAS, Audio Visual Alert System) Si un filtro es alcanzado directamente o por un haz reflejado, este sistema alerta al usuario que el filtro está siendo impactado por el haz. Con este sistema, cuando un haz de un láser de alta potencia alcanza el filtro, suena un avisador acústico seguido por un oscurecimiento visual del filtro en el punto del contacto con el haz. Esto alerta al usuario de que debe abandonar la trayectoria del mismo.

9.3-SEGURIDAD EN LA UTILIZACIÓN DE GASES LICUADOS A BAJA TEMPERATURA

La legislación vigente especifica la necesidad de realizar una evaluación de riesgos en los puestos de trabajo y establecer un plan de prevención para reducir dichos riesgos (Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales y Real Decreto 773/1997 sobre utilización de equipos de protección individual).

Esta legislación supone el marco de referencia para todas las actuaciones encaminadas a proteger a los trabajadores de los riesgos derivados de sus actividades profesionales.

La legislación exige que la empresa proporcione información y organice cursos de formación sobre el uso correcto de los equipos de protección personal, por lo que se hace necesario la implantación y desarrollo de este tipo de cursos.

9.3.1-Riesgos en la utilización de gases licuados a baja temperatura

Existen dos tipos de riesgos claramente diferenciados en la utilización de gases licuados a baja temperatura, los derivados de las características físico-químicas de cada gas, algunos recogidos en diferentes Notas Técnicas, y un segundo grupo derivado de la baja temperatura de utilización lo que se traduce en lo siguiente:

- *Quemaduras por contacto directo con el gas licuado o sus vapores a baja temperatura*, que pueden tener origen en escapes, proyecciones o ebullición del gas. Téngase en cuenta que, el nitrógeno por ejemplo, se encuentra a una temperatura de -196 °C cuando esta en ebullición a la presión de una atmósfera.

Las quemaduras que se producen tienen efectos semejantes a las producidas por el calor, si bien presentan una apariencia poco espectacular y poco inquietante al principio, ya que los

tejidos helados son poco dolorosos, presentando un aspecto amarillento. Cuando posteriormente se deshuelan se vuelven muy dolorosos y propensos a la infección.

En general hay que decir que las quemaduras que se producen tienen una gravedad que depende de la temperatura y del tiempo de exposición. Por otra parte, el gas licuado tiene tendencia a infiltrarse bajo los vestidos, y al acumularse en ellos, aumenta el tiempo de contacto con la piel, extendiéndose la superficie quemada.

- *Quemaduras por contacto con equipos, canalizaciones, etc.*, en los que es corriente que se forme hielo y que si bien en la superficie puede tener una temperatura próxima a 0 ° C a medida que se profundiza, desciende notablemente. Si por alguna circunstancia se desprende la capa superficial y se produce el contacto directo de alguna parte del cuerpo.

- *Lesiones pulmonares* al respirar gas muy frío procedente de la vaporización del gas licuado.

- *Fragilización de materiales.* Al contacto con el gas a muy baja temperatura, el acero dulce, aluminio, hormigón, etc., sufren una fragilización disminuyendo considerablemente su resistencia, dando lugar a la aparición de grietas en chapas, estructuras, etc., con el peligro de rotura o desmoronamiento.

- *Los escapes de gases licuados a baja temperatura* hacen condensar el vapor de agua que se encuentra en el aire, dando lugar a la formación de una nube densa, muy fría y pesada que se estanca en las proximidades del suelo. Esta nube puede ser muy peligrosa en la medida que no se conoce su temperatura, composición, además de permitir muy poca visibilidad en su interior, lo que puede ocasionar la caída en charcos a muy baja temperatura.

- *La vaporización de un gas licuado* ocasiona un gran volumen de gas desplazando el aire y ocasionado riesgo de asfixia. Por ejemplo, la vaporización de un litro de nitrógeno líquido, a 15 ° C y 1 atmósfera, produce 691 litros de gas nitrógeno.

9.3.2-Medidas preventivas a tener en cuenta en la utilización de gases licuados a baja temperatura.

La utilización segura de gases licuados a baja temperatura requiere conocer y aprovechar sus características específicas, y en particular se ha de tener en cuenta lo siguiente:

- Utilizar exclusivamente recipientes concebidos e identificados para el gas que sé este utilizando; Estos recipientes pueden variar según sea la utilización desde pequeñas unidades tipo Dewar a depósitos especiales de almacenaje con vaporizador.

- Dado que en condiciones ambientales los gases licuados se encuentran en ebullición, al rellenar recipientes abiertos que se encuentran a dicha temperatura, se utilizarán prendas de protección adecuada para cara y manos.

Estas consideraciones deberán tenerse también en cuenta cuando la aplicación del gas licuado implique el sumergir piezas, objetos, etc., en ellos, y que se encuentre a la temperatura ambiental, como por ejemplo en zunchado.

- Como medida genérica para evitar el contacto con gas licuado a baja temperatura, se utilizará protección personal y ropa adecuada. Esta última será de fibra natural y estará seca y limpia de grasa, téngase en cuenta que si el gas es por ejemplo oxígeno den vez de nitrógeno, si entra en contacto con la grasa, esta puede entrar espontáneamente en combustión.

- En ningún caso se utilizará ropa ceñida, al objeto de poder quitarse rápidamente en el caso de ser alcanzado por el líquido.

Se prohibirá expresamente el uso de ropa con bolsillos abiertos, mangas remangadas o pantalones con dobleces, por ser lugares donde puede quedar retenido fácilmente el líquido.

- Se evitará la posibilidad que el gas licuado a baja temperatura, quede atrapado entre dos válvulas de la instalación, para lo cual se deberá disponer dispositivos de descarga de presión, como colocar válvulas de escape en nuestro caso. Aun con el mejor aislamiento estos gases acaban vaporizándose y por lo tanto generando elevadas presiones en los

elementos que lo contengan, por ejemplo tuberías, con el consiguiente riesgo de explosión. Los recipientes, tuberías, etc., que contengan gases licuados a baja temperatura, estarán exentos de humedad al introducirse en ellos el gas, ya que su baja temperatura ocasionaría la formación de hielo y el consiguiente riesgo de mal funcionamiento de elementos tales como manómetros, válvulas de seguridad, etc.

- Se debe dar particular importancia a la contracción que presentan todos los materiales al descender su temperatura, y que depende no solamente de esta última, sino de las características de cada material. El empleo de materiales con distintos coeficientes de dilatación puede hacer que se produzcan roturas, fugas, etc., en elementos tales como bridas, acoplamientos, conexiones roscadas, etc.

- Si en la instalación de gas licuado a baja temperatura se observa la formación de una nube densa en la proximidad del suelo, se deberá sospechar de la existencia de un escape de gas, ya que la mezcla del gas con el aire condensa la humedad atmosférica. Téngase en cuenta que en muchas ocasiones la formación de dicha nube es el primer síntoma de un escape. Si la fuga es muy extensa restara visibilidad, además de modificar la composición de la atmósfera y ser fría; jamás penetrar en dicha niebla y estar al tanto de su evolución.

Solamente personas adiestradas y con equipos adecuados, podrán actuar en dicha nube en el cumplimiento de un Plan de Emergencia previamente establecido.

Cuando se ha producido un escape de gas en las proximidades de sótanos, semisótanos, pozos, etc., una vez eliminado el escape, se deberá contar con la posibilidad que el gas se haya quedado retenido en esos lugares y modificado la atmósfera o desplazado el aire, por lo que antes de entrar en ellos se deberá comprobar la misma, mediante mediciones oportunas. Sin embargo nuestra instalación carece de sótanos, pozos etc. luego no se tendrá en cuenta.

- Todas las personas que deban de trabajar con estos gases deberán ser formados e informados adecuadamente, así como asegurarse de que poseen el suficiente adiestramiento.

9.3.3- Actuación en el caso de contacto con un gas licuado a baja temperatura

Se indica a continuación los primeros auxilios que se deben proporcionar a una persona que ha entrado en contacto con dicho gas, si bien se ha de tener en cuenta que serán los criterios de la atención médica los que prevalecerán en todo momento.

- Se le aflojarán las prendas de vestir y los sectores de la piel que han sido afectados se rociarán con abundante agua templada. Jamás se utilizará agua caliente o cualquier otra forma de calor directo, ya que temperaturas superiores a 42 ° C causarían quemaduras adicionales. Por otra parte hay que tener en cuenta que los vestidos han podido quedar adheridos a la piel debido a la congelación de la humedad, por lo que tratar de quitarlos tirando, vendría a agravar las lesiones.

- Si debido a la exposición a la baja temperatura, la temperatura de todo el cuerpo ha descendido, será necesario calentar al accidentado, siendo deseable el sumergirlo en un baño de agua a una temperatura comprendida entre 40 y 42 ° C, y mantenerla como mínimo a 40 ° C para que el calentamiento se efectúe lo mas rápidamente posible. Esta operación se deberá efectuar bajo control médico, por lo que sí se está en espera de su presencia, se llevará al accidentado a una habitación con una temperatura de unos 22 °C y se le tapaná con mantas de lana.

Hay que tener en cuenta que durante el calentamiento se puede producir shock y volverse muy dolorosas las quemaduras.

- Se dispondrá el traslado del accidentado a un centro hospitalario adecuado, que disponga de Unidad de Quemados.

9.4-SEGURIDAD EN EL MANEJO DE BOTELLAS DE NITRÓGENO

9.4.1-Identificación del producto

- Nombre Químico; Clase: Nitrógeno
- Nombre de familia química: Gas inerte
- Fórmula: N₂

9.4.2- Identificación del peligro

El Nitrógeno es un gas incoloro, que no tiene olor. El peligro primordial a la salud asociado con escapes de este gas es asfixia por desplazamiento de oxígeno.

La ruta más significativa de sobre exposición a Nitrógeno es por inhalación. Por lo tanto el órgano que se ve afectado es el sistema respiratorio.

Según el grado de concentración de Oxígeno que va quedando en el medio por desplazamiento de éste por nitrógeno, se generan diversos síntomas a la exposición:

- 12-16% Oxígeno: Respiración y grados del pulso aumentan, coordinación muscular es ligeramente alterada.
- 10-14% Oxígeno: Desajuste emocional, fatiga anormal, respiración perturbada.
- 6-10% Oxígeno: Nausea y vómito, colapso o pérdida de conocimiento.
- Por debajo 6%: Movimientos convulsivos, colapso de la respiración es posible y muerte.

9.4.3-Medidas de primeros auxilios

Las víctimas que han sido expuestas a éste producto, pueden ser rescatadas por los auxiliadores sólo si éstos llevan consigo una protección personal adecuada. Como mínimo un aparato de respiración autosuficiente debe de ser usado.

La víctima tras haber sido sometida a una fuerte exposición de gas es conveniente que tome aire fresco, lo más pronto posible. El personal profesionalmente entrenado es el que solo debe suministrar ayuda médica, como la resucitación cardio-pulmonar y /o oxígeno suplemental, si es necesario.

Por último la víctima que ha sido reconocida debe de llevar una etiqueta, que suministre la máxima información al médico o a la ayuda profesional para conseguir una más rápida atención médica.

9.4.4-Prevención contra incendios

La prevención contra incendios se hace estudiando el tetraedro de la ignición.

Las técnicas de prevención van encaminadas en actuar sobre algunos de éstos vértices: combustible, comburente, foco de ignición y velocidad de reacción.

Sin embargo, existen muy bajos riesgos de incendio y de explosión trabajando con botellas de nitrógeno gas. El nitrógeno no arde, aunque los envases cuando son expuestos a incendios, pueden romperse o estallar con el calor del fuego.

Los parámetros característicos del nitrógeno, para determinar su grado de peligrosidad son:

Límites de inflamabilidad (% de volumen en el aire):

Inferior (LII): No tiene.

Superior (LSI): No tiene.

Punto de inflamación: No tiene, ya que nunca se va a alcanzar el LII.

Temperatura de autoignición: No tiene, el nitrógeno no arde.

Materiales extintores de incendios:

Se usarán extintores de fuegos apropiados para fuegos causados por calentamiento de equipos o chispas eléctricas en las cercanías.

Se usará un agente extintor compatible con los gases almacenados con un mínimo de dos extintores, cada uno con una eficacia mínima de 89B (Según UNE 23110). Se situarán en lugares fácilmente accesibles.

9.4.5- En caso de un derrame accidental

Respuesta ante un escape: Ante un escape se evacuará el área inmediatamente. Los escapes sin control deben ser respondidos por personal profesionalmente entrenado usando un procedimiento establecido previamente y un equipo protector adecuado.

En caso de un escape, se despejará el área afectada, se protegerá al personal, se eliminarán las fuentes de ignición (en nuestro caso el nitrógeno no arde), y se responderá con personal entrenado.

Equipo de protección personal mínimo debe ser de Nivel B: Con aparato de respiración autosuficiente. Se localiza y sella la fuente del escape antes de entrar al área. Permita que el gas, el cual es más liviano que el aire que se disipe. También es necesario monitorear los alrededores para el nivel de oxígeno.

La atmósfera debe tener por lo menos 19.5% de oxígeno antes de dejar al personal dentro del área sin un aparato de respiración autosuficiente.

Si hay un escape incidental en el cilindro o su válvula, se pondrá en contacto con su proveedor.

9.4.6-Manejo y uso

a) Almacenamiento y prácticas de uso:

- Los cilindros deben ser almacenados erguidos (y con la tapa protectora de la válvula puesta) y firmemente sujetos para prevenir que se caigan o se tropiece.

Los cilindros pueden ser almacenados al descubierto, pero en tal caso, deben ser protegidos contra la intemperie y de la humedad.

- Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas y bien ventiladas alejadas de fuentes de calor, ignición y de la luz solar directa. El área se mantendrá limpia de materiales que se quemen. Se prohíbe que la temperatura del almacén de los cilindros exceda de 50 ° C.

- Serán almacenados, lejos de área con mucho tráfico y de salidas de emergencia. Así como lejos de áreas de procesamiento y de producción, alejado de ascensores, y de salidas de edificio y de cuartos y de pasillos principales que lleven a salidas. Se protegerán los cilindros contra daño físico

- Se colocarán válvulas de seguridad o trampas en la línea de descarga para prevenir reflujos peligrosos hacia el cilindro. Queda prohibido que se manipulen indebidamente los dispositivos de escape de emergencia y los cilindros.

- Los cilindros llenos y vacíos deben ser separados. Se usa un sistema de inventario que utilice el primero que llega, que será el primero que sale, para prevenir que los envases llenos sean almacenados por largo periodo.

b) Manejo de cilindros con gas:

Los gases comprimidos pueden presentar un peligro significativo. Las siguientes reglas se aplican en situaciones de trabajo en las cuales los cilindros de gases están en continuo uso.

Antes de Uso:

- Los cilindros se moverán con un carrito de mano apropiado. Se evitará el arrastre o deslizamiento de los mismos.
- Se evitarán caídas de los cilindros accidentalmente, ni dejar que tropiecen unos contra otros. Para ello se sujetarán los cilindros firmemente.
- Se deja la tapa protectora en posición (cuando sea proveída) hasta que el cilindro esté listo para usarse.

c) Durante su Uso:

- Queda prohibido el calentamiento del cilindro de ninguna manera, para aumentar el grado de descarga del producto en el cilindro.
- No se usará aceite o grasa en los ajustadores o en el equipo de manejo de gas.
- Se llevará a cabo Inspecciones del sistema para escapes, usando una solución para detectar escapes, nunca con una llama.
- Si se tienen problemas operando con las válvulas del cilindro. Póngase en contacto inmediatamente con el suplidor

- Jamás se encajará un objeto (por ejemplo alicate, destornillador, palanca, etc.) en las aberturas de la tapa de la válvula. Esto puede dañar la válvula, causando un escape.

- Se usará un alicate ajustable para quitar las tapas apretadas o enmohecidas. Nunca se pondrá el cilindro como parte de un circuito eléctrico.

d) Después de Uso:

- Se cerrará la válvula principal del cilindro.

- Se cerrará firmemente las válvulas.

- Se colocará de nuevo la tapa protectora de la válvula y se marca los cilindros vacíos como "VACIO".

9.4.7- Controles de ventilación y protección personal.

Controles de ventilación:

La ventilación más adecuada es la ventilación local, porque previene la dispersión del producto hacia el área de trabajo al eliminarlo en su origen. Si es apropiado, se llevará a cabo la instalación de un equipo de monitoreo automático para detectar el nivel de oxígeno.

Protección personal:

- **Protección respiratoria:** Se mantendrá el nivel de oxígeno por encima de 19.5% en el área de trabajo.

Se hará uso de protección respiratoria si el nivel de oxígeno baja por debajo de 19.5% o durante emergencias de escapes de Nitrógeno.

- **Protección para los ojos:** gafas de seguridad.

- **Protección para las manos:** se usan guantes cuando se trabaja con cilindros de Nitrógeno. Los guantes serán apropiados para la operación específica para la cual se va a usar Nitrógeno

- **Protección para el cuerpo:** Se usará una determinada protección corporal de acuerdo a lo que vaya a hacer. Se recomienda el uso de zapatos de seguridad cuando trabaje con cilindros.

9.5-SEGURIDAD EN EL DESALOJO DEL POLVO DE CARBONO DE LOS CICLONES:

Los trabajadores que participan en el desalojo del polvo de carbono proveniente de la sublimación de la fibra de carbono al realizar las perforaciones han de seguir ciertas instrucciones acerca de la salud y la seguridad.

Peligro al que se exponen los trabajadores:

El aire contaminado de polvo puede causar el asma o la bronquitis u otro problema respiratorio como tener problemas y dificultad al respirar. Cualquier polvo puede causar irritación a los ojos. Algunos polvos pueden causar reacciones alergias de piel.

Las partículas y polvo ejercen su acción dependiendo de su naturaleza y tamaño; Aquella de tamaño mayor de 5 micras, se retiene en el tramo superior y son generalmente irritantes.

En caso de escape accidental: La evacuación del polvo debe de hacerse de tal manera que no se levante el polvo en el aire. El mojar el polvo con agua antes de recogerlo evitará que se levante y se suspenda en el aire y taparlos con plásticos o telas para evitar la dispersión.

Equipo de protección personal

Adicionalmente habrá que conocer el límite de exposición de la sustancia. Para un gran número de sustancias químicas se definen los límites de exposición ocupacionales o TLV, que representan la concentración a la que se puede estar expuesto en el lugar de trabajo sin riesgo de sufrir efectos adversos sobre la salud.

El paso siguiente será medir la concentración real del contaminante o mezcla de contaminantes en el lugar de trabajo.

La selección del equipo depende de la concentración en el lugar de trabajo, y de cuantas veces esta concentración supera el límite de exposición ocupacional o TLV.

Si se supera el valor límite de exposición, los trabajadores deberán hacer uso de máscaras.

Sin embargo las gafas se deben llevar durante toda la operación de trabajo para protegerse contra el polvo irritante así como ropa protectora que se pueda lavar y guardar por separado para prevenir contaminación.

En algunos casos pueden utilizarse también equipos filtrantes de ventilación asistida o equipos motorizados que ofrecen niveles de protección similares o, en algunos casos, incluso mayores.

9.5-MEDIO AMBIENTE

El proceso tan sólo emite al medio ambiente N₂ gaseoso.

Según la información ecológica de la hoja de seguridad del nitrógeno, la dispersión del gas al medio no provoca ninguna inestabilidad ambiental, ya que el nitrógeno ocurre naturalmente en la atmósfera. Tampoco se anticipa ningún efecto adverso en animales o en la vida de las plantas, ni efecto químico sobre la vida acuática.

Cualquier efecto adverso estaría relacionado con ambientes deficientes en oxígeno.

Según el decreto 833/1975, de 6 de febrero, por el que se desarrolla la ley 38\1972, del 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico, se recoge las líneas generales para prevenir, vigilar y corregir las situaciones de contaminación atmosférica. En el anexo III del capítulo 2 de dicho decreto, se nombra la relación de los principales contaminantes de la atmósfera. La legislación no recoge al nitrógeno gaseoso, quedando descartada su participación en la contaminación atmosférica.

10. ESTUDIO ECONÓMICO.

En éste capítulo se contabilizará la inversión de capital y los costes de operación del sistema de aspiración y refrigeración acoplado a la herramienta.

Se demostrará que la implantación de la nueva tecnología de perforación por corte láser beneficia a la Industria aeronáutica, sustituyendo al sistema de perforación por taladrado mediante brocas.

El estudio económico tendrá lugar de la siguiente manera:

10.1 INVERSIÓN DE CAPITAL

10.1.1 Costes directos:

Los costes directos es la inversión de capital precisa, para comprar los distintos elementos de los que consta el sistema. Los costes directos del sistema total se dividen en: Los costes correspondientes al sistema criogénico, al sistema de vacío, a las conducciones y al sistema de instrumentación y control.

A continuación se muestra la tabla con los costes totales directos. (Ver. Presupuesto. Cáp. 5. Costes directos de la planta):

COSTES DIRECTOS DEL SISTEMA.

| <i>Concepto</i> | <i>Capital estimado</i> |
|----------------------------|-------------------------|
| Sistema óptico | 48597€ |
| Sistema de vacío | 5882€ |
| Costes de las conducciones | 6767'15€ |
| Instrumentación y control | 850'97€ |
| TOTAL: 62097.12€ | |

10.1.2 Costes de operación

Los costes de operación se pueden dividir en:

1. Costes de materias primas.
2. Mantenimiento y mano de obra.
3. Electricidad.

Costes de materias primas.

Se tomará como base de cálculo los gastos de producción que tienen lugar en un año.

El equipo está diseñado para trabajar en continuo, por lo que trabaja por turnos de 8 horas.

La cantidad de materia prima gastada en un año será básicamente la cantidad de N₂(l) gastado durante el corte de la fibra de carbono.

-Cantidad de N₂(l) que es impulsado proveniente del Dewar.

Entonces el volumen de N₂(l) en un año: $2'7405 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 320\text{h} \cdot 3600\text{s/h} = 3'120 \text{ m}^3 = 3120 \text{ l}$

Sabiendo que el caudal volumétrico de nitrógeno líquido requerido es de $2'65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, el volumen de nitrógeno líquido requerido por turno es de:

$$2.65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 8\text{h} \cdot \frac{3600}{1\text{h}} \text{ s} = 0.763 \text{ m}^3$$

En un año se gasta por lo tanto: 278.5 m^3

-Cantidad de N₂(l) que se utiliza para el enfriamiento de la tubería de teflón.

El tiempo de enfriamiento es el tiempo de tránsito desde el Dewar a la boquilla y que toma un valor de 1 minuto. (Ver. Memoria de Cálculo. Cáp. 23). Si el caudal de nitrógeno líquido a través de la tubería de teflón era de $2'65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, entonces, para enfriar la tubería durante un año sería de:

$$2.65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 60\text{s} / \text{dia} \cdot 365\text{días} = 58.04 \text{ m}^3$$

Total de N2(l) = 278.5 + 58.04 = 336.54 m3/año

El precio del N2 5€ / m3, entonces los costes totales de materia prima es de: 1682.68 €

2. Mantenimiento y mano de obra.

Los costes de mantenimiento constituyen aproximadamente un 5% de los costes totales directos.

Costes de mantenimiento = 0'05 x 62097.12€ = 3104.9

3. Energía eléctrica

El consumo principal de energía del sistema proviene de la potencia de la bomba de vacío. No obstante el sistema tendrá otros requerimientos de energía debido al consumo por instalaciones ajenas al equipo.(Caseta de vacío, sala de control etc)

Se elige la tarifa eléctrica básica tipo 4.0, en periodo de horario llano, zona 4, donde la compañía ni recarga ni descuenta.

Facturación de potencia:

Potencia del generador láser:.....30 KW
Potencia de la bomba..... 0'90 Kw
Tarifa 4.0..... 2'15 €/kwh y mes
(30 KW+0.9 KW)*2.15 €/kwh *8 h = 531€/ día
En un año se gasta aproximadamente 194*10³ €

Facturación de la energía: Se supone que el contador es de propiedad de la empresa y por lo tanto no se tiene en cuenta los costes de alquiler.

Término energía..... 0'07 €/Kwh
Consumo de energía medida por el contador.....1'045Kwh bimestral
0'07 €/kwh . 1'045 Kwh .6.8 =3'512 € /año

| | |
|----------------------------|---------|
| I. V. A 16%(3'512 €)..... | 0'562 € |
| TOTAL | 4'074 € |

10.1.3 Salarios

| | |
|----------------------------|---------|
| Operarios..... | 3 |
| Personal sala control..... | 1 |
| Salario medio anual..... | 24000 € |
| COSTE ANUAL..... | 96000 € |

10.2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

La operación de recantado de la fibra de carbono se lleva a cabo en la industria aeronáutica haciendo uso de pistolas neumáticas con brocas especialmente diseñadas para esta operación.

Se pretende sustituir este procedimiento por un sistema de recantado por láser y criomecanizado. (Ver. Memoria descriptiva. Cáp. 5).

Las ventajas que supone llevar a cabo el recantado por corte mediante láser son:

- El tiempo medio en llevar a cabo una perforación mediante pistolas neumáticas es de 8 segundos, mientras que el tiempo medio en realizar una perforación mediante láser es de 2 segundos. Es decir se reduciría cuatro veces el tiempo de perforación mediante la implantación del corte por láser.
- El número de operarios que se necesitan para el acabado del estabilizador mediante perforación por pistolas neumáticas es una media de 10 operarios, mientras que mediante la nueva tecnología de corte por láser se necesitarían contratar una media de 4 operarios.
- Las brocas permiten realizar la operación de taladrado para las industrias en un tiempo rentable y con una muy alta precisión. Sin embargo plantean una serie de inconvenientes como es el alto coste de estas pistolas, su elevado desgaste así como dificultad de perforar estructuras sándwich de fibra de carbono /materiales metálicos (titanio y aluminio).

A todo esto hay que añadir que una de cada diez brocas queda inutilizable durante el proceso operativo debido a cualquier incidente relacionado con una errónea manipulación del útil.

Esto implican aumento de los costes indirectos, debido al alto precio de estas brocas del orden de 600 € /unidad.

La utilización de la nueva tecnología de corte por láser supone una optimización del proceso en los siguientes aspectos:

Reducción del tiempo de operación que implica un decremento del número de horas de trabajo por operario y como consecuencia una reducción de los costes totales.

Disminución de los costes ya que se contratan menor número de operarios.

Además la implantación de este sistema de perforado por láser y criomecanizado permitiría una reducción de gasto de material fungible necesario durante la operación perforado-escarillado-avellanado.

11. NORMATIVA.

La normativa aplicada en el proyecto es la siguiente:

- Norma sobre recipientes a presión ASME, sección VIII div.
- Norma sobre transporte gas líquido a baja y media presión, sección VIII div I.
- Norma UG-99 para la prueba hidrostática en recipientes sometidos a presión, vacío o vacío parcial.
- Norma UG- 100 para prueba neumática en recipientes sometidos a presión, vacío o vacío parcial.
- Norma sobre agentes extintores, UNE 23110.
- Ley 38 / 1972, de 22 de diciembre, de protección del ambiente atmosférico (las emisiones a la atmósfera quedan excluidas de la ley 10/ 1988 de 21 de abril de residuos, por el art2. numeral 1 apartado a, remitiendo a la ley 38/1972).
- Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales y Real Decreto 773/1997 sobre utilización de equipos de protección individual.
- Ley 50/ 1998, de 30 de diciembre, de medida fiscales, administrativas y del orden social (Modf. De la ley de Prevención de riesgos laborales, artículos 45, 47, 48 y 49)

Además de la normativa expuesta, también es aplicable durante la ejecución de las tareas de fabricación y montaje también serán aplicables las últimas leyes citadas en el pliego de condiciones.

12. BIBLIOGRAFÍA

- “The laser adventure” www.um.es/LEQ/Láser/index.htm.
- “El láser y sus aplicaciones” Enrique F. Hita Villaverde.
- “Riesgos en la utilización de gases licuados a baja temperatura”. www.mtas.es/insht.
- “Equipos criogénicos”. [www. Criogen.com](http://www.Criogen.com)
- “Equipos criogénicos”. www.Airlíquide.com.
- “Centro de aplicaciones del láser y metalurgia. LGAI. Centro tecnológico. www.lgai.es.
- “Manual de recipientes a presión. Diseño y cálculo.” Megysey, EF.Edit. Limusa, Grupo Noriega Editores. Quinta reimpresión. México, 1999.
- “Perry’s Chemical Engineer Handbook”. Edit. McGraw-Hill. Chemical Engineering series.
- “Transferencia de Calor”. Holaman J, P. Edit McGraw-Hill. Octava edición (primera español) Madrid, 1998.
- “Transmisión de calor” Alan J. Chapman 3ª edición): cálculo del número de Nusselt
- “Propiedades del acero inoxidable
- [http:// www.efunda.com/materials/alloys/stainless-steels](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless-steels).
- “Materiales plásticos para tuberías”, <http://www.cepla.com/center/8/8.html>
- “Tipos de tuberías”, www.goodfellow.com
- “Material properties: Polyurethane”.
- [http:// cryogenics.nist.gov/NewFiles/Poliurethane.html](http://cryogenics.nist.gov/NewFiles/Poliurethane.html)
- “Selección del aislante térmico. Instalaciones especiales Rodgar” Miguel A. García C. Ingeniero de servicio.
- “Fundamentals of vacuum techniques” A.PIPRO, V. Piskowsky.B.Korolev.V.Kuznetsev.
- “flow of fluid through valves, fittings, and pipes. Crane co.Chicago”. Gráfica de Moody del libro de CRANE (Engineering División) (1965)”
- “Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas” segunda edición, Claudio Mataix.
- “Normas de dibujo”. Manual 2 DIN. 4ª Edición española de la 4ª edición alemana, traducción autorizada por el comité de Normas Alemán (DNA) Edit. Balzola. Bilbao 1969.

MEMORIA DE CÁLCULO.

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

**“Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica”**

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

| | |
|---|----------|
| MEMORIA DE CÁLCULO | 2 |
| 1.- Cálculo de la zona afectada por el calor (ZAC)..... | 2 |
| 2.- Componentes del sistema óptico: lentes y espejos..... | 10 |
| 3.- Cálculo de la divergencia del haz..... | 16 |
| 4.-Cálculo del sistema de enfoque..... | 25 |
| 5.-Cálculo de las aberraciones de las lentes del sistema..... | 28 |
| 6.- Cálculo de la sección de la boquilla..... | 33 |
| 7.-Diseño de la tubería de teflón..... | 43 |
| 8.- Cálculo de la presión de trabajo de la botella de nitrógeno..... | 58 |
| 9.-Cálculo del volumen de Dewar necesario..... | 64 |
| 10.- Cálculo del número de botellas que necesita el equipo..... | 65 |
| 11Cálculo del tiempo de enfriamiento y de tránsito del nitrógeno líquido de la tubería de teflón..... | 66 |
| 12.- sedimentación del polvo de carbono..... | 68 |
| 13.- Cálculo de la presión de absorción en la boquilla..... | 80 |
| 14.-Cálculo de la densidad del fluido..... | 91 |
| 15.- Cálculo del espesor del ciclón..... | 93 |

1. CÁLCULO DE LA ZONA AFECTADA POR EL CALOR (ZAC).

1. Introducción:

El mecanizado de los plásticos reforzados con fibra (FRP) difiere significativamente del mecanizado de metales convencionales. En éste, el comportamiento del material depende de las propiedades de la fibra y la matriz, orientación de las fibras y el volumen relativo entre la fibra y la matriz. La herramienta se encuentra alternativamente matriz y fibra, cuya respuesta al mecanizado varía mucho. Por ejemplo, en un material compuesto epoxy-fibra de vidrio, la herramienta se encuentra a baja temperatura una matriz epoxy blanda y frágiles fibras de vidrio. Es esta variación de los requerimientos del corte lo que hace que el material compuesto sea difícil de mecanizar.

A la vista de un alto desgaste de herramienta y, por lo tanto, un alto coste de la misma, un proceso que no necesita contacto como el mecanizado por láser ofrece una atractiva alternativa. Puede también minimizar la producción polvo y ruido, la deformación extensiva de plástico y consecuentemente, la generación de calor con mecanizado convencional de compuestos FRP. El mecanizado por láser está basado en la interacción del material de trabajo con un rayo de luz de alta intensidad direccional y coherencia monocromática. El material es trasladado principalmente por fusión y evaporación. En el caso de una resina (matriz) también puede ser eliminada por degradación química.

El mecanizado láser es un proceso térmico, cuando un rayo láser afecta al material de trabajo, surgen varios efectos, incluyendo reflexión, absorción y conducción de calor dentro del material.

La cantidad total del rayo que es reflejado depende de la longitud de onda de la radiación láser y las condiciones y propiedades del material de trabajo, como la rugosidad, grado de oxidación y temperatura, mientras que la absorción depende de las propiedades ópticas y termoquímicas del material.

1.1 Tipos de láseres:

Hay dos láseres usados comúnmente en la industria de hoy. Son el de CO₂ y el de Nd-YAG, el primero es un láser de gas y el último es un láser de estado sólido.

El láser de CO₂ tiende a tener más potencia (por encima de los 15 KW) y son usados en continuo o en pulsos. Los láseres YAG son usados en modo pulsado y pueden alcanzar un pico de potencia de 7-10 KW, aunque su potencia media es de 400 w. El uso de estos láseres en modo pulsado es posible por la refrigeración del material que se lleva a cabo durante el intervalo de tiempo entre los pulsos.

La longitud de onda de luz son algo distintos; los de CO₂ tienen una longitud de onda de 10.6 μm y los YAG de 1.06 μm. La longitud de onda del láser YAG es transparente al cristal, así que no es un candidato ideal para el corte de la fibra de vidrio.

El tipo de láser usado para el mecanizado de un FRP dado depende de las propiedades del material y de las siguientes características del rayo:

- ⇒ densidad de potencia;
- ⇒ longitud de onda de emisión;
- ⇒ polarización del rayo,
- ⇒ coeficiente de absorción a la longitud de onda dada;
- ⇒ temperatura de fusión y evaporación del material.

Los requerimientos importantes del láser para mecanizado incluye adecuada disponibilidad de potencia en el trabajo, perfil de intensidad focal controlada, reproducibilidad, fiabilidad y gastos iniciales y corrientes.

Los beneficios del mecanizado láser incluyen el desgaste mínimo del material, tiempo mínimo de parada, no desgaste de la herramienta, baja distorsión global o daño en la zona, posibilidad de cortes paralelos, pueden generarse perfiles definidos independientemente de la dureza del material.

1.2 Problemas asociados con el corte láser de materiales compuestos:

Un material compuesto es aquél que contiene 2 o más fases químicamente distintas, que no están en equilibrio termodinámico. Las propiedades de las fases usadas en el material son por lo general, significativamente distintas, lo que hace que su mecanizado difícil.

Hay un amplio rango de temperatura a la cual los materiales se funden (o a menudo se descomponen). El rayo láser tiene una cierta potencia y por eso tiene un calor definido de entrada al material.

Sin embargo, a causa de las distintas propiedades de la fibra y la matriz, los dos componentes reaccionan de manera muy distinta a la entrada de calor. En general, la energía que se necesita para la vaporización de las fibras es mayor que la requerida por la matriz, esto es más notable cuando se cortan compuestos de fibra de carbono.

Las fibras de carbono son buenas conductoras de calor y mucha de la energía introducida en el corte es conducida a su través. La temperatura de disociación del carbono es también muy alta. Estos factores combinados hacen el corte del material reforzado por fibra muy difícil. Cuando el láser de CO₂ es empleado para cortar estos compuestos con fibras de alta conductividad, un gran volumen de resina es vaporizada en el proceso, causando delaminación y recesión de la matriz en el material compuesto.

Una limitación del corte láser es la zona afectada por el calor. Esta zona es resultado de la recesión de la matriz que ocurre cuando la matriz y las fibras son eliminadas a distintas velocidades, debido a sus distintas propiedades termofísicas.

La recesión de la matriz deja una zona de desprovista del material de la matriz.

Los láseres son capaces de alcanzar un alto grado de flexibilidad y bajos tiempos de procesado, a menudo a costa de la calidad de la pieza de trabajo. Debido a las dificultades inherentes para modelar la interacción entre el láser y el material compuesto, la mayoría de las investigaciones están basadas en experimentar más que en modelar.

2. Modelo matemático para el cálculo de la zona afectada por el calor:

Para calcular la extensión de la ZAC se va a utilizar un modelo desarrollado por Hocheng y Pan (C.T. Pan, H. Hocheng; Journal of Materials Processing Technology, 62 (1996) 54-60)

El modelo considera dos casos extremos:

- 1) El corte es paralelo al eje de las fibras de carbono.
- 2) El corte es perpendicular al eje de las fibras.

Vamos a calcular los dos valores y vamos a tomar como zona afectada por el calor el mayor de ambos, que es el peor de los casos, y se va a comprobar si cumple o no la condición de que sea menor de 700 micras.

Los datos de la fibra de carbono para llevar a cabo este modelo son:

| Material | Densidad, ρ (kg/m ³) | Calor específico, c (J/kgK) | Conductividad, k (W/(mK)) | Difusividad, α (m ² /s) |
|-------------------------------------|--|--------------------------------|--|--|
| Carbono | 1750 | 710 | 50 | 4.024*10 ⁻⁵ |
| Epoxi | 1370 | 1884 | 0.3 | 1.162*10 ⁻⁷ |
| Corte paralelo al eje de las fibras | | | | |
| | | | K ₁ = 25.1 | a ₁ = 1.296*10 ⁻⁵ |
| | | | K ₂ = 0.6 | a ₂ = 3.099*10 ⁻⁷ |
| | | | K ₃ = 0.6 | a ₃ = 3.099*10 ⁻⁷ |
| Carbono/Epoxi | 1530 | 1290 | Corte perpendicular al eje de las fibras | |
| | | | K ₁ = 0.6 | a ₁ = 3.099*10 ⁻⁷ |
| | | | K ₂ = 25.1 | a ₂ = 1.296*10 ⁻⁵ |
| | | | K ₃ = 0.6 | a ₃ = 3.099*10 ⁻⁷ |

| Material | Densidad (g/cm ³) | Conductividad (W/cm ² °C)/10 ⁻² | Calor específico (J/g°C) | Difusividad (cm ² /seg) | Temp. de vaporización (°C) | Calor de vaporización (J/g) |
|------------------|----------------------------------|--|-----------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Resina | 1.25 | 0.2 | 1.2 | 1.3 | 500 | 1000 |
| Fibra de aramida | 1.44 | 0.05 | 1.42 | 0.24 | 950 | 4000 |
| Fibra de carbono | 1.85 | 50 | 0.71 | 380 | 3300 | 43000 |
| Fibra de vidrio | 2.55 | 1 | 0.85 | 4.6 | 2300 | 31000 |

2.1 Cálculo de la zona afectada por el calor (ZAC)

Para la obtención de la ecuación final del modelo se parte de la expresión de conducción de calor en un sólido anisótropo, y los autores toman como consideraciones: el material cortado se mueve en la dirección del eje x, a una velocidad constante v; la conducción del calor en el material se produce en el frente de erosión; el material evaporado no interacciona con el haz del láser; el calor generado por la reacción de oxidación, así como la convección y la

radiación son términos despreciables. La expresión final utilizada para la determinación de perfiles de temperatura es la siguiente:

$$T - T_0 = \frac{\eta \cdot PQ}{4\pi(k_1 k_2 k_3)^{1/2} \left(\frac{x^2}{k_1} + \frac{y^2}{k_2} + \frac{z^2}{k_3} \right)^{-1/2}} \exp \left(- \frac{v\rho \cdot c \left(\left(\frac{x^2}{k_1} + \frac{y^2}{k_2} + \frac{z^2}{k_3} \right)^{-1/2} - \frac{x}{\sqrt{k_1}} \right)}{2\sqrt{k_1}} \right) \quad (1)$$

k_1, k_2, k_3 son las conductividades en las tres direcciones del espacio.

P es la potencia del láser

Q es la ganancia

V es la velocidad del corte

C es el calor específico

ρ es la densidad del material

η es la absorptividad del material

En la ecuación (1) se pueden hacer una serie de consideraciones:

- a) Transmisión de calor en el eje z despreciable, ya que se supone que el contacto térmico en esa dirección es nulo.
- b) El valor de la coordenada "x" será siempre 0, ya que es esa la dirección en la que se mueve el haz láser.
- c) Se toman como constantes los grupos siguientes:

$$\frac{PQ}{4\pi} = M; \left(\frac{v\rho \cdot c}{2} \right) = J$$

Con estas consideraciones, la expresión anterior toma la forma siguiente:

$$T - T_0 = \frac{\eta \cdot M}{y / \sqrt{k_1}} \exp \left(- \frac{J \cdot y}{\sqrt{k_1 k_2}} \right) \quad (2)$$

En nuestro caso, los parámetros de operación son los siguientes:

⇒ Láser CO₂, 2500 W, modo continuo.

⇒ Potencia : 2500 W

⇒ Velocidad de corte: 0.025 m/s

⇒ Gas de aporte: N₂

⇒ Presión del gas de aporte: 1 bar.

⇒ Temperatura de evaporación de la fibra de carbono: 3300K

⇒ Temperatura del Nitrógeno líquido: 77 K

Vamos a seguir un proceso iterativo para determinar la extensión de la ZAC en los dos casos que vimos antes: corte paralelo al eje de las fibras y corte perpendicular al eje de las mismas. Se dará valores a “y” y se calculará el incremento de temperatura. Después se comparará este valor con el que debemos obtener y si no es el mismo, se seguirá iterando.

Caso 1: Corte paralelo al eje de las fibras.

En este caso k_1 tiene de valor 25.1 y k_2 tiene de valor 0.6.

T: Temperatura de evaporización de la fibra de carbono =3300°C=3573 K

T₀: Temperatura exterior: en este caso es la temperatura del nitrógeno líquido; es decir 77K

Los grupos M y J, en este caso, son iguales a:

$$\frac{2500 \cdot 0.75}{4\pi} = M = 49.736 \Rightarrow \left(\frac{0.025 \cdot 1530 \cdot 1290}{2} \right) = J = 24671.25$$

Sustituyendo en la ecuación (2), se obtiene la siguiente expresión:

$$3573 - 77 = \frac{0.3 \cdot 49.736}{\frac{y}{\sqrt{25.1}}} \exp\left(-\frac{24671.25 \cdot y}{\sqrt{25.1 \cdot 0.6}}\right)$$

Se resumen los cálculos en la tabla siguiente:

| y | ΔT |
|----------|------------|
| 0,0001 | 15770,909 |
| 0,000125 | 10762,7253 |
| 0,00015 | 7650,97101 |
| 0,000175 | 5594,29432 |
| 0,0002 | 4175,69634 |
| 0,000225 | 3166,29906 |
| 0,000224 | 3200,71798 |
| 0,000214 | 3570,19088 |

Como vemos, el valor de la ZAC para el corte paralelos al eje de las fibras está entre 214 micras y 224. En ambos casos están muy por debajo del valor máximo permitido, con lo que es válido tomar como valor aproximado de la zona afectada por el calor 220 micras.

Caso 2: Corte perpendicular al eje de las fibras:

En este caso k_1 tiene de valor 0.6 y k_2 tiene de valor 25.1 y los grupos M y J, son iguales que en el caso anterior: $M=49.376$ y $J=24671.25$

Sustituyendo en la ecuación (2), se obtiene la siguiente expresión:

$$3573 - 77 = \frac{0.3 \cdot 49.736}{\frac{y}{\sqrt{0.6}}} \exp\left(-\frac{24671.25 \cdot y}{\sqrt{0.6 \cdot 25.1}}\right)$$

Se resumen los cálculos en la tabla siguiente:

| y | Resultado |
|----------|------------|
| 0,0001 | 102004,178 |
| 0,000125 | 69611,9009 |
| 0,00015 | 49485,4805 |
| 0,000175 | 36183,1645 |
| 0,0002 | 27007,8582 |
| 0,000225 | 20479,2085 |
| 0,00025 | 15722,8482 |
| 0,000275 | 12193,0985 |
| 0,0003 | 9534,56897 |
| 0,000325 | 7507,83125 |
| 0,00035 | 5947,10168 |
| 0,000375 | 4734,97495 |
| 0,0004 | 3786,73145 |
| 0,000404 | 47679,7992 |
| 0,000414 | 46528,1132 |
| 0,000424 | 45430,7521 |
| 0,000425 | 3040,26271 |

Como se puede ver, la zona afectada por el calor en el caso del corte perpendicular al eje de las fibras, está entre 424 y 425 micras. Se tomará como valor medio 424.5 micras.

Este valor, aún siendo mayor que en el caso del corte paralelo al eje de las fibras, es menor del máximo admitido.

Se va a tomar como valor de la zona afectada por el calor 424.5 micras, que es el que corresponde al corte perpendicular al eje de las fibras

Como se puede observar, este valor es mucho menor que el límite máximo exigido para la extensión de esta zona, 700 micras, luego el corte realizado por el láser y refrigerado con el nitrógeno líquido apenas daña la fibra de carbono.

2.- COMPONENTES DEL SISTEMA ÓPTICO: LENTES Y ESPEJOS

1. Introducción:

En este capítulo de la memoria se van a describir los elementos utilizados para diseñar el sistema óptico, tanto para refractar el haz láser y darle el tamaño deseado, como es el caso de las lentes, como de los espejos utilizados en el sistema óptico del láser para cambiar la dirección del haz. Primero se hará un breve resumen de las leyes fundamentales de la óptica geométrica y a continuación se verán las características de las lentes y los espejos en general y los utilizados industrialmente para el haz láser.

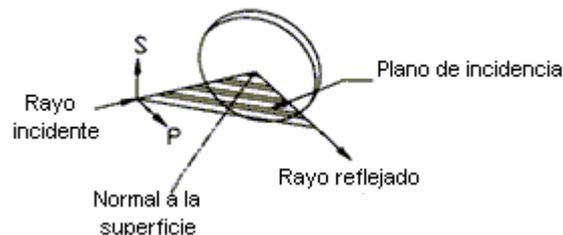
2. CONCEPTOS DE ÓPTICA GEOMÉTRICA PARAXIAL.

2.1 Leyes de la óptica geométrica:

Dos leyes muy importantes en la óptica geométrica son las llamadas leyes de Descartes: conservación del plano de incidencia y leyes de la reflexión y refracción.

Consideremos una superficie que separa dos medios de índices n y n' .

1. Las trayectorias en los medios homogéneos e isótropos son rectilíneas.
2. El rayo incidente, el refractado y la normal están en el mismo plano de incidencia.



3. Ley de la refracción: $n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$

Siendo ε y ε' el ángulo de incidencia y de salida de la luz en el espejo y n y n' los índices de los medios que separa el elemento óptico.

4. Ley de la reflexión: $\varepsilon = \varepsilon'$

2.2 Sistema óptico:

Denominamos sistema óptico a un conjunto de superficies que separan medios con índices de refracción diferentes. Si las superficies son de revolución, y sus centros están alineados, la recta que los une se denomina eje óptico. El punto emisor de donde salen los rayos se denomina objeto; el punto donde se juntan los rayos, una vez pasado el sistema óptico es la imagen. Si los rayos pasan físicamente por un punto se denomina real. El punto es virtual si llegan o salen las prolongaciones de los rayos. El conjunto de puntos objeto forma el espacio objeto mientras que el conjunto de puntos imagen conforma el espacio imagen.

2.3. Definición de óptica paraxial:

Muchas de las situaciones que se estudian en la óptica Geométrica presentan como particularidad que los ángulos con los cuales se trabaja son pequeños. Cuando se trabaja en estas condiciones se habla de óptica paraxial. En estos casos, la aproximación del seno o de la tangente del ángulo por su arco es válida:

$$\text{sen}(\varepsilon) \approx \varepsilon; \tan(\varepsilon) \approx \varepsilon$$

El sistema óptico del láser se va a tratar como un sistema paraxial.

2.4. Definición de condición de estigmatismo:

Un sistema se comporta estigmáticamente entre dos puntos cuando todos los rayos que salen de un punto objeto van a parar a un punto imagen (real o virtual).

Nuestro sistema óptico va a ser un sistema estigmático .

3. LENTES

La lente es el componente óptico más básico. Recoge luz de una fuente y la refracta de manera que obtenemos una imagen de la fuente que podemos utilizar la fuente puede producir luz por ella misma o puede ser un objeto iluminado.

Vamos a describir brevemente cómo trabaja una lente, con el fin de elegir las mejores para nuestro sistema óptico.

3.1. Tipos de lentes:

El término lente es aplicable a un número de configuraciones. La más básica es la lente simple, que es un sólo elemento. Las lentes compuestas consisten en grupo de elementos simples y las lentes complejas está hecha de un grupo múltiple de elementos.

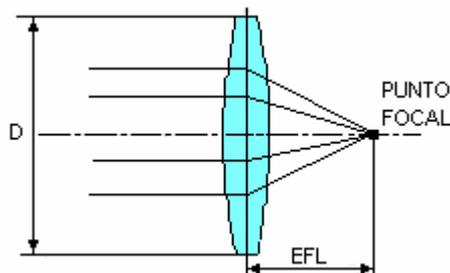
Nuestro sistema va a constar sólo de lentes simples, como se verá en los siguientes capítulos.

3.2. Características básicas de las lentes:

Para predecir cómo va a actuar la lente es necesario comprender ciertas características de las lentes.

3.2.1. Distancia focal efectiva:

La lente forma una imagen de la fuente en un punto en el cual está enfocado a una distancia apropiada. Si la fuente está lejos de la fuente, la lente intercepta esencialmente un número de rayos paralelos de la fuente y los refracta, conduciéndolos a todos al punto focal. La distancia entre el eje óptico de la lente hasta el punto focal



3.2.2. Velocidad de la lente:

La velocidad de la lente es un indicador muy útil del brillo de la imagen producida por una fuente que está lejos de la lente. La velocidad de la lente está expresada de la forma $F/\#$ que

es: $F/\# = \frac{EFL}{D}$ donde EFL es la distancia focal efectiva y D es el diámetro de la lente (D es

estrictamente el diámetro del rayo a la entrada de la lente cuando el objeto está en el infinito.

Para varias fuentes láser, la $F/\#$ efectiva está determinada por el diámetro del rayo láser más que por el diámetro de la lente.

4. ESPEJOS

El sistema óptico del láser cuenta con cinco espejos, uno está en línea con las lentes que controlan la divergencia, que se mueve con un carrito en la dirección horizontal, a fin de poder posicionar el haz allí donde se requiera.

Los otros cuatro están en el cabezal láser, permitiendo que el haz se mueva en las tres direcciones del espacio.

Vamos a determinar los espejos que necesitamos para el sistema, primero viendo sus propiedades y después los requerimientos del sistema.

4.1 Propiedades de los espejos:

El haz láser se va a dirigir a través del sistema óptico hasta la boquilla a través de espejos planos, debido a las características de los mismos, que se pueden resumir en estos cuatro puntos:

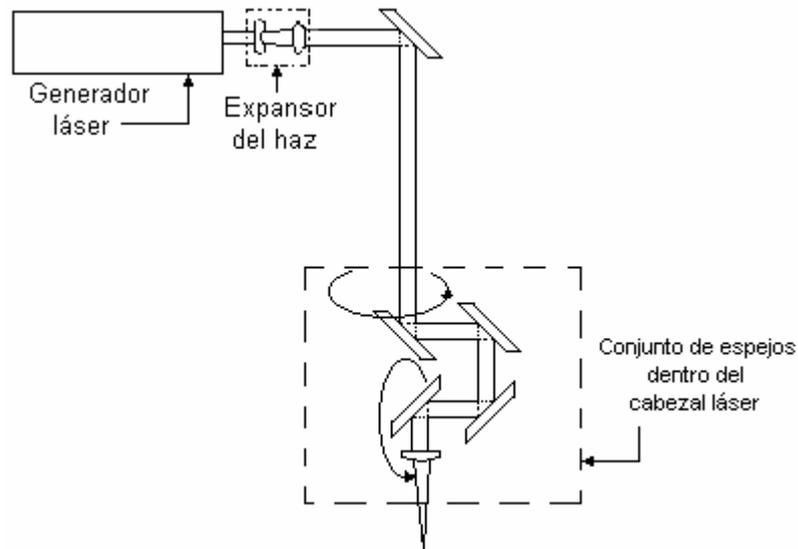
1. Al girar un espejo plano un ángulo dado, el rayo reflejado gira un ángulo doble en el mismo sentido, supuesto fijo el rayo incidente, es decir, con un espejo plano girado de 45° , el rayo reflejado gira 90° .
2. Cuando un espejo plano sufre una traslación, conservándose paralelo a sí mismo, la imagen de un objeto fijo se mueve en el mismo sentido a una distancia doble.
3. Si el rayo incidente gira un ángulo dado, el rayo reflejado gira el mismo ángulo en sentido contrario.
4. Por último, vemos que por analogía con la ley de refracción, la ley de la reflexión la podemos considerar como la misma ley en la que hemos hecho $n' = -n$ y por lo tanto. En este caso, $n = n'$ y la ley queda como: $\epsilon = \epsilon'$

4.2 Los espejos en el sistema óptico del láser:

Hay cinco espejos planos en el sistema óptico del láser. Uno está en línea con el generador láser y el conjunto de lentes que aumentan el tamaño del haz y tiene una inclinación de 45° , lo que produce un giro de 90° en la dirección del haz láser.

Los otros cuatro están en el cabezal de corte, también con una inclinación de 45° , pero éstos pueden girar en el plano, de manera que permitan el traslado del haz láser en las tres direcciones del espacio, para poder cortar la pieza de fibra de carbono con el perfil que se requiera en cada momento.

Un esquema de cómo están dispuestos los espejos es el siguiente:



Las características del espejo elegido vendrán dadas por las características del haz láser, como el tamaño o la longitud de onda.

4.3 Tipos de sustratos para los espejos.

4.3.1 Sustratos sin recubrimiento:

La reflectividad de una superficie sin recubrimiento depende de:

- El índice de refracción del material, que varía con la longitud de onda de la luz incidente.
- El ángulo de incidencia
- El estado de polarización de la luz incidente
- La uniformidad o pulimentado de la superficie.

Este rango de luz reflejada puede ir del 3% del fluoruro de calcio, hasta el 17% del seleniuro de cinc.

4.3.2. Sustratos con recubrimientos dieléctricos:

La reflectancia de una superficie con un recubrimiento dieléctrico depende de las propiedades ópticas tanto del recubrimiento como de sustrato. Los recubrimientos pueden estar diseñados para una alta reflectancia o para ser un reflector parcial. El rango de las longitudes de onda de los reflectores dieléctricos está limitado, no incluyendo la que nos interesa.

4.3.4. Reflectores metálicos:

Las superficies metálicas muy pulimentadas son excelentes superficies especulares. Los mejores reflectores están hechos depositando una delgada capa del metal en un sustrato pulido. Para las características del láser utilizado, los espejos que se van a utilizar en el sistema van a tener un recubrimiento de oro, ya que este tipo de recubrimiento es muy efectivo en Infrarrojo cercano y las regiones de Infrarrojo. Estos espejos van a dar más del 98% de reflexión para 10.6 μm . El diámetro de los espejos vendrá dado por el diámetro del haz que es de 24.9 mm, el diámetro será el menor disponible que permita que todo el haz se refleje. En el catálogo este tamaño es de 50mm, es decir 1.97 pulg con un espesor de 10 mm.

3.- CÁLCULO DE LA DIVERGENCIA DEL HAZ:

En este capítulo de la memoria se va a caracterizar el haz láser calculando su divergencia, si esa divergencia es o no aceptable y las formas de controlarla.

Antes de comenzar los cálculos se hará un repaso por las ecuaciones que rigen el modo gaussiano que es el que vamos a tener en nuestro sistema y las observaciones necesarias para poder utilizarlas. Como ya vimos en el capítulo 4 de la memoria descriptiva, el modo gaussiano de más bajo orden es el más interesante en casi todos los casos prácticos, ya que es el que da lugar a los haces más colimados, las mayores intensidades y los menores "spots" o menores tamaños de luz focalizada. Por tanto, nos centraremos fundamentalmente en las propiedades de éste.

1. Propiedades del Modo Láser Básico TEM₀₀

El modo electromagnético transversal del láser determina las propiedades de la radiación láser:

- Divergencia.
- Capacidad de enfoque.
- Coherencia Espacial.

El modo láser básico transversal (TEM₀₀) es el único modo que:

- Tiene buena coherencia espacial.
- Divergencia mínima.
- Puede enfocarse a un punto muy pequeño.

1.1 Haz Láser gaussiano

El modo más importante es el modo básico transversal TEM_{00} .

Cuando la radiación láser se emite en un modo transversal único, normalmente se trata del modo básico transversal TEM_{00} . En el modo único básico transversal, la forma de la radiación en un plano perpendicular, es un círculo en el cuál la intensidad en el centro es mayor que en los bordes. En la figura se muestra la distribución de intensidad en el modo láser básico transversal, a lo largo de la sección transversal del haz.

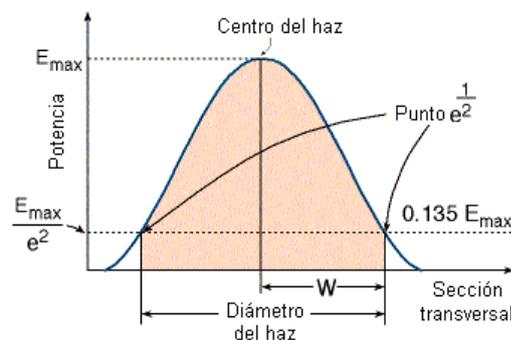


Figura 1: Haz Láser Gaussiano.

Esta curva tiene forma de campana, y se denomina "Gausiana". Por ello, el modo básico transversal es llamado "Modo Gaussiano".

1.2 Diámetro del Haz Gaussiano

Debido a que la curva Gaussiana decae de forma no lineal, es difícil determinar sus límites de forma exacta. Por ello, suele determinarse el diámetro del haz Gaussiano como la distancia a lo largo de la sección perpendicular del haz en la cuál la intensidad del haz es $1/e^2$ (0.135) de la intensidad máxima en el centro del haz.

El área dentro del círculo del diámetro del haz contiene el 86.5% de la energía (potencia) del haz Gaussiano. El resto de la energía 13.5% está fuera de este diámetro determinado. Existen otras definiciones para los límites del haz Gaussiano:

- La distancia a lo largo de la sección perpendicular del haz en la cuál la intensidad del haz es $1/e$ (0.368) de la intensidad máxima en el centro del haz. Con esta definición, el 63 % de la energía el haz está dentro de círculo del diámetro del haz.

- Los puntos a la mitad de la máxima potencia.
- Cualquier otro porcentaje de la máxima potencia (como por ejemplo el 80% o el 90%).

Se va a utilizar el primero de los criterios mencionados, es decir el de $1/e^2$.

1.3 Expresiones analíticas:

Supongamos un modo gaussiano fundamental con el frente de ondas plano $R(z) = R_0 = \infty$, en un plano de referencia que tomemos por simplicidad el $z=0$, en este plano el tamaño del modo que le caracteriza será $w(0) = w_0$.

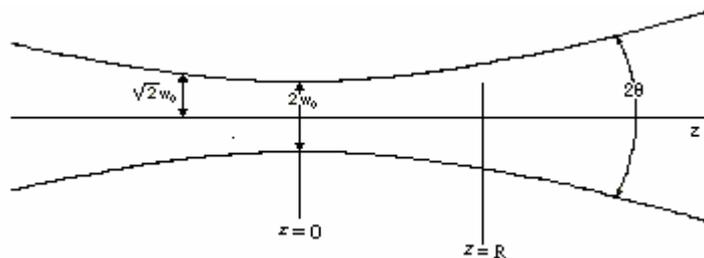


Figura 2: Parámetros característicos del haz láser gaussiano

Con este planteamiento, se deducen fácilmente las expresiones:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{ecuación (1)}$$

$$R(z) = z + \frac{z_R^2}{z} \quad \text{ecuación (2)}$$

Siendo z_R el rango de Rayleigh.

Vemos que la distribución del campo en un haz gaussiano queda completamente caracterizada mediante el parámetro w_0 y la longitud de onda en el medio.

1.4 Rango Rayleigh

El rango Rayleigh (z_0) se define como la distancia desde la cintura del haz hasta que se duplica el área del haz.

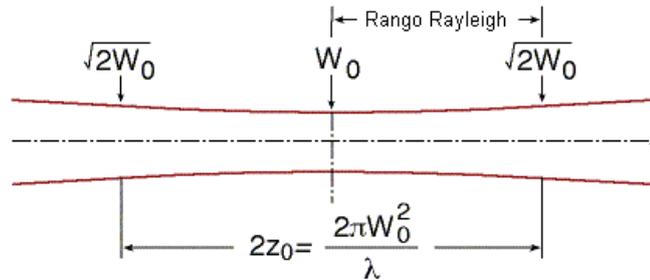


Figura 3: Rango Rayleigh.

Se denomina “Rango de Rayleigh” a la distancia: $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$

Este rango nos indica cuando el haz ha pasado de tener un tamaño w_0 a otro de $\sqrt{2}w_0$, es decir, nos dice cuándo su área se ha duplicado. Se denomina parámetro confocal b a $2z_R$, que indica la región en la que se puede decir que el haz está colimado. El parámetro de Rayleigh marca la línea de división de dos regiones, $z < z_R$ campo cercano y $z > z_R$ campo lejano.

1.5 Colimación:

La variación del tamaño del haz $w(z)$ con la distancia z viene dada por la relación (1). Lo primero que se observa a partir de esta fórmula es que cuando w_0 es menor, el haz se expande más rápidamente.

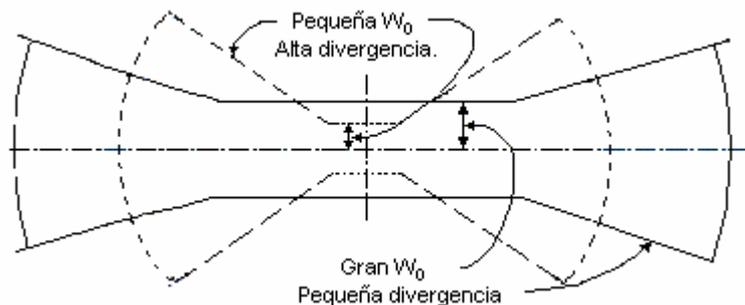


Figura 4: Relación entre el diámetro del haz y la divergencia

1.6 Divergencia del haz láser

Cada haz de luz sufre cierta divergencia mientras se propaga. Para la mayor parte de aplicaciones resulta conveniente reducir la divergencia del haz. Esto significa que durante la propagación del haz, la misma cantidad de energía se disemina sobre un área mayor. Esto reduce la densidad de potencia y la efectividad de la radiación. Los láseres son las fuentes de radiación disponibles con la menor divergencia.

En resumen, la divergencia del haz es el ángulo con que se va expandiendo el haz en el campo lejano, $z \gg z_R$. Este ángulo vendrá dado por el cociente entre el diámetro del haz en un plano $z \gg z_R$ y la distancia z .

$$\text{En este caso: } \theta = 2 \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_0}$$

2. Cálculo de los parámetros del láser:

Vamos a calcular todos los parámetros vistos anteriormente, a fin de caracterizar nuestro haz láser y controlar varias propiedades, como la divergencia.

El haz láser del elegido para realizar el corte tiene las siguientes características:

Potencia: 2500 W

Diámetro 1/e² 15 mm

Diámetro total del haz 18mm

2.1 Cálculo del rango de Rayleigh:

Este rango tiene como valor:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{\pi \cdot (7.5 \cdot 10^{-3})^2}{10.59 \cdot 10^{-6}} = 16.69m; \text{ es decir, a partir de esta distancia el haz pasa de}$$

tener un diámetro de 15mm a otro de $\sqrt{2} w_0 = 10.61$ mm

2.3 Cálculo del ángulo de divergencia:

Como ya se vio anteriormente, el ángulo de divergencia viene dado por:

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0} = \frac{2 \cdot 10.59 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 15 \cdot 10^{-3}} = 0.000899 \text{ rad}$$

Este valor de divergencia es muy grande para esta aplicación, por lo que se debe disminuir.

2.4 Métodos para el control de la divergencia:

El método más simple para el control de la divergencia es utilizar curvaturas más pequeñas en la cavidad óptica.

Sin embargo, este método incrementa las pérdidas por difracción y los rendimientos de la estabilidad del láser son más sensibles al desalineamiento.

Un método de control de divergencia muy simple es poner una lente, cuya distancia focal coincida con el vértice del ángulo de divergencia, de manera que el rayo láser esté totalmente colimado (rayos paralelos al eje óptico).

Antes de comenzar los cálculos propios del sistema, hay que hacer dos aproximaciones:

Aproximación paraxial: Muchas de las situaciones que se estudian en la óptica Geométrica presentan como particularidad que los ángulos con los cuales se trabaja son pequeños. Cuando se trabaja en estas condiciones se habla de óptica paraxial. En estos casos, la aproximación del seno o de la tangente del ángulo por su arco es válida:

$$\text{sen}(\varepsilon) \approx \varepsilon; \tan(\varepsilon) \approx \varepsilon$$

Lentes delgadas: Hemos supuesto que las lentes tienen un espesor despreciable, de esta forma este parámetro no interviene en nuestras ecuaciones.

Sabemos que $\theta/2 = 0.00045$ rad y que el radio del haz láser es 7.5 mm, por lo que, por trigonometría, la distancia focal de dicha lente debe ser de 16.69 m.

$$\operatorname{tag} \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{cos} \alpha} \Rightarrow \operatorname{tag} 0.00045 = \frac{7.5 \cdot 10^{-3}}{x} \Rightarrow x \approx 16.69 \text{ m}$$

Este sistema debe tener una distancia focal muy grande, por lo que esta solución no es válida por el tamaño del sistema resultante.

Un método de control de divergencia más apropiado parece ser el uso de una configuración de 2 lentes, parecido al que se muestra en la figura.

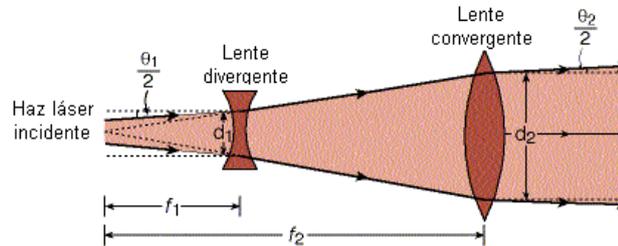


Figura : Expansor de haz basado en el Telescopio de Galileo

La primera lente puede ser convergente o divergente, sin embargo, una lente divergente significa una configuración más compacta. La segunda lente es siempre positiva.

El aumento angular necesario está determinado por la ecuación:

$$\gamma = \frac{\theta^1}{\theta} = \frac{w_0}{w_0^1}$$

donde θ y θ^1 son la divergencia angular del rayo antes y después del sistema óptico respectivamente, y w_0 y w_0^1 las cinturas de los rayos incidentes y emergentes.

A fin de alcanzar la menor divergencia del rayo láser después del segundo elemento del sistema, la imagen de la cintura producida por el primer elemento debe ser tan pequeña como sea posible y localizada en el primer plano focal del segundo elemento. La primera de las condiciones mencionadas puede satisfacerse usando un elemento con una focal corta.

Además, aunque la divergencia del haz disminuya conforme aumenta el diámetro del rayo (como se ve en la figura 4) no se puede aumentar tanto como se quiera, ya que las lentes utilizadas para este sistema no pueden ser muy grandes. Se debe añadir también que el diámetro de la lente debe ser al menos 1.5 veces el diámetro del rayo (criterio de $1/e^2$) a fin de que pase el 99% del rayo a través de la lente.

El diámetro máximo de la segunda lente será 38.1 mm, es decir 1.5 pulgadas, por lo que el diámetro máximo que puede alcanzar el haz es $38.1 / 1.5 = 25.4$ mm.

Como lente divergente se utilizará una lente de menisco positivo, de diámetro 1 pulgada. Las distancias focales disponibles comercialmente son:

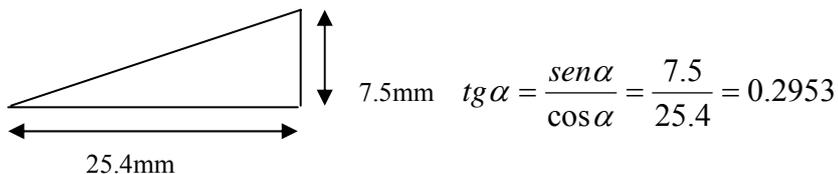
$$f_1=25.4 \text{ mm}; f_2=50.9 \text{ mm}; f_3=76.3 \text{ mm}$$

La segunda lente será una convexo-plana, de diámetro 1.5 pulgadas y las distancias focales disponibles son:

$$f_1=50.9 \text{ mm}; f_2=126.7 \text{ mm}; f_3=200.3 \text{ mm}.$$

Combinaremos estas lentes para determinar qué dos lentes son las más adecuadas para nuestro sistema. Un ejemplo de los cálculos a realizar es:

Lente 1: Menisco $f= 25.4$ mm; radio haz =7.5mm



¿Qué radio se alcanzará a la distancia focal de la segunda lente?

Lente 2: Convexo- plana, $f = 38.1$

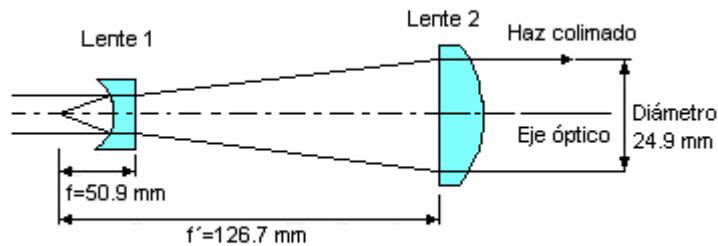
$$tg \alpha = \frac{x}{38.1} \Rightarrow 0.2953 \cdot 38.1 = x = 30.06 > 25.4, \text{ no nos vale, continuamos con la}$$

siguiente lente convexo- plana.

La tabla de resultados es la siguiente:

| | PLANO-CONVEXA | | |
|------------|---------------|-------------|-------------|
| MENISCO | $f = 50,9$ | $f = 126,7$ | $f = 200,3$ |
| $f = 25,4$ | 30,0590551 | 74,8228346 | 118,2874016 |
| $f = 50,9$ | 15 | 37,3379175 | 59,02750491 |
| $f = 76,3$ | 10,0065531 | 24,9082569 | 39,3774574 |

Como se puede observar, la única combinación de lentes que nos da como resultado un diámetro resultante menor de 25.4 mm es la lente de menisco positivo de $f = 76.3$ mm y la lente convexo- plana de $f = 126.7$ mm, que nos da un diámetro de haz de ≈ 25 mm.

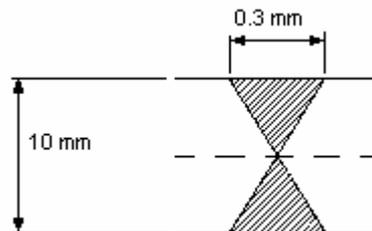


Con este valor ya podemos considerar que para nuestro sistema el tamaño del spot es constante a lo largo de la distancia a la que se va a utilizar el haz láser.

4.- CÁLCULO DEL SISTEMA DE ENFOQUE DEL HAZ LÁSER.

En este capítulo vamos a calcular el sistema de lentes necesario para enfocar el haz láser. El haz, de diámetro 24.9 para minimizar la divergencia, debe ser enfocado de manera que se cumplan las siguientes condiciones:

- El tamaño del spot del láser en la superficie de la pieza es de 300 micras.
- El punto de enfoque debe estar en el plano medio de la pieza, de longitud 10 mm, ya que después de este punto de enfoque el haz vuelve a abrirse y se debe tener un corte lo más simétrico posible, es decir, la misma longitud de corte en ambas superficies de la pieza.



Con estas condiciones, ya tenemos el ángulo que debe tener el haz para conseguir que en ambas superficies el tamaño del spot sea de 300 micras.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{cos} \alpha} = \frac{0.15}{5} = 0.03 \Rightarrow \alpha = 1.7184^\circ$$

Sabiendo que el diámetro de haz láser que tenemos es 24.9 mm y que el ángulo que forma en el enfoque es de 1.7184° , la distancia focal requerida es de:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{cos} \alpha} = \frac{12.45}{x} = 0.03 \Rightarrow x = 415 \text{ mm}$$

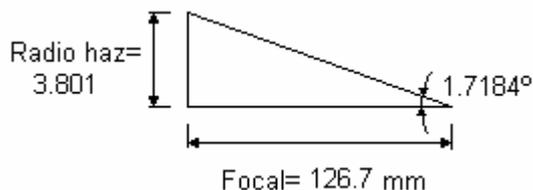
La distancia focal requerida, f , es demasiado grande, ya que la lente de enfoque está en el cabezal láser, y éste no puede tener una longitud tan grande.

Vamos a tener que poner un sistema de lentes para enfocar el haz, y como condición pondremos que la distancia focal total del sistema no sea mayor de 150mm, ya que estas lentes están justo antes de la boquilla del cabezal láser y ésta no puede ser muy grande.

Este sistema va a estar formado por dos lentes; la primera una lente convexo-plana de diámetro 1.5 pulgadas (38.1 mm) con la distancia focal más pequeña y la segunda una lente convexo-plana de diámetro 1 pulgada (25.4 mm) que cumpla con la condición de que el ángulo con el que se enfoque el haz sea 1.7184° .

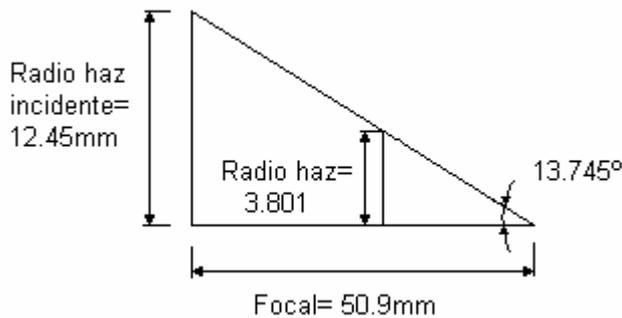
Empezaremos con la segunda lente. Las distancias focales disponibles comercialmente para estas lentes son: 50.9 mm, 76.6mm y 126.7 mm. Todas son menores de 150mm, sin embargo se tomará la de mayor focal, ya que es la que tiene menor aberración esférica. Se calculará el radio que el haz debería tener antes de esta lente para que se enfoque el haz con el ángulo deseado con esta lente, y si no cumple las condiciones deseadas, se probará con la siguiente de mayor focal.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \frac{x}{126.7} = 0.03 \Rightarrow x = 3.801 \text{ mm}$$



El radio del haz debería ser 3.801 mm. Sin embargo, lo que tenemos es un haz de 12.45 mm de radio, por lo que hay que disminuirlo hasta 3.801 mm con otra lente. Esta lente va a ser de menisco positivo, ya que minimiza la aberración esférica como se verá en el capítulo siguiente de la memoria de cálculo (Cálculo de las aberraciones de las lentes del sistema); de diámetro de 38.1 mm y de distancia focal 50.9, ya que es la menor de las disponibles: 50.9mm, y 127.2mm

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \frac{12.45}{50.9} = 0.2446, \alpha = 13.745^\circ$$



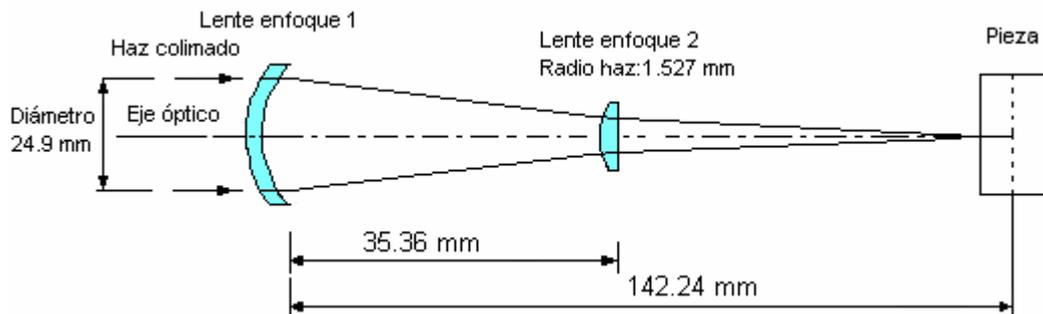
Vamos a calcular a qué distancia tendríamos que poner la segunda lente para tener un radio de haz 1.527 mm

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\operatorname{sen} \beta}{\cos \beta} = \frac{3.801}{x} = 0.2446 \Rightarrow x = 15.54 \text{ mm}$$

Luego la distancia a la que hay que poner la segunda lente es:

$$50.9 - 15.54 = 35.36 \text{ mm.}$$

Vamos a comprobar si cumple la condición que se había impuesto: que la longitud del sistema óptico no fuera superior a 150mm: $126.7 + 50.9 - 35.36 = 142.24 \text{ mm}$



Cálculo de la longitud de la boquilla:

La longitud de la boquilla va a ser la distancia focal de la última lente 126.7mm (ya que ésta comienza donde termina la lente) menos la mitad del grosor de la pieza de fibra de carbono (se enfoca justo en el plano medio), 5mm y menos la distancia de seguridad que debe haber entre la pieza y la boquilla que es de 700micras, es decir 0.7 mm

La longitud es, por tanto: $126.7 - 5 - 0.7 = 121 \text{ mm}$

5.- CÁLCULO DE LAS ABERRACIONES DE LAS LENTES DEL SISTEMA:

Una lente recoge luz de una fuente y la enfoca en un punto determinado. Sin embargo, siempre existe algún error en la precisión con la que la lente enfoca esa luz, más que un verdadero punto imagen o una imagen lo más pequeña posible, lo que produce la lente es un círculo borroso. Esta desviación de la idealidad está asociada a las aberraciones de las lentes. Se deben elegir las lentes del sistema con el mínimo de aberración que nos dé la resolución o la imagen que necesitamos.

Las aberraciones se pueden clasificar en:

1. Aberraciones cromáticas: no nos ocuparemos de ellas, puesto que el láser es una fuente de luz monocromática.

2. Aberraciones monocromáticas:
 - Aberración esférica.
 - Coma
 - Astigmatismo
 - Curvatura de campo
 - Distorsión

Las tres primeras se refieren a la calidad de imagen de un punto y las dos últimas a la de su posición en el objeto. Dentro de estas tres primeras, las más importantes son la aberración esférica y el coma, que es en las que nos centraremos.

En este capítulo vamos a resumir brevemente estas aberraciones, se calculará su cuantía y las formas de controlarlas para que no afecten demasiado al sistema óptico.

3.1 Aberración esférica:

No existe una clara definición para la aberración esférica, pero podemos decir en primer lugar que es la variación de la focal con respecto a la apertura. Está relacionada con rayos que proceden de un punto objeto situados en el eje óptico, para ello fijémonos en la figura 1.

Desde el punto de vista de lo que sucede en el plano imagen, la acción de esta aberración sobre un punto es el de difuminar la imagen del mismo, de forma que perdemos contraste y nitidez. Esta aberración es por lo tanto desastrosa para los instrumentos de aplicación científica, pues hace disminuir la resolución.

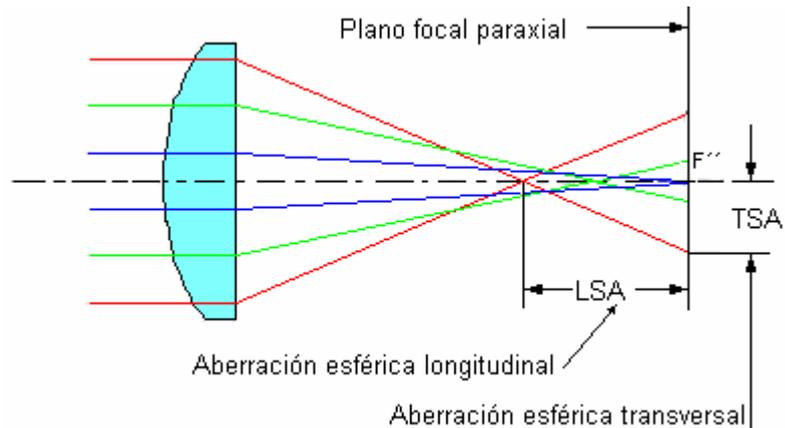


Figura 1: Aberración esférica

El punto más importante a resaltar es que, la aberración esférica de una lente delgada es función del factor de forma y de posición. Así pues, dada una posición determinada del objeto, existe un número infinito de lentes con la misma focal que nos darían la misma posición de imagen paraxial, si bien sus formas serían muy diferentes y su aberración esférica también.

Para una apertura y una distancia focal dada, la cantidad de aberración esférica es una función de la posición del objeto y de la forma de la lente. Por ejemplo, una lente delgada con un objeto en el infinito tiene una cantidad de aberración esférica mínima para una forma de lente que se aproxima a la convexo plana, como vemos en la figura. Con la superficie plana mirando el objeto, entonces tiene mucha más aberración esférica.

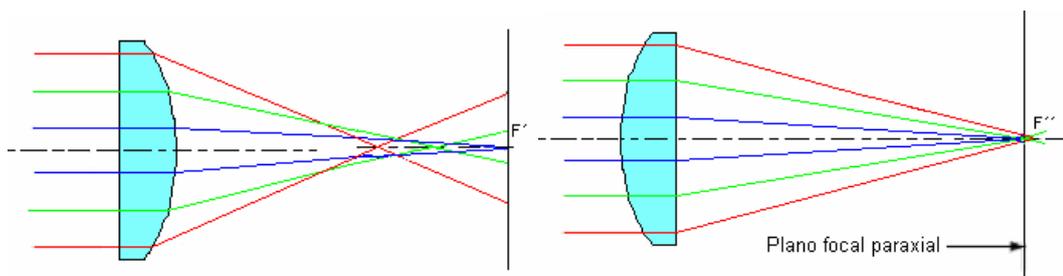


Figura 2: (A) La cara plana mirando al haz

(B) Cara curva mirando al haz

Las lentes plano-convexas y plano cóncavas tienen una aberración esférica mínima cuando sus caras curvas miran hacia el rayo incidente paralelo. Todas las otras configuraciones tienen mucha más aberración esférica.

Es por esto que las lentes de nuestro sistema siempre han de tener la disposición (b), para minimizar la aberración esférica.

La aberración esférica depende de la forma de las lentes, orientación y de su radio conjugado, así como del índice de refracción de los materiales presentes. Sin embargo, se puede estimar la aberración esférica de una lente convexo-plana puede estimarse por:

$$\text{Extensión lateral} = x = \frac{0.0286 \cdot D_{spot}^3}{f^2}$$

Para una lente de menisco, la extensión lateral del spot debido a la aberración esférica viene dada por:

$$\text{Extensión lateral} = x = \frac{0.018 \cdot D^3}{f^2}$$

Vamos a cuantificar la aberración esférica de las lentes elegidas para el sistema, para comprobar que esta aberración no afecta excesivamente al sistema.

LENTE CONVEXO-PLANAS

Lente 1: $f = 126.7 \text{ mm}$; $D_{spot} = 24.9 \text{ mm}$; lente del subsistema de control de divergencia.

$$\text{Extensión lateral} = x = \frac{0.0286 \cdot (24.9 \cdot 10^{-3})^3}{(126.7 \cdot 10^{-3})^2} = 2.75 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0.0275 \text{ mm}$$

Lente 2: $f = 50.9 \text{ mm}$; $D_{spot} = 24.9 \text{ mm}$; lente del subsistema de enfoque

$$\text{Extensión lateral} = x = \frac{0.0286 \cdot (24.9 \cdot 10^{-3})^3}{(50.9 \cdot 10^{-3})^2} = 1.704 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0.17 \text{ mm}$$

Lente 3: $f = 126.7 \text{ mm}$; $D_{\text{spot}} = 7.602 \text{ mm}$; lente del subsistema de enfoque

$$\text{Extensión lateral} = x = \frac{0.0286 \cdot (7.062 \cdot 10^{-3})^3}{(126.7 \cdot 10^{-3})^2} = 6.27 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 6.27 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$$

Como se ve, la aberración esférica es mayor en las lentes convexo- planas cuanto menor es la distancia focal, por lo que se van a elegir siempre las lentes de esta forma con la distancia focal mayor, es decir de 126.7 mm.

Con respecto a la lente 2, que está situada en el sistema de enfoque, vamos a ver si cambiándola por una de menisco positivo podemos minimizar esta aberración.

LENES DE MENISCO

Lente 1: $f = 50.9 \text{ mm}$; $D_{\text{spot}} = 24.9 \text{ mm}$; lente del subsistema de enfoque

$$x = \frac{0.018 \cdot D^3}{f^2} = \frac{0.018 \cdot (24.9 \cdot 10^{-3})^3}{(50.9 \cdot 10^{-3})^2} = 1.073 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0.1 \text{ mm}$$

Como se ve, esta aberración es un 40% menor que en el caso de una convexo- plana, por lo que se pondrá una lente de menisco positivo.

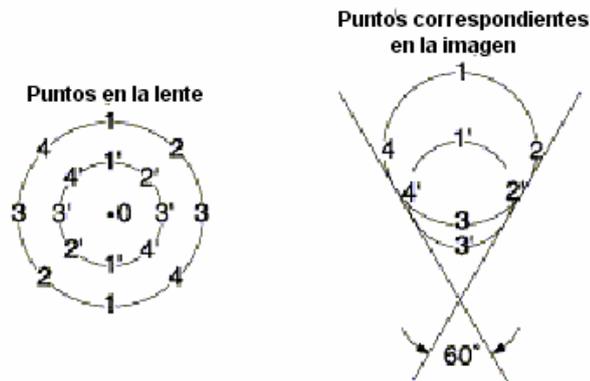
Lente 1: $f = 50.9 \text{ mm}$; $D_{\text{spot}} = 15 \text{ mm}$; lente del subsistema de control de divergencia.

$$x = \frac{0.018 \cdot D^3}{f^2} = \frac{0.018 \cdot (15 \cdot 10^{-3})^3}{(50.9 \cdot 10^{-3})^2} = 2.345 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Como se puede observar, el aumento del spot debido a la aberración esférica de la lente de menisco es despreciable siempre que el diámetro del haz sea pequeño. Para diámetros mayores del haz, la aberración es casi la misma y es indiferente poner una lente de menisco que una convexo-plana.

3.3.2. Coma

Esta aberración recibe dicha denominación por la forma de cometa que tiene la imagen de un punto objeto situado fuera del eje. Aunque todos los rayos que parten de un punto objeto fuesen al punto imagen porque se corrigiese la aberración esférica, los puntos imagen correspondientes al punto objeto fuera del eje no se cortarían en un mismo plano, perdiéndose una vez más la nitidez en la imagen.



Al igual que la aberración esférica, el coma se corrige eligiendo una lente con un factor de forma intermedio, como es el caso de las convexo- planas, que son mayoritariamente utilizadas en nuestro sistema. Además esta aberración se cancela entre lentes simples combinadas simétricamente por lo que no hay un efecto neto en la calidad de la imagen. Se intentará por lo tanto, que nuestro sistema sea lo más simétrico posible.

6.-CÁLCULO DE LA SECCIÓN DE LA BOQUILLA.

En este capítulo vamos a calcular el diámetro de la boquilla por la cual va a fluir el nitrógeno líquido que va a refrigerar la fibra de carbono que está siendo cortada por el haz láser, con el fin de minimizar la zona afectada por el calor.

Para ésto, se va a realizar un balance de energía entre el calor que absorbe el nitrógeno líquido y el que cede la fibra de carbono en un punto situado al final de la boquilla y la fibra de carbono a cortar, por lo que se van a ir calculando todos los términos que intervienen en este balance.

$$P_{ABS} = P_L - P_R$$

Donde:

P_{ABS} potencia que absorbe el material.

P_L potencia del láser.

P_R potencia que se disipa por radiación.

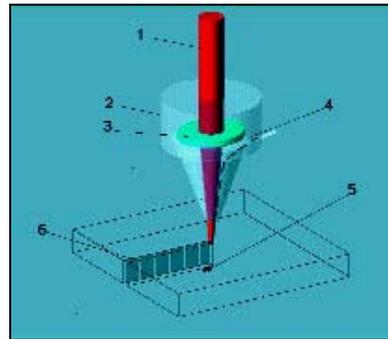


Fig.1.-: Proceso de corte

1.-Cálculo de la potencia láser:

La potencia del láser es la potencia que se requiere para cortar la fibra de carbono cuyo valor corresponde a 2.5KW, pero es necesario obtenerlo por unidad de área. El área corresponde a la superficie de la pieza que cortamos, por tanto, este área será igual a:

$$S_{PIEZA} = 2 \cdot \Pi \cdot R^2 = 2 \cdot \Pi \cdot \left(\frac{0.3 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 7.07 \cdot 10^{-8} m^2$$

Y la potencia por unidad de área vendrá dada por:

$$P_L = \frac{P_L (KW/m^2)}{S_{PIEZA} (m^2)} = \frac{2.5 KW}{7.09 \cdot 10^{-8} m^2} \approx 3.54 \cdot 10^{10} \frac{W}{m^2}$$

2.- Cálculo de la potencia de radiación:

Nos referimos a la potencia de radiación, como la energía por unidad de área que se disipa. La atmósfera con la que se rodea la fibra de carbono al ser cortada será de nitrógeno, evitando así la combustión de ésta con oxígeno, y refrigerando la fibra para reducir la zona afectada por el calor.

El enfriamiento se realiza mediante la utilización del N₂ líquido en condiciones de 15 bar, 1 atm. El Nitrógeno es transparente, es decir, no absorbe radiación, por tanto, la expresión que representa el proceso viene dada por la Ley de Stefan-Boltzman. Esta expresión nos indica que al trabajar con elevadas temperaturas, el intercambio de calor que se produce se realiza exclusivamente por radiación y sólo dependerá de la temperatura y de

“ σ ” la constante de Stefan-Boltzman cuyo valor es $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4}$

La expresión de la Ley de Stefan-Boltzman es por tanto:

$$P_{RAD} = \sigma * T^4 = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} * 5000^4 K^4 = 3.54 * 10^7 \frac{W}{m^2}$$

3.- Cálculo de la potencia de absorción:

Es la que se requiere para cortar la fibra de carbono y será la diferencia entre la potencia del láser y la potencia disipada por radiación:

Como iniciamos el capítulo el balance se resolverá mediante la ecuación:

$$P_{ABS} = P_L - P_R$$

$$P_{ABS} = 3.54 * 10^{10} - 3.54 * 10^7 = 3.53 * 10^{10} \frac{W}{m^2}$$

Esta es la potencia teórica que se necesita para el corte, pero no todo se aprovecha para ello. Una parte se pierde por conducción del calor a través de la fibra de carbono, pero puede considerarse despreciable por estar trabajando con elevadas temperaturas. Y otra parte, se pierde en el disparo inicial del láser, que provoca una perforación sobre la fibra por sublimación de la materia. La perforación posee el diámetro del haz del láser (300μ) y la longitud del grosor de la lámina de la fibra de carbono ($10mm$)

La cantidad de calor que se retira al refrigerar la fibra de carbono será igual a la cantidad de calor que absorbe el N_2

$$Q_{abs} = Q_V * \rho * C_p * \Delta T$$

$$Q_{cedido} = (P_L - P_R) * A - \lambda * m$$

Antes de comenzar a calcular los distintos términos de este balance, debemos calcular la densidad del nitrógeno líquido.

3.1 -Cálculo de la densidad del N_2 utilizando la ecuación en estado cúbico:

Para determinar la densidad del N_2 a 77K. y 15 bar, no se podrá aplicar la ecuación general de los gases por tratarse de un líquido, como consecuencia necesitaremos utilizar "Las ecuaciones en estado cúbicas", que son las más simples y capaces de representar el comportamiento tanto de líquidos como de vapores.

De todas las posibles ecuaciones cúbicas que podemos utilizar elegimos la ecuación de Redlich/Kwong, por ofrecernos una exactitud en los datos aceptables.

$$P = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a \cdot \alpha}{V \cdot (V + b)}$$

El término "a" corrige el hecho de que las moléculas ejercen fuerzas de atracción una con respecto a la otra, cuando "a" es grande, indica que hay grandes fuerzas de atracción. El

factor “b” corrige el volumen, teniendo en cuenta el que ocupan las propias moléculas; las moléculas más grandes tienen valores mayores de “b”. Cuando tanto “b” como “a” son iguales a cero la ecuación Redlich/Kwong, se reduce a la ecuación de los gases ideales. Los valores de “a” y “b” son específicos para cada fluido ya que están en función de la temperatura y presión crítica:

$$a = 0.42748 \cdot \frac{R^2 \cdot T_c^{2.5}}{P_c}$$

$$b = 0.08664 \cdot \frac{R \cdot T_c}{P_c}$$

Los valores correspondientes de P_c y T_c para el N_2 líquido serán -146.9°C (126.1 K) y 3399 KPa (33.54 atm.). Por tanto los valores correspondientes para a y b será:

$$a = 0.42748 \cdot \frac{(0.082)^2 \cdot (126.1)^{2.5}}{33.54} = 15.3 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}^2 \text{K}^{0.5}}{\text{mol}^2}$$

$$b = 0.08664 \cdot \frac{0.082 \cdot 126.1}{33.54} = 0.027 \frac{\text{l}}{\text{mol}}$$

Si de la ecuación de Redlich/Kwong despejamos el volumen:

$$V = b + \frac{R \cdot T}{P + \frac{a \cdot \alpha}{V \cdot (V + b)}}$$

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{T}} = \frac{1}{\sqrt{77}} = 0.114$$

y sustituimos los valores de temperatura y presión de N_2 de nuestras condiciones de trabajo (77K, 15 bar) obtendremos una expresión que podremos iterar dándole valores al volumen:

$$V = 0.027 + \frac{6.314}{14.7 + \frac{1.74}{V(V + 0.027)}}$$

El volumen inicial será aquel que resulte de suponer un gas ideal:

$$PV = RT$$

$$V = \frac{RT}{P} = \frac{0.082 \cdot 77}{14.7} = 0.43 \text{l}$$

Este valor será el que se sustituya en la ecuación en su primera aproximación. Y como resultado realizaremos 16 iteraciones que representamos en esta tabla.

| volumen | Ec Redlich/Kwong |
|------------|------------------|
| 0,43 | #¡VALOR! |
| 0,29505905 | 0,29505905 |
| 0,21827135 | 0,21827135 |
| 0,16076645 | 0,16076645 |
| 0,11428038 | 0,11428038 |
| 0,07855571 | 0,07855571 |
| 0,05511962 | 0,05511962 |
| 0,04282015 | 0,04282015 |
| 0,0375816 | 0,0375816 |
| 0,03563027 | 0,03563027 |
| 0,03494781 | 0,03494781 |
| 0,03471489 | 0,03471489 |
| 0,03463608 | 0,03463608 |
| 0,0346095 | 0,0346095 |
| 0,03460054 | 0,03460054 |
| 0,03459752 | 0,03459752 |

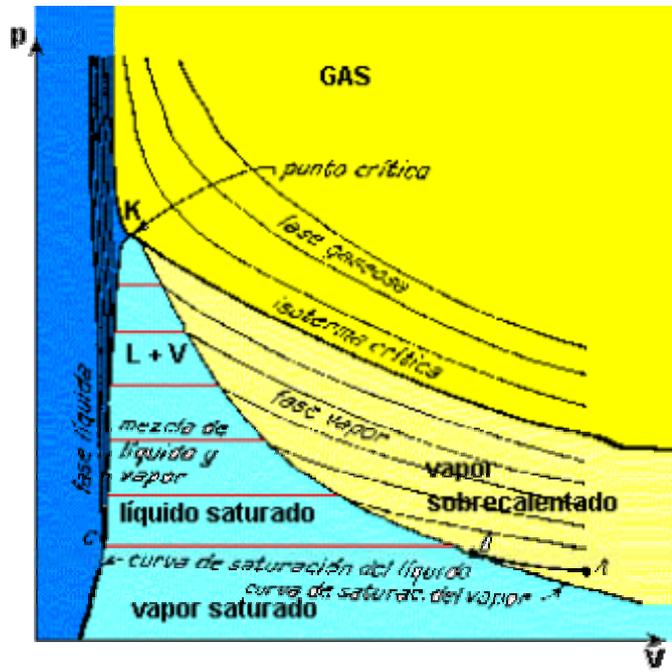
El valor del volumen específico que obtenemos será:

$$V = 0.03459 \frac{l}{mol} \text{ y por tanto la densidad resultante es}$$

$$\rho = 28.57 \frac{mol}{l} \cdot \frac{28 \cdot 10^{-3} Kg}{1 mol} \cdot \frac{1l}{10^{-3} m^3} = 809.5 \frac{Kg}{m^3}$$

Como podemos comprobar, el dato de la densidad a 1 bar y 15 bar no varían mucho y esto se debe a que estamos trabajando a presiones que se sitúan por debajo de la crítica y por tanto, se corresponden con la isoterma que pasa por un estado líquido, atraviesa una zona de estado bifásico y por último pasa por un estado gaseoso. A presiones medias y elevadas (15 bar) esas isotermas son líneas rectas, situadas en la zona izquierda superior

del diagrama, en las que una gran variación en las presiones (de 1 a 15 bar) implica una pequeña variación en el volumen, y por tanto de la densidad. (de $800 \frac{Kg}{m^3}$ a $809.5 \frac{Kg}{m^3}$)



3.2- Cálculo de la velocidad de salida del N_2 a la salida de la boquilla.

El caudal volumétrico es el producto de la velocidad de fluido por la sección que atraviesa:

$$Q_v = V \cdot S$$

La velocidad del fluido se realizará mediante la aplicación de la ecuación de Bernouilli entre el punto final de la boquilla láser (punto 2) y la superficie más próxima de la fibra de carbono (punto 1).

Aplicando las siguientes condiciones de trabajo suponemos que:

- ✓ Es válida la condición de contorno $V_{SOL} = V_{FLUI}$ La velocidad del fluido al contacto con la fibra de carbono será nula, $V_2 = 0 \frac{m}{s}$
- ✓ En la boquilla existe una expansión adiabática; $Q = 0 \frac{KJ}{Kg}$
- ✓ La distancia que atraviesa el fluido es prácticamente nula; $\Delta Z = 0m$

✓ No se realiza ningún trabajo mecánico; $W = 0 \text{ KJ/Kg}$

✓ No considero pérdidas de carga; $h_f = 0m$

la ecuación de Bernoulli en unidades de longitud se expresará como:

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \Delta Z + \frac{\Delta V^2}{2 \cdot g} + h_f = Q + W$$

y al aplicar las condiciones de trabajo se nos muestra como:

$$\frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} = \frac{P_1}{\rho \cdot g}$$

despejando la velocidad, obtenemos la expresión que nos permite calcular la velocidad del fluido:

$$V_2 = \sqrt{\frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} \cdot 2g}$$

Si sustituimos los valores correspondientes:

$$P_1 = 1bar = 10^5 Pa$$

$$P_2 = 15bar = 15 \cdot 10^5 Pa$$

$$\rho_{15bar,77K} = 809.5 \text{ Kg/m}^3$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{15 \cdot 10^5 - 10^5}{809.5} \cdot 2} = 58.6 \text{ m/s} \approx 60 \text{ m/s}$$

3.3. -Cálculo de calor latente del carbono λ :

Es la cantidad de calor que se retira por evaporación de la fibra de carbono, por la acción del láser. Por tanto, se necesita conocer la cantidad de materia que pasa a estado vapor. Para ello suponemos que el calor latente se debe al grafito de la fibra de carbono despreciando el de la resina. Y por tanto para el cálculo del calor latente por unidad de masa, se efectuará mediante el peso molecular del grafito, exclusivamente.

Tomaremos como base de cálculo 1 segundo, y teniendo en cuenta que la velocidad de corte es de 0.025 m/s, la sección de material que se corta tiene las siguientes dimensiones: longitud 25 mm, espesor 300 μm y altura 10mm, con lo que el volumen cortado de fibra de carbono por segundo es:

$$V = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} = 75 \cdot 10^{-9} m^3$$

$$m = \rho \cdot V = 1530 \frac{Kg}{m^3} \cdot 75 \cdot 10^{-9} m^3 = 1.1475 \cdot 10^{-4} Kg$$

Con el peso molecular del grafito puedo conocer el calor latente por unidad de masa:

$$\lambda = 0.71 \frac{J}{g} \cdot \frac{10^3 g}{1kg} = 710 \frac{J}{Kg}$$

Si ahora lo multiplico por la masa, tenemos que en un segundo:

$$\lambda \cdot m = 710 \frac{J}{Kg} \cdot 1.1475 \cdot 10^{-4} Kg = 57.85 J$$

3.4. -Cálculo de la capacidad calorífica del N₂:

Para calcular la capacidad calorífica del N₂ bajo las condiciones de trabajo, necesitamos conocer la temperatura media entre 77K y la temperatura a la que se somete el N₂ al contacto con la fibra de carbono.

Podemos suponer que permanecerá dentro del intervalo de 300 y 3000K y la expresión de la capacidad calorífica será:

$$\begin{aligned} C_p &= 6.5 + (0.001 \cdot T) \Rightarrow \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT = 6.5(T_2 - T_1) + 0.001 \left(\frac{T_2^2 - T_1^2}{2} \right) = \\ &= 6.5(3573 - 77) + 0.001 \left(\frac{3573^2 - 77^2}{2} \right) = 29104.2 \cdot cal / mol \end{aligned}$$

si realizamos las conversiones de las unidades al sistema internacional:

$$\frac{1cal}{mol^\circ C} \cdot \frac{1mol}{28 \cdot 10^{-3} Kg} \cdot \frac{4.18J}{1cal} = 149.29 \frac{J}{Kg^\circ C}$$

resultará:

$$\Delta H = 29104.2 \cdot 149.29 = 4.345 \cdot 10^6 J/kg^\circ C$$

Como ya habíamos visto antes $Q_{abs} = Q_V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$ de lo que obtenemos que

$$Q_{abs} = Q_V \cdot 4.345 \cdot 10^6 \cdot 809.5 = Q_V \cdot 3.517 \cdot 10^9 J$$

Además tenemos que: $Q_{cedido} = (P_L - P_R)A - \lambda \cdot m$

$$Q_{cedido} = 3.53 \cdot 10^{10} \cdot 7.0686 \cdot 10^{-8} - 57.85 = 2437.366 J$$

Igualando las dos ecuaciones y despejando Q_V tenemos:

$$Q_V = \frac{2437.366}{3.517 \cdot 10^9} = 6.93 \cdot 10^{-7} m^3 / s$$

Como el caudal volumétrico es la sección por la velocidad, tenemos que:

$$S = \frac{Q_V}{v} = \frac{6.93 \cdot 10^{-7}}{60} = 1.155 \cdot 10^{-8} m^2$$

A esta sección hay que sumarle el área del spot que tiene el haz láser, ya que el diámetro de la boquilla tendrá que incluir el diámetro del haz láser al final de la boquilla.

Como se vió en el capítulo 16 "Cálculo del sistema de enfoque" el haz incide en la pieza con un ángulo de 1.7184° . Sabiendo que la separación de seguridad entre la boquilla y la pieza es de 700 micras, el tamaño del spot a 5.7 mm (mitad del grosor más separación) es de:

$$\operatorname{tg} 1.7184^\circ = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} = \frac{x}{5.7} = 0.03 \Rightarrow x = 0.171 mm$$

El diámetro del spot láser es por tanto: $0.171 \cdot 2 = 0.342$, con lo que la sección de la boquilla es:

$$S_{TOTAL} = 1.155 \cdot 10^{-8} + \frac{(0.342 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1.034 \cdot 10^{-7} m^2$$

$$S = \pi \cdot r^2 \Rightarrow r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{1.034 \cdot 10^{-7}}{\pi}} = 1.81 \cdot 10^{-4} m = 0.181 mm$$

Sin embargo, el diámetro resultante se sobredimensionará ya que el haz láser debe moverse para cortar la fibra de carbono y a fin de que la zona afectada por el calor en ésta sea mínima. Así pues, se multiplicará por un factor de 2, obteniendo así un radio de boquilla de: $0.181 \cdot 2 = 0.374 \Rightarrow D = 0.748 \approx 0.750$; en consecuencia, el diámetro de la boquilla será de 0.750 mm.

7.- DISEÑO DE LA TUBERÍA DE TEFLÓN:

En este capítulo de la memoria de cálculo, se va a llevar a cabo el diseño de una tubería de teflón de 25 m de longitud y de diámetro externo e interno 8.2 y 8 mm respectivamente. Por esta tubería de teflón circula un fluido refrigerante a temperatura criogénica; en concreto se trata de nitrógeno líquido a 77 K.

La utilización de la nueva tecnología de corte y perforado láser para cortar chapas de fibra de carbono, supone que la fibra de carbono esté expuesta a altas temperaturas del orden de 5000K.

La fibra de carbono es un material compuesto por dos fases químicamente diferenciadas: la fibra y la matriz. En general, la energía necesaria para la vaporización de las fibras es más elevada que para la matriz. Las fibras de carbono son buenas conductoras de calor y su temperatura de disociación es muy elevada.

Todos estos factores hacen que el corte por láser sea bastante complejo por la aparición de una zona afectada por el calor, ZAC, debido a la recesión, descomposición y delaminación de la matriz, por lo tanto es una limitación en cuanto a su aplicación. Por esta razón al aplicar en la misma zona donde actúa el láser en un fluido refrigerante a temperatura criogénica, queda disminuida la zona afectada por el calor y por tanto, se consigue disminuir dicha limitación.

Como consecuencia de las diferencias de temperaturas entre el medio ambiente, donde se encuentra expuesta la tubería, y el fluido refrigerante que circula a través de ésta, se producen grandes pérdidas de calor provocando la disminución de temperatura del nitrógeno líquido. Además, existe el fenómeno de la condensación del vapor de agua del aire, que aparece cuando la tubería de teflón está a una temperatura muy inferior a la de saturación o de rocío del vapor de agua. En instalaciones de refrigeración que funcionan con temperaturas de fluido inferiores a la del rocío del ambiente, las gotas de agua de condensación perturban sensiblemente el funcionamiento, causando daños importantes por

lo que, mantener la temperatura del fluido refrigerante y la de la superficie de la tubería es realmente importante para conseguir óptimos resultados.

Para evitar las pérdidas de calor a través de la tubería de teflón, así como cumplir con el requisito indispensable de que la temperatura del nitrógeno líquido, no varíe en más de un grado desde el dewar hasta la boquilla; se recubrirá la tubería con un material aislante (poliuretano) con un espesor adecuado para cumplir esta condición.

La secuencia de cálculo es la que sigue:

En primer lugar, se calculará el caudal de nitrógeno que pasa por la tubería de teflón y después la cantidad de calor máxima que se puede disipar a través de la tubería, teniendo en cuenta la condición, de que el nitrógeno no varíe más de un grado su temperatura y que además no cambie de fase, es decir, que no pase de líquido a gas.

En segundo lugar, se calcularán las pérdidas de calor que se producen a través de la tubería de teflón sin la utilización de aislante térmico, con el objeto de corroborar la necesidad de su uso.

A continuación, se calculan las pérdidas de calor que se producen para diferentes espesores de aislantes térmicos y finalmente se selecciona el espesor que cumpla los requisitos establecidos.

1. Caudal de nitrógeno líquido

Como se vio en el capítulo 18 de la memoria de cálculo, el diámetro de la boquilla elegida era de 0.75 mm, luego la sección real por la que pasa el nitrógeno líquido es la sección de la boquilla menos el área del spot del láser, es decir:

$$S_{Total} = \frac{\pi}{4} (0.75 \cdot 10^{-3})^2 - \frac{\pi}{4} (0.3 \cdot 10^{-3})^2 = 3.711 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

El caudal volumétrico vendrá dado por la sección por donde sale el nitrógeno líquido por la velocidad a la que sale, es decir, 60 m/s (véase memoria de cálculo, capítulo 5, cálculo de la sección de la boquilla)

$$Q_V = S \cdot v = 3.711 \cdot 10^{-7} \cdot 60 = 2.2265 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

El caudal másico será, por lo tanto, el caudal volumétrico multiplicado por la densidad del fluido, es decir: $Q_m = 2.2265 \cdot 10^{-5} \cdot 809.5 = 0.01802 \text{ Kg/s}$

2. Cantidad máxima de calor.

El nitrógeno líquido que se encuentra en el Dewar está a 77° K, y no debe variar su temperatura en más de un grado cuando llegue a la boquilla. Este calor vendrá dado por el producto del caudal másico del nitrógeno líquido que pasa por la tubería por la capacidad térmica del N₂ líquido por el incremento de la temperatura, es decir, 1 grado. Además habrá que tener en cuenta el calor que se requiere para que el refrigerante pase de líquido a gas.

La cantidad total de calor que es admisible perder vendrá dado por la suma de estos dos términos, $Q_{\max} = Q_1 + Q_2$

2.1 Cálculo de Q₁

El calor debido al incremento de 1 grado se calculará como multiplicando el caudal másico de nitrógeno por la capacidad calorífica y por el incremento de temperatura.

$$Q_1 = Q_{N_2} C_p \Delta T = 0.01802 \cdot 2060 \cdot 1 = 37.128 \text{ J / s}$$

C_p: capacidad calorífica del nitrógeno líquido a 77 K 2060J/kgK

ΔT=1 K

Q_{N₂}:Caudal másico de N₂ líquido= 0.01802 kg/s

Además hay que calcular el calor que necesita el nitrógeno para pasar de líquido a gas, que será igual al producto del caudal másico por la entalpía de vaporización del nitrógeno.

2.2-Cálculo de Q_2

El calor necesario para el cambio de fase se calculará multiplicando el caudal másico por el calor latente de vaporización, es decir:

$$1336 \frac{\text{cal}}{\text{mol}} \cdot \frac{4.184\text{J}}{1\text{cal}} \cdot \frac{1\text{mol}}{28 \cdot 10^{-3}} = 199.636 \cdot 10^6 \text{ J}$$

por lo que el calor necesario para que el nitrógeno cambie de fase es:

$$Q_2 = Q_{N_2} \Delta H_v = 0.01802 \cdot 199.636 \cdot 10^3 = 3597.44 \text{ J / s}$$

Como se ha dicho anteriormente, la cantidad de calor máxima que se puede disipar del sistema es la correspondiente a la suma de dos factores: el calor por el incremento de temperatura de 1 grado del nitrógeno líquido y el correspondiente al cambio de fase.

La cantidad total de calor es por lo tanto: $Q_{\text{max}} = Q_1 + Q_2 = 32.128 + 3597.44 = 3629.568 \text{ J}$

3. Pérdidas de calor sin aislante térmico:

Considerando las pérdidas por radiación despreciables, frente a las pérdidas por conducción y convección, el flujo de calor viene dado por:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad \text{expresión (1)}$$

T_1 = temperatura del fluido circulante a través de la tubería, K

T_2 = temperatura del fluido exterior, K

R_1 = Resistencia por convección interna, J/sK

R_2 = Resistencia por conducción, J/sK

R_3 = Resistencia por convección externa, J/sK

Las resistencias al flujo de calor vienen cuantificadas por las siguientes expresiones:

$$R_1 = \frac{1}{h_{ci} \cdot A_1} = \frac{1}{h_{ci} \cdot 2\pi \cdot r_1 \cdot l} \quad \text{expresión (1.1)}$$

h_{ci} = coeficiente de convección interna, J/m²sK

A_1 = Área lateral interna, m²

L = Longitud de la tubería, m

$$R_2 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k_1 \cdot l} \quad \text{expresión (1.2)}$$

r_2 = radio externo, m

r_1 = radio interno, m

k_1 = Coeficiente de conductividad térmica de teflón, J/msK

L= Longitud de la tubería, m

$$R_3 = \frac{1}{h_{co} \cdot A_2} = \frac{1}{h_{co} \cdot 2\pi \cdot r_2 \cdot l} \quad \text{expresión (1.3)}$$

h_{co} = coeficiente de convección externa, J/m²sK

A_2 = Área lateral externa, m²

L= Longitud de la tubería, m

3.1 Cálculo del coeficiente de convección interno:

El cálculo del coeficiente local individual de transmisión de calor debe realizarse utilizando correlaciones adimensionales obtenidas del análisis de datos experimentales. Por lo tanto es necesario determinar las condiciones del fluido refrigerante en el interior de la tubería mediante números adimensionales:

3.1.1. Número de Reynolds.

El número de reynolds nos dirá en que régimen de flujo nos encontramos, laminar, turbulento o de transición, y se calcula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_1}{\mu}$$

ρ : densidad= 809.5 kg/m³

d_1 : diámetro interno= 4*10⁻³ m

μ : viscosidad= 153.409*10⁻⁶ kg/ms

v= velocidad de la tubería, m/s

No conocemos la velocidad del fluido, la calcularemos por la ecuación de continuidad, sabiendo que para fluidos con densidad constante, esta ecuación es:

$$Q_v = cte = v_1 S_1 = v_2 S_2 \Rightarrow v_2 = \frac{2.2265 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2} = 0.443 \text{ m/s}$$

Sustituyendo estos valores en el número de Reynolds se obtiene:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_1}{\mu} = \frac{809.5 \cdot 0.443 \cdot 8 \cdot 10^{-3}}{153.409 \cdot 10^{-6}} = 18689.23 \text{ Régimen turbulento.}$$

3.1.2. Número de Prandtl:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

C_p: calor específico (77 K, 1 bar)= 2062.762 J/kgK

m: viscosidad del N₂ (77 K, 1 bar)= 153.409*10⁻⁶ kg/m.s

k: conductividad del N₂ (77 K, 1 bar)= 0.137 J/msK

Sustituyendo:

$$Pr = \frac{2062.762 \cdot 153.409 \cdot 10^{-6}}{0.137} = 2.31$$

3.1.3. Número de Nusselt:

La correlación adimensional para la determinación del número de Nusselt, en el caso del flujo turbulento desarrollado por el interior de tuberías, viene dada por la expresión correlacionada por Colburn:

$$Nu = \frac{h \cdot d_1}{k} = 0.023 Pr^{1/3} \cdot Re^{0.8}$$

Las consideraciones para que la expresión sea válida son:

- ✓ Número de Prandtl comprendida entre 0.7 < Pr < 100
- ✓ El flujo estará completamente desarrollado para L/d < 50

$$Nu = \frac{h \cdot d_1}{k} = 0.023 \cdot 2.31^{1/3} \cdot 18698.59^{0.8} = 79.502$$

$$h_{ci} = \frac{Nu \cdot k}{d_1} = \frac{79.502 \cdot 0.137}{8 \cdot 10^{-3}} = 1361.474 \text{ J/m}^2 \text{ sK}$$

Ahora que tenemos todos los datos vamos a calcular todas las resistencias y el flujo de calor sin aislante térmico.

$$R_1 = \frac{1}{h_{ci} \cdot A_1} = \frac{1}{1361.474 \cdot 2\pi \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 25} = 1.169 \cdot 10^{-3} \text{ J/sK}$$

$$R_2 = \frac{\ln(4.1 \cdot 10^{-3} / 4 \cdot 10^{-3})}{2\pi \cdot 0.2324 \cdot 25} = 6.764 \cdot 10^{-4} \text{ J/sK}$$

$$R_3 = \frac{1}{h_{co} \cdot A_2} = \frac{1}{10 \cdot 2\pi \cdot 4.1 \cdot 10^{-3} \cdot 25} = 0.155 \text{ J/sK}$$

Luego el flujo de calor es:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{298 - 77}{1.169 \cdot 10^{-3} + 6.764 \cdot 10^{-4} + 0.155} = 1409.03 \text{ J/s}$$

Comparamos este valor con el valor del calor máximo que se puede perder y vemos que sin aislante no se sobrepasa este valor que es 3629.568 J/s en comparación con los 1409.03 J/s que se pierden sin aislante, sin embargo, este aislamiento es necesario, ya que se produce una condensación en la tubería de teflón, cuya temperatura se puede aproximar a 77°K, es decir, -196°C.

En instalaciones de refrigeración que funcionan con temperaturas de fluido inferiores a la del rocío del ambiente, las gotas de agua de condensación perturbarían sensiblemente el funcionamiento, causando daños importantes.

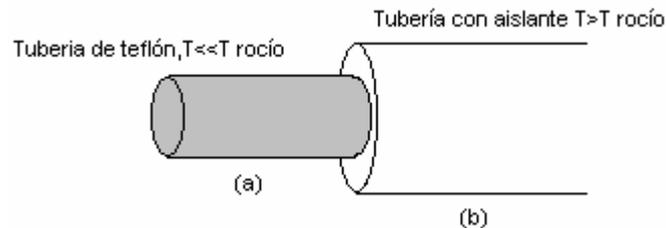
4. El fenómeno de la condensación:

La condensación es un fenómeno físico que se produce en una superficie con temperatura inferior a la del rocío del ambiente.

El aire caliente puede contener mayor cantidad de vapor de agua que el aire frío. Al enfriarlo se produce un aumento de la humedad relativa que puede llegar al 100%. La temperatura a la cual se alcanza esta saturación se llama "punto de rocío".

A una temperatura inferior a la del punto de rocío, el vapor de agua condensa en forma de gotas o de escarcha.

En una tubería de refrigeración como la mostrada en la figura, se formará hielo en la parte sin aislar (a)



No obstante, si el espesor del aislamiento es muy pequeño, se seguirá formando escarcha si la temperatura superficial es inferior a 0°C o gotas de rocío si ésta temperatura se encuentra entre 0°C y la temperatura de rocío.

Con el espesor seleccionado en la parte (b) de la figura, obtenemos una temperatura superficial superior a la de rocío y no se producirá condensación.

4.1 Cálculo del espesor de aislamiento necesario para evitar la condensación.

Los factores más importantes son los siguientes:

1. La temperatura ambiente T_a
2. La humedad relativa HR
3. El coeficiente de conductividad térmica k

4.1. La temperatura ambiente T_a y la humedad relativa HR

Esta temperatura es un dato que puede obtenerse en varias fuentes. Por ejemplo, los laboratorios meteorológicos disponen de valores de las localidades más importantes. Los valores del Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.) son los siguientes: Temperatura media 18.2°C, la media de las mínimas 15.2°C y la media de las máximas 21.2°C. Para asegurarse que el valor de cálculo garantiza la prevención de la condensación, se debe escoger los valores máximos para la temperatura ambiente, es decir, en este caso 21.2°C

La humedad relativa es alta: alrededor del 72% como media anual debida a la proximidad del mar.

4.2 Estimación de la conductividad térmica del poliuretano (k_2)

Uno de los aislamientos disponibles en el mercado para tuberías que conducen nitrógeno líquido es el poliuretano expandido reforzado con fibra de vidrio y cubierta final de PVC.

El coeficiente de conductividad aumenta con la temperatura, por lo que en un cálculo correcto hemos de usar el valor para una temperatura media entre la interior y la ambiente.

La conductividad térmica del poliuretano viene dado por la expresión:

$$\log k_2 = a + b(\log T) + c(\log T)^2 + d(\log T)^3 + e(\log T)^4 + f(\log T)^5 + g(\log T)^6 + h(\log T)^7 + i(\log T)^8$$

Los valores de los coeficientes y el rango de aplicabilidad de la expresión son:

| a | b | c | d | e | f | g | h | i | Rango datos | % error |
|---------|--------|----------|---------|---------|--------|---------|----------|---|-------------|---------|
| -33.898 | 117.81 | -176.376 | 142.038 | -63.034 | 14.958 | -1.5468 | 0.020625 | 0 | 30-300 | 1 |

El poliuretano se encuentra sometido a una temperatura entre los valores máximos y mínimos de 298 K y 77 K, respectivamente, luego se calculará su valor medio mediante la expresión:

$$\log k_m = \int_{77}^{298} \frac{\log k(T)}{\Delta T}$$

**SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
MEMORIA DE CÁLCULO**

Dada la complejidad matemática de la integral, ésta se aproximará por mínimos cuadrados. Es decir, se representará gráficamente $\log k(T)$ en función de la temperatura.

Sabiendo que la integral es el área bajo la curva representada, dicha área se calculará de forma aproximada como la suma del área de rectángulos de base diez y de la altura la media aritmética entre los valores extremos de la base.

Los valores obtenidos están representados en la siguiente tabla:

| T | K | Log K | Media | Área |
|-----|------------|-------------|-------------|-------------|
| 77 | 0,01651709 | -1,78206656 | -1,76828481 | -17,6828481 |
| 87 | 0,01759936 | -1,75450306 | -1,74158458 | -17,4158458 |
| 97 | 0,01867815 | -1,72866611 | -1,71644927 | -17,1644927 |
| 107 | 0,01975912 | -1,70423244 | -1,69261435 | -16,9261435 |
| 117 | 0,02084509 | -1,68099626 | -1,66991684 | -16,6991684 |
| 127 | 0,02193626 | -1,65883743 | -1,64826622 | -16,4826622 |
| 137 | 0,02303059 | -1,63769502 | -1,62762133 | -16,2762133 |
| 147 | 0,02412417 | -1,61754764 | -1,60797353 | -16,0797353 |
| 157 | 0,02521161 | -1,59839942 | -1,58933485 | -15,8933485 |
| 167 | 0,02628632 | -1,58027027 | -1,57172973 | -15,7172973 |
| 177 | 0,02734077 | -1,56318918 | -1,55518944 | -15,5518944 |
| 187 | 0,0283668 | -1,5471897 | -1,53974833 | -15,3974833 |
| 197 | 0,02935574 | -1,53230696 | -1,52544131 | -15,2544131 |
| 207 | 0,03029872 | -1,51857567 | -1,51230227 | -15,1230227 |
| 217 | 0,03118682 | -1,50602887 | -1,50036303 | -15,0036303 |
| 227 | 0,03201126 | -1,49469719 | -1,4896528 | -14,896528 |
| 237 | 0,0327636 | -1,48460841 | -1,48019786 | -14,8019786 |
| 247 | 0,03343588 | -1,4757873 | -1,47202141 | -14,7202141 |
| 257 | 0,0340208 | -1,46825552 | -1,46514363 | -14,6514363 |
| 267 | 0,03451185 | -1,46203174 | -1,45958173 | -14,5958173 |
| 277 | 0,03490344 | -1,45713171 | -1,45535009 | -14,5535009 |
| 287 | 0,03519099 | -1,45356847 | -1,45246048 | -14,5246048 |
| 297 | 0,03537101 | -1,45135249 | -1,4512789 | -14,512789 |
| 298 | 0,035383 | -1,45120532 | | |

La suma de todas las áreas es $\sum \text{Áreas} = -359.925$ con lo que la conductividad térmica del poliuretano vendrá dada por:

$$\log k_m = \int_{77}^{298} \frac{\log k(T)}{\Delta T} = \sum_{77}^{298} \frac{-359.925}{(298-77)} = -1.6286 \Rightarrow k_m = 10^{-1.6286} = 0.0235 \text{ J/msK}$$

Una vez que ya se conoce el valor medio de la conductividad térmica del poliuretano, se llevará a cabo la determinación del espesor del aislante térmico.

5 Cálculo del espesor del aislante térmico:

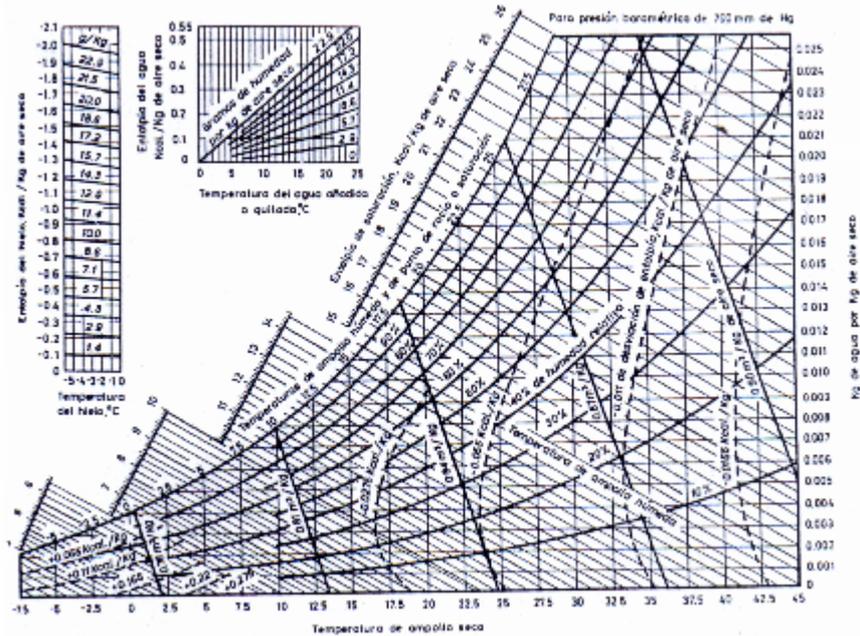
Vamos a realizar el cálculo del espesor del poliuretano para evitar la condensación de la siguiente manera:

Se van a dar distintos valores al espesor del aislante y se va a calcular el flujo total de calor. Con este flujo, y suponiendo una temperatura interior del poliuretano de 77°K se va a estimar la temperatura final del mismo. Esta temperatura se comparará con la temperatura de rocío, obtenida gráficamente en el siguiente apartado. Si la temperatura final del poliuretano es menor que la de rocío se recalculará aumentando el espesor del mismo. Este proceso finalizará cuando la temperatura del aislante sea mayor que la temperatura de rocío del vapor de agua contenido en el aire.

5.1 Estimación del punto de rocío .

El punto de rocío es la temperatura a la que una mezcla dada de aire y de vapor de agua está saturada de vapor de agua y empieza la condensación de la misma.

Para averiguar esta temperatura hacemos uso de una gráfica psicrométrica, en la que además de las escalas de temperatura y humedad y de las líneas de saturación adiabática, se incluyen otras escalas y otras líneas para mayor comodidad. Así, se han trazado curvas de porcentaje de humedad relativa que tienen como ordenadas fracciones de la presión de vapor correspondiente a la curva de saturación.



Después del uso de esta gráfica, para un valor de temperatura ambiente de 21°C y de un 70% de humedad relativa aproximadamente, la temperatura de rocío es de 14°C aproximadamente.

5.2. Estimación del espesor del aislante térmico

La utilización de un aislante térmico incrementa la resistencia al paso del flujo de calor, luego añade una nueva resistencia R_4 a la expresión (1), quedando de la siguiente forma:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_1 + R_2 + R_4 + R_5} \text{ expresión (2)}$$

T_1 = temperatura del fluido circulante a través de la tubería, K

T_2 = temperatura del fluido exterior, K

R_1 = Resistencia por convección interna, J/sK

R_2 = Resistencia por conducción a través de la tubería de teflón, J/sK

R_3 = Resistencia por conducción a través del aislante térmico, J/sK

R_4 = Resistencia por convección externa, J/sK

Las resistencias de calor R_1 y R_2 vienen cuantificadas por las expresiones (1.1) y (1.2) respectivamente. Las resistencias R_3 y R_4 vienen dadas por:

$$R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_2 \cdot l} \text{ expresión (2.1)}$$

$$R_4 = \frac{1}{h_{co} \cdot A_4} = \frac{1}{h_{co} \cdot 2\pi \cdot r_3 \cdot l} \text{ expresión (2.2)}$$

Siendo:

r_2 = radio externo de la tubería de teflón, m

r_3 = radio externo de la tubería, incluyendo el espesor del aislante, m

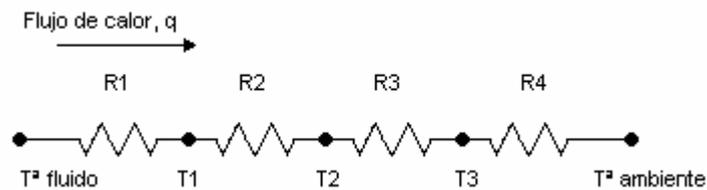
k_2 = Coeficiente de conductividad térmica del poliuretano, J/msK

L= Longitud de la tubería, m

h_{co} = coeficiente de convección externa, J/m²sK

A_3 = Área lateral externa, m²

Como se puede deducir de las ecuaciones, dependiendo del espesor del aislante, así serán las pérdidas de calor. Daremos valores al espesor del poliuretano y calcularemos los valores de las resistencias 3 y 4 y luego el flujo de calor. Si hacemos una analogía de este sistema con uno eléctrico tendríamos un circuito con 4 resistencias en serie (serían las resistencias debidas a la convección y conducción), recorridas por el flujo de calor q . Después, con ese flujo de calor, se va a calcular la temperatura final del aislante (T_3 en el dibujo), a fin de comprobar si el espesor del mismo es suficiente para mantener la temperatura del mismo por debajo de la temperatura de rocío.



Los cálculos se realizan como sigue:

Espesor de aislante 1cm.

$$R_3 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \cdot k_2 \cdot l} = \frac{\ln(0.0141/0.0041)}{2 \cdot \pi \cdot 0.0235 \cdot 25} = 0.3344$$

$$R_4 = \frac{1}{h_{co} \cdot A_4} = \frac{1}{h_{co} \cdot 2\pi \cdot r_3 \cdot l} = \frac{1}{10 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.0141 \cdot 25} = 0.0452$$

$$q = \frac{T_2 - T_1}{R_1 + R_2 + R_4 + R_5} = \frac{298 - 77}{1.169 \cdot 10^{-3} + 6.764 \cdot 10^{-4} + 0.3344 + 0.0452} = 579.741 J / s$$

Una vez que tenemos el flujo de calor, sustituimos en la ecuación del flujo de calor por conducción en el aislante térmico que sería:

$$q_{conduccion} = \frac{T_3 - T_2}{R_3} = \frac{T_3 - 77}{0.3344} = 579.741 J / s$$

$$T_3 = (q_{conduccion} \cdot R_3) + T_2 = (579.741 \cdot 0.3344) + 77 = 270.851^\circ K \Rightarrow -2.15^\circ C$$

Como vemos, la temperatura resultante no sólo es menor que la temperatura de rocío (14°C), sino que además es menor de 0°, por lo que se produciría escarcha en la superficie del aislante.

Los cálculos realizados se resumen en la siguiente tabla:

| Espesor aislante (cm) | R3 | R4 | q=DT/SR(0,75) | DT | T ^a ROCÍO (K) | T ^a ROCÍO (C) |
|-----------------------|--------|--------|---------------|--------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 0,3344 | 0,0452 | 579,7414 | 193,85 | 270,85 | -2,15 |
| 2 | 0,4795 | 0,0264 | 435,4001 | 208,77 | 285,77 | 12,77 |
| 2,2 | 0,5011 | 0,0244 | 419,2461 | 210,07 | 287,07 | 14,07 |
| 2,3 | 0,5112 | 0,0235 | 411,9946 | 210,63 | 287,63 | 14,63 |
| 2,4 | 0,5211 | 0,0227 | 405,2159 | 211,14 | 288,14 | 15,14 |
| 2,5 | 0,5305 | 0,0219 | 398,8623 | 211,61 | 288,61 | 15,61 |

Como se puede ver, con un espesor de aislante de 2.3 centímetros de espesor es suficiente para que la temperatura de la superficie del aislante sea superior a la temperatura de rocío del vapor de agua, que es de 14° C aproximadamente. Sin embargo, tomando un espesor algo mayor (2.4 cm) nos aseguramos de que no se condensa el vapor de agua cuando exista algún incremento de la temperatura.

Determinar la presión máxima de trabajo para el espesor de la tubería de teflón:

La fórmula de Barlow se utiliza comúnmente en la industria para aproximar o para predecir las presiones máximas de la pared fina dúctil tubular o de los materiales cilíndricos debido a la presurización y rinde generalmente buenos resultados o predicciones.

La expresión de la fórmula de Barlow es la siguiente:

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot e}{D} = \frac{2 \cdot 1451.09 \cdot 1.969 \cdot 10^{-3}}{0.323} = 17.687 \text{ psi}$$

donde: P: presión máxima de trabajo, 15 bar = 0.00217 psi

S: Esfuerzo máximo, 1451.098 psi

D: diámetro exterior de la tubería, 8.2 mm= 0.323 pulgadas

E: espesor de la tubería, 0.1 mm= 1.969*10⁻³ pulgadas.

La presión máxima de trabajo que puede soportar la tubería de teflón según sus características técnicas es de 17.687 psi, un valor mucho mayor con respecto a la presión de operación que es de 0.00217 psi. Por tanto, las condiciones en las que se operan son seguras.

8.- CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE TRABAJO DE LA BOTELLA DE NITRÓGENO .

En este capítulo de la memoria de cálculo, se va a calcular la presión en la línea de refrigeración, tanto en la línea de nitrógeno líquido como la de gas, así como las distintas velocidades de flujo, a fin de caracterizar ambas líneas.

Se va a dividir éste cálculo de la presión en dos partes: se calcularán primero las pérdidas de presión del tramo desde el Dewar hasta la boquilla y después desde la botella de N₂ y el Dewar.

1. Cálculo de las pérdidas de presión desde la superficie del nivel de líquido que contiene el dewar y la entrada de la boquilla.

Se va a utilizar la ecuación fundamental de la hidrodinámica, ya que en este tramo circula un líquido con la densidad constante.

Esta expresión es la ecuación de Bernoulli, y viene dado por:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g} \text{ ecuación (1)}$$

Siendo:

P₁: Presión en la superficie del líquido del dewar; N/m²

P₂: Presión a la entrada de la boquilla; 15 bar= 15.199*10⁵ N/m²

z₁: Altura del punto 1; m

z₂: Altura del punto 2; m

v₁: Velocidad en la superficie del líquido del Dewar: m/s

v₂: Velocidad en la entrada de la boquilla: 0.443 m/s

H_{rt}: Pérdidas de carga; m

ρ: Densidad del nitrógeno líquido: 809.5 kg/m³

g: Aceleración de la gravedad: 9.8 m/s²

Para este caso concreto, haremos las siguientes consideraciones:

- ✓ La altura del punto 1 es la misma que la del punto 2: $z_1 = z_2$
- ✓ La velocidad en el punto 1 se puede aproximar a 0, ya que el punto 1 está en la superficie del líquido contenido en el Dewar

Con lo que la ecuación se simplifica como sigue:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_r = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g} \Rightarrow \frac{P_1}{\rho \cdot g} - H_r = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g}$$
$$\Delta P = \left(H_r + \frac{v_2^2}{2g} \right) \rho \cdot g \Rightarrow P_1 = P_2 + \left(H_r + \frac{v_2^2}{2g} \right) \rho \cdot g \quad \text{Ecuación (2)}$$

1.1 Cálculo de las pérdidas de carga

Las pérdidas de carga en las tuberías son de dos clases: primarias y secundarias.

Las pérdidas primarias son las pérdidas de superficie en el contacto del fluido con la tubería y se cuantifican mediante la expresión de Darcy-Weisbach:

$$H_r = (\lambda) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación (3)}$$

siendo:

(λ): coeficiente de fricción

L: longitud de la tubería: 25 m

D: Diámetro de la tubería de teflón: $8 \cdot 10^{-3}$ m

v: velocidad del fluido: 0.443 m/s

El teflón ofrece muy poca resistencia al paso del fluido, como consecuencia el valor que adquiere el coeficiente de fricción es muy pequeño en comparación con otros materiales y oscila entre 0.05-0.2. Se tomará el mayor valor considerando que ofrece la máxima resistencia. Por lo tanto: (λ) = 0.2 y sustituyendo:

$$H_r = (0.2) \frac{25}{8 \cdot 10^{-3}} \frac{0.443^2}{2 \cdot 9.8} = 6.258 \text{ m}$$

Las pérdidas secundarias son las pérdidas de forma, que tiene lugar en las transiciones (estrechamientos o expansiones de la corriente), codos, válvulas, y en toda clase de accesorios de tuberías. Las pérdidas secundarias se las considera como equivalentes a unas longitudes de tubería que varían según el tipo de accesorio. En nuestro caso existen una válvula de escape y una válvula abierta. La longitud equivalente de una válvula de escape es de 1.4 metros y la de una válvula abierta es de 2.8 metros, luego las pérdidas de carga totales son:

$$H_{\text{rotales}} = H_{\text{primarias}} + H_{\text{secundarias}} = 6.258 + 1.4 + 2.8 = 10.458m$$

1.2 Cálculo de la presión en el punto 1:

Se despeja la presión de la ecuación (2) y se obtiene:

$$\Delta P = \left(H_{\text{r}} + \frac{v_2^2}{2g} \right) \rho \cdot g \Rightarrow P_1 = P_2 + \left(H_{\text{r}} + \frac{v_2^2}{2g} \right) \rho \cdot g$$
$$P_1 = 15.199 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 + \left(10.458m + \frac{0.443^2 \text{ m}^2/\text{s}^2}{2 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2} \right) 809.5 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 =$$

La presión que tiene el líquido en el dewar es de 25.567 bar, sin embargo, la presión que fijaremos en el manorreductor de la botella de nitrógeno será algo mayor como consecuencia de las pérdidas de carga al recorrer la conducción de entrada de los gases de nitrógeno al Dewar, por lo que se calcularán estas pérdidas.

2. Cálculo de la presión de salida de los gases de la botella de nitrógeno:

Ahora la ecuación fundamental cambia, ya que estamos hablando de un gas en vez de un líquido. En este caso no aplicaremos la ecuación básica de la hidrodinámica sino la ecuación general de flujo, que es:

$$(4f) \frac{G^2}{2} \frac{L}{D} + \frac{M}{2RT} (P_2^2 - P_1^2) + G^2 \left(\ln \frac{T_2}{T_1} + \ln \frac{P_1}{P_2} \right) = 0 \quad \text{Ecuación (4)}$$

Haremos las siguientes simplificaciones:

- ✓ El flujo de un gas a través de un conducto largo sin aislamiento en un entorno a temperatura constante ($T_1 \approx T_2 = T_{sistema}$) puede suponerse una buena aproximación al flujo isotérmico, ya que el aumento de temperatura provocado por la fricción es muy pequeño.
- ✓ Consideramos que la densidad apenas varía $\rho \approx cte$
- ✓ La velocidad de flujo es pequeña, $v \leq 35 m/s$, y a esa velocidad, la diferencia de presiones es pequeña, por lo que $\ln \frac{P_1}{P_2} \approx 0$

Después de estas simplificaciones, la ecuación nos queda:

$$P_1^2 - P_2^2 = \frac{RT}{M} (4f) G^2 \frac{L}{D} \text{ que es la ecuación de Weymouth (5)}$$

Siendo:

$$G = \rho \cdot v \quad (6)$$

En este caso:

P_2 : Presión de la conducción de entrada en el Dewar = 25.567 bar = 25.506*10⁵

P_1 : Presión de la salida de los gases de la botella.

$M = 28 \cdot 10^{-3}$ Kg/mol

$R = 8.314$ J/molK

$L = 1$ m

$D = 2.54 \cdot 10^{-2}$ m

No conocemos el incremento de la presión, ni la velocidad de flujo, ni por lo tanto, el régimen de flujo ni el factor de fricción, por lo que vamos a hacer una consideración sobre la velocidad de flujo del gas a través de la conducción y luego calcularemos la presión que hay que fijar en la botella de N₂ gaseoso.

Como se ha visto, la ecuación de Weymouth es válida cuando la velocidad de flujo del gas es inferior a 35 m/s, por lo que se va a fijar la velocidad en el tramo desde la botella de nitrógeno hasta el Dewar de 30 m/s, y se va a calcular la presión que se debe fijar en el

manorreductor de la botella para conseguir los 25.6 bar necesarios en la superficie del dewar.

Calcularemos primero el coeficiente de fricción, sabiendo que la rugosidad relativa es $e/D=0.0018$ y que el Reynolds es:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} = \frac{1.16 \cdot 30 \cdot 2.54 \cdot 10^{-2}}{15 \cdot 10^{-6}} = 58928$$

siendo:

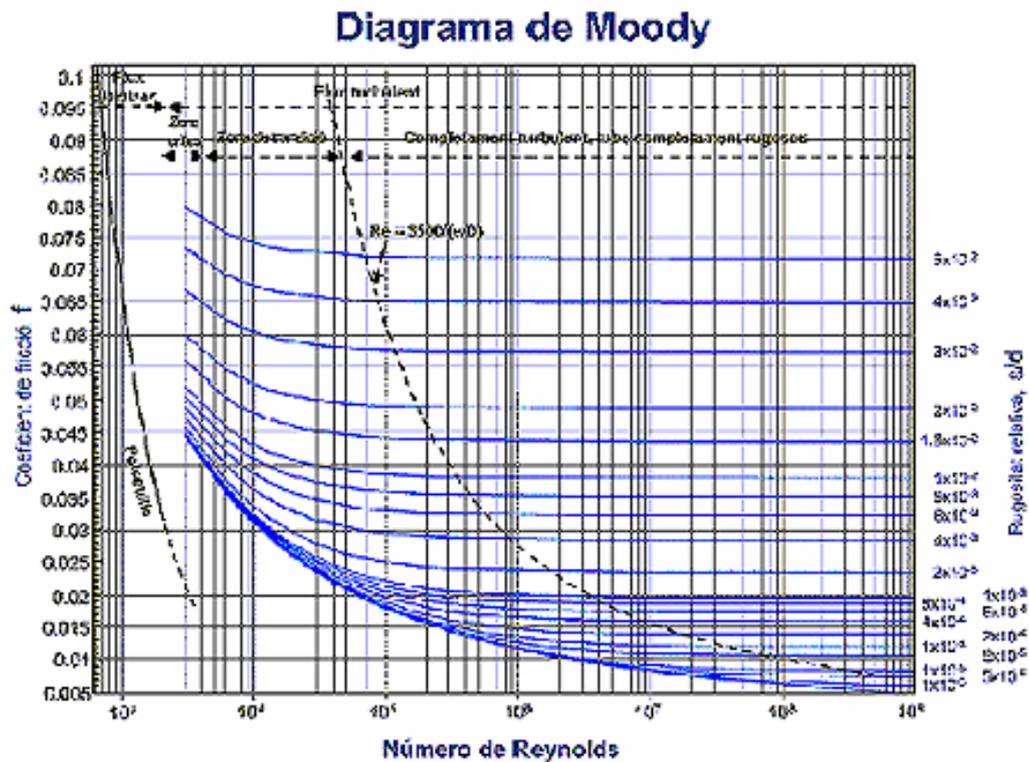
ρ : Densidad del nitrógeno gaseoso=1.16 kg/m³

v : Velocidad de la corriente gaseosa= 30 m/s

D : Diámetro de la conducción= 1 pulgada=2.54*10⁻² m

μ : Viscosidad del nitrógeno gaseoso= 15*10⁻⁶

Buscamos con este número de Reynolds el valor del coeficiente de fricción en el diagrama de Moody:



Con este valor y con la gráfica de Moody tenemos que el valor del factor de fricción (4f) de 0.024. El valor de G es $G = \rho \cdot v = 1.16 \cdot 30 = 40.6 \text{ kg} / \text{m}^2 \text{ s}$. Ya con estos valores del factor (4f) y de G y sustituyendo en la ecuación de Weymouth:

$$P_1^2 - (25.906 \cdot 10^5)^2 = \frac{8.314 \cdot 298}{28 \cdot 10^{-3}} 0.021 (40.6)^2 \frac{1}{2.54 \cdot 10^{-2}} = 120.589 \cdot 10^6 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow P_1^2 = 6.506 \cdot 10^{12} + 120.589 \cdot 10^6 = 6.505 \cdot 10^{12} \Rightarrow P_1 = 25.9062 \cdot 10^5 \text{ N} / \text{m}^2$$

Como se ve en el resultado, la presión que hay que fijar en el manorreductor de la botella de nitrógeno gaseoso es prácticamente la misma presión que se necesita para empujar el nitrógeno líquido desde la superficie del Dewar.

9.- CÁLCULO DEL VOLUMEN DE DEWAR NECESARIO:

En este capítulo de la memoria de cálculo se va a determinar el volumen del depósito dewar para la refrigeración del sistema.

Dado que el sistema de recantado puede operar tanto en continuo como en discontinuo, se va a considerar que el tiempo de operación va a ser una jornada laboral de 8 horas.

Sabiendo que el caudal volumétrico de nitrógeno líquido requerido es de $2.65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, el volumen de nitrógeno líquido requerido es de:

$$2.65 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} \cdot 8\text{h} \cdot \frac{3600}{1\text{h}} \text{ s} = 0.763 \text{ m}^3$$

El volumen del dewar será un 20% mayor, para dejar un margen de seguridad en el mismo y que no esté completamente lleno.

El volumen del dejar que vamos a tomar es por tanto: $0.763 \text{ m}^3 + 20\% = 0.9156 \text{ m}^3 \approx 1 \text{ m}^3$

Con estas características se ha buscado el modelo del mercado que más se le parece que es el modelo D180, de 1150 litros de capacidad y de dimensiones 508 mm de diámetro exterior y 1640 mm de longitud

10.- CÁLCULO DEL NÚMERO DE BOTELLAS DE N₂ QUE NECESITA EL EQUIPO:

En este capítulo se estimará el número de botellas de N₂ necesarias para que el equipo trabaje en continuo durante una jornada laboral de 8h.

El nitrógeno se suministra en estado gaseoso en botellas y bloques de botellas a 200/300 bar de presión de llenado.

Según el tipo de envase tenemos distintas capacidades, como estos:

| Tipo de envase | Capacidad geométrica (litros) | Diámetro exterior (mm) | Longitud (mm) | Tara (Kg) | Capacidad de gas (Nm ³) | Presión de llenado (bar a 15°C) |
|----------------|-------------------------------|------------------------|---------------|-----------|-------------------------------------|---------------------------------|
| B10 | 10 | 140 | 815 | 16 | 1.9 | 200 |
| B50 | 50 | 230 | 1550 | 63 | 9.4 | 200 |
| BL12 | 600 | 1620 x 1200x 880 | | 930 | 112.8 | 200 |
| BL23 | 1150 | 1860x 1250 x 1035 | | 1650 | 216.2 | 200 |

Como se puede observar en esta tabla, sólo necesitamos una botella (B10), ya que tiene una capacidad de gas de casi 2 m³, aunque por motivos de seguridad (si falla la botella) se pondrán dos en esta línea.

11.- CÁLCULO DEL TIEMPO DE ENFRIAMIENTO Y DE TRÁNSITO DEL NITRÓGENO LÍQUIDO DE LA TUBERÍA DE TEFLÓN.

El objetivo de este capítulo es estimar el tiempo de enfriamiento de la tubería de teflón y el tiempo de tránsito del nitrógeno líquido por la misma, a fin de saber cuanto tiempo se tarda en tener las condiciones óptimas de temperatura para el flujo de nitrógeno líquido.

Tiempo de tránsito:

Es el tiempo que tarda el fluido en recorrer la tubería de teflón, desde donde se encuentra almacenado el nitrógeno líquido en el depósito Dewar, hasta alcanzar la boquilla. Sabiendo que la tubería de teflón es de 25 m y la velocidad del fluido es de 0.443 m/s, el

tiempo de tránsito viene dado por: $v = \frac{s}{t} \Rightarrow t = \frac{s}{v} = 56.43$ segundos.

Tiempo de enfriamiento:

El tiempo de enfriamiento es el tiempo que tarde la tubería de teflón, que se encuentra inicialmente a temperatura ambiente de 298 K en disminuir su temperatura hasta 77 K, condiciones criogénicas:

$$V_{\text{enfriamiento}} = 2 \cdot \pi \cdot e \cdot l = 2 \cdot \pi \cdot 0.1 \cdot 10^{-3} \cdot 25 = 0.0157 m^3$$

Cantidad de calor que hay que retirar para enfriar la tubería de teflón:

Vamos a calcular la cantidad de calor que hay que retirar para enfriar una tubería de teflón de longitud 25 metros y de espesor 0.1mm. Esta cantidad de calor viene dado por:

$$Q = V_{\text{enfriamiento}} \cdot \rho \cdot Cp \cdot \Delta T = 0.0157 \cdot 2200 \cdot 1000 \cdot 221 = 7.64 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Siendo:

Cp: capacidad calorífica del teflón= 2200 J/Kg

ΔT : Incremento de temperatura desde los 298 K a 77K

ρ : Densidad del teflón= 1000 kg/m³

Caudal másico de nitrógeno líquido necesario:

Ahora calculamos el caudal másico de nitrógeno líquido necesario para absorber este calor. Este caudal de nitrógeno másico está calculado por:

$$Q_{\text{absorbido}}_{N_2} = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$7.64 \cdot 10^6 = Q_m \cdot 2060 \cdot 221 \Rightarrow Q_m = 0.0596 \text{ Kg/s}$$

Siendo:

Cp: capacidad calorífica del nitrógeno líquido a 77 K: 2060

ΔT Incremento de temperatura desde 298K hasta 77K

Así pues, teniendo en cuenta que el caudal másico del nitrógeno líquido es 0.0824 kg/s, el tiempo de enfriamiento viene dado por:

$$t_{\text{enfriamiento}} = \frac{Q_{\text{másico}}_{\text{enfriamiento}}}{Q_{\text{másico}}} = \frac{0.0596}{0.01802} = 3.307 \text{ segundos}$$

Como resumen, podemos afirmar que el sistema podrá empezar a operar unos 3.5 segundos después de que el flujo esté completamente desarrollado, es decir, el tiempo total para empezar con el proceso de refrigeración es:

$$t_{\text{total}} = t_{\text{tránsito}} + t_{\text{enfriamiento}} = 56.433 + 3.307 = 59.74 \text{ segundos} \approx 1 \text{ minuto.}$$

12.- SEDIMENTACIÓN DEL POLVO DE CARBONO:

En este capítulo se hará una breve introducción sobre el mecanismo de separación de sedimentación y seguidamente se demostrará que en las condiciones de trabajo y características técnicas del equipo, son adecuadas para que tenga lugar la sedimentación del polvo de carbono absorbido por la línea de vacío, en los tanques.

Hay que tener en cuenta que cuando se llevan a cabo las perforaciones mediante la utilización del láser de CO₂ sobre la fibra de carbono, se produce la sublimación de ésta, pero se quema más resina que fibra, puesto que el punto de ebullición de la fibra es mayor. Se considerará que todo el material quemado es resina, en el peor de los casos, por poseer menor densidad. De esta forma el polvo será menos denso y existirá mayor dificultad en su sedimentación.

Objeto de la recolección o separación de polvos y nieblas:

La recolección o separación de polvos y nieblas trata de la eliminación o recogida de los dispersoides sólidos o líquidos de los gases, con el propósito de:

1. Evitar riesgos y peligros para la salud, derivados de la aspiración de polvo.
2. Reducir los gastos de conservación de la maquinaria, evitando que el polvo entre en la misma y se acumule.
3. Evitar molestias, como cuando se limpia el aire de ventilación.
4. Mejorar la calidad de los productos.
5. La recuperación de un producto valioso.
6. La recolección de un producto pulverizado, como en los transportadores neumáticos.

En este caso, se realiza la separación del polvo de carbono por las tres primeras razones expuestas, es decir, para evitar peligros para la salud de los trabajadores, evitar molestias y reducir gastos de mantenimiento de la maquinaria.

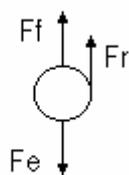
Concepto de sedimentación:

La sedimentación es una operación unitaria física de separación de los sólidos contenidos en suspensión. En la sedimentación, las partículas se separan por la acción de la gravedad. A medida que tiene lugar la sedimentación, las partículas se van uniendo unas a otras cambiando su tamaño y su geometría, es lo que se llama sedimentación por floculación. Así, como que el movimiento de unas partículas afecta a otras que van sedimentando.

Sin embargo en nuestro caso, se va a considerar que se produce una sedimentación ideal en la que las partículas que sedimentan son esféricas y conservan su individualidad, lo cual resulta ser una buena aproximación numérica.

El tamaño de las partículas es un factor fundamental del que depende el proceso de sedimentación. De hecho si las partículas son muy pequeñas, se mueven desordenadamente en direcciones no predecibles, contrarrestando la fuerza externa dificultando la sedimentación. A este fenómeno se le denomina movimiento Browniano. Para partículas esféricas de diámetro de 0.1 micras el efecto Browniano es dominante. El tamaño medio de las partículas de polvo de carbono es de 50 micras.

La velocidad de sedimentación



Una partícula libre en el seno de un fluido se encuentra sometido a tres fuerzas:

$$F_e = \text{Fuerza externa} = m_p \cdot g$$

$$F_f = \text{Fuerza de flotación} = m_f \cdot g = \rho_f \cdot v_f \cdot g = \rho_f \cdot v_p \cdot g =$$

$$= \rho_f \cdot \frac{m_p}{\rho_p} \cdot g$$

$$F_r = \text{Fuerza de rozamiento} = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_f \cdot v_p^2 \cdot A_p$$

Siendo:

m_p : masa de la partícula, kg

V_p : volumen de la partícula, m³

ρ_p : densidad de la partícula, kg/ m³

A_p : área de la partícula, m²

v_p : velocidad de sedimentación la partícula, m/s

m_f : masa del fluido, kg

V_f : volumen del fluido, m³

ρ_f : densidad del fluido, kg/ m³

g : aceleración de la gravedad, m/s²

La fuerza resultante es: $F = F_f + F_r - F_e = m \cdot \frac{dv}{dt}$

La velocidad de sedimentación es cuando la partícula en el seno del fluido no se encuentra acelerada y adquiere un valor constante y límite de sedimentación, por lo tanto $\frac{dv}{dt} \longrightarrow 0$

Sustituyendo las expresiones de fuerza externa, fuerza de rozamiento y fuerza de flotación, en la expresión de fuerza resultante y considerando la condición límite anterior, la velocidad de sedimentación ideal viene dada por la expresión:

$$v_f = \sqrt{\frac{4 \cdot D_p \cdot g \cdot (\rho_p - \rho)}{3 \cdot C_D \cdot \rho}} \quad (1)$$

Donde:

D_p : Diámetro de partícula, m

ρ_p : densidad de la partícula, kg/ m³

ρ : densidad del fluido, kg/ m³

g : aceleración de la gravedad, m/s²

C_D : Coeficiente de rozamiento.

El coeficiente de rozamiento está relacionado con el Reynolds de partículas mediante la siguiente expresión:

$$C_D = \frac{b_i}{Re_p^n}$$

| Tramo | b_i | n |
|-----------------------------|-------|-----|
| $Re_p < 2$ | 2.4 | 1 |
| $2 < Re_p < 500$ | 18.5 | 0.6 |
| $500 < Re_p < 2 \cdot 10^5$ | 0.44 | 0 |

Sin embargo, el Reynolds de partículas está en función de la velocidad límite de sedimentación.

Para determinar el régimen en el que se está trabajando se hace uso del factor K, que viene dado por la siguiente expresión:

$$K^3 = \frac{D_p^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho)}{\mu^2}$$

| Tramo | K |
|-----------------------------|-------------------|
| $Re_p < 2$ | $K < 3.3$ |
| $2 < Re_p < 500$ | $3.3 < K < 43.5$ |
| $500 < Re_p < 2 \cdot 10^5$ | $43.5 < K < 2365$ |

Cálculo de C_D :

Para calcular el valor del coeficiente de rozamiento, primero se ha de estimar el valor de K

$$K^3 = \frac{D_p^3 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho)}{\mu^2} = \frac{(50 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 9.8 \cdot (1370 - 1.16)}{15 \cdot 10^{-6}} = 7.453 \rightarrow K = \sqrt[3]{7.453} = 1.953$$

Donde:

D_p : Diámetro de partícula, $50 \cdot 10^{-6}$ m

g: aceleración de la gravedad, 9.8 m/s²

ρ_p : densidad de la partícula, 1370 kg/ m³

ρ : densidad del fluido, 1.16 kg/ m³

μ : viscosidad $15 \cdot 10^{-6}$ kg/ms

El valor del factor K se encuentra en el primer tramo, es decir, $K < 3.3$, por lo tanto, el valor

que adquiere el coeficiente de rozamiento es: $C_D = \frac{2.4}{Re_p}$

Cálculo de la velocidad de sedimentación:

Sustituyendo el valor del coeficiente de rozamiento calculado anteriormente, en la expresión

(1) y despejando la velocidad de sedimentación se obtiene la siguiente expresión:

$$v_t = \left[\frac{1}{18} \cdot g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot \frac{D_p^2}{\mu} \right] \quad (2)$$

Donde:

$D_p = 50 \cdot 10^{-6}$ m

$\rho_p = 1370$ kg/ m³

$\rho = 1.16$ kg/ m³

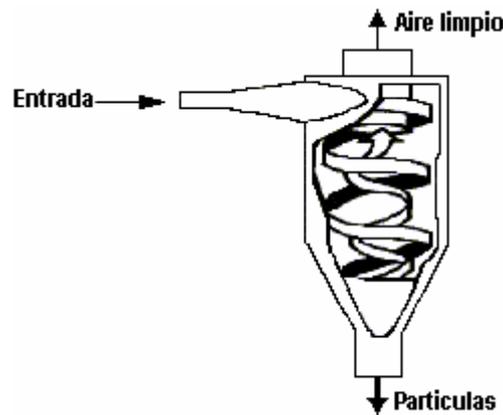
$\mu = 15 \cdot 10^{-6}$ kg/ms

Sustituyendo los valores en la expresión (2) se tiene que:

$$v_t = \left[\frac{1}{18} \cdot g \cdot (\rho_p - \rho) \cdot \frac{D_p^2}{\mu} \right] = \left[\frac{1}{18} \cdot 9.8 \cdot (1370 - 1.16) \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 10^{-6}} \right] = 0.124 \text{ m/s}$$

Separadores de ciclón:

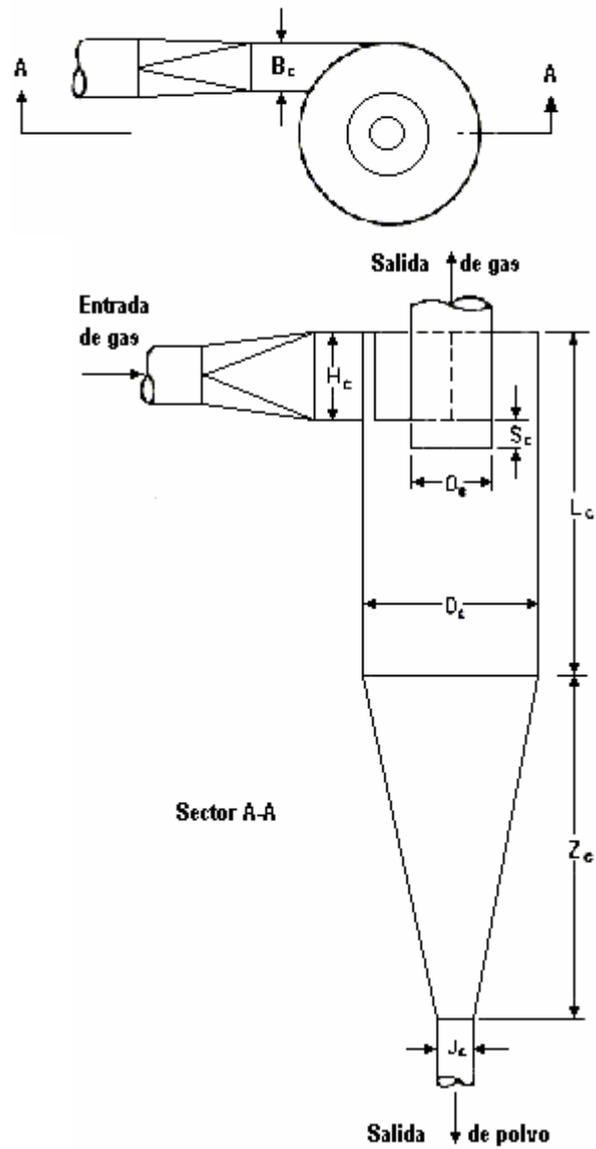
El tipo más empleado en las instalaciones para la separación de polvos es el separador ciclónico en el cual los gases cargados de polvo penetran tangencialmente en una cámara cilíndrica o cónica por uno o varios puntos y salen por una abertura central (figura 1)



Las partículas de polvo, en virtud de su inercia, tienden a moverse hacia la pared exterior del separador desde la cual son conducidas a un receptor. Un ciclón es en esencia una cámara de sedimentación en la que la aceleración debida a la gravedad es reemplazada por una aceleración centrífuga. En las condiciones de trabajo comúnmente empleadas en la práctica, la fuerza separadora centrífuga o aceleración varía de cinco veces la de la gravedad en los ciclones de diámetro muy grande y baja resistencia, hasta 2500 veces la gravedad en los muy pequeños y de su resistencia elevada. La entrada inmediata a un ciclón suele ser rectangular.

Este separador es muy eficaz a menos que el gas contenga una gran proporción de partículas de tamaño inferior a aproximadamente 10 micras, y es igualmente eficaz tanto si se utiliza para gases cargados de polvo como de niebla. En nuestro caso, el ciclón es un separador adecuado, ya que las partículas de fibra de carbono tienen un tamaño del orden de 50 micras.

Proporciones del separador de ciclón: (figura 2)



Con las relaciones geométricas:

$$B_c = D_c / 4$$

$$L_c = 2 D_c$$

$$D_e = D_c / 2$$

$$S_c = D_c / 8$$

$$H_c = D_c / 2$$

$$Z_c = 2 D_c$$

$$J_c = D_c / 4$$

En un ciclón, la trayectoria de los gases implica un doble torbellino con los gases moviéndose con los gases moviéndose hacia abajo en espiral en la parte exterior y hacia arriba en el interior. Cuando penetran los gases en el ciclón, su velocidad sufre una redistribución de modo que su componente tangencial aumenta cuando disminuye el radio, según una ley de la forma:

$$v = \frac{b}{r^n} \quad \Rightarrow \quad n [0.5 - 1.0]$$

Y la aceleración radial es:

$$a_c = \omega^2 r = \frac{b}{r^{n-1}}$$

La velocidad en espiral en un ciclón puede alcanzar un valor varias veces mayor que la media de entrada con los gases. Consideraciones teóricas indican que n debe ser igual a 1.0 si no hay rozamiento en las paredes. Sin embargo, las mediciones reales efectuadas indican que n varía de 0.5 a 0.7 en una porción considerable del radio del ciclón. En las paredes, la velocidad de los gases se acerca a cero, mientras que adquiere un valor máximo en cierto radio, disminuyendo rápidamente en los radios menores.

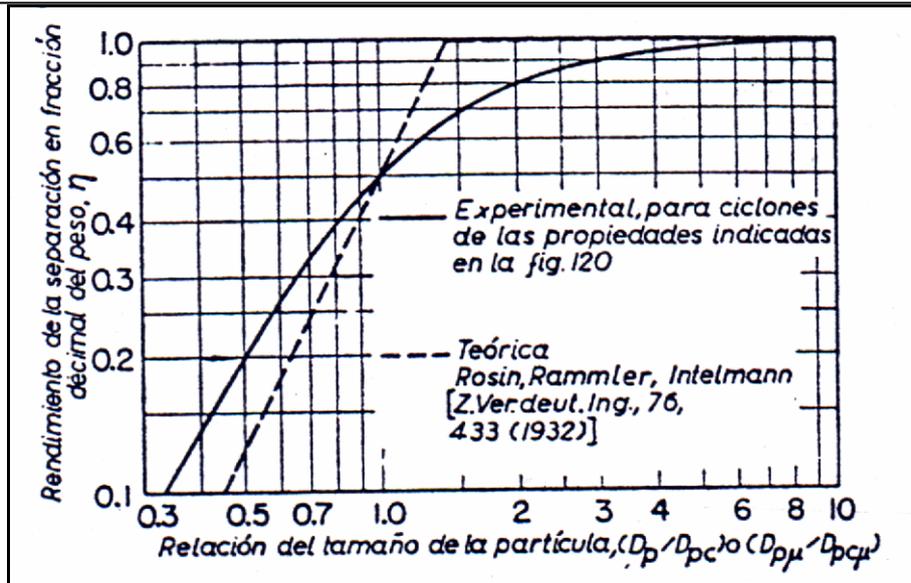
Rendimiento de separación:

Rossín, Rammler e Intelmann han deducido la siguiente ecuación para el diámetro mínimo de partícula que será completamente separable de la corriente gaseosa en un ciclón:

$$D_{p,\min} = \sqrt{\frac{9\mu \cdot B_c}{\pi \cdot N_t \cdot V_c (\rho_s - \rho)}} \quad (3)$$

Las partículas más pequeñas se separan en un grado proporcional a sus distancias iniciales a la pared. Su deducción se basa en la ley de Stokes, suponiendo que la corriente gaseosa de un número fijo de vueltas con una velocidad constante en espiral sin ninguna acción de mezcla o turbulencia.

Esta correlación puede presentarse de forma gráfica como en la siguiente figura, que da el probable rendimiento de separación para un tamaño de partícula dado, expresado por una relación al tamaño de corte; D_{pc} , definiéndose éste por la ecuación anterior.



η = Eficiencia de selección

D_{pc} = Diámetro de corte de para el tamaño de partícula en el que la eficiencia es del 50% en el ciclón considerado.

En la práctica lo que se especifica en un proyecto es la eficiencia de separación deseada para partículas de un determinado tamaño.

Factores para el diseño de ciclones:

El factor primordial que puede utilizarse en el diseño para regular el rendimiento de separación es el diámetro del ciclón; trabajando con una caída de presión fija, el aparato de diámetro menor tiene un rendimiento más alto.

Dimensionamiento :

Vamos a dimensionar el ciclón teniendo en cuenta que la partícula va a dar 5 vueltas en el ciclón antes de caer en el depósito (con lo que $N_t = 5$).

Como hemos visto, el diámetro de partícula que se va separar en el ciclón viene dado por:

$$D_{p,\min} = \sqrt{\frac{9\mu \cdot B_c}{\pi \cdot N_t \cdot V_c (\rho_s - \rho)}} \quad (3)$$

El diámetro del ciclón (D_c) está relacionado con la anchura del conducto de entrada (B_c) de la

forma: $B_c = \frac{D_c}{4}$, sustituyendo en la ecuación anterior y despejando tenemos:

$$B_c = \frac{D_c}{4} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N_f \cdot v \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D'^2}{9 \cdot \mu} \quad (4)$$

para $N = 5$

$$D_c = 13.96 \cdot \frac{v \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D'^2}{\mu} \quad (5)$$

Cálculos:

Después de establecido el porcentaje de captación para las partículas de tamaño D especificado en la curva de eficiencia, se halla el valor D_p/D_{pc} .

- Se Calcula D_{pc} ;

- Se Calcula D_c (Ecuación 5);

- Se especifican las demás dimensiones:

$$L_c = z_c = 2 \cdot D_c$$

$$D_s = \frac{D_c}{2}$$

$$J = \frac{D_c}{4}$$

$$B = \frac{D_c}{4}$$

Además, sabemos que el caudal de gas que entra en el ciclón es: $Q_{gas} = A_{entrada} \cdot v$; dado que

el área de entrada del ciclón es: $H_c \cdot B_c$; para una altura H_c dada se obtiene: $H_c = \frac{Q_{gas}}{B_c \cdot v}$,

Siendo v la velocidad de entrada al ciclón.

Si la longitud del conducto de entrada no cumple con las dimensiones del ciclón, es decir:

$H_c \neq D_c/2$, entonces hay que re proyectar el ciclón.

En nuestro caso, el caudal de gas de entrada al ciclón vendrá dado por el caudal de gas que nos da la bomba de vacío elegida, que es un caudal de $3m^3/h$

$$Q_{gas} = 3 \frac{m^3}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 8.33 \cdot 10^{-4} m^3 / s$$

Para un diámetro de partícula de $50\mu m$, la eficacia experimental del sedimentador es de 87% entonces, sustituyendo en la gráfica: $D_p/D_{pc} = 3$

$$D_{pc} = 50 / 3 = 16.67 \mu m = 16.67 \cdot 10^{-6} m$$

Cálculo de D_c y otros parámetros:

$$D_c = 13.96 \cdot v \cdot (\rho_s - \rho) \cdot D^2 / \mu$$

Siendo:

ρ_s : Densidad de las partículas de carbono = 1530 kg/m^3

ρ : Densidad del aire = 1.29 kg/m^3

μ : Viscosidad del aire = $15 \cdot 10^{-6}$

➤ **Se supone: $v = 1 \text{ m/s}$**

$$D_c = 13.96 \cdot \frac{v \cdot (1530 - 1.29) \cdot (16.67 \cdot 10^{-6})^2}{15 \cdot 10^{-6}} = 0.3954 \cdot v = 0.3954 \cdot 1 = 0.3954 m$$

$$B = \frac{D_c}{4} = \frac{0.3954}{4} = 0.09885 m$$

$$H_c = \frac{D_c}{2} = \frac{0.3954}{2} = 0.1977 m$$

$$H_c = \frac{Q}{B_c \cdot v} = \frac{8.33 \cdot 10^{-4}}{0.09885 \cdot 1} = 8.43 \cdot 10^{-3} m \neq 0.1977 m; \text{ con lo que repetimos los cálculos}$$

para una velocidad de entrada más pequeña.

➤ **$v = 0.5 \text{ m/s}$**

$$D_c = 0.3954 \cdot v = 0.3954 \cdot 0.5 = 0.1977 m$$

$$B = \frac{0.1977}{4} = 0.049425 m$$

$$H_c = \frac{0.1977}{2} = 0.09885m$$

$$H_c = \frac{Q}{B_c \cdot v} = \frac{8.33 \cdot 10^{-4}}{0.09885 \cdot 0.5} = 0.03370m \neq 0.09885m$$

➤ **v= 0.4m/s**

$$D_c = 0.3954 \cdot v = 0.3954 \cdot 0.4 = 0.15816m$$

$$B = \frac{0.15816}{4} = 0.03954m$$

$$H_c = \frac{0.15816}{2} = 0.07908m$$

$$H_c = \frac{Q}{B_c \cdot v} = \frac{8.33 \cdot 10^{-4}}{0.03954 \cdot 0.4} = 0.052m \neq 0.07908m$$

➤ **v= 0.35m/s**

$$D_c = 0.3954 \cdot v = 0.3954 \cdot 0.35 = 0.1384m$$

$$B = \frac{0.1384}{4} = 0.03459m$$

$$H_c = \frac{0.1384}{2} = 0.0692m$$

$$H_c = \frac{Q}{B_c \cdot v} = \frac{8.33 \cdot 10^{-4}}{0.03459 \cdot 0.5} = 0.0690m \approx 0.0692m$$

Finalmente, la velocidad de entrada al ciclón es de 0.35 m/s, que es mayor que la velocidad de sedimentación por gravedad del polvo de carbono, con lo que nos aseguramos que el polvo no sedimenta a lo largo de la conducción.

**SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
MEMORIA DE CÁLCULO**

Las dimensiones del ciclón diseñado son:

$$D_c = 138.4 \text{ mm}$$

$$L_c = 2D_c = 276.8 \text{ mm}$$

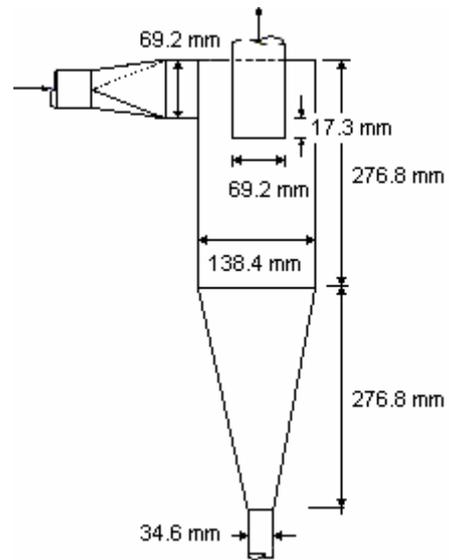
$$Z_c = 2D_c = 276.8 \text{ mm}$$

$$J_c = D_c/4 = 34.6 \text{ mm}$$

$$B_c = D_c/4 = 34.6 \text{ mm}$$

$$H_c = D_c/2 = 69.2 \text{ mm}$$

$$S_c = D_c/8 = 17.3 \text{ mm}$$



13.- CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE ABSORCIÓN EN LA BOQUILLA

Como ya vimos en el capítulo anterior de la memoria de cálculo, se ha elegido un ciclón para recolectar de partículas de polvo, siendo diseñado en función del caudal que proporcionaba la bomba de vacío elegida para este fin. Esta bomba, es una bomba de vacío de paletas lubricadas por recirculación, recomendada para la industria de vacío en general.

Sus características son:

- Fiabilidad comprobada en procesos de trabajo en continuo
- Refrigeración por aire, no necesita enfriamiento por agua.
- Buena tolerancia al vapor de agua
- Provista de separador de neblina de aceite.
- Fácil mantenimiento
-

La bomba tiene un desplazamiento nominal de $3 \text{ m}^3/\text{h} = 0.833 \text{ l/s}$, da un vacío de 2 mbar y una potencia nominal del motor de 0.1 Kw.

Esta bomba está colocada a la salida de los gases del ciclón, con lo que tenemos los siguientes datos a la salida del mismo:

- ✓ *Densidad del fluido: 1.29 Kg./m^3*
- ✓ *Presión a la entrada del ciclón: $15 \text{ mbar} = 15 \cdot 10^{-3} \text{ bar} = 1500 \text{ N/ m}^2$*
- ✓ *Diámetro del conducto de salida: 69.2 mm*

Además, sabemos que a la entrada del ciclón tenemos:

- ✓ *Velocidad del gas a la entrada: 0.35 m/s*
- ✓ *Área del conducto de entrada: $69.2 \text{ mm} \cdot 34.60 \text{ mm} = 2394.32 \text{ mm}^2 = 2.394 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$*

Por otro lado, la conducción por la que se va a conducir el fluido con las partículas tiene las siguientes características:

- ✓ *Tubería de elastómero reforzado y flexible, de manera que pueda tener acceso a los diferentes puntos de actuación del sistema de vacío.*
- ✓ *El diámetro de la conducción es de 1 pulgada, es decir, de 25.4 mm.*
- ✓ *La longitud de la tubería es de 50m, ya que el ciclón se encuentra fuera de la planta.*

No conocemos, por tanto, ni la velocidad dentro de la conducción ni la presión en la misma, así como las pérdidas de presión en el ensanchamiento existente entre la tubería y la entrada al ciclón y la que hay dentro del ciclón.

En este capítulo se va a caracterizar la línea de vacío, comenzando por la pérdida de carga en el ciclón, continuando por el ensanchamiento desde la tubería hasta la entrada del ciclón y finalizando por la conducción hasta la entrada de la boquilla.

1.- Caída de presión en el ciclón:

La caída de presión en un ciclón y las pérdidas por rozamiento conviene expresarlas en función de la carga de la velocidad basada en el área inmediata a la entrada del ciclón. La carga de la velocidad a la entrada, expresada en milímetros de agua, está relacionada con la velocidad media de entrada en los gases y su densidad por la ecuación de Sheferd, Lapple y Ter Linden:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho'' \cdot v^2}{2 \cdot g_c} \text{ (mm H}_2\text{O)}$$

ρ'' = Densidad del gas compuesto, que se calcula en función de la fracción en volumen de las partículas sólidas.

ξ = parámetro que depende de la geometría de los conductos de entrada y salida del gas.

g = aceleración de la gravedad.

Estas pérdidas están asociadas a:

- Fricción en el conducto de entrada;
- Contracción / expansión en la entrada;
- Fricción en las paredes;
- Pérdidas cinéticas en el ciclón;
- Pérdidas en la entrada del tubo de salida;
- Pérdidas de presión estática entre la entrada y la salida.

Se considerará que las pérdidas por energía cinética son las más importantes dentro de un ciclón, siendo las únicas que van a ser consideradas

1.1.- Cálculo de la densidad del gas compuesto.

El caudal de gas absorbido por la bomba de vacío es, como se vio en el capítulo (), de $8.33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, con lo cual, el caudal de gas que circula por el sistema de aspiración es una mezcla de aire, y partículas de carbono.

La densidad del fluido compuesto será:

$$\rho'' = \frac{m_{\text{aire}} + m_{\text{part}}}{V_{\text{gas}}}$$

Siendo:

m_{aire} : masa de aire en la corriente de gas

m_{part} : masa de partículas de carbono

V_{gas} : volumen de gas absorbido

1.1.a.- Cálculo de m_{aire} :

Sabemos que la bomba de vacío absorbe $8.33 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, luego la masa de aire es

$$m_{\text{aire}} = Q_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} = 8.33 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2931 = 1.0484 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Siendo

ρ_{aire} : densidad del aire = 1.2931 kg/m³

1.1.b.- Cálculo de $m_{\text{part.}}$:

Tomaremos como base de cálculo 1 segundo, y teniendo en cuenta que la velocidad de corte es de 0.025 m/s, la sección de material que se corta tiene las siguientes dimensiones: longitud 25 mm, espesor 300 μm y altura 10mm, con lo que el volumen cortado de fibra de carbono por segundo es:

$$V = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot 0.3 \cdot 10^{-3} = 75 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$m = \rho \cdot V = 1530 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot 75 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 = 1.1475 \cdot 10^{-4} \text{ Kg}$$

La densidad del fluido compuesto es:

$$\rho'' = \frac{m_{\text{aire}} + m_{\text{part}}}{V_{\text{gas}}} = \frac{1.0484 \cdot 10^{-3} + 1.1475 \cdot 10^{-4}}{8.33 \cdot 10^{-4}} = 1.31 \text{ kg / m}^3$$

1.2.- Cálculo del factor ξ :

Este factor se calcula de la siguiente manera:

$$\xi = 21.16 \cdot \left(\frac{A_e}{A_s} \right)^{1.21}$$

Siendo

A_e = Área de entrada = $B_C \cdot H_C$

A_s = Área de salida = $(\rho \cdot D_e^2) / 4$

$$A_e = B_C \cdot H_C = 34.6 \cdot 10^{-3} \cdot 69.2 \cdot 10^{-3} = 2.39 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_s = \pi \frac{(D_e)^2}{4} = \pi \frac{(69.2 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 3.76 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\xi = 21.16 \cdot \left(\frac{A_e}{A_s} \right)^{1.21} = 21.26 \left(\frac{2.39 \cdot 10^{-3}}{3.76 \cdot 10^{-3}} \right)^{1.21} = 12.229$$

1.3.- Cálculo de las pérdidas de carga:

Vamos a calcularla por la ecuación $\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho'' \cdot v^2}{2 \cdot g_c}$

Sustituyendo tenemos:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho'' \cdot v^2}{2 \cdot g_c} = 12.229 \cdot \frac{1.31 \cdot 0.35^2}{2 \cdot 9.8} = 2.1156 \text{ (mm H}_2\text{O)}$$

Siendo:

v: velocidad de entrada al ciclón = 0.35 m/s

ρ'' : Densidad del gas compuesto = 1.31 Kg/m³

ξ : parámetro que depende de la geometría = 12.229

g: aceleración de la gravedad = 9.8 m/s²

Haremos el cambio de unidades necesario para tener el incremento de presión en pascuales.

$$\frac{\Delta P}{\rho \cdot g} = h \Rightarrow \Delta P = 2.1156 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1000 \text{ Kg} / \text{m}^3 \cdot 9.8 \text{ m} / \text{s}^2 = 20.678 \text{ N} / \text{m}^2$$

Luego la presión a la entrada del ciclón, será la presión de vacío que da la bomba más la pérdida de carga, esto es:

$$P_{\text{entradaciclón}} = P_{\text{bomba}} + \Delta P = 200 + 20.678 = 220.678 \text{ N} / \text{m}^2$$

Siendo:

P_{bomba} : Presión de vacío de la bomba = 2mbar = $2 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$

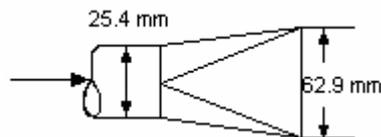
2.- Cálculo de la velocidad y caída de presión a través de la sección convergente.

Cuando se trata de un fluido compresible en movimiento, si el cambio de densidad es gradual y no muy importante en porcentaje, el flujo puede considerarse incompresible usando una densidad media para obtener los resultados más aproximados. Sin embargo, si $\Delta\rho/\rho > 0.05$ se deben considerar los efectos de la compresibilidad.

Vamos a suponer que la variación de densidad en este tramo convergente no supera el 5% y que además el fluido es compresible, obteniendo así una aproximación bastante cercana a lo que pasa en realidad.

2.1.- Cálculo de la longitud del estrechamiento:

El ensanchamiento tiene la forma:



Se va a intentar que el ensanchamiento se lo menos brusco posible, por lo que trataremos que el ángulo de inclinación sea de 6 o 7°. Para un ángulo de 6° la longitud del ensanchamiento es:

$$\tan 6^\circ = \frac{\text{sen}}{\text{cos}} = \frac{31.45 - 12.7}{x} \rightarrow x = \frac{18.75}{\tan 6} = 178 \text{ mm}$$

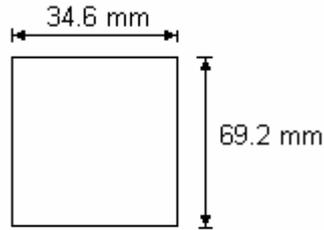
2.2.- Cálculo de la velocidad:

El cálculo de la velocidad en la tubería de elastómero vendrá dada por la ecuación de continuidad que es: $Q = v \cdot S = cte$. Dado que la entrada al ciclón es rectangular, vamos a calcular el diámetro equivalente: $D_e = 4 \cdot R_H$, siendo R_H , el radio hidráulico que es

$$R_H = \frac{S}{P}$$

donde S es la sección y P es el perímetro mojado.

El diámetro equivalente es por tanto:



Sección de entrada al ciclón

$$D_e = 4 \cdot R_H = 4 \frac{S}{P} =$$

$$= 4 \frac{34.6 \cdot 69.2}{2 \cdot 34.6 + 2 \cdot 69.2} = 46.13 \text{ mm}$$

La velocidad en la sección estrecha es:

$$Q = v \cdot S = cte \rightarrow 0.35 \cdot \pi \cdot \frac{(46.13 \cdot 10^{-3})^2}{4} = v \cdot \pi \cdot \frac{(25.4 \cdot 10^{-3})^2}{4}$$

$$v = 1.154 \text{ m/s}$$

2.3.- Cálculo de la presión a la salida del estrechamiento:

Vamos a calcular la presión en la salida de la sección divergente con la ecuación de Bernoulli, ya que hemos considerado que la densidad apenas varía en un 5%, por lo que se puede considerar un fluido incompresible.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g}$$

Siendo:

P_2 : Presión en la sección estrecha; N/m²

P_1 : Presión en la sección ancha; 15 mbar= 220.678 N/m²

z_1 : Altura del punto 1; m

z_2 : Altura del punto 2; m

v_1 : Velocidad en el punto 1: 0.35 m/s

v_2 : Velocidad en el punto 1.154 m/s

H_{rt} : Pérdidas de carga; m

ρ : Densidad del aire: 1.29 kg/m³

g : Aceleración de la gravedad: 9.8 m/s²

Para este caso concreto, se considerará que la altura del punto 1 es la misma que la del punto 2: $z_1 = z_2$

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g}$$

2.3.a.- Cálculo de las pérdidas de carga:

La expresión para calcular las pérdidas de carga en este caso es:

$$h_{fg} = \left(\frac{S_a}{S_e} - 1 \right)^2 \cdot \frac{v_a^2}{2g} = \left(\frac{1.67 \cdot 10^{-3}}{5.067 \cdot 10^{-4}} - 1 \right)^2 \cdot \frac{0.35^2}{2 \cdot 9.8} = 0.033m$$

Siendo:

S_e = Sección de la tubería estrecha

S_a = Sección de la tubería ancha

v_a = Velocidad del fluido de la tubería ancha

La caída de presión es por lo tanto:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g} \rightarrow$$

$$\frac{220.678}{1.29 \cdot 9.8} + \frac{0.35^2}{2 \cdot 9.8} + 0.33 = \frac{P_2}{1.29 \cdot 9.8} + \frac{1.154^2}{2 \cdot 9.8}$$

$$17.456 + 6.25 \cdot 10^{-3} + 0.33 = \frac{P_2}{12.642} + 0.0679 \rightarrow P_2 = 224.862 \text{ N/m}^2$$

Tenemos por lo tanto, una presión de 224.862 N/m² a la entrada de la sección divergente.

3.- Cálculo de la presión a la entrada de la boquilla:

Para calcular la presión a la entrada de la boquilla hacemos las mismas consideraciones que en el apartado anterior:

- ✓ La variación de densidad es menor del 5%.
- ✓ El flujo es isotérmico.

En este tramo del sistema de aspiración, la tubería es de elastómero reforzado. La razón de hacer uso de este elastómero es debido a su carácter flexible, ya que permite no sólo una mayor movilidad sino también una disminución de las pérdidas de carga en el recorrido que comprende debido a la reducción del número de codos.

En este caso, podemos seguir aplicando la ecuación de Bernouilli, ya que el fluido es prácticamente incompresible.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g}$$

Siendo:

P_2 : Presión de salida de la sección estrecha; 224.862 N/m²

P_1 : Presión de absorción en la boquilla N/m²

z_1 : Altura del punto 1; m

z_2 : Altura del punto 2; m

v_1 : Velocidad en el punto 1: 1.154 m/s

v_2 : Velocidad en el punto 1.154 m/s

H_{rt} : Pérdidas de carga; m

ρ : Densidad del aire: 1.29 kg/m³

g : Aceleración de la gravedad: 9.8 m/s²

Para este caso concreto, se considerará que la altura del punto 1 es la misma que la del punto 2: $z_1 = z_2$ y que la velocidad en ambos puntos es la misma, ya que la sección del conducto es constante, luego $v_1 = v_2$.

La ecuación queda:

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} - H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{v_2^2}{\rho \cdot g} \Rightarrow \frac{P_1}{\rho \cdot g} - H_{rt} = \frac{P_2}{\rho \cdot g}$$

$$P_1 = P_2 + H_{rt} \cdot \rho \cdot g$$

3.1.- Cálculo de las pérdidas de carga:

Vamos a calcular en primer lugar las pérdidas causadas por la fricción del fluido con las paredes de la tubería, sabiendo que el valor del coeficiente de fricción del elastómero reforzado es 0.155.

La ecuación que nos da éstas pérdidas es:

$$H_{rt} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = 0.155 \cdot \frac{50}{25.4 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1.154^2}{2 \cdot 9.8} = 20.73m$$

Siendo:

λ : Coeficiente de fricción del elastómero reforzado = 0.155

L: Longitud de la tubería = 50 m

D: Diámetro de la tubería de aspiración = 25.4mm

v: Velocidad del fluido en la tubería de aspiración = 1.154 m/s

El siguiente paso es calcular las pérdidas secundarias debido a la presencia de accesorios en la tubería. En este caso, hay tres codos de 90° y una válvula abierta.

La longitud equivalente de estos accesorios es:

✓ 3 codos de 90° = 3*5 = 15m

✓ 1 válvula abierta = 2.8m

Las pérdidas de carga secundarias son, por lo tanto 17.8 m y las pérdidas de carga totales son: 17.8 + 20.73 = 38.53 m

Conocidas las pérdidas totales, se calcula la presión a la entrada de la boquilla:

$$P_1 = P_2 + H_{rt} \cdot \rho \cdot g = 224.862 + 38.53 \cdot 1.29 \cdot 9.8 = 711.958 \text{ N/m}^2$$

Así pues queda completamente caracterizada la tubería de aspiración.

14.- CÁLCULO DE LA DENSIDAD DEL FLUIDO.

El caudal de gas absorbido por la bomba de vacío es, como se vio en el capítulo 24 (“Sedimentación del polvo de carbono”), de $8.33 \cdot 10^{-4}$ m³/s, sin embargo, el caudal de nitrógeno necesario para enfriar la pieza de fibra de carbono es de $2.2265 \cdot 10^{-5}$ m³/s, con lo cual, el caudal de gas que circula por el sistema de aspiración es una mezcla de aire, nitrógeno y partículas de carbono. Podemos considerar que la masa de las partículas es despreciable frente a la masa del gas, así que se va a determinar la densidad del gas compuesto por aire y nitrógeno y se estudiará como afecta a los cálculos.

La densidad del fluido será:

$$\rho_{TOTAL} = \frac{m_{N_2} + m_{aire}}{V_{gas}}$$

Siendo:

m_{N_2} : masa de nitrógeno en la corriente de gas

m_{aire} : masa de aire en la corriente de gas

V_{gas} : volumen de gas absorbido

1. Cálculo de m_{N_2} :

Teniendo en cuenta que el caudal volumétrico es de $2.2265 \cdot 10^{-5}$ m³/s, la masa del fluido es :

$$m_{N_2} = Q_{N_2} \cdot \rho_{N_2} = 2.2265 \cdot 10^{-5} \cdot 1.16 = 2.583 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

Siendo

ρ_{N_2} : densidad del nitrógeno gaseoso = 1.16 kg/m³

2. Cálculo de m_{aire} :

Sabemos que la bomba de vacío absorbe $8.33 \cdot 10^{-4}$ m³/s , luego el caudal de aire es el caudal que absorbe la bomba menos el caudal de nitrógeno, es decir:

$8.33 \cdot 10^{-4}$ m³/s - $2.2265 \cdot 10^{-5}$ m³/s = $8.1074 \cdot 10^{-4}$ m³/s, y la masa del aire es :

$$m_{aire} = Q_{aire} \cdot \rho_{aire} = 8.1074 \cdot 10^{-4} \cdot 1.2931 = 1.0484 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

Siendo

ρ_{aire} : densidad del aire = 1.2931 kg/m³

3. Cálculo de la densidad total del fluido.

La densidad total del nitrógeno gaseoso con las partículas en suspensión viene dada por:

$$\rho_{TOTAL} = \frac{m_{N_2} + m_{aire}}{V_{gas}} = \frac{2.583 \cdot 10^{-5} + 1.0484 \cdot 10^{-3}}{8.33 \cdot 10^{-4}} = 1.2896 \approx 1.29 \text{ kg} / \text{m}^3$$

La densidad total del fluido es muy parecida a la del aire que es 1.2931 kg/m³, por lo que podemos considerar que prácticamente, toda la corriente de fluido está formada por aire y su densidad no se ve afectada por la cantidad de nitrógeno que absorbe la bomba y se pueden realizar los cálculos utilizando la densidad del aire sin que afecte a los resultados.

15.- CÁLCULO DEL ESPESOR DEL CICLÓN:

En este capítulo de la memoria se va a determinar el espesor del sedimentador (en este caso es un ciclón), dado que está sometido a presión externa, sabiendo que los recipientes a presión deberán diseñarse, fabricarse, inspeccionarse y marcarse de acuerdo con la última edición de las normas de calderas y recipientes a presión del ASME, sección VII, división 1, y sus agregados subsecuentes.

Primero se hará un breve resumen del cálculo de estos recipientes y después se determinará el espesor del mismo.

1. Cálculo de recipientes sometidos a presión externa:

Existen muchos procesos que se realizan en condiciones de presión inferior a la atmosférica. Los recipientes donde se realizan estos procesos están trabajando a vacío total o parcial, de forma que el máximo valor de la presión exterior a la que se encuentran sometidos es, por razones obvias, de una atmósfera (1.033 Kg/cm²).

La presión externa, actuando sobre un recipiente cilíndrico, induce en la pared del mismo esfuerzos de compresión circunferenciales y longitudinales, siendo el valor de los primeros el doble de los segundos. Es necesario estudiar los esfuerzos circunferenciales de compresión por el fenómeno de inestabilidad elástica que producen en el recipiente. En general, la inestabilidad elástica es un fenómeno que debe ser considerado en todas las estructuras con rigidez limitada, cuando están sometidas a flexión, torsión, compresión o una combinación de estas cargas. El fallo por inestabilidad elástica se dice que la estructura se abolla o se aplasta.

Debido a este fenómeno, cuando se diseña un recipiente para presión externa, no será suficiente el conocimiento del esfuerzo admisible del material, como en el caso de presión interna. Se debe utilizar otro criterio, que es, con las características particulares del aparato (material, espesor y geometría), calcular la máxima presión externa que puede aguantar. Esta máxima presión admisible es directamente proporcional al módulo de elasticidad del material y al momento de inercia de la envolvente, e inversamente proporcional al cubo del radio de la curvatura.

Es muy frecuente que un mismo recipiente pueda estar sometido a presión interna, y en ocasiones, a presión externa, normalmente por operación incorrecta. Tanto estos recipientes como en todos en general, se debe realizar el diseño, primero, a presión interna o se dimensiona con los espesores mínimos, y luego se comprueba si estos espesores son correctos para resistir la presión externa de diseño o proyecto (P_a).

A continuación se incluye el método de comprobación de los recipientes sometidos a presión externa según el código ASME VIII Div.1.

1.2. Variables de diseño:

- **Presión de diseño:**

Como ya se dijo anteriormente, el máximo valor de la presión exterior a la que se encuentran sometidos es, de una atmósfera (1.033 Kg/cm^2).

La presión de diseño debe ser en todo caso mayor a la máxima de operación o servicio. Su valor se puede fijar como el mayor de:

$$P \geq 1.1 \cdot \text{Presión máxima de operación} = 1.1 \cdot 1.033 = 1.1363 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

$$P \geq \text{Presión máxima de operación} + 2 \text{ Kg/cm}^2 = 2.033 \text{ Kg/cm}^2$$

$$P \geq 3.5 \text{ Kg/cm}^2$$

Con lo que nuestra presión de diseño es 3.5 Kg/cm^2 .

- **Temperatura de diseño:**

Al igual que en el apartado anterior, debe ser superior a la máxima que se produzca durante la operación, y es habitual adoptar como temperatura de diseño el valor de:

$$T = \text{Máxima temperatura de operación} + 20^\circ\text{C}$$

El tanque permanecerá a temperatura ambiente, es decir, la temperatura de diseño se establece entre 15 y 20°C por encima de la temperatura de trabajo, por lo que será de 40°C .

- **Materiales:**

Los materiales a utilizar en la construcción de los recipientes sometidos a presión estarán de acuerdo con las especificaciones de la Sección II del Código ASME. En este caso el tanque se fabricará de acero A316L cuya composición nominal es de 16 Cr-12Ni-2Mo, tensión máxima permitida "S", de 18800 psi (13321.77 Kg/cm²) y de límite elástico σ_F de 30000 psi (21092.1 Kg/cm²)

- **Sobreespesor normal para la corrosión:**

El sobreespesor normal para la corrosión será el indicado en la hoja de datos para cada equipo conforme a la tabla siguiente:

| Material del recipiente | Sobreespesor normal para la corrosión (mm) |
|--|--|
| Aceros al carbono | 3.0 |
| Aceros de baja aleación | 3.0 |
| Aceros de media aleación | 1.5 |
| Aceros de alta aleación | 1.5 |
| Materiales no féreos | 0.5 |
| Recipientes con recubrimiento interior | 0 |

El grupo de aceros de alta aleación incluye los aceros aleados con más del 9% de cromo, incluso los inoxidable de cualquier tipo. Debido a que el tanque se proyecta en acero inoxidable, el sobreespesor necesario es de 1.5 mm.

- **Espesor mínimo de pared:**

El espesor mínimo, excluido el sobreespesor por corrosión admisible de las envolventes y fondos, será el mayor de los siguientes valores:

$$t_{\min} = 2.5 + c \text{ (mm)} = 2.5 + 1.5 = 4 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = \frac{D_0}{1000} + 2.54 + c \text{ (mm)} = \frac{138.4}{1000} + 2.54 + 1.5 = 4.1784 \text{ mm} \approx 4.2 \text{ mm}$$

$$t_{\min} = 3 \text{ (mm)}$$

El espesor mínimo como se puede observar es de 4.2 mm

1.3 Dimensiones del tanque sedimentador:

Las dimensiones del ciclón ya fueron calculadas en el capítulo () de la memoria de cálculo.

Las dimensiones del ciclón diseñado son:

$$D_c = 138.4 \text{ mm} = 5.449 \text{ pulg}$$

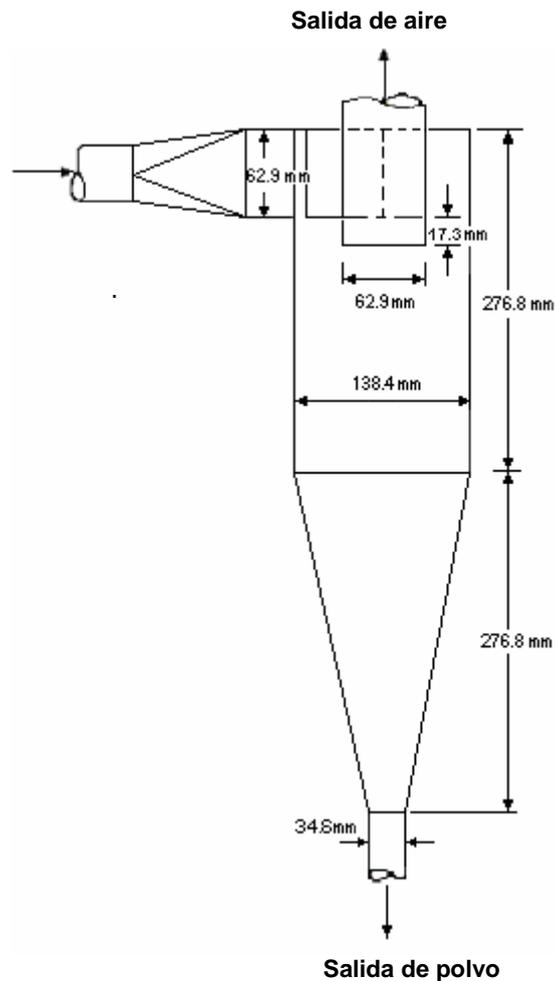
$$L_c = 2D_c = 276.8 \text{ mm} = 10.898 \text{ pulg}$$

$$B_c = D_c/4 = 34.6 \text{ mm} = 1.362 \text{ pulg}$$

$$J_c = D_c/4 = 34.6 \text{ mm} = 1.362 \text{ pulg}$$

$$Z_c = 2D_c = 276.8 \text{ mm} = 10.898 \text{ pulg}$$

$$H_c = D_c/2 = 69.2 \text{ mm} = 2.724 \text{ pulg}$$



1.4. Cálculo del espesor de la envolvente:

Se calculará el valor del espesor de la pared del tanque cuando se encuentra primero sometido a presión externa y a continuación se determinará el espesor de la pared cuando se encuentra sometido a presión interna. Se tomará el máximo valor de las dos.

1.4.1. -Cálculo del espesor de la envolvente t, cuando el tanque se encuentra sometido a presión externa:

Carcasas cilíndricas:

Antes de iniciar el cálculo de la presión externa, vamos a definir los parámetros que utilizamos en las fórmulas de cálculo:

A= Factor función de las dimensiones del recipiente.

B= Factor determinado por las figuras del ASME VIII Div.1.

D₀= Diámetro exterior, en mm.

E= módulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño, en psi.

L= longitud total, en mm, y cuyo valor será la longitud del recipiente de tangente a tangente de las cabezas, se le suma un tercio de la profundidad de las mismas = $L + L' / 3 = 10.898 + 10.898 / 3$ pulg = 14.531 pulg.

P= presión externa de diseño o de proyecto = 3.5 Kg/cm²

P_a: Valor calculado de la presión externa máxima de trabajo, en Kg/cm²

t = espesor de la envolvente = 4.2 mm

c = sobreespesor o margen de corrosión = 1.5 mm.

La máxima presión de trabajo admisible, P_a, que soporta una carcasa cilíndrica de relación

$\frac{D_0}{t} \geq 10$, se calcula siguiendo el siguiente procedimiento.

A) Se determinan los valores de las siguientes relaciones geométricas: $\frac{L}{D_0}$ y $\frac{D_0}{t}$

$$\frac{L}{D_0} = \frac{369.067}{138.4} = 2.67$$

$$\frac{D_0}{t} = \frac{138.4}{2.5} = 55.36$$

B) Con las relaciones geométricas anteriores, y con la ayuda de la gráfica 5-UCS-28.1; UCS-28.2 s/ASME VIII Div.1, se calcula el valor de A:

Se entra en la figura UGO-28, con el valor de L/D_0 y se sigue horizontalmente hasta la línea que representa D_0/t . Desde el punto de intersección se sigue verticalmente hasta determinar el factor de A. En este caso $A = 0.0015$.

C) Tomando el valor de "A", y utilizando la grafica relativa al material que aparece reflejada en el anexo gráfico, se calculará el valor de B en función de la temperatura de diseño o proyecto. Con el valor de A se va a la gráfica UHA-28.2 y se sigue verticalmente hasta la línea de temperatura aplicable, desde la intersección, se continúa horizontalmente y se lee el valor de B que es de 11000

El valor de la presión máxima admisible sería:

$$P_a = \frac{4B}{3(D_0/t)} = \frac{4 \cdot 11000}{3(55.36)} = 264.93 \text{ psi} = 18.501 \text{ Kg/cm}^2$$

Una vez calculada la máxima presión externa admisible se compara con la del proyecto; si $P_a > P$, el espesor es correcto, y en caso contrario se deberá proceder a un aumento del valor del mismo o instalar unos anillos rigidizadores colocados circunferencialmente alrededor del recipiente y a una distancia tal que su efecto se solape entre ellos.

$$P_a = 18.501 \text{ Kg/cm}^2 > 3.5 \text{ Kg/cm}^2$$

Como la presión máxima de trabajo permitida es mayor que la presión de diseño, entonces el espesor de pared propuesto es correcto.

1.4.2 -Cálculo del espesor de la envolvente t cuando el recipiente se encuentra sometido a presión externa:

Se comprueba si el espesor de la envolvente del recipiente sometido a presión externa es válido cuando dicho recipiente se encuentra sometido a presión interna.

Para ello se calculará, según la norma UG-27 del código ASME, el espesor mínimo necesario de un casco cilíndrico sometido a presión interna mediante la siguiente expresión:

Quando predomina el esfuerzo longitudinal:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.4 \cdot P} + c = \frac{50 \cdot 2.725}{18800 \cdot 1 - 0.4 \cdot 50} + 0.059 = 0.0662inch = 1.68mm$$

Quando predomina el esfuerzo circunferencial:

$$t = \frac{P \cdot R}{S \cdot E - 0.6 \cdot P} + c = \frac{50 \cdot 2.725}{18800 \cdot 1 - 0.6 \cdot 50} + 0.059 = 0.0662inch = 1.68mm$$

Donde:

P = Presión interna de diseño, 50 lb/pulg²

R = Radio interno del casco, $D_i/2 = 2.725$ pulg.

S = Tensión máxima permitida del material, 18800 psi.

E = Eficiencia de la junta, 1

c = Factor de corrosión: 0.059 pulg.

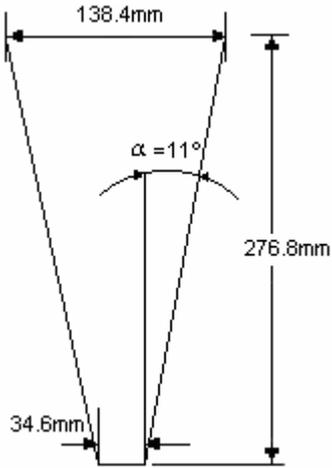
Se toma el valor mayor de los espesores calculados que es 4.2 mm = 0.165 pulg, pero se tomará el valor de espeso normalizado más próximo que es 1/5", que es aproximadamente 5 mm

1.5 Cálculo de fondos a presión externa:

Con respecto a los fondos superior e inferior del recipiente, al ser el fondo superior plano tendrá el mismo espesor que la pared del tanque, es decir, **1/5 pulg.**

Sin embargo, el fondo inferior, es una sección cónica a la que hay que determinar el espesor, sometida tanto a presión externa como a presión interna.

Los datos de diseño queden reflejados en la siguiente tabla.



- P_0 : Presión de diseño externa,
- P_i : Presión interna de diseño,
- S : Valor del esfuerzo del material, 18800 psi.
- E : Eficiencia de la junta, 1.
- R_o = radio exterior, 138.4mm = 5.449 pulg.
- α : La mitad del ángulo en el vértice, 11°
- c : Margen de corrosión, 1.5mm = 0.059 pulg
- D_i : Diámetro exterior, en el extremo grande: 138.4mm
- D_s : Diámetro exterior, en el extremo pequeño 34.6 mm
- L' : Longitud del cono: 276.8 mm

1.5.1 Determinar el espesor de la sección cónica cuando está sometida a presión externa:

Antes de describir el método de cálculo definiremos los parámetros necesarios en este apartado en particular.

t_e = espesor efectivo de la sección cónica, en pulgadas, su expresión:

$$t_e = t \cdot \cos \alpha = 4.2 \cdot \cos 11^\circ = 4.123 \text{ mm}$$

L_e = Longitud equivalente de la sección cónica, en pulgadas, su expresión:

$$L_e = \frac{L}{2} \left(1 + \frac{D_s}{D_l} \right) = \frac{10.897}{2} \left(1 + \frac{1.362}{5.449} \right) = 6.81 \text{ inch} = 173 \text{ mm}$$

D_s = Diámetro exterior pequeño de la sección cónica = 1.362 pulgadas.

D_l = Diámetro exterior grande de la sección cónica = 5.449 pulgadas

L = Longitud de cono = 10.897 pulgadas

α =Semiángulo de la sección cónica = 11 grados

Para los fondos y/o secciones cónicas se procede como sigue:

Consideramos elementos cónicos con una relación $\frac{D_l}{t_e} \geq 10$, $\frac{5.449}{0.1625} \approx 34$, (se cumple la condición)

1. Se estima un valor inicial de t_e y, de acuerdo a éste, se determinan las relaciones L_e/D_l y D_l/t_e

$$\frac{L_e}{D_l} = \frac{6.811}{5.449} = 1.25; \frac{D_l}{t_e} = \frac{5.449}{0.1625} = 33.53$$

2. Determinar el valor de A con la gráfica UGO-28.0; A = 0.006
3. Cálculo del factor B con la gráfica UHA-28.2, B = 13500
4. Usando este valor de B calculado se determina el valor de la máxima presión externa admisible P_a usando la siguiente expresión:

$$P_a = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot \left(\frac{D_l}{t_e}\right)} = \frac{4 \cdot 13500}{3 \cdot \left(\frac{5.449}{0.1625}\right)} = 536.83 \text{ psi} = 37.75 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

5. Se compara el valor de P_a calculado con la presión externa máxima. Si $P_a \geq P$ el valor de t es correcto, pero si, en cambio, $P_a < P$, habría que aumentar el valor de t.

$$37.75 \text{ Kg/cm}^2 > 3.5 \text{ Kg/cm}^2$$

Como se puede observar, el espesor elegido es válido

Determinar el espesor de la sección cónica cuando está sometida a presión interna:

Se aplica la siguiente expresión:

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot E \cdot \cos \alpha}{D + 1.2 \cdot t \cdot \cos \alpha} = \frac{2 \cdot 18800 \cdot 1 \cdot \cos 11}{5.449 + 1.2 \cdot 0.1625 \cdot \cos 11} = 6543.7 \text{ psi} = 460.01 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

Por lo tanto, el espesor propuesto para el fondo inferior es válido tanto cuando está sometido a presión interna, pero nunca menor al de la envolvente. Luego el espesor del fondo inferior es el espesor comercial más próximo a 4.2mm, que es el de 1/5 de pulgada, como vimos anteriormente.

Calculo del espesor de las conexiones.

El espesor requerido para conexiones sometidas a presión externa está dado por la norma UG-45.

- (a) El espesor debe ser para la carga aplicable más el margen de corrosión, pero no menor que el espesor más pequeño requerido por presión interna en la cabeza o el casco utilizando en el cálculo la presión externa como equivalente a la presión interna, pero en ningún caso menor que el espesor mínimo especificado para el material en UG-16 (b) (1/16 pulgadas para cascos y cabezas, 3/32 pulgadas en servicios de aire comprimido, vapor o agua, 1/4 de pulgada para calderas que no están sometidas a fuego directo)
- (b) El espesor mínimo de pared de tubería estándar, más el margen por corrosión.

Aplicado a nuestro caso:

- 1) Para soportar una presión externa de 50 psi se requiere una pared de 1/ pulg, pero el espesor no debe ser menor que el mínimo de los siguientes valores:

- 2) El espesor requerido del casco para una presión interna de 50 psi,

$$t = \frac{P_0 \cdot R_0}{S \cdot E - 0.6 \cdot P_0} = \frac{50 \cdot 2.725}{18800 \cdot 1 - 0.6 \cdot 50} = 0.00726inch$$

- 3) El espesor mínimo de la pared de la tubería estándar es: 0.328 pulg.

El menor de los dos valores calculados en el apartado 2) y 3) es 0.00726 inch, pero se tomará el espesor comercial más próximo que es 1/16 pulg, que es el valor mínimo según la norma UG-16. De esta forma se concluye que el espesor de las conexiones de entrada y de salida de gases al ciclón tendrán un mínimo de 1/16 pulg.

**SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
MEMORIA DE CÁLCULO**

Tablas necesarias para los cálculos:

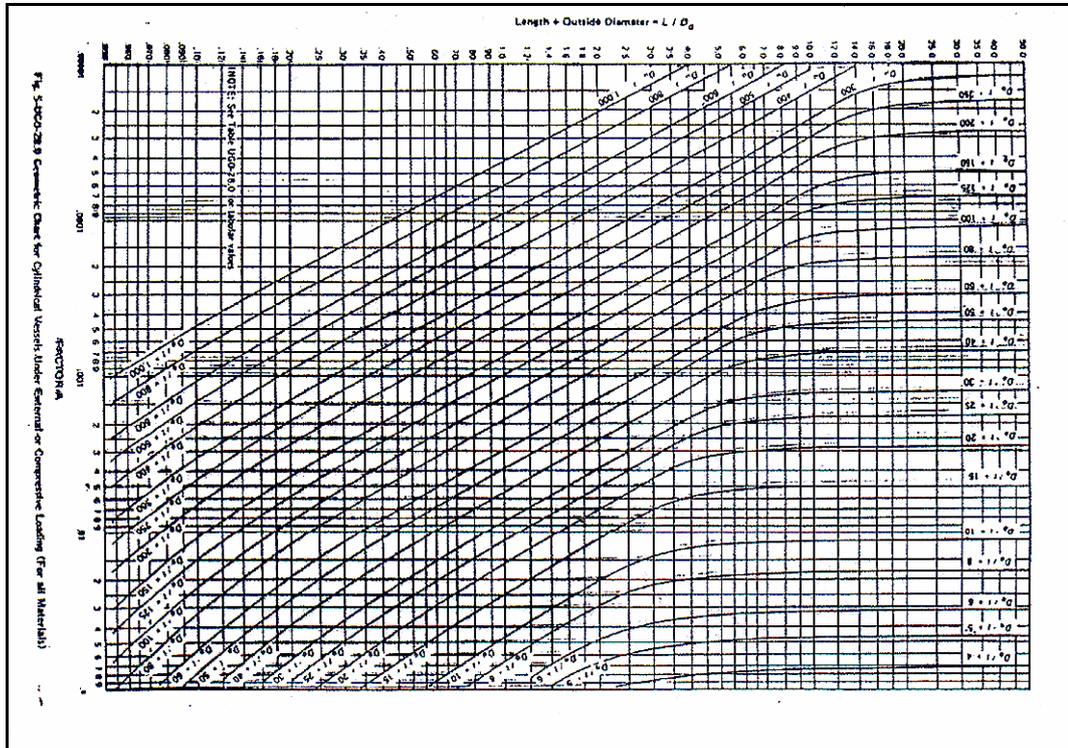


Tabla 1: UGO-28

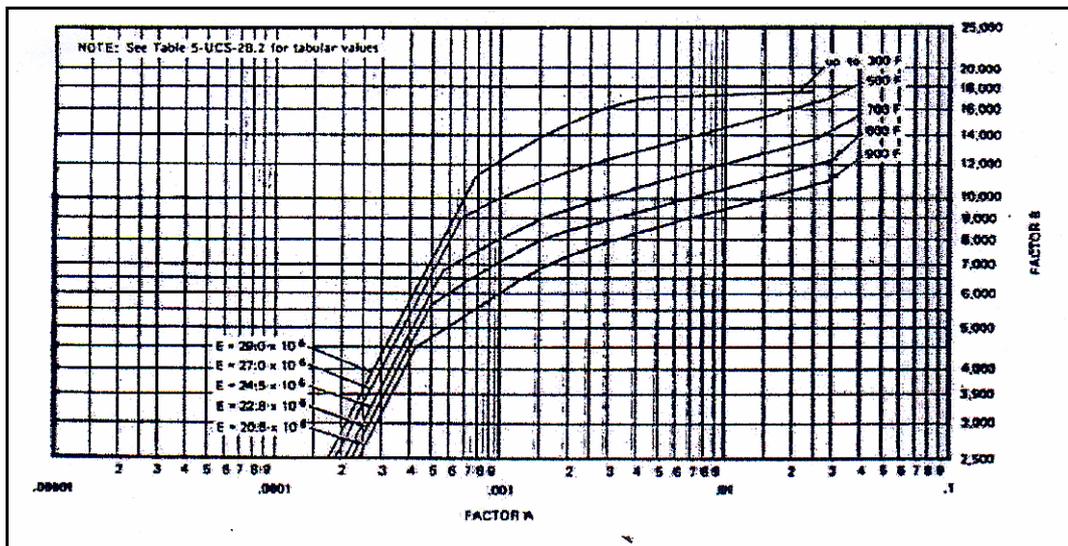


Tabla 2: UCS-28.2

PLIEGO DE CONDICIONES

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

**“Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica”**

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

**“Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica”**

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

| | |
|---|----------|
| <u>PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES</u> | 6 |
| 1.- DISPOSICIONES GENERALES | 6 |
| 1.1.- Objeto del Pliego..... | 6 |
| 1.2.- Proyecto..... | 7 |
| 1.3.- Documentación complementaria..... | 7 |
| 2.- ADJUDICACIÓN | 8 |
| 2.1.- Concurso..... | 8 |
| 2.2.- Retirada de la documentación de concurso..... | 8 |
| 2.3.- Condiciones legales que debe reunir el contratista para poder ofertar..... | 8 |
| 2.4.- Presentación de las ofertas..... | 9 |
| 2.5.- Garantía de mantenimiento de la oferta..... | 11 |
| 2.6.- Validez de las ofertas..... | 12 |
| 2.7.- Aclaraciones a los licitadores..... | 13 |
| 2.8.- Alcance de las aclaraciones..... | 13 |
| 2.9.- Contradicciones y omisiones en la documentación..... | 14 |
| 2.10.- Planos provisionales y definitivos..... | 14 |
| 2.11.- Presentaciones defectuosas de las ofertas..... | 15 |
| 2.12.- Adjudicación del concurso..... | 15 |
| 2.13.- Devolución de la documentación..... | 16 |

| | |
|--|-----------|
| 3.- EL CONTRATO..... | 17 |
| 3.1.- Contrato..... | 17 |
| 3.2.- Documentos del contrato..... | 18 |
| 3.3.- Formalización del contrato..... | 18 |
| 3.4.- Gastos e impuestos..... | 18 |
| 3.5.- Fianzas provisional, definitiva y fondo de garantía..... | 19 |
| 3.6.- Aprobación y vigencia del contrato..... | 20 |
| 3.7.- Incomparecencia del contratista..... | 20 |
| 3.8.- Cesión del contrato..... | 21 |
| 3.9.- Asociación de contratistas..... | 22 |
| 3.10.- Subcontratistas..... | 22 |
| 3.11.- Relaciones entre el promotor y el contratista y entre los diversos contratistas y subcontratistas..... | 23 |
| 3.12.- Domicilios y representantes..... | 24 |
| 4.- OBLIGACIONES DEL CONTRATISTA..... | 26 |
| 4.1.- Obligaciones contables..... | 26 |
| 4.2.- Cumplimiento de la legislación laboral y de seguridad.... | 26 |
| 4.3.- Seguros..... | 26 |
| 4.4.- Coberturas a tomar..... | 26 |
| 4.5.- Obligaciones en materia de seguridad..... | 28 |
| 4.6.- Sustitución del personal..... | 30 |
| 4.7.- Rescisión del contrato..... | 31 |

| | |
|--|-----------|
| 5.- CONDICIONES ECONÓMICAS Y LEGALES..... | 34 |
| 5.1.- Gastos de carácter general por cuenta del contratista..... | 34 |
| 5.2.- Gastos de carácter general por cuenta del promotor..... | 34 |
| 5.3.- Indemnizaciones por cuenta del contratista..... | 35 |
| 5.4.- Partidas para tareas accesorias..... | 35 |
| 5.5.- Partidas alzadas..... | 36 |
| 5.6.- Revisión de precios..... | 36 |
| 5.7.- Régimen de intervención..... | 37 |
| 5.8.- Informes..... | 38 |
| 5.9.- Revisión de los informes..... | 39 |
| 5.10.- Certificación de las prestaciones..... | 39 |
| 5.11.- Confección de las facturas de pago..... | 39 |
| 5.12.- Pago de los certificados..... | 40 |
| 5.13.- Propiedad industrial, comercial e intelectual..... | 40 |
| 5.14.- Tribunales..... | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 6.- DESARROLLO DE LAS TAREAS, CONDICIONES TÉCNICO- ECONÓMICAS..... | 42 |
| 6.1.- Modificaciones del proyecto..... | 42 |
| 6.2.- Modificaciones de los planos..... | 43 |
| 6.3.- Empleo de materiales nuevos pertenecientes al promotor..... | 44 |
| 6.4.- Uso anticipado del equipo o componentes..... | 44 |
| 6.5.- Plan de trabajo y montaje..... | 45 |
| 6.6.- Plazos de ejecución..... | 45 |
| 6.7.- Retenciones por retrasos durante la ejecución de las tareas..... | 45 |
| 6.8.- Incumplimiento de los plazos y multas..... | 47 |
| 6.9.- Supresión de las multas..... | 48 |
| 6.10.- Procedimiento para la aplicación de multas..... | 48 |
| 6.11.- Premios y primas..... | 49 |
| 6.12.- Retrasos ocasionados por el promotor..... | 49 |
| 6.13.- Daños y ampliación del plazo en casos de fuerza mayor..... | 50 |
| 6.14.- Medición de las tareas..... | 50 |
| 6.15.- Certificación y abono de las tareas..... | 52 |
| 6.16.- Abono de unidades incompletas o defectuosas..... | 54 |
| 6.17.- Informe final..... | 54 |
| 6.18.- Acta de finalización de las prestaciones..... | 55 |

**SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES**

| | |
|--|----|
| 6.19.- Recepción provisional de los equipos..... | 55 |
| 6.20.- Plazo de garantía..... | 56 |
| 6.21.- Recepción definitiva de los equipos..... | 57 |
| 6.22.- Liquidación..... | 57 |

1.- DISPOSICIONES GENERALES

1.1.- Objeto del pliego

El presente Pliego de Condiciones Generales tiene por objeto la ordenación, con carácter general, de las condiciones facultativas y económicas que han de regir en los concursos y contratos destinados a la ejecución de los trabajos del presente proyecto, "Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el sector aeronáutico".

El Contratista Adjudicatario se compromete a aceptar íntegramente todas y cada una de las cláusulas del presente Pliego de Condiciones Generales, a excepción de aquellas que expresamente queden anuladas o modificadas en el Pliego de Condiciones Particulares.

1.2.-Proyecto

El Proyecto comprende los siguientes documentos:

1.2.1- Una Memoria que considerará las necesidades a satisfacer y los factores de carácter general a tener en cuenta.

1.2.2- Los Planos de conjunto y detalle necesarios para que las tareas queden perfectamente definidas.

1.2.3- Los diferentes cuadros de precios que conforman el presupuesto.

1.2.4- El Pliego de Condiciones Particulares, que incluirá la descripción de las tareas, especificaciones de los materiales y elementos constitutivos y normas para la ejecución de las tareas, las condiciones de este Pliego Particular serán preceptivas y prevalecerán sobre las del Pliego General en tanto las modifiquen o contradigan.

1.2.5.- Plazos totales y parciales de ejecución de las tareas, incluidos en el Pliego de Condiciones Particulares.

1.3.- Documentación complementaria

Además de los documentos integrantes del Proyecto indicados en el Artículo anterior, y del presente Pliego General, serán preceptivas las Normas Oficiales que se especifiquen en el Pliego de Condiciones Particulares.

2.- ADJUDICACIÓN

2.1.- Concurso

La licitación de la obra se hará por Concurso Restringido, en el que el promotor convocará a las Empresas Contratistas que estime oportuno.

Los concursantes enviarán sus ofertas por triplicado, en sobre cerrado y lacrado, según se indique en la carta de petición de ofertas, a la dirección que indique el Promotor.

No se considerarán válidas las ofertas presentadas que no cumplan los requisitos citados anteriormente, así como los indicados en la Documentación Técnica enviada.

2.2.- Retirada de Documentación de Concurso

Los Contratistas, por sí o a través de sus representantes, podrán retirar dicha documentación de las oficinas del Promotor cuando ésta no les hubiese sido enviada previamente.

El Promotor se reserva el derecho de exigir para la retirada de la documentación, un depósito que será reintegrado en su totalidad a los Contratistas que no hubiesen resultado adjudicatarios de la obra, previa devolución de dicha documentación.

2.3.- Condiciones legales que debe reunir el Contratista para poder ofertar

2.3.1.- *Capacidad para concurrir*

Las personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras que se hallen en plena posesión de su capacidad jurídica y de obrar.

No obstante, serán de aplicación a las Empresas extranjeras las normas de ordenación de la industria y las que regulen las inversiones de capital extranjero, así como las que dicte el Gobierno sobre concurrencia de dichas empresas, antes de la licitación de estas obras.

2.3.2.- Documentación justificativa para la admisión previa

2.3.2.1.- Documento oficial o testimonio notarial del mismo que acredite la personalidad del solicitante.

2.3.2.2.- Documento notarial justificativo de la representación ostentada por el firmante de la propuesta, así como documento oficial acreditativo de su personalidad.

2.3.2.3.- Documento que justifique haber constituido la fianza provisional en las formas que se determinan en el apartado 2.6 del Pliego de Condiciones Generales

2.3.2.4.- Documento acreditativo de que el interesado está al corriente en el pago del impuesto industrial en su modalidad de cuota fija o de Licencia Fiscal, (o compromiso, en su caso, de su matriculación en éste, si resultase adjudicatario de las obras).

2.3.2.5.- Documento oficial acreditativo de hallarse al corriente de pago de las cuotas de la Seguridad Social y, concretamente, el de cobertura de riesgo de accidentes de trabajo.

2.4.- Presentación de las Ofertas

Las Empresas que oferten en el Concurso presentarán obligatoriamente los siguientes documentos en original y dos copias:

2.4.1.- Cuadro de Precios n°1, consignando en letra y cifra los precios unitarios asignados a cada tarea cuya definición figura en dicho cuadro. Estos precios deberán incluir el % de Gastos Generales, Beneficio Industrial y el IVA que facturarán independientemente. En caso de no coincidir las cantidades expresadas en letra y cifra, se considerará como válida la primera. En el caso de que existiese discrepancia entre los precios unitarios de los Cuadros de Precios Números 1 y 2, prevalecerá el del Cuadro n°1.

2.4.2.- Cuadro de Precios n°2, en el que se especificará claramente el desglose de la forma siguiente:

2.4.2.1.- Mano de obra por categorías, expresando el número de horas invertido por categoría y precio horario.

2.4.2.2.- Materiales, expresando la cantidad que se precise de cada uno de ellos y su precio unitario.

2.4.2.3.- Maquinaria y medios auxiliares, indicando tipo de máquina, número de horas invertido por máquina y precio horario.

2.4.2.4.- Transporte, indicando en las unidades que lo precisen el precio por peso y kilómetro.

2.4.2.5.- Varios y resto de tareas que incluirán las partidas directas no comprendidas en los apartados anteriores.

2.4.2.6.- Porcentajes de Gastos Generales, Beneficios Industrial e IVA.

2.4.3.- Presupuesto de ejecución Material, obtenido al aplicar los precios unitarios a las mediciones del Proyecto. En caso de discrepancia entre los precios aplicados en el Presupuesto y los del Cuadro de Precios n°1, obligarán los de este último.

2.4.4.- Presupuesto Total, obtenido al incrementar el Presupuesto de ejecución Material en sus dos apartados con el % de IVA.

2.4.5.- Relación del personal técnico adscrito a la ejecución y organigrama general del mismo durante el desarrollo de las tareas.

2.4.6.- Relación de maquinaria adscrita a la obra, expresando tipo de máquina, características técnicas fundamentales, años de uso de la máquina y estado general; asimismo relación de máquinas de nueva adquisición que se asignarán a la obra en de resultar adjudicatario. Cualquier sustitución posterior de la misma debe ser aprobada por el Promotor. Deberá incluirse asimismo un plan de permanencia de toda la maquinaria en obra.

2.4.7.- Baremos horarios de mano de obra por categorías y de maquinaria para trabajos por administración. Estos precios horarios incluirán el % de Gastos Generales y Beneficio Industrial y el IVA. que facturarán independientemente.

2.4.8.- Plan de obra detallado, en el que se desarrollarán en el tiempo los distintos trabajos a ejecutar, haciendo mención de los rendimientos medios a obtener.

2.4.9.- Las propuestas económicas y documentación complementaria deberán venir firmadas por el representante legal o apoderado del ofertante quien, a petición del Promotor, deberá probar este extremo con la presentación del correspondiente poder acreditativo.

2.4.10.- Además de la documentación reseñada anteriormente y que el Contratista deberá presentar con carácter obligatorio, el Promotor podrá exigir en cada caso, cualquier otro tipo de documentación, como pueden ser referencias, relación de tareas ejecutadas, balances de la sociedad, etc.

2.5.- Garantía de mantenimiento de la Oferta

Para afianzar el mantenimiento de la oferta, cada licitador presentará una Garantía. La garantía deberá tener vigencia y validez durante 90 días.

La garantía será constituida a favor del Promotor, en cualquiera de las siguientes formas:

2.5.1.- Dinero en efectivo, mediante depósito en euros en la cuenta que oportunamente indique el Promotor, o mediante la entrega de un certificado de depósito a plazo fijo a noventa (90) días renovables automáticamente, extendido a nombre del Promotor. Los intereses sobre la garantía constituida, en este caso, formarán parte de la misma.

2.5.2.- Fianza bancaria de entidad autorizada por el Banco Central de España, pagadera incondicionalmente al primer requerimiento del Promotor, mediante el correspondiente documento afianzando al licitador, emitido en carácter de fiador liso y llano y principal pagador con renuncia a los beneficios de división y exclusión y a toda interpelación previa al deudor principal.

2.5.3.- Póliza de seguro, extendida por entidad aseguradora de reconocida solvencia.

En el caso de las formas previstas en los numerales 2.5.2 ó 2.5.3, el texto de la fianza o del seguro deberá indicar la identificación del presente concurso, el beneficiario del seguro (Promotor) y el plazo de duración, el que en ningún caso será inferior al período de noventa (90) días.

Sin perjuicio de lo anterior, la fianza y/o el seguro se deberán cumplimentar en las condiciones especificadas, incorporando a tal fin en el texto de la póliza, la formula expresada en el citado dispositivo normativo.

Las garantías de mantenimiento de oferta deberán ser otorgadas a entera satisfacción del Promotor, que deberá prestar conformidad con el texto, con los documentos que las instrumenten y con las instituciones y personas que las otorguen.

En el caso de que las garantías no hayan sido presentadas o constituidas a satisfacción (y siempre que no se trate de deficiencias insalvables y que constituyan causal de rechazo de la oferta), el Promotor queda facultado para solicitar su sustitución o modificación, inclusive para rechazar al fiador o asegurador presentado. En caso de producirse tal supuesto, y a simple requerimiento del Promotor, el licitador deberá presentar una nueva garantía, dentro del término de setenta y dos (72) horas.

La garantía de mantenimiento de oferta del licitador que no resulte adjudicatario, será devuelta a partir de los diez (10) días posteriores a la notificación de aprobación del contrato, previa presentación de una solicitud por escrito en tal sentido por parte del interesado.

2.6.- Validez de las Ofertas

No se considerará válida ninguna oferta que se presente fuera del plazo señalado en la carta de invitación, o anuncio respectivo, o que no conste de todos los documentos que se señalan en el apartado 2.4.

Los concursantes se obligan a mantener la validez de sus ofertas durante un periodo mínimo de 90 días a partir de la fecha tope de recepción de ofertas, salvo que en la documentación de petición de ofertas se especifique otro plazo.

2.7.- Aclaraciones a los licitadores

Antes de transcurrido la mitad del plazo estipulado en las bases del Concurso, los Contratistas participantes podrán solicitar por escrito al Promotor las oportunas aclaraciones, en el caso de encontrar discrepancias, errores u omisiones en los Planos, Pliegos de Condiciones o en otros documentos de Concurso, o si se les presentasen dudas en cuanto a su significado.

El Promotor estudiará las peticiones de aclaración e información recibidas y las contestará mediante una nota que remitirá a todos los presuntos licitadores.

Si la importancia de la consulta así lo aconsejara, el Promotor podrá prorrogar el plazo de presentación de ofertas, comunicándolo así a todos los interesados.

2.8.- Alcance de las aclaraciones

La totalidad de las aclaraciones emitidas en virtud de lo establecido en el artículo precedente, pasarán a formar parte integrante del pliego. No se admitirán reclamos o acciones de índole alguna fundadas en falta de información.

Por otra parte, el solo retiro del pliego implica la aceptación para que el Promotor modifique y/o introduzca agregados y/o efectúe aclaraciones al contenido de los mismos y/o prorrogue los plazos previstos.

Todas las aclaraciones que emita el Promotor serán numeradas en forma correlativa y ordenadas cronológicamente.

2.9.- Contradicciones y omisiones en la documentación

Lo mencionado, tanto en el Pliego de Condiciones Generales, como en el particular de cada tarea y omitido en los Planos, o viceversa, habrá de ser ejecutado como si estuviese expuesto en ambos documentos. En caso de contradicción entre los Planos y alguno de los mencionados Pliegos de Condiciones, prevalecerá lo escrito en estos últimos.

Las omisiones en los Planos y Pliegos de Condiciones o las descripciones erróneas de los detalles de las tareas que deban ser subsanadas para que pueda llevarse a cabo el espíritu o intención expuesto en los Planos y Pliegos de Condiciones o que, por uso y costumbres, deben ser realizados, no solo no exime al Contratista de la obligación de ejecutar estos detalles de obra omitidos o erróneamente descritos sino que, deberán ser ejecutados como si se hubiera sido completa y correctamente especificados en los Planos y Pliegos de Condiciones.

2.10.- Planos provisionales y definitivos.

Con el fin de poder acelerar los trámites de licitación y adjudicación de las tareas y consecuente iniciación de las mismas, el Promotor, podrá facilitar a los contratistas, para el estudio de su oferta, documentación con carácter provisional. En tal caso, los planos que figuren en dicha documentación no serán válidos para construcción, sino que únicamente tendrán el carácter de informativos y servirán para formar ideas de los elementos que componen los trabajos, así como para obtener las mediciones aproximadas y permitir el estudio de los precios que sirven de base para el presupuesto de la oferta. Este carácter de planos de información se hará constar expresamente y en ningún caso podrán utilizarse dichos planos para la ejecución de ninguna parte de las tareas.

Los planos definitivos se entregarán al Contratista con antelación suficiente a fin de no retrasar la preparación y ejecución de los trabajos.

2.11.- Presentaciones defectuosas de las ofertas

Si durante el acto de apertura de las ofertas se observara la no inclusión en los mismos, o el no cumplimiento en forma integral de cualquiera de los requisitos establecidos, se dejará la constancia correspondiente. El o los licitadores que hayan incurrido en tal situación deberán cumplimentar la entrega de la documentación omitida u observada (siempre que la misma no constituya una causa taxativa de rechazo de la oferta), dentro de los dos (2) días hábiles siguientes a la clausura del acto, sin necesidad de notificación previa.

El incumplimiento de este requisito en el plazo establecido, será causa de desestimación de la oferta que incurra en tal situación, no teniéndose en cuenta a los efectos de la adjudicación.

2.12.- Adjudicación del concurso

El Promotor procederá a la apertura de las propuestas presentadas por los licitadores y las estudiará en todos sus aspectos. El Promotor tendrá alternativamente la facultad de adjudicar el Concurso a la propuesta más ventajosa, sin atender necesariamente al valor económico de la misma, o declarar desierto el concurso. En este último caso, el Promotor podrá libremente suspender definitivamente la licitación de las obras o abrir un nuevo concurso pudiendo introducir las variaciones que estime oportunas, en cuanto al sistema de licitación y relación de Contratistas ofertantes.

Transcurriendo el plazo indicado en el artículo 9 desde la fecha límite de presentación de oferta, sin que el Promotor, hubiese comunicado la resolución del concurso, podrán los licitadores que lo deseen, proceder a retirar sus ofertas, así como las fianzas depositadas como garantía de las mismas.

La elección del adjudicatario de la obra por parte del Promotor es irrevocable y, en ningún caso, podrá ser impugnada por el resto de los contratistas ofertantes.

El Promotor comunicará al ofertante seleccionado la adjudicación de las obras mediante una carta de intención.

En el plazo máximo de un mes a partir de la fecha de esta carta, el Contratista a simple requerimiento del Promotor se prestará a formalizar en contrato definitivo. En tanto no se firme este y se constituya la fianza definitiva, el Promotor, retendrá la fianza provisional depositada por el Contratista.

2.13.- Devolución de la documentación.

Los Planos, Pliegos de Condiciones y demás documentación del concurso, entregado por el Promotor a los concursantes, deberá ser devuelto después de la adjudicación del concurso, excepto por lo que respecta al Adjudicatario, que deberá conservarla sin poder reclamar la cantidad abonada por dicha documentación.

El plazo para devolver la documentación será de 30 días, a partir de la notificación a los concursantes de la adjudicación del concurso y su devolución tendrá lugar en las mismas oficinas de donde fue retirada

El Promotor, a petición de los concursantes no adjudicatarios, devolverá la documentación correspondiente a las ofertas en un plazo de 30 días, a partir de haberse producido dicha petición.

La no devolución por parte de los contratistas no adjudicatarios de la documentación del concurso dentro del plazo, lleva implícita la pérdida de los derechos de la devolución del depósito correspondiente a la referida documentación, si lo hubiese.

3.- EL CONTRATO

3.1.- Contrato

A tenor de lo dispuesto en el apartado 2.12 el Contratista, dentro de los treinta (30) días siguientes a la comunicación de la adjudicación y a simple requerimiento del Promotor, depositará la fianza definitiva y formalizará el Contrato en el lugar y fecha que se le notifique oficialmente.

El Contrato, tendrá carácter de documento privado, pudiendo ser elevado a público, a instancias de una de las partes, siendo en este caso a cuenta del Contratista los gastos que ello origine.

Una vez depositada la fianza definitiva y firmado el Contrato, el Promotor procederá, a petición del interesado, a devolver la fianza provisional, si la hubiera.

Cuando por causas imputables al Contratista, no se pudiera formalizar el Contrato en el plazo previsto, el Promotor podrá proceder a anular la adjudicación, con incautación de la fianza provisional.

A efectos de los plazos de ejecución de las tareas, se considerará como fecha de comienzo de las mismas la de la orden de comienzo de los trabajos. Esta orden se comunicará al Contratista en un plazo no superior a 90 días a partir de la fecha de la firma del Contrato.

El Contrato, será firmado por parte del Contratista, por su representante legal o apoderado, quien deberá poder probar este extremo con la presentación del correspondiente poder acreditativo.

3.2.- Documentos del contrato

Formarán parte integrante del contrato:

- El contrato firmado por las partes.
- El pliego de condiciones.
- Las aclaraciones emitidas por el Promotor durante la fase del Concurso.
- La resolución de adjudicación.
- La oferta adjudicada.

3.3.- Formalización del contrato

Resuelta la adjudicación y notificado formalmente el Contratista Adjudicatario deberá comparecer ante el promotor dentro de los cinco (5) días hábiles, para suscribir el pertinente contrato, sin opción a prórroga.

3.4.- Gastos e impuestos

Todos los gastos e impuestos de cualquier orden, que por disposición del Estado, Provincia o Municipio se deriven del contrato, y estén vigentes en la fecha de la firma del mismo, serán por cuenta del Contratista con excepción del IVA.

Las modificaciones tributarias establecidas con posterioridad al contrato afectarán al sujeto pasivo directo, sin que las partes puedan repercutirlas entre sí. En ningún caso podrá ser causa de revisión de precios la modificación del sistema tributario vigente a la firma del contrato.

3.5.- Fianzas provisional, definitiva y fondo de garantía

3.5.1.- *Fianza provisional.*

La fianza provisional del mantenimiento de las ofertas se constituirá por los contratistas ofertantes por la cantidad que se fije en las bases de licitación. Esta fianza se depositará al tomar parte en el concurso y se hará en efectivo. Por lo que a plazo de mantenimiento, alcance de la fianza y devolución de la misma se refiere, se estará a lo establecido en los apartados 2.6 y 2.11 del presente Pliego General.

3.5.2.- *Fianza definitiva.*

A la firma del contrato, el Contratista deberá constituir la fianza definitiva por un importe igual al 5% del Presupuesto Total de Adjudicación.

En cualquier caso el Promotor se reserva el derecho de modificar el anterior porcentaje, estableciendo previamente en las bases del concurso el importe de esta fianza.

La fianza se constituirá en efectivo o por Aval Bancario realizable a satisfacción del Promotor. En el caso de que el Aval Bancario sea prestado por varios Bancos, todos ellos quedarán obligados solidariamente con el Promotor y con renuncia expresa a los beneficios de división y exclusión.

El modelo de Aval Bancario será facilitado por el Promotor debiendo ajustarse obligatoriamente el Contratista a dicho modelo. La fianza tendrá carácter de irrevocable desde el momento de la firma del contrato, hasta la liquidación final de los trabajos y será devuelta una vez realizada. Dicha liquidación seguirá a la recepción definitiva de los equipos y componentes, que tendrá lugar una vez transcurrido el plazo de garantía a partir de la fecha de la recepción provisional. Esta fianza inicial responde del cumplimiento de todas las obligaciones del contratista, y quedará a beneficio del Promotor en los casos de abandono del trabajo o de rescisión por causa imputable al Contratista.

3.5.3.- Fondo de garantía.

Independientemente de esta fianza, el Promotor retendrá el 5% de las certificaciones semanales, que se irán acumulando hasta constituir un fondo de garantía.

Este fondo de garantía responderá de los defectos de ejecución o de la mala calidad de los materiales, suministrados por el Contratista, pudiendo el Promotor realizar con cargo a esta cuenta las reparaciones necesarias, en caso de que el Contratista no ejecutase por su cuenta y cargo dicha reparación.

Este fondo de garantía se devolverá, una vez deducidos los importes a que pudiese dar lugar el párrafo anterior, a la recepción definitiva de las obras.

3.6.- Aprobación y vigencia del contrato

El contrato será aprobado mediante resolución del Promotor, adquiriendo plena validez y eficacia jurídica a partir de su notificación fehaciente al Contratista Adjudicatario, sin perjuicio de la fecha de comienzo efectivo de las prestaciones.

3.7.- Incomparecencia del contratista

Si el Contratista Adjudicatario no compareciera a suscribir el contrato, o no constituyera la fianza definitiva del mismo ni cumpliera con las demás obligaciones exigidas dentro del plazo establecido, se dejará sin efecto la adjudicación, notificando por escrito a todos los licitadores, y se ejecutará automáticamente la garantía de mantenimiento de oferta.

El promotor podrá emitir una nueva resolución de adjudicación, haciendo recaer la misma en la oferta que hubiese quedado en segundo lugar en orden de mérito.

Si el Promotor desistiera de suscribir el contrato, tal situación no creará derecho alguno a favor del Contratista Adjudicatario.

3.8.- Cesión del contrato

No se admitirá la cesión total del contrato ni la asociación por decisión unilateral del Contratista Adjudicatario con terceros, con posterioridad a la adjudicación o a la firma del contrato, bajo pena de quedar sin efecto aquella o de rescindir el contrato, según corresponda, y en todos los casos con las consecuencias legales que ello implique.

Solamente podrá admitirse la cesión total del contrato, cuando concurran, a exclusivo criterio del Promotor, causas que lo justifiquen; debiendo en tales casos aprobarlo el mismo mediante resolución.

Si el Promotor autorizase la cesión total del contrato, lo que en tal caso sería hasta completar el plazo contractual, se deberán cumplir los siguientes requisitos:

3.8.1.- El cesionario deberá acreditar todos y cada uno de los requisitos exigidos al cedente, conforme a las disposiciones de la documentación contractual original.

3.8.2.- Se suscribirá un convenio entre el Promotor y el cesionario, con el acuerdo del cedente, por el cual se transfieren todos los derechos y obligaciones emergentes del contrato, manteniendo plena validez todos los documentos del contrato original, incluidos el pliego y todas las modificaciones y condiciones eventualmente acordadas entre las partes con posterioridad a aquél.

3.8.3.- El cesionario deberá cumplimentar la presentación de todos los requisitos establecidos para los licitadores en el momento del llamado a concurso.

3.8.4.- El cesionario deberá constituir las garantías en idénticas condiciones y con iguales características a la garantía de cumplimiento del contrato, según lo especificado en el apartado 3.5.2.

3.8.5.- Subsistirá la responsabilidad solidaria del cedente por todas las obligaciones inherentes al contrato.

3.8.6.- El cedente, previo a la cesión, deberá abonar al Promotor un derecho que se denomina "Derecho de Cesión", el que será equivalente al cincuenta por ciento (50%) del valor de la fianza definitiva.

A fin de asegurar la homogeneidad, coherencia, correlación y unidad conceptual de las tareas a ejecutar por el contratista, no se admitirá, bajo ningún concepto, la cesión parcial del contrato.

3.9.- Asociación de contratistas

Si las tareas licitadas se adjudicasen en común a un grupo o asociación de contratistas, la responsabilidad será conjunta y solidaria, en relación al compromiso contraído por el grupo o asociación.

Los componentes del grupo o asociación delegarán en uno de ellos, a todos los efectos, la representación ante el Promotor. Esta delegación se realizará por medio de un representante responsable provisto de poderes, tan amplios como proceda, para actuar ante el Promotor en nombre del grupo o asociación.

La designación de representante, para surtir efecto, deberá ser aceptada y aprobada por el Promotor por escrito.

3.10.- Subcontratistas

El Contratista podrá subcontratar o destajar cualquier parte de la ejecución de los trabajos, previa autorización del promotor, para lo cual deberá informar con anterioridad a éste del alcance y condiciones técnico-económicas del Subcontrato mencionado.

El Promotor podrá, en cualquier momento, requerir del Contratista la exclusión de un Subcontratista por considerar al mismo incompetente, o que no reúne las necesarias

condiciones, debiendo el Contratista tomar las medidas necesarias para la rescisión de este Subcontrato, sin que por ello pueda presentar reclamación alguna al Promotor.

En ningún caso podrá deducirse relación contractual alguna entre los Subcontratistas o destajistas y el Promotor, como consecuencia de la ejecución por aquellos de trabajos parciales correspondientes al Contrato principal, siendo siempre responsable el Contratista ante el Promotor de todas las actividades del Subcontratista y de las obligaciones derivadas del cumplimiento de las condiciones expresadas en este Pliego.

Los trabajos específicos que requieran una determinada especialización y que no estuviesen incluidos en el Presupuesto del Contrato, bien por que aún estando previstos en la Memoria y/o Planos de Concurso, no se hubiese solicitado para ellos oferta económica, bien por que su necesidad surgiese a posteriori durante la ejecución del Contrato, podrán ser adjudicados por el Promotor directamente a la Empresa que libremente elija, debiendo el Contratista prestar las ayudas necesarias para la realización de los mismos.

3.11.- Relaciones entre el promotor y el contratista y entre los diversos contratistas y subcontratistas

El Contratista está obligado a suministrar, en todo momento, cualquier información relativa a la realización del contrato, de la que el Promotor juzgue necesario tener conocimiento. Entre otras razones por la posible incidencia de los trabajos confiados al Contratista, sobre los de otros Contratistas y suministradores.

El Contratista debe ponerse oportunamente en relación con los demás contratistas y suministradores, a medida que estos sean designados por el Promotor, con el fin de adoptar de común acuerdo las medidas pertinentes para asegurar la coordinación de los trabajos, el buen orden de la obra, y la seguridad de los trabajadores.

Cuando varios contratistas y suministradores utilicen las instalaciones generales pertenecientes a uno de ellos, se pondrán de acuerdo sobre su uso suplementario y el reparto de los gastos correspondientes.

El Promotor deberá estar permanentemente informado de los acuerdos tomados al amparo del párrafo anterior, para en el caso de presentarse dificultades o diferencias, tomar la resolución que proceda, o designar el árbitro a quien haya de someterse dichas diferencias. La decisión del árbitro designado por el Promotor es obligatoria para los interesados. En ningún caso el Promotor deberá encontrarse durante los trabajos, en presencia de una situación de hecho que tuviese lugar por falta de información por parte del Contratista.

Cuando varios contratistas trabajen en la ejecución de las tareas, cada uno de ellos es responsable de los daños y perjuicios de toda clase que pudiera derivarse de su propia actuación.

3.12.- Domicilios y representaciones.

El Contratista está obligado, antes de iniciarse la ejecución de las tareas objeto del contrato a facilitar un domicilio, dando cuenta al Promotor del lugar de ese domicilio.

Seguidamente a la notificación del contrato, el Promotor comunicará al Contratista su domicilio a efectos de la ejecución del contrato, así como nombre de su representante.

Antes de iniciarse las obras objeto del contrato, el Contratista designará su representante en la ejecución de las tareas y se lo comunicará por escrito al Promotor especificando sus poderes, que deberán ser lo suficientemente amplios para recibir y resolver en consecuencia las comunicaciones y órdenes de la representación del Promotor. En ningún caso constituirá motivo de excusa para el Contratista la ausencia de su representante.

El Contratista está obligado a presentar a la representación del Promotor antes de la iniciación de los trabajos, una relación comprensiva del personal facultativo responsable de la ejecución de las tareas contratadas y a dar cuenta posteriormente de los cambios que en el mismo se efectúen, durante la vigencia del contrato.

**SISTEMA DE RECANTEADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES**

La designación del representante del Contratista, así como la del personal facultativo, responsable de la ejecución de las tareas contratadas, requiere la conformidad y aprobación del Promotor quien por motivo fundado podrá exigir al Contratista la remoción de su representante y la de cualquier facultativo responsable.

4.- OBLIGACIONES DEL CONTRATISTA

4.1.- Obligaciones contables

El Contratista deberá llevar y conservar los libros y documentos relativos al contrato y mantenerlos a disposición del Promotor durante toda la vigencia del mismo y hasta los seis (6) meses posteriores a su vencimiento y el de las eventuales prórrogas acordadas.

4.2.- Cumplimiento de la legislación laboral y de seguridad

El Contratista deberá cumplir con todas las leyes laborales, provisionales e impositivas, convenios colectivos de trabajo vigentes, como así también con toda otra disposición que pudiera ser de aplicación a los trabajos que desarrolle.

Deberá mantener al día el pago de los impuestos, del personal empleado (cualquiera sea su nivel o jerarquía), abonar íntegramente los honorarios, salarios y jornales estipulados, ingresando los aportes provisionales y demás cargas sociales que correspondan. Asimismo deberá cumplimentar las reglamentaciones y pagos de aranceles que para la actividad desarrollada pueda corresponder, de acuerdo a la legislación vigente en la materia, a los Consejos o Colegios Profesionales, incluyendo la inscripción de los mismos.

El Contratista deberá dar estricto cumplimiento a lo estipulado por la ley nacional y europea de higiene y seguridad en el trabajo.

Será responsabilidad del Contratista el pago de multas, recargos, intereses, etc., originados por infracciones a las leyes, decretos, ordenanzas, reglamentos y demás normas vigentes, por las que fuera responsable como consecuencia de su condición de contratista y de empleador.

4.3.- Seguros

El Contratista será responsable de cualquier accidente que ocurra al personal profesional, técnico, obrero o administrativo, que realice o inspeccione trabajos para aquél, en el lugar o en tránsito, correspondiéndole en consecuencia, las obligaciones que establecen las leyes nacionales y europeas.

A los efectos precedentemente indicados, el Contratista deberá mantener en vigencia y cancelar a su cargo todos los seguros especificados en el artículo siguiente.

Se considerará falta grave del Contratista tener sin cobertura cualquiera de los riesgos indicados, por lo que en caso de incumplimiento, el Promotor podrá proceder a la contratación de los seguros con cargo al contratista, independientemente de la aplicación de las sanciones que pudieran corresponder.

El Promotor deberá aprobar las pólizas y la entidad aseguradora ofrecida, previo a que aquéllas entren en vigencia, para lo cual el Contratista deberá someterlas a su consideración, previo a suscribir los contratos de seguros respectivos.

Todas las pólizas deben contener cláusulas de ajuste automático de las sumas aseguradas. También deberán contener una cláusula por la cual la entidad aseguradora asume el compromiso de no reducir ni alterar las condiciones de cobertura sin consentimiento previo y fehaciente del promotor.

Cuando corresponda, dichas pólizas deberán ser endosadas a favor del promotor.

4.4.- Coberturas a tomar

Los seguros que el Contratista deberá tomar a su cargo cubrirán los siguientes riesgos:

4.4.1. Responsabilidad del contratista como empleador.

4.4.1.1. Muerte e incapacidad permanente, total o parcial, de todo el personal afectado a los fines del contrato, en un todo de acuerdo a las obligaciones emergentes de la normativa legal vigente.

4.4.1.2. La indemnización prevista en de la Ley de Contrato de Trabajo.

4.4.2. Seguro contra terceros afectados por el contratista durante los trabajos.

4.5.- Obligaciones en materia de seguridad

El Contratista estará obligado al cumplimiento de las disposiciones vigentes en materia laboral, de seguridad social y de seguridad e higiene en el trabajo.

En lo referente a las obligaciones del Contratista en materia de seguridad e higiene en el trabajo, estas quedan detalladas de la forma siguiente:

4.5.1.- El Contratista es responsable de las condiciones de seguridad e higiene en los trabajos, estando obligado a adoptar y hacer aplicar, a su costa, las disposiciones vigentes sobre estas materias, en las medidas que dicte la Inspección de Trabajo y demás organismos competentes, así como las normas de seguridad complementarias que correspondan a las características de las obras contratadas.

4.5.2.- A tal efecto el Contratista debe establecer un Plan de Seguridad, Higiene y Primeros Auxilios que especifique con claridad las medidas prácticas que, para la consecución de las precedentes prescripciones, estime necesario tomar en la obra. Este Plan debe precisar las formas de aplicación de las medidas que correspondan a los riesgos de la obra con el objeto de asegurar eficazmente:

- La seguridad de su propio personal, y de terceros.
- La higiene y primeros auxilios a enfermos y accidentados.
- La seguridad de las instalaciones.

El Plan de Seguridad así concebido debe comprender la aplicación de las Normas de Seguridad que el Contratista prescribe a sus empleados cuando realizan trabajos similares a los encomendados al personal del Contratista.

El Plan de Seguridad, Higiene y Primeros Auxilios deberá ser comunicado al Promotor, en el plazo máximo de tres meses a partir de la firma del contrato. El incumplimiento de este plazo puede ser motivo de resolución del contrato.

La adopción de cualquier modificación o aplicación al plan previamente establecido, en razón a la variación de las circunstancias de la obra, deberá ser puesta inmediatamente en conocimiento del Promotor.

4.5.3.- Los gastos originados por la adopción de las medidas de seguridad, higiene y primeros auxilios son a cargo del Contratista y se considerarán incluidos en los precios del contrato. Quedan comprendidas en estas medidas, sin que su enumeración las limite:

a) La formación del personal en sus distintos niveles profesionales en materia de seguridad, higiene y primeros auxilios, así como la información al mismo mediante carteles, avisos o señales de los distintos riesgos que la obra presente.

b) El mantenimiento del orden, limpieza, comodidad y seguridad en las superficies o lugares de trabajo, así como en los accesos a aquellos.

c) Las protecciones y dispositivos de seguridades en las instalaciones, aparatos y máquinas, almacenes, etc., incluidas las protecciones contra incendios.

d) El establecimiento de las medidas encaminadas a la eliminación de factores nocivos, tales como polvos, humos, gases, vapores, ruidos, temperatura, humedad, y aireación e iluminación deficientes...

e) Suministro de todos los elementos de protección personal necesarios, así como de las instalaciones sanitarias, botiquines, ambulancias, que las circunstancias hagan igualmente necesarias. Además, el Contratista debe proveer de vestuarios, servicios higiénicos, servicio de comedor y menaje, barracones, suministro de agua, etc., que las características de las tareas y la reglamentación determinen.

4.5.4.- Si se produjera una Asociación de Contratistas, éstos deberán agruparse en el seno de un Comité de Seguridad, formado por los representantes de los Contratistas, Comité que tendrá por misión coordinar las medidas de seguridad, higiene y primeros auxilios, tanto a nivel individual como colectivo.

De esta forma, cada contratista debe designar un representante responsable ante el Comité de Seguridad. Las decisiones adoptadas por el Comité se aplicarán a todos los contratistas, incluso a los que lleguen con posterioridad a la ejecución de las tareas.

Los gastos resultantes de esta organización colectiva se prorratearán mensualmente entre las empresas participantes, proporcionalmente al número de jornales, horas de trabajo de sus trabajadores, o por cualquier otro método establecido de común acuerdo.

El Contratista remitirá al Promotor, con fines de información, copia de cada declaración de accidente que cause baja en el trabajo, inmediatamente después de formalizar la dicha baja.

El incumplimiento de estas obligaciones por parte del Contratista o la infracción de las disposiciones sobre seguridad por parte del personal técnico designado por él, no implicará responsabilidad alguna para el Promotor.

4.6.- Sustitución del personal

4.6.1.- A solicitud del Promotor:

El Promotor podrá exigir con causa fundada, la sustitución o separación de cualquiera de las personas que integren el equipo. En tales casos, todos los gastos emergentes serán por cuenta del Contratista.

En los casos que, en virtud de lo anterior, corresponda la sustitución de personal, el contratista deberá cumplimentar los requisitos atinentes establecidos en el numeral siguiente.

4.6.2. A solicitud del contratista:

La sustitución de cualquier persona que integra el equipo profesional sólo podrá ocurrir cuando se produzcan causas debidamente fundadas. La propuesta de sustitución se efectuará por nota dirigida al Promotor, la cual contendrá:

- Curriculum vitae actualizado del nuevo profesional propuesto.
- Actividades específicas a desarrollar.
- Compromiso de participación debidamente firmado por el profesional propuesto
- Cuando corresponda, la pertinente habilitación expedida por el Colegio Profesional correspondiente.

- Efecto que produce la sustitución sobre la ejecución de las tareas.
- Constancia de aceptación del profesional reemplazado de su sustitución.

La incorporación del profesional propuesto a los equipos de trabajo, sólo podrá hacerse efectiva una vez que el Promotor haya otorgado la aprobación correspondiente.

La ocurrencia de las situaciones contempladas en el presente artículo, no podrán dar lugar, bajo ningún concepto, a la disminución del ritmo del cumplimiento de las obligaciones, ni dejar en ningún momento áreas específicas sin cubrir.

4.7.- Rescisión del contrato

Cuando a juicio del Promotor el incumplimiento por parte del Contratista de alguna de las cláusulas del Contrato pudiera ocasionar graves trastornos en la ejecución de las tareas, cumplimiento de los plazos, o en el aspecto económico, el Promotor podrá decidir la resolución del Contrato, con las penalidades a que hubiera lugar. Asimismo, podrá proceder la resolución con pérdida de fianza y garantía suplementaria si la hubiera, de producirse alguno de los supuestos siguientes.

a) Cuando no se hubiera aportado los medios relacionados en la oferta o su equivalente o capacidad en los plazos previstos incrementados en un 25%, o si el Contratista hubiese sustituido dichos medios en sus elementos principales sin la previa autorización del Promotor.

b) Cuando se cumpla el plazo final de las tareas y falte por ejecutar más del 20% de las tareas. La imposición de las multas establecidas por los retrasos sobre dicho plazo, no obligará al Promotor a la prórroga del mismo, siendo potestativo por su parte elegir entre la resolución o la continuidad del Contrato.

Será asimismo causa suficiente para la rescisión, alguno de los hechos siguientes:

- La quiebra, fallecimiento o incapacidad del Contratista. En este caso, el Promotor podrá optar por la resolución del Contrato, o por que se subroguen en el lugar del Contratista los síndicos de la quiebra o sus representantes.
- La disolución, por cualquier causa, de la sociedad, si el Contratista fuera una persona jurídica.
- Si el Contratista es una agrupación temporal de empresas y alguna de las integrantes se encuentra incluida en alguno de los supuestos previstos en alguno de los dos apartados anteriores, el Promotor estará facultado para exigir el cumplimiento de las obligaciones pendientes del Contrato a las restantes empresas que constituyen la agrupación temporal o para acordar la resolución del Contrato. Si el Promotor optara en ese momento por la rescisión, esta no producirá pérdida de la fianza, salvo que concurriera alguna otra causa suficiente para declarar tal pérdida.

Procederá asimismo la rescisión, sin pérdida de fianza por el Contratista, cuando se suspendan las tareas una vez comenzadas, y en todo caso, siempre que por causas ajenas al Contratista, no sea posible dar comienzo a las tareas adjudicadas, en el plazo de 3 meses, a partir de la fecha de adjudicación.

En el caso de que se incurriese en las causas de resolución del Contrato conforme a las cláusulas de este Pliego de Condiciones Generales, o del Particular de las tareas, el Promotor se hará cargo de las obras en la situación en que se encuentren, sin otro requisito que el del levantamiento de un Acta Notarial o simple, si ambas partes prestan su conformidad, que refleje la situación de las tareas, así como de acopios de materiales, maquinaria y medios auxiliares que el Contratista tuviese en ese momento en el emplazamiento de los trabajos. Con este acto del Promotor el Contratista no podrá poner interdicto ni ninguna otra acción judicial, a la que renuncie expresamente.

Siempre y cuando el motivo de la rescisión sea imputable al Contratista, este se obliga a dejar a disposición del Promotor hasta la total terminación de los trabajos, la maquinaria y medios auxiliares existentes en la ejecución de las tareas que el Promotor

estime necesario, pudiendo el Contratista retirar los restantes. El Promotor abonará por los medios, instalaciones y máquinas que decida deben continuar en obra, un alquiler igual al estipulado en el baremo para trabajos por administración, pero descontando los porcentajes de gastos generales y beneficio industrial del Contratista.

El Contratista se compromete como obligación subsidiaria de la cláusula anterior, a conservar la propiedad de las instalaciones, medios auxiliares y maquinaria seleccionada por el Promotor o reconocer como obligación preferente frente a terceros, la derivada de dicha condición.

El Promotor comunicará al Contratista, con treinta (30) días de anticipación, la fecha en que desea reintegrar los elementos que venía utilizando, los cuales dejará de devengar interés alguno a partir de su devolución, o a los treinta (30) días de la notificación, si el

Contratista no se hubiese hecho cargo de ellos. En todo caso, en la devolución se realizarán siempre por cuenta del Contratista los gastos de su traslado definitivo.

En los contratos rescindidos, se procederá a efectos de garantías, fianzas, etc. a efectuar las recepciones provisionales y definitivas de todos los trabajos ejecutados por el Contratista hasta la fecha de la rescisión.

5.- CONDICIONES ECONÓMICAS Y LEGALES

5.1.- Gastos de carácter general por cuenta del contratista

Se entienden como tales los gastos de cualquier clase ocasionados por los ensayos de materiales que deba realizar por su cuenta el Contratista; oficinas y almacenes pertenecientes al Contratista; equipos necesarios para la evitación de accidentes de cualquier clase; los de protección de materiales y las propias tareas contra todo deterioro, daño o incendio, cumpliendo los reglamentos vigentes; los de limpieza de los espacios interiores y exteriores; los de retirada al fin de las tareas de herramientas, materiales, etc.

Salvo que se indique lo contrario, será de cuenta del Contratista el suministro de la energía eléctrica necesaria para la ejecución de las tareas.

Serán de cuenta del Contratista los gastos ocasionados por la retirada del lugar de ejecución de las tareas, de los materiales rechazados, los de jornales y materiales para las mediciones periódicas para la redacción de certificaciones y los ocasionados por la medición final; los de pruebas, ensayos, reconocimientos y tomas de muestras para la recepción definitiva, del equipo; la corrección de las deficiencias observadas en las pruebas, ensayos, etc., y los gastos derivados de los asientos o averías, accidentes o daños que se produzcan en estas pruebas y la reparación y conservación de las obras durante el plazo de garantía.

Además de los ensayos a los que se refieren los párrafos anteriores de este artículo, serán por cuenta del Contratista los ensayos que realice directamente con los materiales suministrados por sus proveedores antes de su adquisición e incorporación a la obra y que en su momento serán controlados por el Promotor para su aceptación definitiva. Serán asimismo de su cuenta aquellos ensayos que el Contratista realice durante la ejecución de los trabajos, para su propio control.

En los casos de resolución del Contrato, cualquiera que sea la causa que lo motive, serán de cuenta del Contratista los gastos de jornales y materiales ocasionados por la

liquidación de las obras y los de las Actas Notariales que sean necesarias levantar, así como los de retirada de los medios auxiliares que no utilice el Promotor o que le devuelva después de utilizados.

5.2.- Gastos de carácter general por cuenta del Promotor

Serán por cuenta del Promotor los gastos originados por la inspección de las obras del personal del Promotor o contratados para este fin, la comprobación o revisión de las certificaciones, la toma de muestras y ensayos de laboratorio para la comprobación periódica de calidad de materiales y obras realizadas, salvo los indicados en el apartado 5.1, y el transporte de los materiales suministrados por el Promotor, hasta el almacén del Contratista, sin incluir su descarga ni los gastos de paralización de vehículos por retrasos en la misma.

5.3.- Indemnizaciones por cuenta del contratista

Será de cuenta del Contratista la reparación de cualquier daño que pueda ocasionar sus instalaciones y construcciones auxiliares en propiedades particulares, los producidos en las demás operaciones realizadas por el Contratista para la ejecución de las tareas.

5.4.- Partidas para tareas accesorias

Las cantidades calculadas para tareas accesorias, que por su escasa o nula definición, figuren en el presupuesto con una partida alzada, no se abonará por su cantidad total, salvo que se indique así en el Pliego de Condiciones Particulares.

En consecuencia estas obras accesorias se abonarán a los precios unitarios del Contrato y conforme a las unidades y medidas que se obtengan de los proyectos que se realicen para ellas y de su medición final.

5.5.- Partidas alzadas

Las partidas alzadas consignadas en los presupuestos para obras o servicios, y que expresamente así se indique en el Pliego de Condiciones Particulares, se abonarán por su importe una vez realizados totalmente dichos trabajos.

Quedan excluidas de este sistema de abono, las obras accesorias que se liquidarán conforme a lo indicado en el artículo 39.

5.6.- Revisión de precios.

El Promotor adopta para las revisiones de los precios el sistema de fórmulas polinómicas vigentes para las obras del Estado y Organismos Autónomos, establecido por el Decreto-Ley 2/1964 de 4 de febrero (B.O.E. de 6-II-64), especialmente en lo que a su artículo 4º se refiere.

Se establecerán la fórmula o fórmulas polinómicas a emplear, adoptando de entre todas las reseñadas en el Decreto-Ley 3650/1970 de 19 de diciembre (B.O.E. 29-XII-70) la que más se ajuste a las características de la obra contratada.

Si estas características así lo aconsejan, el Promotor se reserva el derecho de establecer nuevas fórmulas, modificando los coeficientes o las variables de las mismas.

Para los valores actualizados de las variables que inciden en la fórmula, se tomarán para cada mes los que faciliten el Ministerio de Hacienda una vez publicados en el B.O.E. Los valores iniciales corresponderán a los del mes de la fecha del Contrato.

El índice de revisión mensual se aplicará al importe total de la certificación correspondiente al mes de que se trate, siempre y cuando la tarea realizada durante dicho periodo, lo haya sido dentro del programa de trabajo establecido.

En el caso de que las obras se desarrollen con retraso respecto a dicho programa, las certificaciones mensuales producidas dentro del plazo se revisarán por los correspondientes índices de revisión hasta el mes previsto para la terminación de los trabajos. En este momento, dejarán de actualizarse dicho índice y todas las certificaciones posteriores que puedan producirse, se revisarán con este índice constante.

Los aumentos de presupuesto originados por las revisiones de precios oficiales, no se computarán a efectos de lo establecido en el artículo 51, "Modificaciones del proyecto".

Si las tareas a realizar fuesen de corta duración, el Promotor podrá prescindir de la cláusula de revisión de precios, debiéndolo hacer constar así expresamente en las bases del Concurso.

5.7.- Régimen de intervención

Cuando el Contratista no de cumplimiento, sea a las obligaciones o disposiciones del Contrato, sea a las órdenes de servicio que les sean dadas por el Promotor, éste le requerirá a cumplir este requisito de órdenes en un plazo determinado, que, salvo en casos de urgencia, no será nunca menor de diez (10) días a partir de la notificación de requerimiento.

Pasado este plazo, si el Contratista no ha ejecutado las disposiciones dadas, el Promotor podrá ordenar a título provisional el establecimiento de un régimen de intervención general o parcial por cuenta del Contratista.

Se procederá, en presencia del Contratista, o habiéndole convocado, a la comprobación de las tareas ejecutadas, de los materiales acopiados así como al inventario descriptivo del material del Contratista, y a la devolución a este de la parte de materiales que no utilizará el Promotor para la terminación de los trabajos.

El Promotor tiene por otra parte, la facultad sea de ordenar la convocatoria de un nuevo concurso, en principio sobre petición de ofertas, por cuenta y riesgo del Contratista incumplidor, sea de ejercitar el derecho de rescisión pura y simple del Contrato, sea de prescribir la continuación de la intervención.

Durante el periodo de régimen de intervención, el Contratista podrá conocer la marcha de los trabajos, sin que pueda, de ninguna manera, entorpecer o dificultar las órdenes del Promotor.

El Contratista podrá, por otra parte, ser liberado del régimen de intervención si justifica su capacidad para volver a hacerse cargo de los trabajos y llevarlos a buen fin.

Los excedentes de gastos que resulten de la intervención o del nuevo contrato serán deducidos de las sumas, que puedan ser debidas al Contratista, sin perjuicios de los derechos a ejercer contra él en caso de ser insuficientes.

Si la intervención o el nuevo contrato supone, por el contrario una disminución de gastos, el Contratista no podrá pretender beneficiarse en ninguna parte de la diferencia, que quedará a favor del Promotor.

5.8.- Informes

De cada uno de los informes que se produzcan por parte del Contratista en cumplimiento de sus obligaciones contractuales, así como de la documentación de respaldo anexa a los mismos, se confeccionarán dos (2) ejemplares, redactados en idioma español. Las unidades de medida utilizadas en los informes deberán ser las del Sistema Internacional de Unidades y las hojas a emplear para los informes deberán ser de tamaño DIN A4.

Cada Informe deberá presentarse acompañado de su soporte magnético en disquetes de 3,5", debidamente identificado y fechado. Para el soporte de textos se utilizará la última versión de Word; para planilla de datos, cálculos y gráficos resultantes, la última versión de Excel; para bases de datos, Access en su última Versión; para Administración de Proyectos Microsoft Project y para planos el Programa Autocad en versión 14 o mayor. Todo ello sin perjuicio de los programas computacionales desarrollados o utilizados al efecto, y que previamente hayan sido aprobados por el Promotor.

Cada informe que presente el Contratista deberá ser autosuficiente, evitando al máximo las referencias a otros informes y por lo tanto permitir que el Promotor pueda verificar, analizar y evaluar integralmente su contenido, sin necesidad de tener que recurrir a otros documentos o informaciones adicionales. El Promotor rechazará los informes que no respondan a estas condiciones.

5.9.- Revisión de los informes

El Promotor revisará, analizará, evaluará y, en caso de encontrarlos conformes a las normas contenidas en la documentación contractual, aceptará los informes y demás documentación de respaldo a sus tareas que entregue al contratista durante la vigencia del contrato.

5.10.- Certificación de las prestaciones

El Promotor emitirá un informe de evaluación de las tareas ejecutadas por el Contratista. En caso de que su evaluación concluya en el sentido que las funciones del contratista hubiesen sido cumplidas en forma satisfactoria por el mismo en el período considerado y se ajustan a las normas contenidas en la documentación contractual, se dará curso a la factura de pago correspondiente.

5.11.- Confección de las facturas de pago

El Contratista presentará las facturas de pago a la comisión, para cuya confección utilizará formularios previamente aprobados y que se ajusten a las disposiciones vigentes en la materia. Para tales facturas se considerará como fecha de emisión, la del día hábil posterior al de finalización del periodo al que corresponden las prestaciones liquidadas.

5.12.- Pago de los certificados

El pago de las facturas o certificados semanales se efectuará dentro de los treinta (30) días contados desde el primer día posterior a su fecha de emisión. En caso de producirse demora en el pago, será de aplicación lo estipulado en el Derecho español.

5.13.- Propiedad industrial, comercial e intelectual

Al suscribir el Contrato, el Contratista garantiza al Promotor contra toda clase de reivindicaciones que se refieran a suministros y materiales, procedimientos y medios utilizados para la ejecución de las tareas y que procedan de titulares de patentes, licencias, planos, modelos, marcas de fábrica o comercio.

En el caso de que fuera necesario, corresponde al Contratista la obtención de las licencias o a utilidades precisas y soportar la carga de los derechos e indemnizaciones correspondientes.

En caso de acciones dirigidas contra el Promotor por terceros titulares de licencias, autorizaciones, planos, modelos, marcas de fábrica o de comercio utilizadas por el Contratista para la ejecución de los trabajos, el Contratista responderá ante el Promotor del resultado de dichas acciones estando obligado además a prestarle su plena ayuda en el ejercicio de las excepciones que competan al Promotor.

La propiedad intelectual del contenido de todos los informes presentados por el Contratista en lo que hace a los estudios, cálculos, recomendaciones, conclusiones y demás trabajos propios de los profesionales de aquélla, será exclusiva del Promotor, quien podrá disponer libremente de los mismos. El Contratista sólo podrá invocarlos como antecedentes de su propia labor.

5.14.- Tribunales

El Contratista renuncia al fuero de su propio domicilio y se compromete a sustanciar cuantas reclamaciones origine el Contrato ante los tribunales.

6.- DESARROLLO DE LAS TAREAS, CONDICIONES TÉCNICO-ECONÓMICAS

6.1.- Modificaciones del proyecto

El Promotor podrá introducir en el proyecto, antes de empezar las tareas o durante su ejecución, las modificaciones que sean precisas para la normal ejecución de las mismas, aunque no se hayan previsto en el proyecto y siempre que no varíen las características principales de las tareas.

También podrá introducir aquellas modificaciones que produzcan aumento o disminución y aún supresión de las unidades de obra marcadas en el presupuesto.

Cuando se trate de aclarar o interpretar preceptos de los Pliegos de Condiciones o indicaciones de los planos o dibujos, las órdenes o instrucciones se comunicarán exclusivamente por escrito al Contratista, estando obligado éste a su vez a devolver una copia suscribiendo con su firma el enterado.

Todas estas modificaciones serán obligatorias para el Contratista, y siempre que, a los precios del Contrato, sin ulteriores omisiones, no alteren el Presupuesto total de ejecución Material contratado en más de un 35%, tanto en más como en menos, el Contratista no tendrá derecho a ninguna variación en los precios ni a indemnización de ninguna clase.

Si la cuantía total de la certificación final, correspondiente a la obra ejecutada por el Contratista, fuese a causa de las modificaciones del Proyecto, inferior al presupuesto total de ejecución material del contrato en un porcentaje superior al 35%, el Contratista tendrá derecho a indemnizaciones.

Para fijar su cuantía, el Contratista deberá presentar al Promotor en el plazo máximo de dos (2) meses a partir de la fecha de dicha certificación final, una petición de indemnización con las justificaciones necesarias debido a los posibles aumentos de los gastos generales e insuficiente amortización de equipos e instalaciones, y en la que se valore el perjuicio que le resulte de las modificaciones introducidas en las previsiones del

Proyecto. Al efectuar esta valoración el Contratista deberá tener en cuenta que el primer 35% de reducción no tendrá repercusión a estos efectos.

Si por el contrario, la cuantía de la certificación final, correspondiente a la obra ejecutada por el Contratista, fuese, a causa de las modificaciones del Proyecto, superior al presupuesto total de ejecución material del contrato y cualquiera que fuere el porcentaje de aumento, no procederá el pago de ninguna indemnización ni revisión de precios por este concepto.

No se admitirán mejoras de tareas más que en el caso de que el Promotor haya ordenado por escrito, la ejecución de trabajos nuevos o que mejoren la calidad de los contratados.

Tampoco se admitirán aumentos de tareas en las unidades contratadas, salvo caso de error en las mediciones del Proyecto, o salvo que el Promotor ordene también por escrito la ampliación de las contratadas. Se seguirá el mismo criterio y procedimiento, cuando se quieran introducir innovaciones que supongan una reducción apreciable en las unidades de obra contratadas.

6.2.- Modificaciones de los planos

Los planos de construcción podrán modificar a los provisionales de concurso, respetando los principios esenciales y el Contratista no puede por ello hacer reclamación alguna al Promotor

El carácter complejo y los plazos limitados de que se dispone en la ejecución de un Proyecto, obligan a una simultaneidad entre las entregas de las especificaciones técnicas de los suministradores de equipos y la elaboración de planos definitivos de Proyecto.

El Promotor tomará las medidas necesarias para que estas modificaciones no alteren los planes de trabajo del Contratista entregando los planos con la suficiente antelación para

que la preparación y ejecución de estos trabajos se realice de acuerdo con el programa previsto.

El Contratista por su parte no podrá alegar desconocimiento de estas definiciones de detalle, no incluidas en el proyecto base, y que quedará obligado a su ejecución dentro de las prescripciones generales del Contrato.

El Contratista deberá confrontar, inmediatamente después de recibidos, todos los planos que le hayan sido facilitados, debiendo informar por escrito al Promotor en el plazo máximo de quince (15) días y antes de proceder a su ejecución, de cualquier contradicción, error u omisión que lo exigiera técnicamente incorrectos.

6.3.- Empleo de materiales nuevos pertenecientes al Promotor

Cuando fuera de las previsiones del Contrato, el Promotor juzgue conveniente emplear materiales y equipos nuevos que le pertenezcan, el Contratista no podrá oponerse a ello y las condiciones que regulen este suministro serán establecidas de común acuerdo o, en su defecto, se establecerá mediante Arbitraje de Derecho Privado.

6.4.- Uso anticipado del equipo o componentes

El Promotor se reserva el derecho de hacer uso de los componentes o del equipo terminado de las tareas contratadas, antes de que los trabajos prescritos en el contrato se hayan terminado en su totalidad, bien por necesidades de servicio, bien para permitir la realización de otros trabajos que no forman parte del contrato.

Si el Promotor deseara hacer uso del citado derecho, se lo comunicará al Contratista con una semana de antelación a la fecha de utilización. El uso de este derecho por parte del Promotor no implica recepción provisional del equipo afectado.

6.5.- Plan de trabajo y montaje.

Independientemente del plan de trabajos que los Contratistas ofertantes deben presentar con sus ofertas, de acuerdo a lo establecido en el artículo 7.8, el Contratista presentará con posterioridad a la firma del Contrato, un plan más detallado que el anterior.

El plazo máximo a partir de la formalización del Contrato, en el que debe presentarlo y tipo de programa exigido queda establecido en un mes.

Este Plan, que deberá ser lo más completo, detallado y razonado posible, respetará obligatoriamente los plazos fijados en el Concurso, y deberá venir acompañado del programa de certificaciones mensuales.

En el caso de que el Contratista, decidiera proponer un adelanto en alguno de los plazos fijados, deberá hacerlo como una variante suplementaria, justificando expresamente en este caso todas las repercusiones económicas a que diese lugar.

El Plan de Trabajo deberá ser aprobado oficialmente por el Promotor adquiriendo desde este momento el carácter de documento contractual. No podrá ser modificado sin autorización expresa del Promotor y el Contratista estará obligado a respetarlo en el desarrollo de los trabajos.

En caso de desacuerdo sobre el Plan de Trabajo, una vez rechazado por el Promotor, se someterá la controversia a arbitraje, siendo desempeñado por un profesional competente, designado por el Colegio Profesional correspondiente.

Los medios ofrecidos, que han de ser como mínimo los de la propuesta inicial, salvo que el promotor, a la vista del Plan de Trabajo, autorice otra cosa, quedarán afectos a la obra y no podrán ser retirados o sustituidos.

La aceptación del Plan y relación de medios auxiliares propuestos por el Contratista no implica exención alguna de responsabilidad para el mismo en el caso de incumplimiento de los plazos parciales, o final convenido.

Si el desarrollo de los trabajos no se efectuase de acuerdo al Plan aprobado y ello pudiera dar lugar al incumplimiento de plazos parciales o final, el Promotor podrá exigir del Contratista la actualización del Plan vigente, reforzando las plantillas de personal, medios auxiliares e instalaciones necesarias a efectos de mantener los plazos convenidos y sin que el Contratista pueda hacer recaer sobre el Promotor las repercusiones económicas que este aumento de medios puede traer consigo. El Plan de Trabajo actualizado sustituirá a todos los efectos contractuales al anteriormente vigente, con la salvedad que se indica en el párrafo siguiente.

En cualquier caso, la aceptación por parte del Promotor de los Planes de Trabajo actualizados que se vayan confeccionando para adecuar el desarrollo real de los trabajos al mantenimiento de los plazos iniciales, no liberará al Contratista de las posibles responsabilidades económicas en que incurra por el posible incumplimiento de los plazos convenidos.

6.6.- Plazos de ejecución

En el Pliego de Condiciones Particulares, se establecen los plazos parciales y plazo final de terminación, a los que el Contratista deberá ajustarse obligatoriamente.

Los plazos parciales corresponderán a la fabricación, adquisición o terminación de determinados elementos, tareas o conjuntos de tareas, que se consideren necesarios para la prosecución de otras fases del montaje.

6.7.- Retenciones por retrasos durante la ejecución de trabajos

Los retrasos sobre el plan de trabajo y programa de certificaciones imputables al Contratista, tendrán como sanción económica para cada mes la retención por el Promotor, con abono a una cuenta especial denominada "Retenciones", del 50% de la diferencia entre el 90% de la tarea que hasta ese momento debería haberse justificado y la que realmente se haya realizado.

Si el Contratista realizase tareas con valor superior a lo establecido en el Plan de Trabajos para cada momento, tendrá derecho a recuperar de la cuenta de "Retenciones" la parte proporcional que le corresponda.

Cuando se alcance el plazo total previsto para la ejecución del trabajo con un saldo acreedor en la cuenta de "Retenciones" quedará éste bloqueado a disposición del Promotor para responder de las posibles multas y sanciones correspondientes a una posible rescisión. En el momento de la total terminación y liquidación de las tareas contratadas, se procederá a saldar esta cuenta abonando al Contratista el saldo acreedor si lo hubiere o exigiéndole el deudor si así resultase.

6.8.- Incumplimiento de los plazos y multas

En el caso de incumplimiento de los plazos fijados por causas directamente imputables al Contratista, satisfará éste las multas que se indiquen en el Pliego Particular, con cargo a las certificaciones, fondo de retenciones o fianza definitiva, sucesivamente, sin perjuicio de la responsabilidad por daños.

Si el retraso producido en el cumplimiento de los plazos ocasionara a su vez retrasos en otros contratistas, lesionando los intereses de estos, el Promotor podrá hacer repercutir sobre el Contratista las indemnizaciones a que hubiera lugar por tales perjuicios.

En el caso de que los retrasos se produzcan por causas imputables al Promotor en los suministros a que venga obligado, se prorrogarán los plazos en un tiempo igual al estimado por el Promotor como retraso producido, de acuerdo con lo establecido en el apartado 6.3.2.

6.9.- Supresión de las multas

Cuando el Promotor advierta la posibilidad de que un retraso en la ejecución de las obras o en el montaje, no va a repercutir en la entrega final ni causar perjuicios a terceros, podrá acordar libremente la supresión de multas, o la ampliación de los plazos de ejecución.

En este último caso, el Promotor podrá diferir a la nueva fecha de terminación, y en el supuesto de que ésta tampoco se cumpla, la aplicación de las multas establecidas.

6.10.- Procedimiento para la aplicación de multas

A los fines de la aplicación de las multas que se establecen en el Pliego y en el Contrato, se considerará producido el hecho por el solo incumplimiento de las cláusulas contractuales que dan origen a la aplicación de las mismas. El importe de la penalidad será exigible y cobrable sin necesidad de interpelación extrajudicial o judicial previa, produciéndose la mora en forma automática por el solo vencimiento del plazo concedido para su cancelación.

En todos los casos en que corresponda la aplicación de multas, las mismas serán dispuestas por resolución del Promotor y notificadas al Contratista. La cantidad resultante será pagada por el Contratista en un plazo de diez (10) días contados a partir de la fecha de su notificación.

Vencido el plazo de pago, el Promotor podrá deducir las cantidades impagadas más sus intereses moratorios, de cualquier crédito que tenga a su favor el Contratista, a cuyo fin los importes originados en penalidades, cualquiera sea su origen, se consideran de plazo vencido, líquidos y exigibles.

En especial las multas podrán deducirse de los pagos de cualquier tipo que tenga a cobrar el Contratista o de las fianzas constituidas de acuerdo a las disposiciones contractuales, a cuyo efecto se deberá disponer los mecanismos o la redacción necesaria para que ello pueda efectivizarse de manera automática. Cada vez que se produzca una

reducción en la cantidad de las fianzas por deducción de multas, el contratista deberá reintegrarla cantidad original de las mismas, dentro de los diez (10) días de efectivizada la deducción.

Las multas, una vez aplicadas, serán deducidas en forma automática, sin perjuicio de las presentaciones recurriendo las mismas que el Contratista pueda efectuar mediante la correspondiente nota dirigida al Promotor. Si se diese curso favorable a alguna solicitud de reconsideración, el importe descontado le será reintegrado mediante un certificado especial, sin ningún tipo de intereses.

6.11.- Premios y primas

Se podrán establecer premios en el caso de cumplimiento de los plazos parciales y total contratados y/o un sistema de primas para premiar los posibles adelantos sobre dichos plazos de terminación de obras.

En el Pliego Particular, se especificarán las condiciones que deberán concurrir para que el Contratista pueda obtener dichos premios y/o primas.

El Promotor podrá supeditar el pago de los premios, siempre que así lo indique expresamente, al cumplimiento estricto de los plazos, incluso en el caso de retrasos producidos por causas no imputables al Contratista o de fuerza mayor.

6.12.- Retrasos ocasionados por el Promotor

Los retrasos que pudieran ocasionar la falta de planos, demoras en el suministro de materiales que deba realizar por el Promotor, o interferencias ocasionadas por otros Contratistas, serán valorados en tiempo por el Promotor, después de oír al Contratista, prorrogándose los plazos conforme a la valoración.

Para efectuar ésta, el Promotor tendrá en cuenta la influencia sobre la parte de las tareas realmente afectada, y la posibilidad de adelantar la ejecución de tareas cuya realización estuviese prevista para fecha posterior.

6.13.- Daños y ampliación de plazo en caso de fuerza mayor

Cuando se produjeran daños en las tareas por causa de fuerza mayor, si su prevención o minoración hubiera correspondido a las partes, la que hubiese sido negligente soportará sus consecuencias.

Si fuese por completo ajena a la actuación del Contratista el riesgo sobre la tarea ejecutada será soportado por el Promotor en cuanto a las unidades de que se hubiese hecho previa medición, según se determina en el apartado 6.15.

Si por causa de fuerza mayor no imputable al Contratista hubiese de sufrir demora el curso de las tareas, lo pondrá en conocimiento del Promotor con la mayor prontitud posible, concretando el tiempo en que estima necesario prorrogar los plazos establecidos, el Promotor deberá manifestar su conformidad o reparos a la procedencia y alcance de la prórroga propuesta en un plazo igual al que hubiese mediado entre el hecho originario y la comunicación del Contratista.

6.14.- Mediciones de las tareas ejecutadas.

Servirán de base para la medición y posterior abono de las obras los datos contractuales de presupuestos parciales y totales.

Las mediciones con los datos recogidos de los elementos cualitativos que caracterizan las tareas ejecutadas, los acopios realizados, o los suministros efectuados, constituyen comprobación de un cierto estado de hecho y se recogerán por el Promotor en presencia del Contratista. La ausencia del Contratista, aún habiendo sido avisado previamente, supone su conformidad a los datos recogidos por el Promotor.

En caso de presencia del Contratista las mediciones serán avaladas con la firma de ambas partes.

El Contratista no podrá dejar de firmar las mediciones. En caso de negarse a hacerlo, podrá levantarse acta notarial a su cargo. Si las firmara con reservas, dispondrá de un plazo de 10 días a partir de la fecha de redacción de las mismas para formular por escrito sus observaciones. Pasado ese plazo, las mediciones se suponen aceptadas sin reserva alguna.

En el caso de la firma con reserva, se redactará un acta en la que se hará constar los motivos de disconformidad, acta que se unirá a la correspondiente medición.

En el caso de reclamación del Contratista las mediciones se tomarán a petición propia o por iniciativa del Promotor, sin que estas comprobaciones prejuzguen, en ningún caso, el reconocimiento de que las reclamaciones están bien fundamentadas.

El Contratista está obligado a exigir a su debido tiempo la toma contradictoria de mediciones para los trabajos, prestaciones y suministros que no fueran susceptibles de comprobación o de verificaciones ulteriores, a falta de lo cual, salvo pruebas contrarias que deben proporcionar a su costa, prevalecerán las decisiones del Promotor con todas sus consecuencias.

6.15.- Certificación y abono de las tareas

6.15.1.- Las tareas se medirán periódicamente sobre las partes realmente ejecutadas con arreglo al Proyecto, modificaciones posteriores y órdenes del Promotor, y de acuerdo con los artículos del Pliego de Condiciones.

La medición de la tarea realizada se llevará a cabo en los dos (2) primeros días siguientes a la fecha de cierre de certificaciones. Dicha fecha se determinará al comienzo de las obras.

Las valoraciones efectuadas servirán para la redacción de certificaciones al origen, de las cuales se tendrá el líquido de abono. Corresponderá al Promotor en todo caso, la redacción de las certificaciones periódicas.

6.15.2.- Las certificaciones y abonos de los equipos y componentes, no suponen aprobación ni recepción de los mismos.

6.15.3.- Las certificaciones periódicas se deben entender siempre como abonos a buena cuenta, y en consecuencia, las mediciones de unidades de obra y los precios aplicados no tienen el carácter de definitivos, pudiendo surgir modificaciones en certificaciones posteriores y definitivamente en la liquidación final.

6.15.4.- Si el Contratista rehusase firmar un certificado semanal o lo hiciese con reservas por no estar conforme con ella, deberá exponer por escrito y en el plazo máximo de dos (2) días, a partir de la fecha de que se le requiera para la firma, los motivos que fundamenten su reclamación e importe de la misma.

El Promotor considerará esta reclamación y decidirá si procede atenderla. Los retrasos en el cobro, que pudieran producirse como consecuencia de esta dilación en los trámites de la certificación, no se computarán a efectos de plazo de cobro ni de abono de intereses de demora.

6.15.5.- Terminado el plazo de dos días, (2) señalado en el epígrafe anterior, o si hubiesen variado las tareas en forma tal que les fuera imposible recomprobar la medición objeto de discusión, se considerará que la certificación es correcta, no admitiéndose posteriormente reclamación alguna en tal sentido.

6.15.6.- Tanto en las certificaciones, como en la liquidación final, las obras serán en todo caso abonadas a los precios que para cada unidad de obra figuren en la oferta aceptada, o a los precios contradictorios fijados en el transcurso de la obra, de acuerdo con lo provisto a continuación.

6.15.7.- Los precios de las tareas, así como los de los materiales, maquinaria y mano de obra que no figuren entre los contratados, se fijarán contradictoriamente entre el Promotor y el Contratista, o su representante expresamente autorizado a estos efectos.

Estos precios deberán ser presentados por el Contratistas debidamente descompuestos, conforme a lo establecido en el apartado 2.4 del presente Pliego.

El Promotor podrá exigir para su comprobación la presentación de los documentos necesarios que justifique la descomposición del precio presentado por el Contratista. La negociación del precio contradictorio será independiente de la ejecución de la unidad de obra de que se trate, viniendo obligado el Contratista a realizarla, una vez recibida la orden correspondiente. A falta de acuerdo se certificará provisionalmente a base de los precios establecidos por el Promotor.

6.15.8.- Cuando circunstancias especiales hagan imposible el establecer nuevos precios, o así le convenga al Promotor, corresponderá exclusivamente a éste la decisión de abonar estos trabajos en régimen de administración, aplicando los baremos de mano de obra, materiales y maquinaria, aprobados en el Contrato.

6.15.9.- Cuando así lo admita expresamente el Pliego de Condiciones Particulares, o el Promotor acceda a la petición en este sentido formulada por el Contratista, podrá certificarse a cuenta de acopios de materiales en la cuantía que determine dicho Pliego, o en su defecto la que estime oportuno el Promotor.

Las cantidades abonadas a cuenta por este concepto se deducirán de la certificación de la unidad de obra correspondiente, cuando dichos materiales pasen a formar parte de la tarea ejecutada.

En la liquidación final no podrán existir abonos por acopios, ya que los excesos de materiales serán siempre por cuenta del Contratista.

El abono de cantidades a cuenta en concepto de acopio de materiales no presupondrá, en ningún caso, la aceptación en cuanto a la calidad y demás especificaciones técnicas de dicho material, cuya comprobación se realizará en el momento de su puesta en obra.

6.15.10.- Del importe de la certificación se retraerá el porcentaje fijado en el apartado 3.5.3 de este Pliego General para la constitución del fondo de garantía.

6.15.11.- Las certificaciones por revisión de precios, se redactarán independientemente de las certificaciones mensuales de obra ejecutada, ajustándose a las normas establecidas en el apartado 5.6 de este Pliego General.

6.16.- Abono de unidades incompletas o defectuosas

El Promotor determinará si las unidades que han sido realizadas en forma incompleta o defectuosa, deben rehacerse o no. Caso de rehacerse el Contratista vendrá obligado a ejecutarlas, siendo de su cuenta y cargo dicha reparación, en el caso de que ya le hubiesen sido abonadas. De no haberlo sido, se certificará la obra como realizada una sola vez.

Cuando existan trabajos defectuosos o incompletos que el Promotor considere, que a pesar de ello puedan ser aceptables para el fin previsto, se abonarán teniendo en cuenta la depreciación correspondiente a las deficiencias observadas.

En lo referente a resistencias, densidades, grados de acabado, tolerancias en dimensiones, etc. Se podrá hacer una proporcionalidad con las obtenidas, siempre que sean admisibles, o bien fijar de entrada una depreciación en los precios de un 10% para obras defectuosas pero aceptables.

6.17.- Informe final

Previo a la finalización de la relación contractual o de suscripción de la prórroga del contrato, lo que ocurra antes, el contratista deberá presentar:

- Informe final global.
- Informe final de cada tarea.

6.18.- Acta de finalización de las prestaciones

Una vez aprobado el informe final por parte del Promotor se procederá a elaborar el acta de finalización de las prestaciones. En el acta de finalización de las prestaciones, se deberá dejarse constancia de:

- Fecha en que se elabora.
- Listado e índice del informe, de la documentación de respaldo y del soporte computacional, que el contratista haya entregado.
- Constancia de las modificaciones, ampliaciones o supresiones producidas en el transcurso de la ejecución de las prestaciones, si hubieren existido.
- Constancia expresa que las prestaciones fueron ejecutadas de acuerdo con lo establecido en la documentación contractual.
- Constancia de las multas impuestas al contratista por mora u otros motivos, si hubiesen existido.

6.19.- Recepción provisional de los equipos

A partir del momento en que todas las tareas que le han sido encomendadas, hayan sido terminadas, el Contratista lo pondrá en conocimiento del Promotor, mediante carta certificada con acuso de recibo.

El Promotor procederá entonces a la recepción provisional de los equipos y de los componentes, habiendo convocado previamente al Contratista mediante notificación escrita con acuso de recibo, al menos con cinco (5) días de anticipación. Si el Contratista no acude a la convocatoria, se hará mención de su ausencia en el Acta de Recepción.

Del resultado del reconocimiento de los equipos, se levantara un Acta de Recepción en la que se hará constar el estado final de los mismos así como las deficiencias que pudieran observarse. El Acta será firmada conjuntamente por el Contratista y el Promotor.

Si el reconocimiento de los equipos fuera satisfactorio se recibirán provisionalmente los mismos, empezando a contar desde esta fecha el plazo de garantía. Si por el contrario se observara deficiencias y no procediese efectuar la recepción provisional, se concederá al Contratista un plazo breve para que corrija los defectos observados, transcurrido el cual deberá procederse a un nuevo reconocimiento.

Si transcurrido el plazo concedido al Contratista, no se hubieran subsanado dichos defectos, el Promotor podrá proceder a su realización, bien directamente, bien por medio de otros contratistas, con cargo al fondo de garantía y si este no bastase, con cargo a la fianza definitiva.

Una vez terminados los trabajos de reparación, se procederá a recibir provisionalmente los equipos y componentes.

6.20.- Plazo de garantía

Una vez terminadas totalmente la ejecución de las tareas, se efectuará la recepción provisional de las mismas, tal como se indica en el artículo 69, a partir de cuyo momento comenzará a contar el plazo de garantía, al final del cual se llevará a cabo la recepción definitiva.

Durante este plazo, será de cuenta del Contratista la conservación y reparación de los equipos, así como todos los desperfectos que pudiesen ocurrir en los mismos, desde la terminación de estos, hasta que se efectúe la recepción definitiva, excepción hecha de los daños que se deriven del mal trato o uso inadecuado de las obras por parte del Promotor.

Si el Contratista incumpliese lo estipulado en el párrafo anterior, el Promotor podrá encargar a terceros la realización de dichos trabajos o ejecutarlos directamente por administración, deduciendo su importe del fondo de garantía y si no bastase, de la fianza definitiva, sin perjuicio de las acciones legales a que tenga derecho el Promotor en el caso

de que el monto del fondo de garantía y de la fianza no bastasen para cubrir el importe de los gastos realizados en dichos trabajos de reparación.

6.21.- Recepción definitiva de los equipos

Una vez transcurrido el plazo de garantía se procederá a efectuar la recepción definitiva de las obras de un modo análogo al indicado en el artículo 69 para la recepción provisional.

En el caso de que hubiese sido necesario conceder un plazo para subsanar los defectos hallados, el Contratista no tendrá derecho a cantidad alguna en concepto de ampliación del plazo de garantía, debiendo continuar encargado de la conservación de las obras durante esa ampliación.

Si el equipo presentase con posterioridad a la recepción definitiva defectos de cualquier tipo debidos a incumplimiento doloso del Contrato por parte del Contratista, responderá éste de los daños y perjuicios en el término de dos (2) años.

Transcurrido este plazo, quedará totalmente extinguida la responsabilidad del Contratista.

6.22.- Liquidación

Una vez efectuada la recepción provisional se procederá a la medición general de las tareas que han de servir de base para la valoración de las mismas.

La liquidación se llevará a cabo después de la recepción definitiva, saldando las diferencias existentes por los abonos a cuenta y descontando el importe de las reparaciones u obras de conservación que haya habido necesidad de efectuar durante el plazo de garantía, en el caso de que el Contratista no las haya realizado por su cuenta.

Después de realizada la liquidación, se saldarán el fondo de garantía y la fianza definitiva, tanto si ésta última se ha constituido Aval Bancario.

**SISTEMA DE RECANTEADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PLIEGO DE CONDICIONES GENERALES**

También se liquidará, si existe, la cuenta especial de retenciones por retrasos durante la ejecución de las tareas.

PLIEGO DE CONDICIONES

PARTICULARES

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

**“Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica”**

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

**SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES**

| | |
|---|----------|
| PLIEGO DE CONDICIONES PARTICULARES..... | 2 |
| 1- ESPECIFICACIONES DE MATERIALES..... | 2 |
| 1.- Acero inoxidable 316..... | 2 |
| 2.- PVC..... | 2 |
| 3.- Teflón..... | 3 |
| 4.- Ensayos a materiales..... | 3 |
| | |
| 2.- TAREAS A REALIZAR SOBRE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA..... | 5 |
| 1.- Torno..... | 5 |
| 2.- Corte..... | 5 |
| 3.- Soldadura..... | 6 |
| 3.- REALIZACIÓN DE LAS TAREAS..... | 8 |
| 1.- Piezas de catálogo..... | 8 |
| 2.- Válvulas, bombas, lámparas y elementos del sistema de control..... | 8 |
| 3.- Piezas a mecanizar..... | 9 |
| 4.- Plazos..... | 9 |
| 5.- Montaje del sistema..... | 9 |

1.- ESPECIFICACIONES DE MATERIALES

1.- Acero inoxidable 316

Las características y requisitos que debe cumplir el acero inoxidable 316 que se use en la fabricación de los componentes del sistema son, a temperatura ambiente y 1 atm de presión:

Composición: C 0.08%, Mn 2.00%, Si 1.00%, Cr 16.0-18.0%, Ni 10.0-14.0%, P 0.045%, S 0.03%

Propiedades físicas:

- Densidad: $8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
- Punto de fusión: 1400-1455°C
- Resistividad eléctrica (20°C): 70-72 Ohm-cm

Propiedades mecánicas:

- Límite elástico: 190-200 Mpa
- Resistencia a la tracción: 500-525 MPa
- Dureza: Brinnell 160-190, Rocwell B 95 (máx)
- Módulo de Poisson 0.27-0.30

2.- PVC

Las tuberías de PVC empleadas para la conducción de aire y líquido cumplirán las especificaciones y ensayos fijados en el PPTGTAA 1986, cuando son de presión.

Los conductos serán de PVC rígido no plastificado, con menos del 1% de impurezas, y más del 96% de PVC puro. El material será exento de grietas, granulaciones, burbujas o faltas de homogeneidad. Las paredes serán opacas.

Propiedades físicas:

- Densidad (20°C): $1'35-1'46 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
- Absorción de agua < 50 g/m²
- Estabilidad dimensional: < 5%(variación longitudinal)

Propiedades mecánicas:

- Módulo de tracción: 2'5-4 GPa
- Resistencia a la tracción: 49-70 Mpa
- Alargamiento a rotura > 80%
- Dureza- Rockwell R106-120

3.-Teflón

Propiedades físicas:

- Densidad (20°C): $2'2 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
- Absorción de agua- en 24 horas (%): 0'01

Propiedades mecánicas:

- Coeficiente de fricción: 0'05-0'2
- Dureza- Rockwell D50-55
- Módulo de tracción (Gpa): 0'3- 0'8
- Resistencia a la tracción (Mpa) 10-40

Propiedades térmicas:

- Calor específico (KJ.Kg⁻¹.K⁻¹): 1'0
- Conductividad térmica, 23 ° C: 0'25 (W. m⁻¹. K⁻¹)

4.- Ensayos a materiales

Sobre los materiales recibidos para la fabricación de diferentes componentes del sistema se realizarán ensayos, al menos uno en cada partida recibida para asegurar que se cumplen las especificaciones establecidas.

Los ensayos a realizar sobre los materiales son:

- Ensayo de tracción. Se determina el límite elástico y la resistencia a la tracción.
- Ensayo de dureza para la determinación de dureza Rockwell o Brinnell.

Los ensayos se llevarán a cabo según las siguientes normas UNE:

- UNE 7474-1:1992 Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo (A la temperatura ambiente)
- UNE-EN ISO 6506-1:2000 Materiales metálicos. Ensayo de dureza Brinnell. Parte 1: Método de ensayo. (ISO 6506-1:1999)
- UNE-EN ISO 6508-1:2000 Materiales metálicos. Ensayo de dureza Rockwell. Parte 1: Método de ensayo (Escala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:1999)
- UNE 53324:1979 EX, Plásticos. Película de policloruro de vinilo. Características y métodos de ensayo.

Todos los ensayos se realizarán por quintuplicado, siendo necesario para que el resultado del ensayo sea positivo, que las cinco pruebas realizadas cumplan los requisitos especificados para los materiales.

2.- TAREAS A REALIZAR SOBRE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

El mecanizado de las piezas se realizará en taller mecánico de precisión. Las operaciones que se incluyen son: torno, soldadura y corte.

1.- Torno

Las operaciones de torneado se realizarán a cabo para el rebaje de ciertas zonas. Los requisitos que debe reunir la herramienta, así como el desarrollo de los trabajos serán conformes a las siguientes normas:

- UNE 15318:1990 Tornos paralelos de uso general. Control de la precisión.
- UNE 15322:1992 Tornos verticales de una o dos columnas, de mesa fija o desplazable. Introducción general y control de la precisión.
- UNE 15323-1:1992 Tornos horizontales revolver y automáticos monohusillo. Parte 1: Tornos con diámetro de paso de barra menor o igual a 25 mm y diámetro de plato menor o igual a 160 mm. Control de la precisión.
- UNE 15323-2:1992 Tornos horizontales revolver y automáticos monohusillo. Parte 2: Tornos con diámetro de paso de barra mayor de 25 mm. Control de la precisión.

2.- Corte

El corte se realizará, esencialmente, en las zonas en las que se producen los encajes de las conexiones. Estas operaciones y los equipos que las realicen deben ajustarse a las normas siguientes:

- UNE-EN 12584:1999 Imperfecciones en los cortes realizados por oxicorte, corte por láser y corte por plasma. Terminología.
- UNE-EN 28206:1993 Ensayos de recepción para máquinas de oxicorte. Precisión de reproducción. Características de funcionamiento.

3.- Soldadura

Las soldaduras que se realizarán en el conjunto del equipo serán del tipo TIG, debiéndose ajustar en todos sus aspectos al siguiente conjunto de normas:

- UNE 14208:1992 Electrodo de wolframio para el soldeo por arco en atmósfera inerte, con electrodo refractario y para el soldeo y corte con plasma. Simbolización.
- UNE-EN 288-1:1993 Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 1: Reglas generales para el soldeo por arco.
- UNE-EN 288-2:1993 Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 2: Especificación del procedimiento para el soldeo por arco.
- UNE-EN 288-3:1993 Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 3: Cualificación del procedimiento para el soldeo por arco de aceros.
- UNE-EN 29692:1995 Soldeo por arco con electrodo revestido, soldeo por arco con protección gaseosa y soldeo por gas. Preparación de uniones de acero.

En los cálculos, se suponen que los factores de eficiencia para las soldaduras es 1, por lo que deberán inspeccionarse todas las soldaduras en su totalidad. Las inspecciones de las soldaduras se harán conforme a las siguientes normas, según la técnica de inspección que se utilice:

- UNE 14618:2000 Inspectores de soldadura. Cualificación y certificación.
- UNE-EN 12062:1997 Examen no destructivo de soldaduras. Reglas generales para los materiales metálicos.
- UNE 14612:1980 Práctica recomendada para el examen de las uniones soldadas mediante la utilización de líquidos penetrantes.

- UNE-EN 1289:1998 Examen no destructivo de soldaduras. Ensayo de soldaduras mediante líquidos penetrantes. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 12517:1998 Examen no destructivo de soldaduras. Examen radiográfico de uniones soldadas. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 1290:1998 Examen no destructivo de uniones soldadas. Examen de uniones soldadas mediante partículas magnéticas.
- UNE-EN 1291:1998 Examen no destructivo de uniones soldadas. Ensayo mediante partículas magnéticas de soldaduras. Niveles de aceptación.
- UNE-EN 1435:1998 Examen no destructivo de uniones soldadas. Examen radiográfico de uniones soldadas.
- UNE-EN 1714:1998 Examen no destructivo de soldaduras. Examen ultrasónico de uniones soldadas.
- UNE-EN 1712:1998 Examen no destructivo de soldaduras. Examen ultrasónico de uniones soldadas. Niveles de aceptación.

3.- REALIZACIÓN DE LAS TAREAS

1.- Piezas de catálogo

Las piezas que pueden adquirirse directamente de catálogo son las siguientes:

- Lentes del sistema de enfoque y de control de divergencia
- Soporte para espejos
- Espejos
- Soporte para lentes.
- Cabezal láser.
- Carril
- carrito
- Bridas de vacío NW 25
- Bridas de vacío de 8'2 mm O.D
- Registro de apertura y cierre al tanque sedimentador.

2.- Válvulas, bombas y elementos del sistema de control

Estos elementos incluyen:

- Válvula de compuerta
- Válvula de seguridad
- Sensor de presión.
- Sensor de temperatura.
- Sensor de nivel.
- Bomba.
- Uniones y conducciones.

Estos elementos deberán reunir las características técnicas y dimensionales indicadas en la Memoria Descriptiva (apartados 6.3, 6.6, 6.7, 6.8 y 6.9)

3.- Piezas a mecanizar

Las piezas a mecanizar se trabajarán a partir de los materiales de partida indicados en el presupuesto. Estos materiales deberán cumplir las condiciones establecidas en el apartado 1 de este Pliego de Condiciones Particulares, y el mecanizado se realizará de acuerdo con las normas expuestas en el apartado 2 de este Pliego de Condiciones Particulares.

4.- Plazos

Los plazos a cumplir por el contratista son los siguientes:

- Adquisición de materiales para mecanizado: Plazo máximo de 30 días naturales, desde el momento de inicio de las prestaciones o de la firma del contrato (a especificar por el Promotor en acuerdo con el Contratista).
- Adquisición de elementos de catálogo: Plazo máximo de 30 días naturales a partir del inicio de las prestaciones o firma del contrato (según acuerdo entre Promotor y Contratista).
- Mecanizado de piezas: 15 días naturales contados desde el momento en el que se han adquirido todos los materiales.
- Montaje de los componentes del equipo: 30 días naturales contabilizados desde el momento en el que se tienen mecanizadas todas las piezas y adquiridos todos los elementos de catálogo.

5.- Montaje del sistema

En este apartado se indica como debe realizarse el montaje del sistema una vez que se han concluido los trabajos de mecanizado (torno y corte) de piezas y se han adquirido todos los elementos de catálogo. Se describirán paso a paso las operaciones para un correcto montaje.

Se diferenciarán tres partes: montaje del sistema óptico, montaje de la línea de vacío y montaje de la línea criogénica,

✓ **Montaje del sistema óptico.**

- 1.-Colocación y soldadura del rail.
2. -Alineamiento y ajuste de las lentes y espejos en el sistema óptico.
3. -Ubicación del generador láser encima del pórtico que lo va a sostener.
4. - Colocación de los espejos y el cabezal láser.
- 5.- Comprobación del sistema.

✓ **Montaje de la línea de vacío.**

- 1.- Ajuste de la línea de vacío a la herramienta.
- 2.Unión por encolado del elastómero reforzado con la línea de PVC.
3. Ubicación del equipo básico de vacío en la caseta a 2 metros del nivel del suelo.
- 4.- Colocación de las conexiones de 1" OD de los sedimentadores, bombas de vacío y extremos de tubería de PVC.
- 5.- Colocación y soldadura e las bridas de vacío NW25 correspondiente a los sedimentadores y bombas de vacío de las conexiones de 1" OD.
6. Ensamblaje de las bridas de vacío NW25 correspondientes de los sedimentadores y de las bombas de vacío con las bridas de 1" OD de las válvulas de compuerta, con previa colocación de la junta de vitón entre bridas.
- 7.- Unión por embridado de los tramos de tuberías de PVC al resto de equipos de vacío.
- 8.- Montaje del sistema del filtro del carbón activo.
- 9- Montaje de la campana de burbujeo.

✓ Montaje de la línea criogénica.

- 1.- Ubicación del tanque criogénico.
- 2.- Ubicación del Dewar.
- 3.- Unión de entrada de la línea de gases con las conexiones en el Dewar.
- 4.- Colocación de conexiones de 8'2mm de O. D en la tubería teflón.
- 5.- Colocación y soldadura de las bridas de vacío NW 8'2mm de O. D correspondientes a la tubería de teflón.
- 6.- Ensamblaje de las bridas de vacío de la tubería de teflón con las bridas de 8'2 mm O. D correspondientes a la válvula de compuerta y de seguridad.
- 7.- Ajuste de la línea criogénica a la herramienta.

PRESUPUESTO

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

“**Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica**”

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PRESUPUESTO

| | |
|---|----------|
| PRESUPUESTO..... | 2 |
| 1.- Introducción..... | 2 |
| 2.- Costes de equipos..... | 3 |
| 2.1.- Sistema óptico..... | 4 |
| 2.2.- Sistema criogénico..... | 5 |
| 2.3.-Sistema de vacío..... | 5 |
| 2.4.-Cálculo aproximativo del ciclón..... | 6 |
| 3.- Costes de las conducciones..... | 7 |
| 4.- Instrumentación y control..... | 8 |
| 5.- Costes directos de la planta..... | 9 |

1.- INTRODUCCIÓN:

El presupuesto que contiene este documento es un estudio preliminar de costes (en el que se admite una desviación respecto al coste real de un 20%) debido a que el proyectista no ha conseguido precios en firme de los equipos necesarios.

Por esta razón se emplean técnicas de estimación de costes para adecuar los precios obtenidos a los equipos necesarios del sistema.

Los precios se actualizan haciendo uso de los índices de costes de equipos de Marshall & Swift publicadas mensualmente en la Chemical Engineering. Se utiliza la siguiente expresión:

$$C = C_0 \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

Donde:

C: Coste actual.

C₀: Coste base.

I: Índice actual.

I₀: Índice base.

Los precios de equipos análogos de diferentes tamaños o capacidad se escalan mediante la siguiente expresión:

$$C_B = C_A \cdot \left(\frac{S_B}{S_A} \right)^N$$

Donde:

C_B: Coste aproximado del nuevo equipo B

C_A: Coste conocido del equipo A.

$\left(\frac{S_B}{S_A} \right)$: Factor de tamaño.

N: El valor del exponente depende del equipo que se desee escalar.

2. COSTES DE EQUIPOS

El siguiente cuadro de precios es una estimación de la inversión a realizar en los equipos.

En el cuadro se muestra una breve descripción de cada uno de los equipos de la planta y se especifican el precio unitario y el total de cada uno de ellos.

Se estimarán los costes de los equipos pertenecientes al sistema criogénico, al sistema de vacío, a las redes de conducción y a los materiales necesarios en el control e instrumentación. Finalmente se hará una evaluación global.

SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PRESUPUESTO

2.1.- Sistema óptico

| Cantidad | Partida | €/ud | Coste € |
|---------------|--|--------|----------------|
| 1 | Generador láser. Modelo PRC STS 2500 | 40 000 | 40 000 |
| 1 | Cabezal láser de corte. Modelo Haas ROLW- 2000 | 2 375 | 2 375 |
| 1 | Lente Plano- convexa, Diámetro 1 pulg, Focal= 126.7mm. Modelo Oriel 43709 | 334 | 334 |
| 1 | Lente Plano- convexa, Diámetro 1.5 pulg, Focal= 126.7mm .Modelo Oriel 43715 | 334 | 334 |
| 1 | Lente Menisco positivo, Diámetro 1pulg, Focal= 50.9 mm. Modelo Oriel 43735 | 304 | 304 |
| 1 | Lente Menisco positivo, Diámetro 1pulg, Focal= 50.9 mm. Modelo Oriel 43740 | 304 | 304 |
| 1 | Soporte para lentes de 1 pulg de diámetro | 22 | 22 |
| 1 | Soporte para lentes de 1.5 pulg de diámetro | 24 | 24 |
| 4 | Espejos planos revestidos de oro, Diámetro 50mm, modelo Oriel 45200 | 120 | 480 |
| 1 | Soporte para espejo | 37 | 37 |
| 1 | Rail para el sistema óptico | 4320 | 4320 |
| 1 | Carrito para el espejo | 63 | 63 |
| TOTAL: | | | 48 597€ |

**SISTEMA DE RECANTEADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PRESUPUESTO**

2.1- Sistema criogénico.

| Cantidad | Partida | €/ud | Coste € |
|---------------|--|---------------|---------|
| 1 | Dewar de 1000l de alta presión de trabajo, 25 bar. Modelo Air Liquide | 5 589€ | 5 589€ |
| 1 | Botella de N ₂ comprimido B50 | 48€ | 48€ |
| 1 | Grifo manorreductor integrado botella N ₂ , modelo "Altop" | 200€ | 200€ |
| 2 | Válvula de compuerta electoneumática. Modelo GP-G15 con bridas NW25 | 15€ | 30€ |
| 1 | Válvula de seguridad de la serie SURAL DN 15 | 15€ | 15€ |
| TOTAL: | | 5 882€ | |

2.2 Sistema de vacío.

| Cantidad | Partida | €/ud | Coste € |
|---------------|--|-------------------|---------------------|
| 2 | Bomba de dos etapas rotativas. Modelo E2M28. | 698'56€ | 1397'12€ |
| 2 | *Sedimentador de 0'4 m de diámetro y fondo inferior de sección cónica de 0'25m de altura. | 125'017€ | 250'034€ |
| 1 | Filtro de carbón activo. | | * P. A ₁ |
| 1 | Campana de burbujeo | | * P. A ₂ |
| 8 | Válvula de compuerta electoneumática. Modelo GP-G15 con bridas NW25 | 15€ | 120€ |
| TOTAL: | | 6 767'15 € | |

* P. A₁ y P. A₂, son partidas alzadas, que no deberán de superar en cuanto a coste, entre las dos el valor máximo de 5000 €

Cálculo aproximativo del ciclón:

Sabiendo que el precio de la chapa lisa de acero inoxidable/ 11'75 Kg/m² de espesor 1/5 pulg es de 51,55€/m², vamos a aproximar el valor del ciclón multiplicando este valor por el área del mismo.

$$Area = 2\pi rL = \pi \cdot 138,4 \cdot 553,6 = 2.021m^2$$

Por lo tanto el coste del sedimentador es de:

$$2'021m^2 \cdot \frac{51'55€}{1m^2} = 104'18€$$

Al valor obtenido le vamos a añadir un 20% por conformado del material, mecanizado, soldadura etc

Luego el precio del sedimentador es de:

$$104'18 + 0'2 \cdot 104'18 = 125'017€$$

SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PRESUPUESTO

3- COSTES DE LAS CONDUCCIONES.

| Cantidad | Partida | €/ud | Coste € |
|-----------------------|--|---------------------|------------------|
| 25m | Tubería de teflón de $D_i=8\text{mm}$ $D_e=8'2\text{ mm.}$ | 23€/m | 575 € |
| 25x1'3 m ² | Aislante térmico poliuretano, L= 25m $e=2'5\text{ cm, } D_i=8'2\text{mm}$ | 7'5€/m ² | 243'75 € |
| 6'10m | Tubería de PVC, $D_i=1''$ | 0'6€/m | 3'66 € |
| 50m | Tubería de elastómero reforzado, $D_i=1''$ | 30 €/m | 1500 € |
| 1m | Tubería de acero inoxidable, $D_i= 1''$ | 118'11€/m | 118'11€ |
| TOTAL: | | | 2 440'52€ |

SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PRESUPUESTO

4- INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL.

| Cantidad | Partida | €/ud | Coste € |
|---------------|--|-------------|----------------|
| 1 | Sonda de temperatura PT100 tipo A | 12 €/ud | 12€ |
| 2 | Sensor de presión diferencial | 150 €/ud | 150€ |
| 1 | Sistema de nivel de columna hidrostática (HTG) | 181€/ud | 181€ |
| 1 | Controladores PID (Tarjeta de adquisición de satsos con 24 canales) | 507'97 €/ud | 507'97€ |
| TOTAL: | | | 850'97€ |

SISTEMA DE RECANTADO PARA RESINAS EPÓXICAS REFORZADAS POR FIBRA DE CARBONO (CFRP)
DE USO EN EL SECTOR AERONÁUTICO
PRESUPUESTO

5. COSTES DIRECTOS DE LA PLANTA.

| Concepto | Capital estimado |
|----------------------------|------------------|
| Sistema óptico | 4 8597 |
| Sistema criogénico | 5 882€ |
| Sistema de vacío | 6 767.15€ |
| Costes de las conducciones | 2 440'52€ |
| Instrumentación y control | 850'97€ |
| TOTAL:64 537'64€ | |

A éstos costes habría que añadirles los costes indirectos debido a la ingeniería de supervisión, mantenimiento, contingencias, obras civiles etc, que podrían incrementar los costes totales en un 25 % aproximadamente.

PLANOS

“Sistema de recantado para resinas epóxicas
reforzadas por fibra de carbono (CFRP) de uso en el
sector aeronáutico”

Departamento:

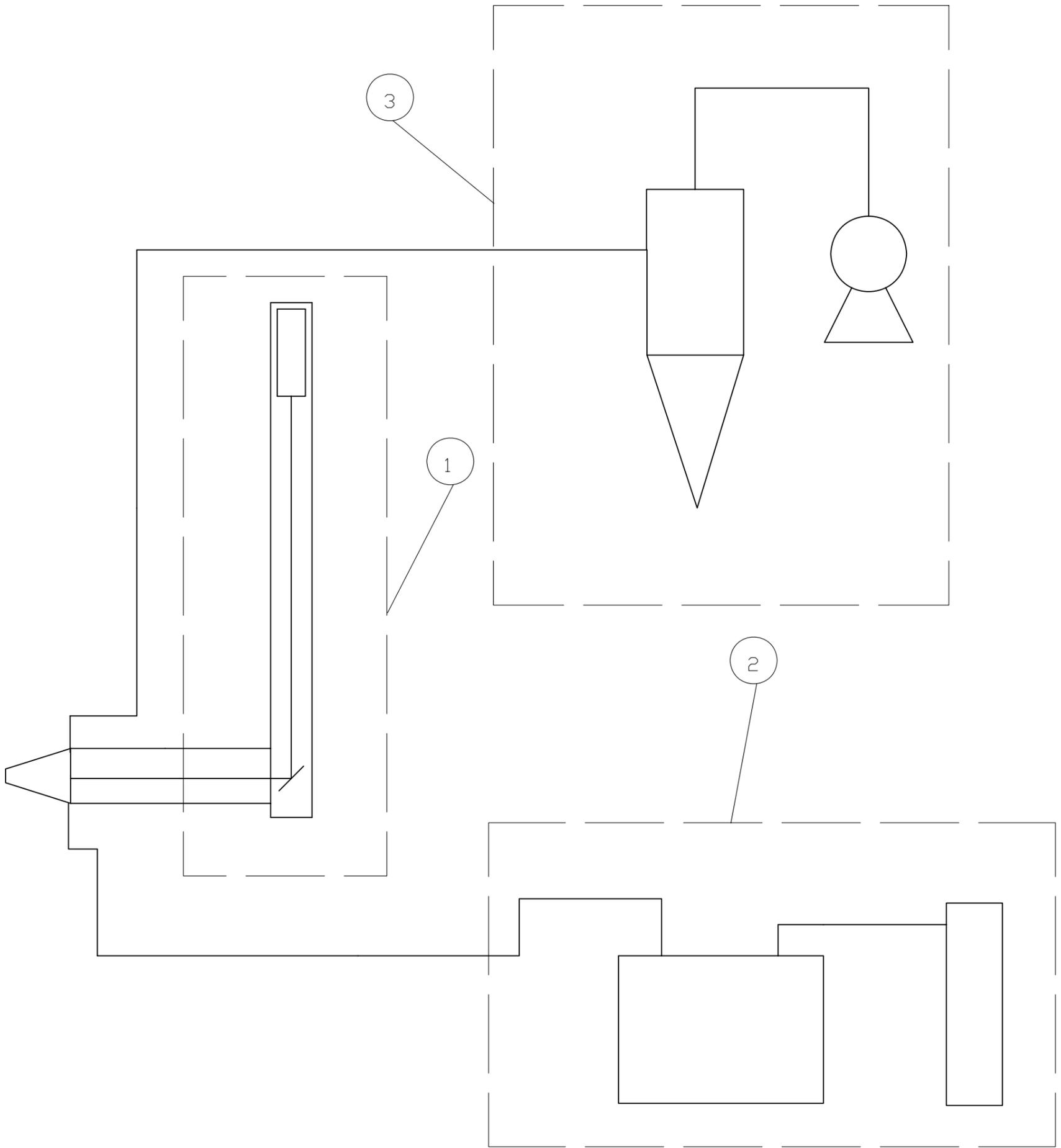
**“Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica y Química
Inorgánica”**

Tutores del proyecto:

Dr. Daniel Araujo Gay
Ing. Antonio J. García Fuentes.

Cristina Alcantarilla Parra

Junio 2004

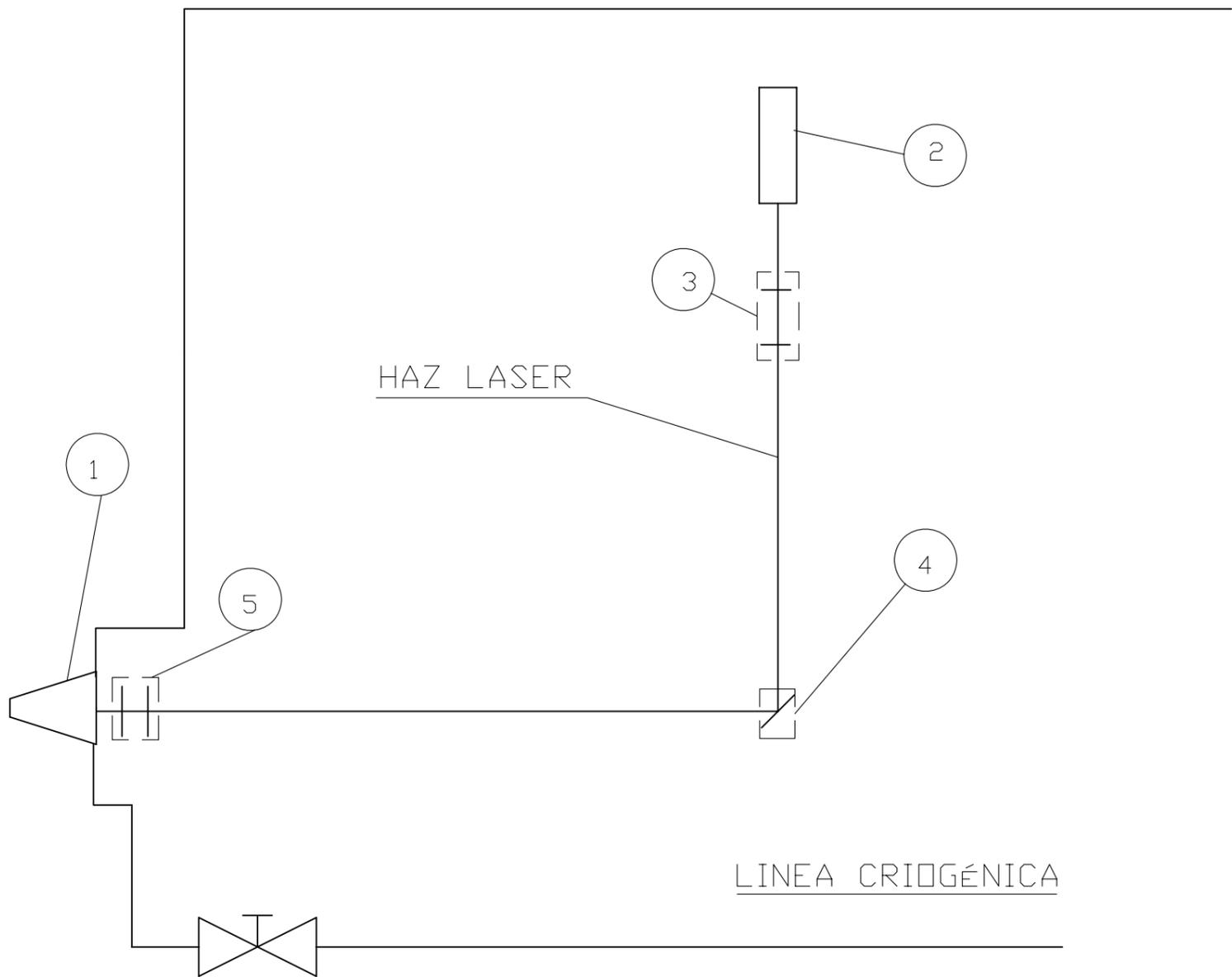


| | | |
|-----------|-------|--------------------------|
| | 1 | SISTEMA ÓPTICO |
| | 2 | SISTEMA DE REFRIGERACIÓN |
| | 3 | SISTEMA DE ABSORCIÓN |
| Nº piezas | pieza | Designación |

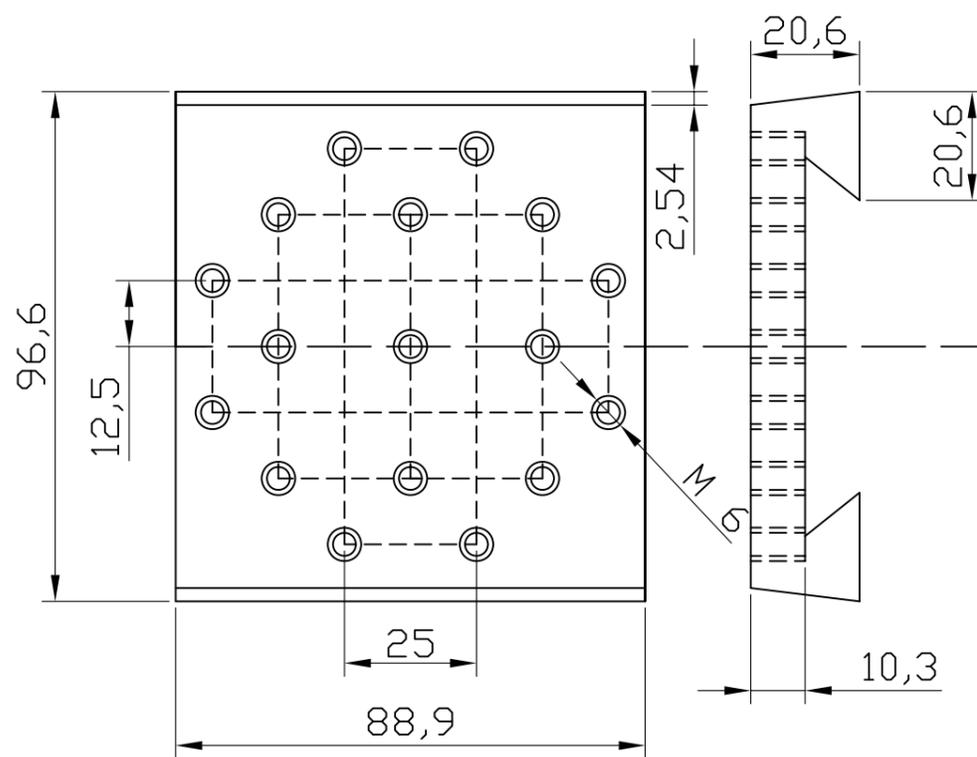
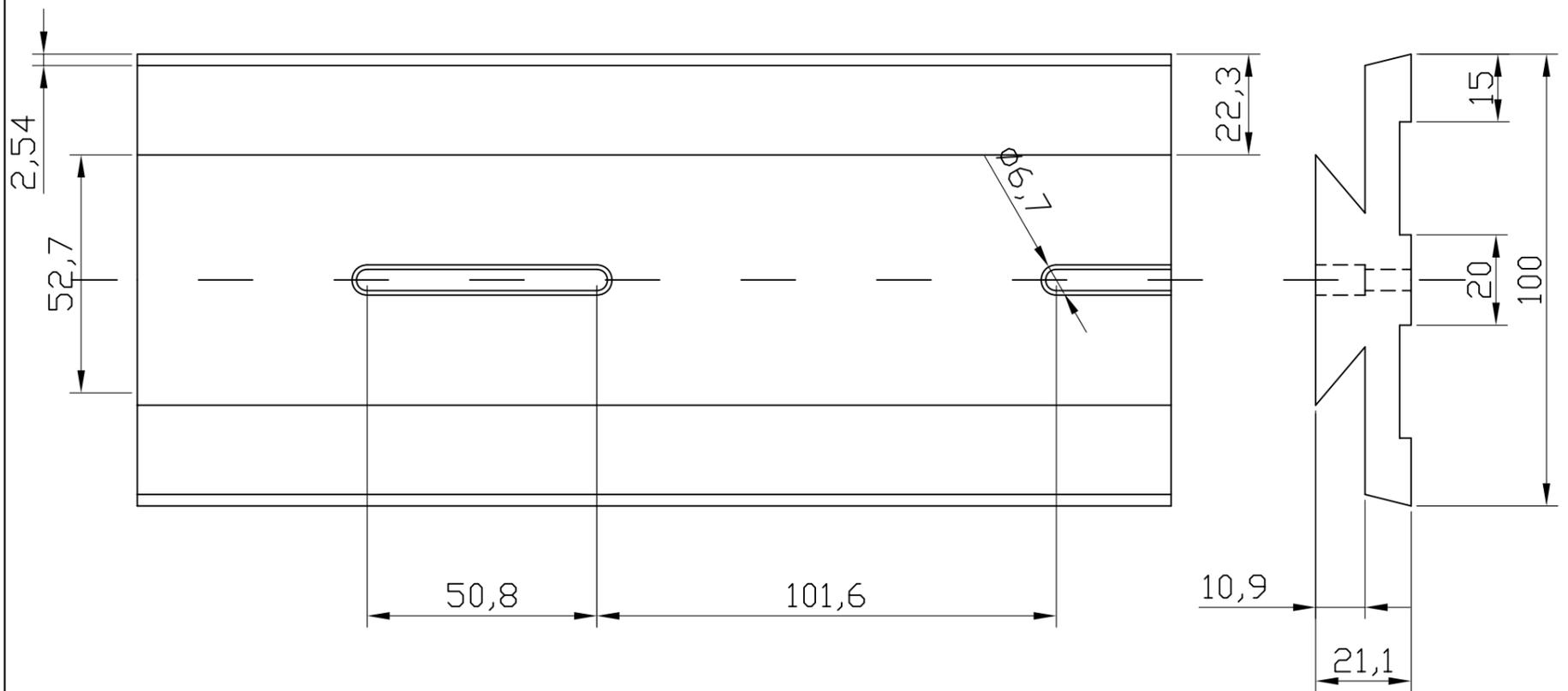
| | | | | |
|----------------|-------|-----------------------------|-------|--|
| PLANO Nº 0 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recateado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | |

| | | |
|-------------------|---------------------------|----------------------|
| ESCALA Sin escala | DIAGRAMA GENERAL DE FLUJO | FACULTAD DE CIENCIAS |
|-------------------|---------------------------|----------------------|

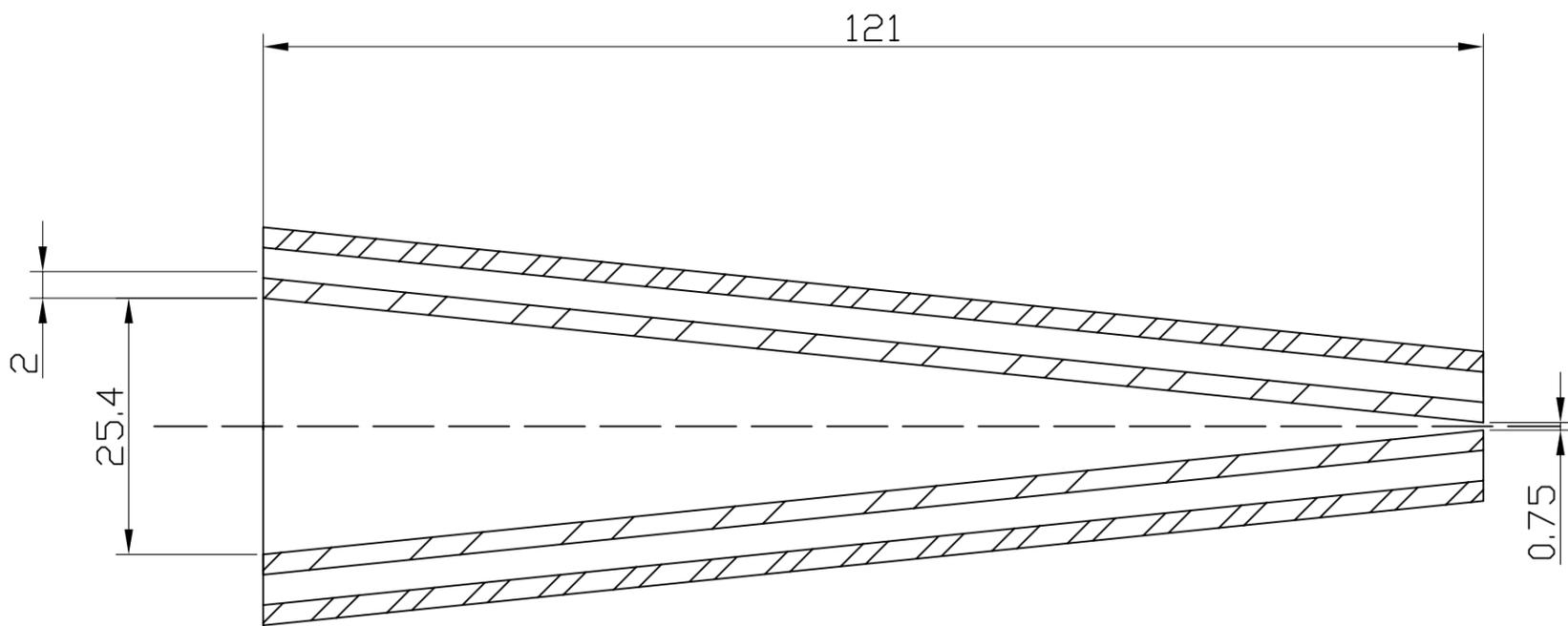
LINEA DE ASPIRACIÓN



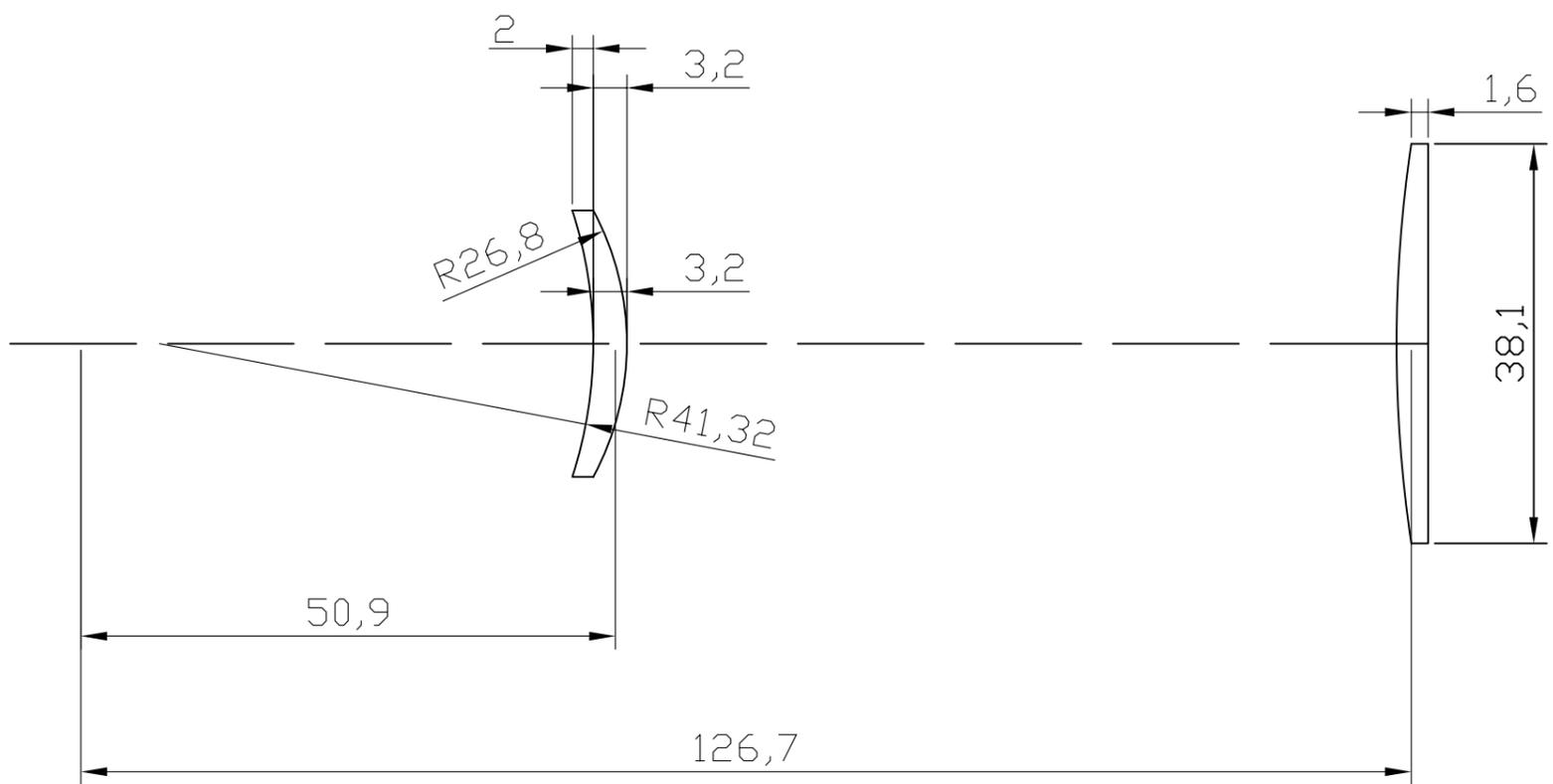
| | | | | | |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------|---|--|
| | 1 | BOQUILLA | | 4 | BOQUILLA |
| | 2 | GENERADOR LÁSER | | 5 | SISTEMA DE ENFOQUE |
| | 3 | SISTEMA DE CONTROL DE DIVERGENCIA | |  | VÁLVULA DE SEGURIDAD |
| Nº piezas | pieza | Designación | Nº piezas | pieza | Designación |
| PLANO Nº 1 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | | |
| ESCALA Sin escala | DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA ÓPTICO | | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



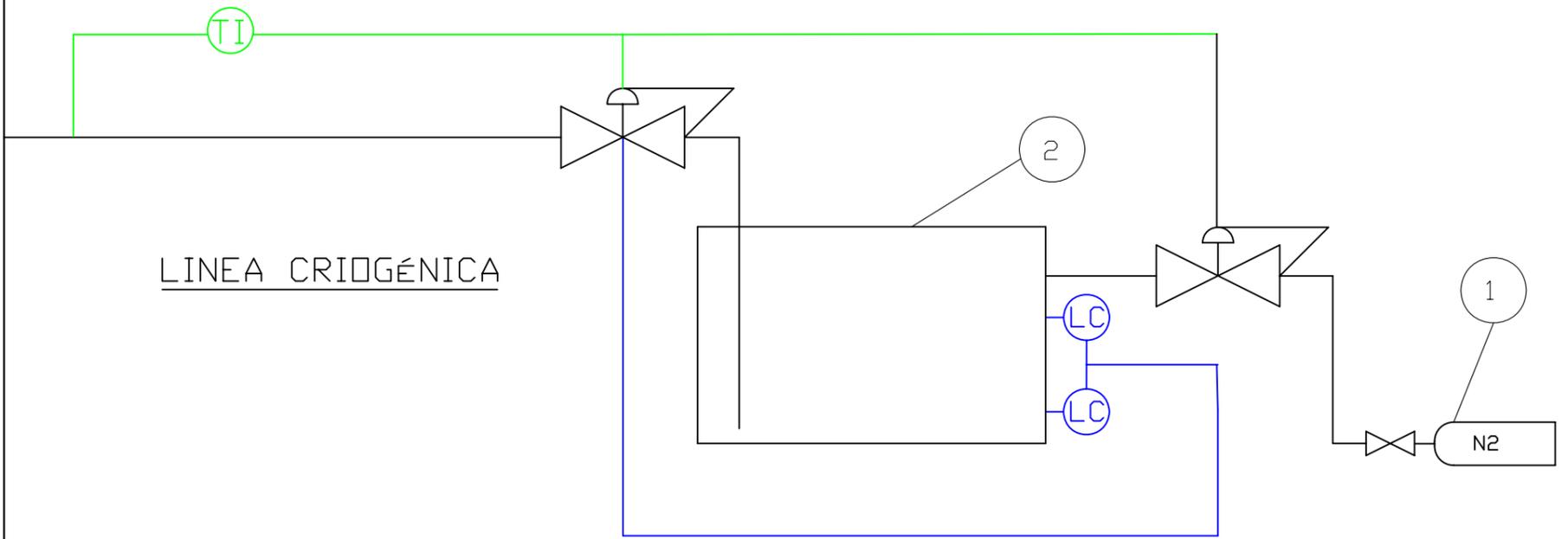
| | | | | |
|-------------------|--|-----------------------------|----------------------|--|
| PLANO Nº 1.1 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 20/06/04 | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA | COMPONENTES SISTEMA ÓPTICO CARRIL Y CARRITO | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



| | | | | |
|-------------------|--|-----------------------------|----------------------|--|
| PLANO Nº 1.2 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 200604 | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA | COMPONENTES SISTEMA ÓPTICO BOQUILLA | | FACULTAD DE CIENCIAS | |

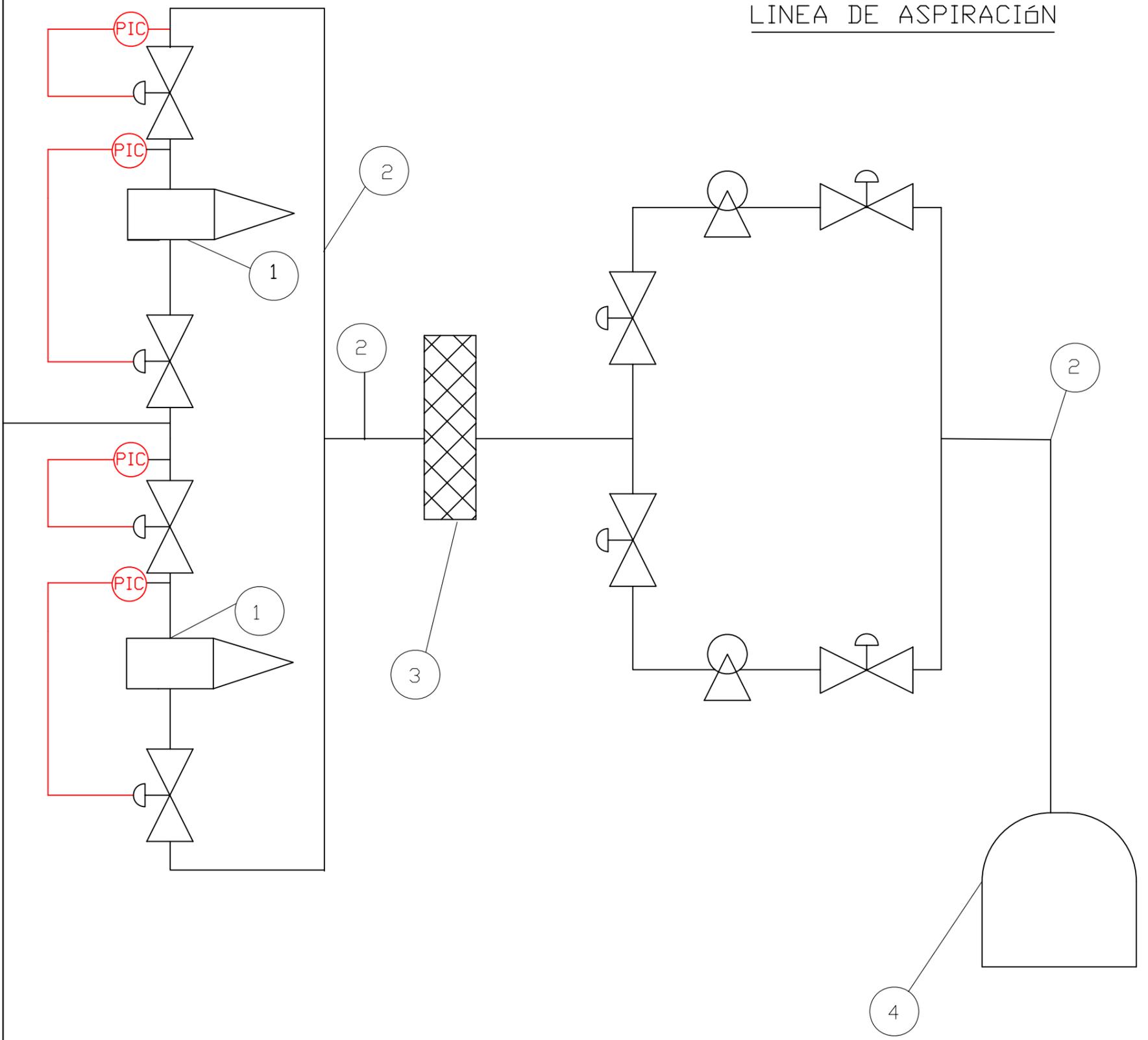


| | | | | | |
|-------------------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|
| 2 | 3 | SISTEMA DE CONTROL DE DIVERGENCIA | | | |
| Nº piezas | pieza | Designación | | | |
| PLANO Nº 1.3 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 20/0604 | Cristina Alcantarilla Parra | | | |
| ESCALA Sin escala | COMPONENTES SISTEMA ÓPTICO SISTEMA DE CONTROL DE DIVERGENCIA | | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



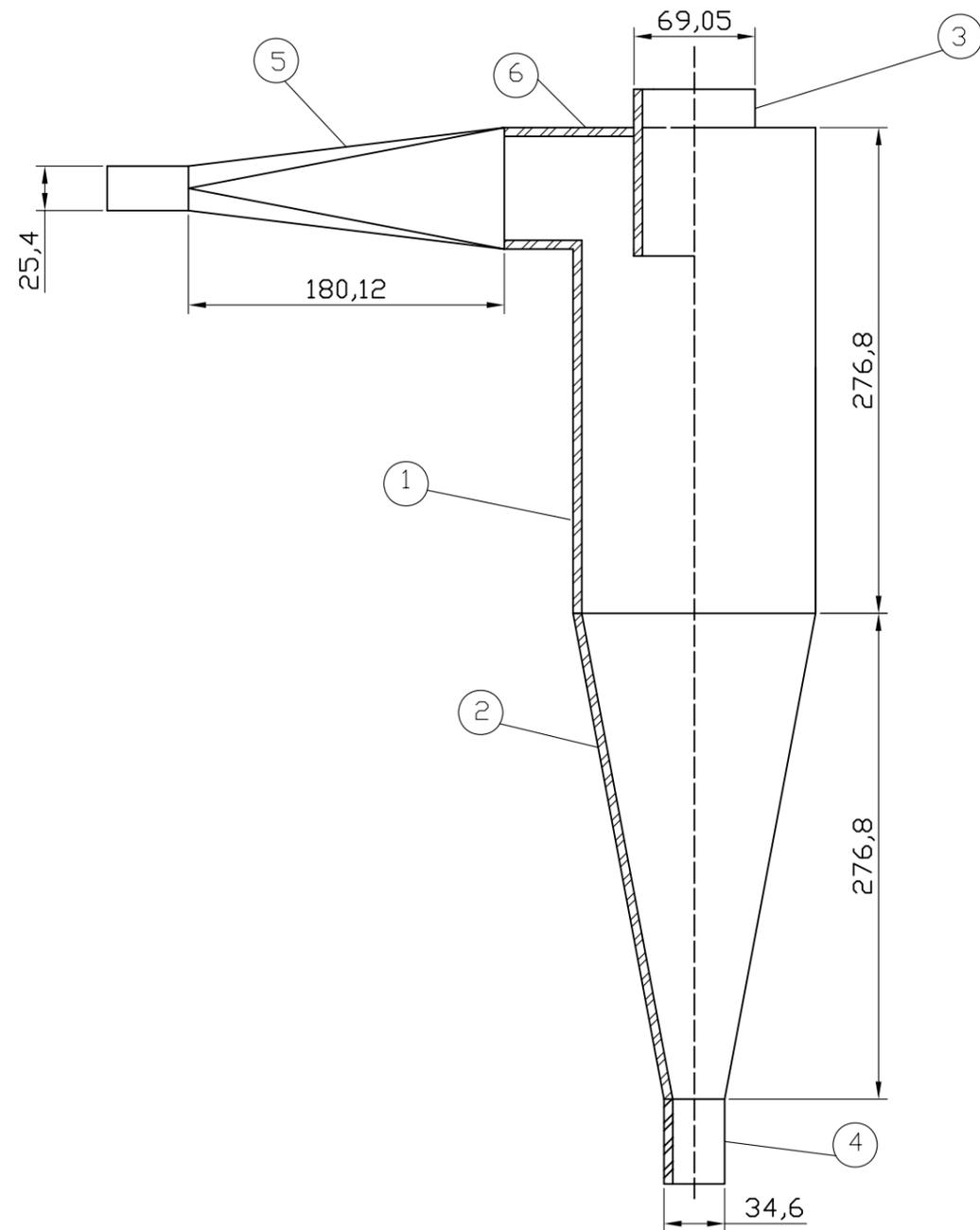
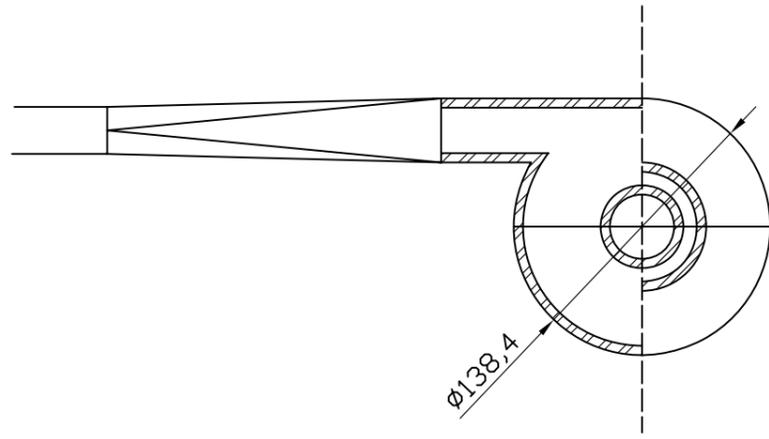
| | | | | | |
|-------------------|---|-------------------------------|-----------|----------------------|--|
| 1 | 1 | BOTELLA N2 | | | |
| 1 | 2 | DEWAR | 1 | TI | SENSOR DE TEMPERATURA |
| 2 |  | ELECTRO-VÁLVULAS DE COMPUERTA | 2 | LC | SENSOR NIVEL DE LÍQUIDO |
| Nº piezas | pieza | Designación | Nº piezas | pieza | Designación |
| PLANO Nº 2 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | | |
| ESCALA Sin escala | DIAGRAMA DE FLUJO SISTEMA CRIOGÉNICO | | | FACULTAD DE CIENCIAS | |

LINEA DE ASPIRACIÓN

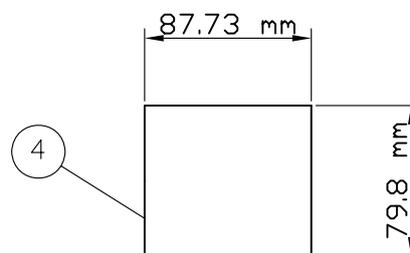
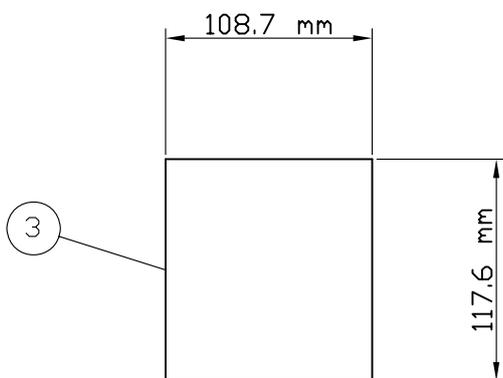
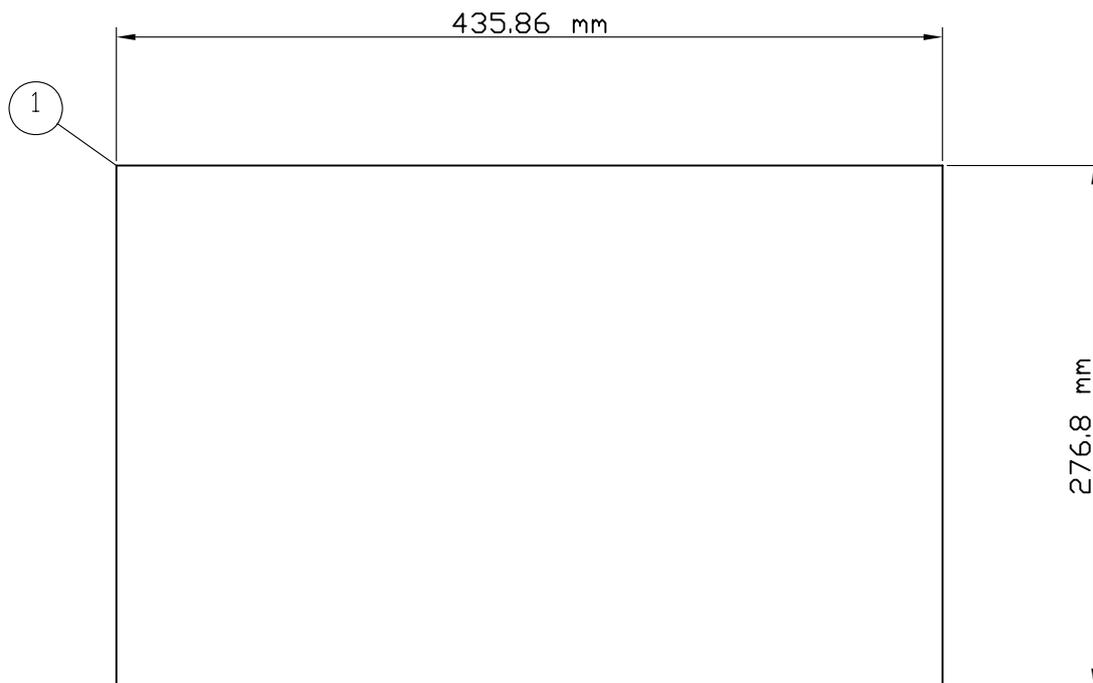


| | | | | | |
|-----------|-------|-------------------------|-----------|-------|-------------------------------|
| | | | 3 | PIC | SENSOR DE PRESIÓN |
| 2 | 1 | CICLÓN | 1 | 4 | CAMPANA DE BURBUJEO |
| 1 | 2 | TUBERIA DE ELASTÓMERO | 2 | | BOMBA DE VACÍO |
| 1 | 3 | FILTRO DE CARBÓN ACTIVO | 8 | | ELECTRO-VÁLVULAS DE COMPUERTA |
| Nº piezas | pieza | Designación | Nº piezas | pieza | Designación |

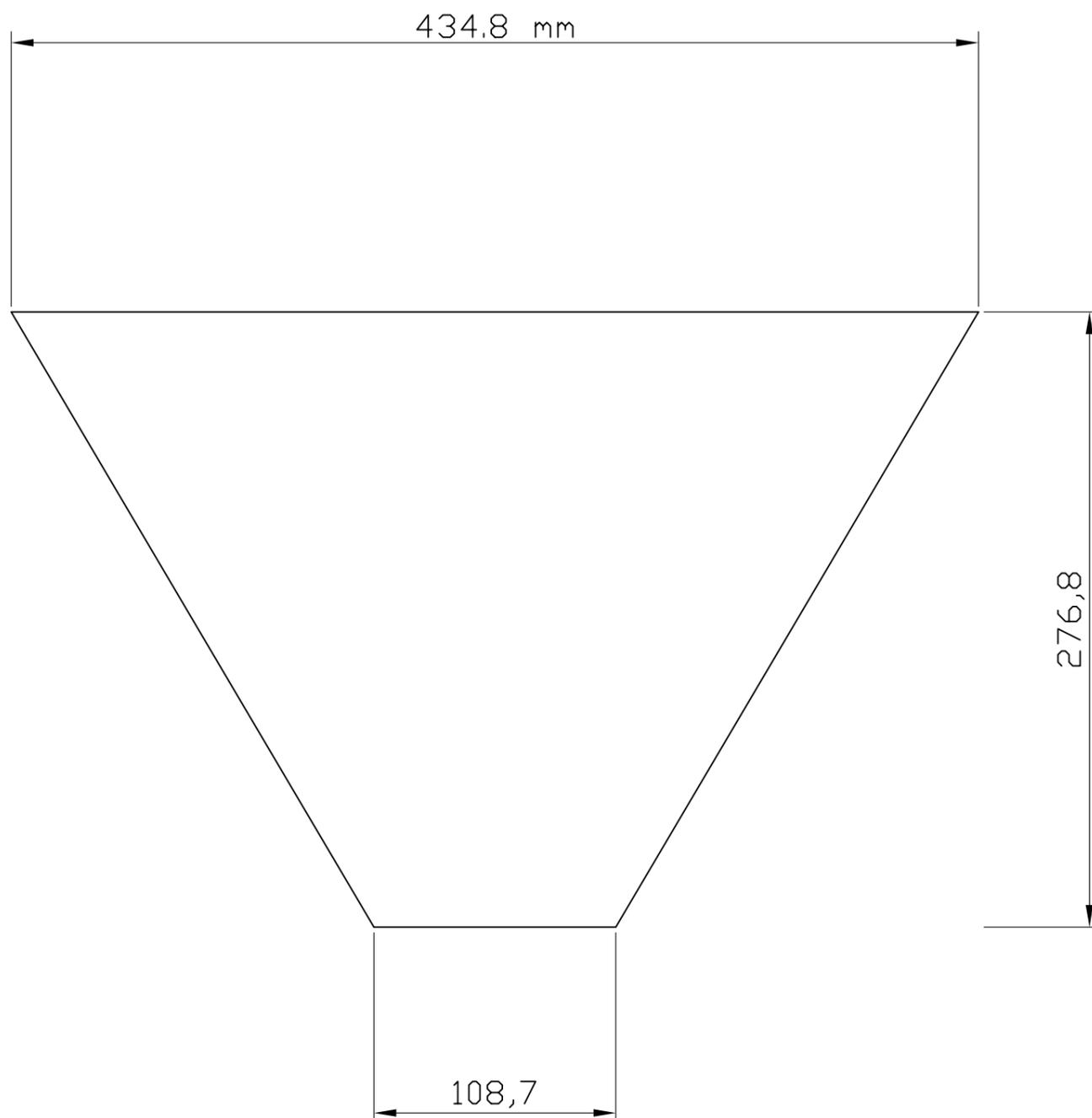
| | | | | | |
|-------------------|--|-----------------------------|--|----------------------|--|
| PLANO Nº 3 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | | |
| ESCALA Sin escala | DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE ABSORCIÓN | | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



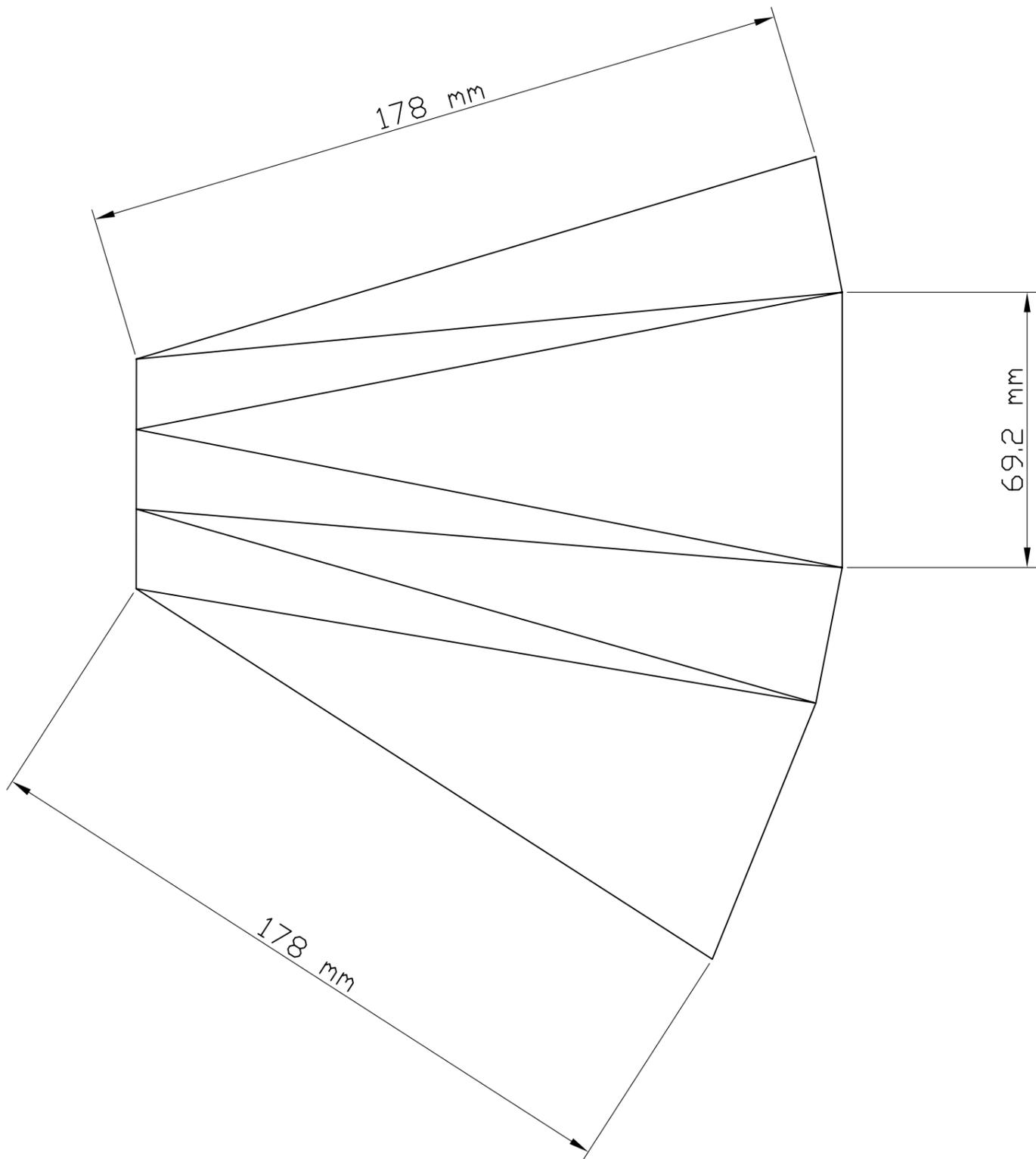
| | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| NÚMERO | | | | |
| 1 | Cuerpo cilíndrico del ciclón | | | |
| 2 | Cuerpo cónico del ciclón. | | | |
| 3 | Conducto de salida de los gases. | | | |
| 4 | Conducto de salida de los sólidos | | | |
| 5 | Sección convergente | | | |
| 6 | Conducto de entrada de los gases | | | |
| PLANO Nº3.1 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recateado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA Sin escala | PLANO GENERAL CICLÓN | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



| | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| NÚMERO | | | | |
| 1 | Cuerpo cilíndrico del ciclón | | | |
| 3 | Conducto de salida de los gases. | | | |
| 4 | Conducto de salida de los sólidos | | | |
| PLANO Nº3.1.1 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA 1:4 | COMPONENTES CICLÓN | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



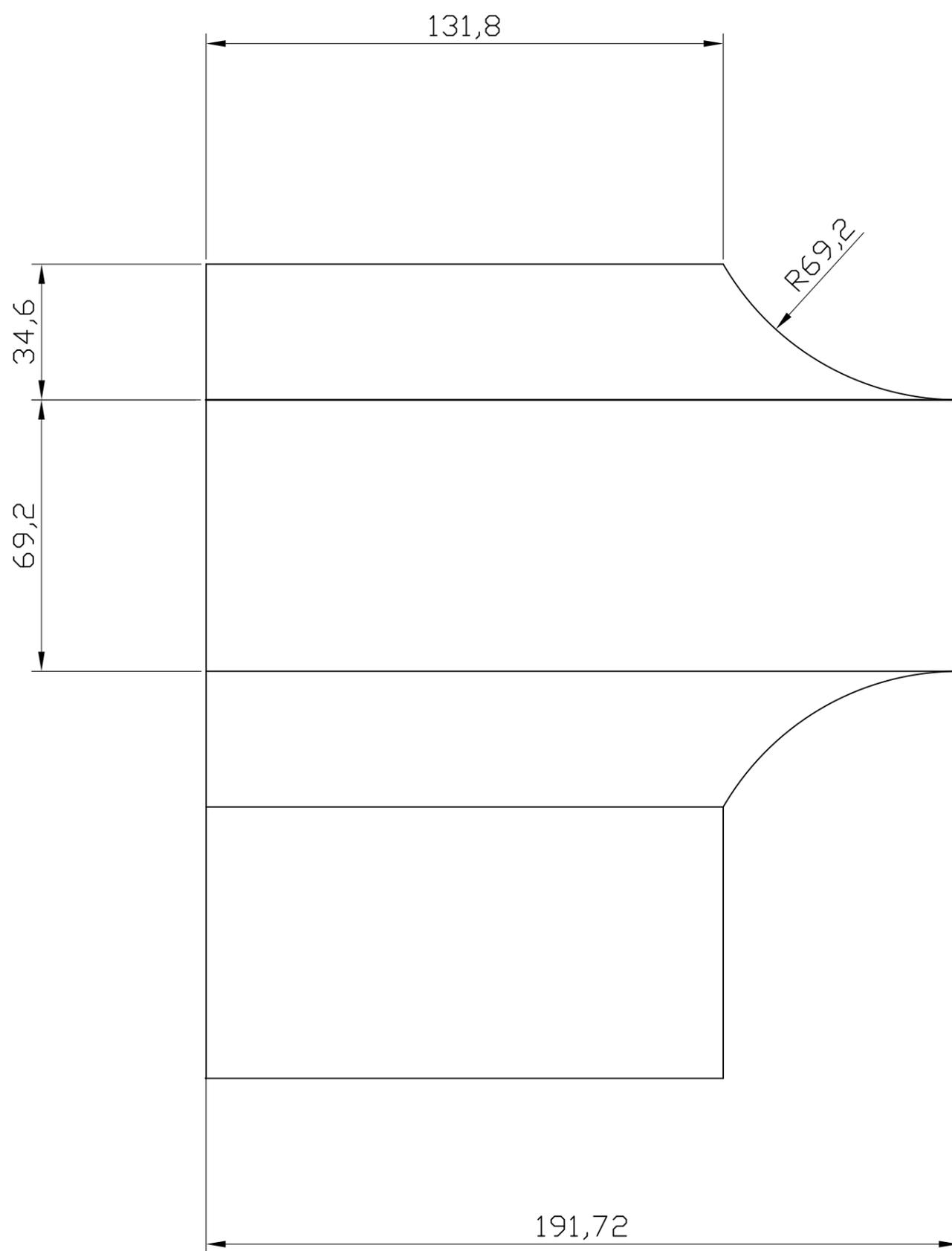
| | | | | | |
|-------------------|--------------------|-----------------------------|--|----------------------|--|
| 1 | 2 | SECCIÓN CÓNICA | | | |
| Nº piezas | pieza | Designación | | | |
| PLANO Nº3.1.2 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 20/06/04 | Cristina Alcantarilla Parra | | | |
| ESCALA | COMPONENTES CICLÓN | | | FACULTAD DE CIENCIAS | |



| | | |
|--------------|-------|---------------------|
| 1 | 5 | SECCIÓN CONVERGENTE |
| Nº piezas | pieza | Designación |

| | | | | |
|-------------------|-------|-----------------------------|-------|--|
| PLANO Nº 3.1.3 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | |

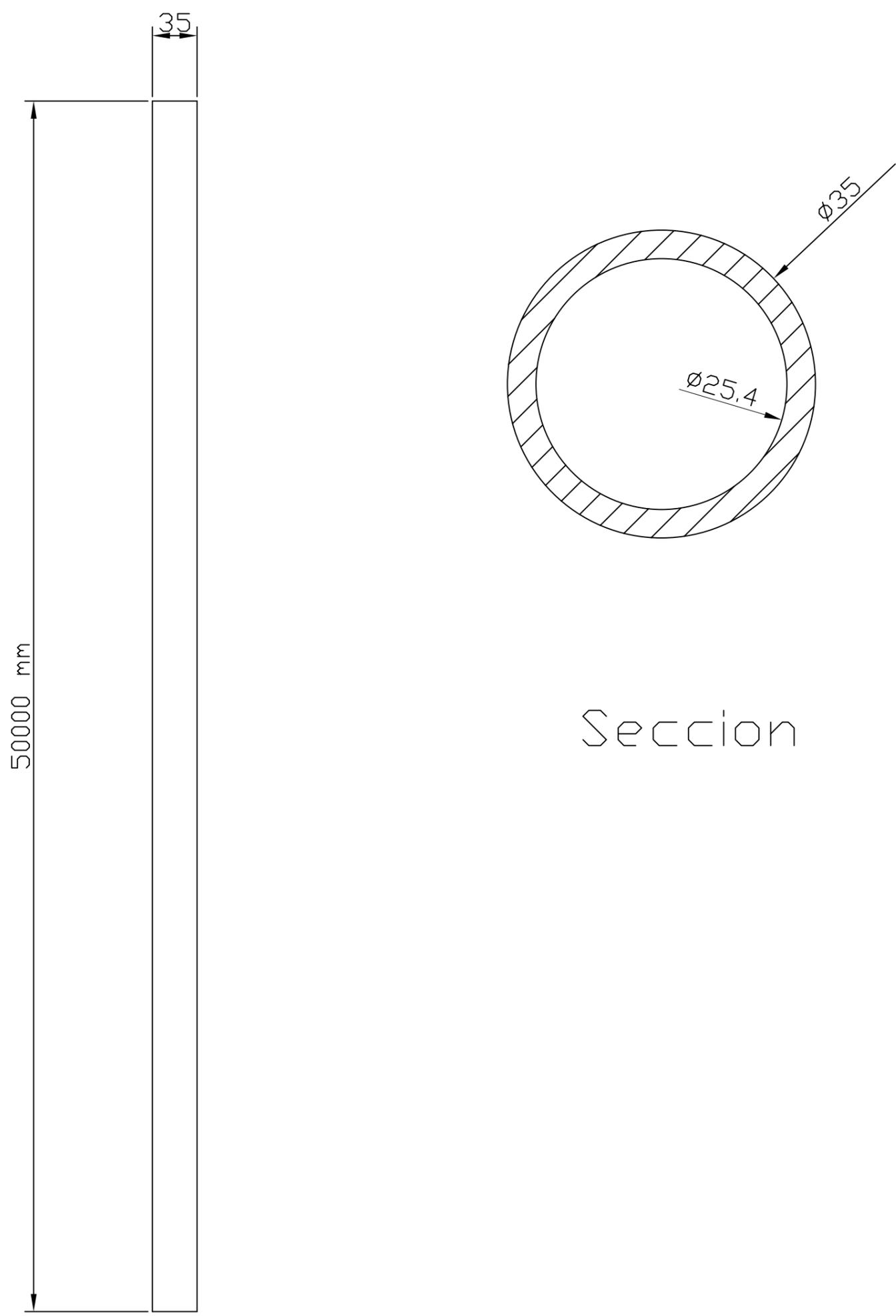
| | | |
|--------|--------------------|----------------------|
| ESCALA | COMPONENTES CICLÓN | FACULTAD DE CIENCIAS |
|--------|--------------------|----------------------|



| | | |
|--------------|-------|------------------------|
| 1 | 6 | CONDUCTO ENTRADA GASES |
| Nº piezas | pieza | Designación |

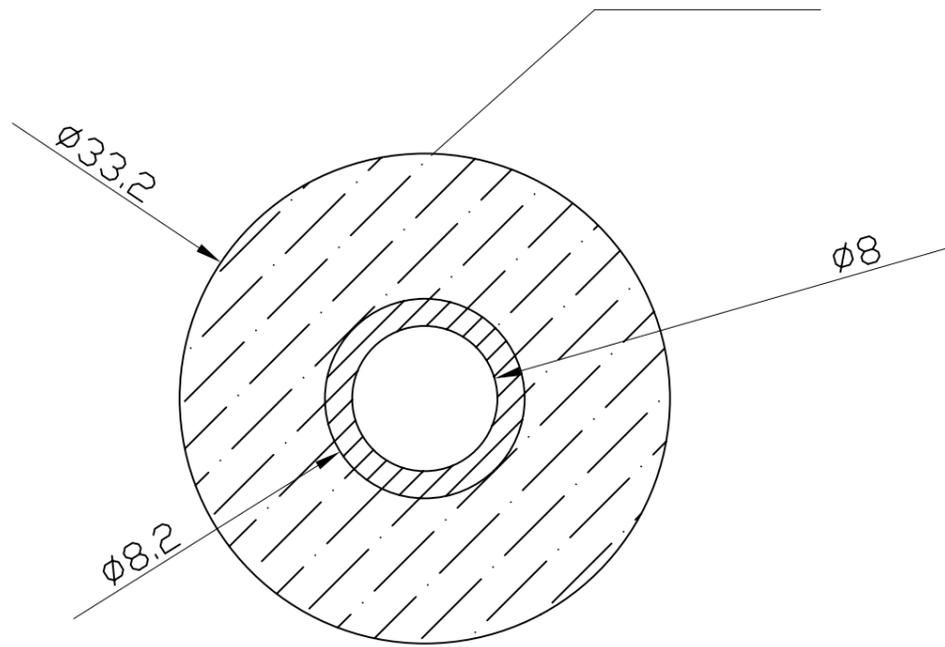
| | | | | |
|-------------------|----------|-----------------------------|-------|--|
| PLANO | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 20/06/04 | Cristina Alcantarilla Parra | | |

| | | |
|-------------------------|--------------------|----------------------|
| ESCALA Sin escala | COMPONENTES CICLÓN | FACULTAD DE CIENCIAS |
|-------------------------|--------------------|----------------------|

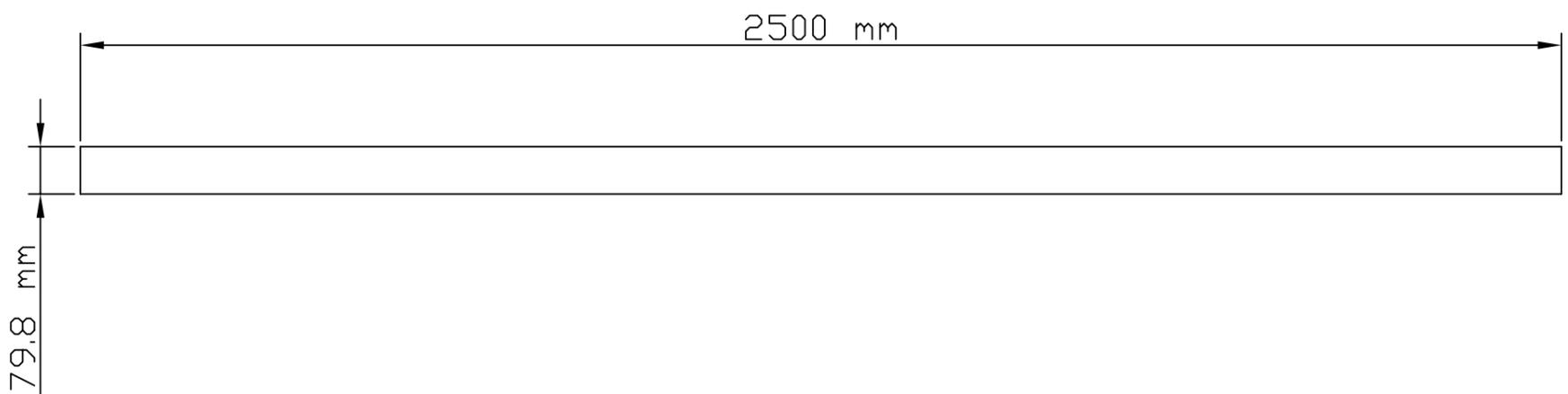


| | | | | |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| PLANO Nº 3.2 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 20/06/04 | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA Sin escala | TUBERIA DEL SISTEMA DE VACÍO | | FACULTAD DE CIENCIAS | |

Poliuretano

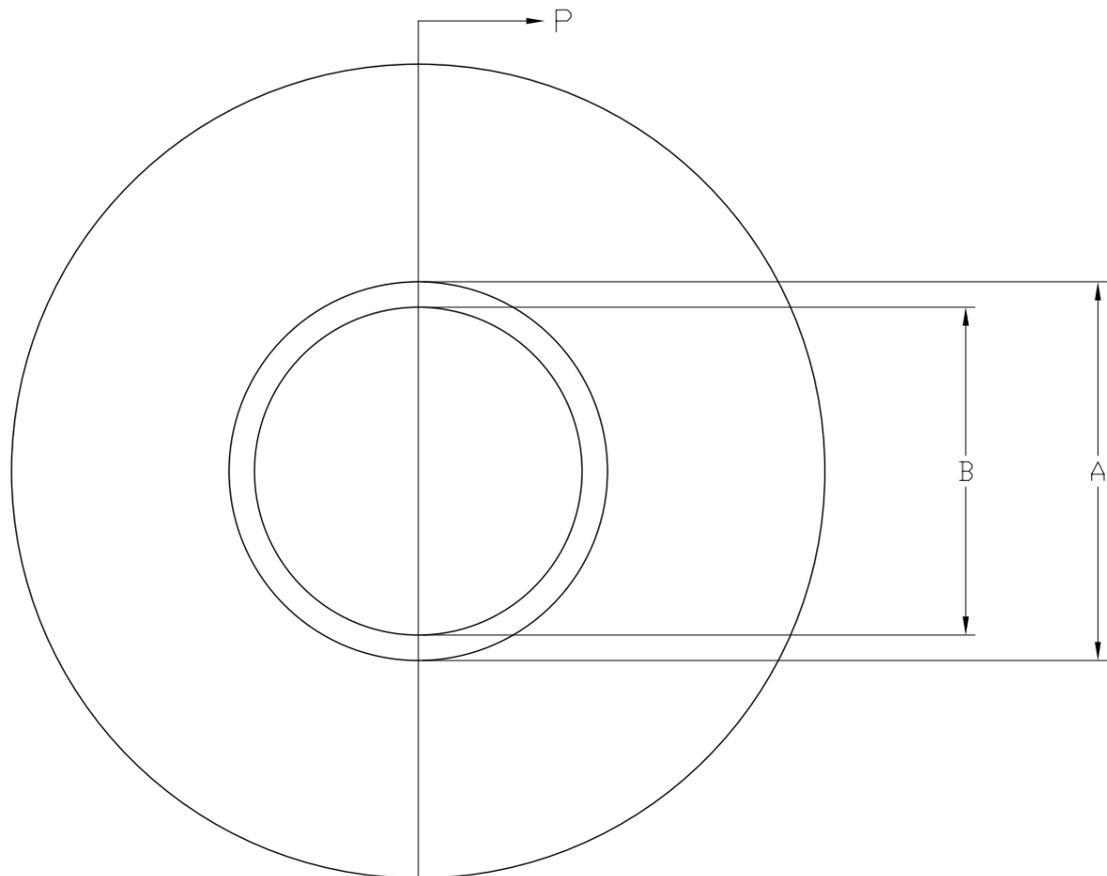


Seccion

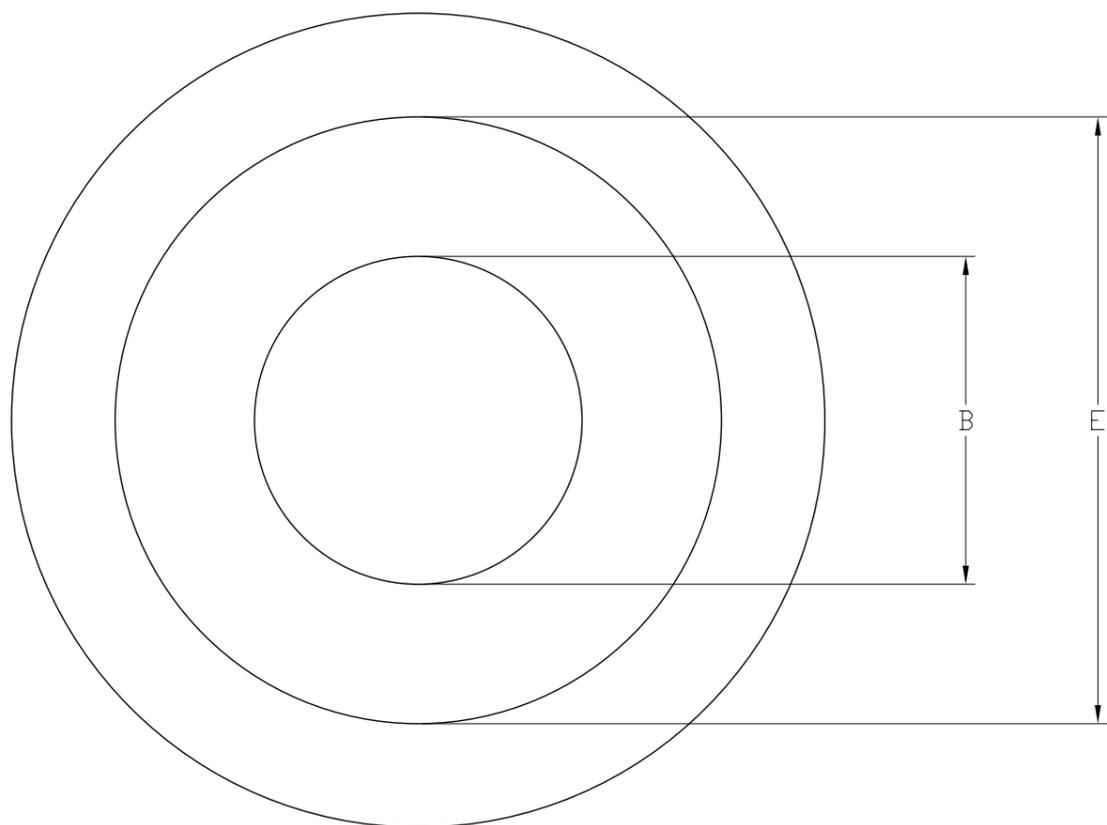


| | | | | |
|-------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| PLANO Nº2.1 | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recantado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
| DIMENSIONES mm | 2006/04 | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA Sin escala | TUBERÍA DE TEFLÓN. | | FACULTAD DE CIENCIAS | |

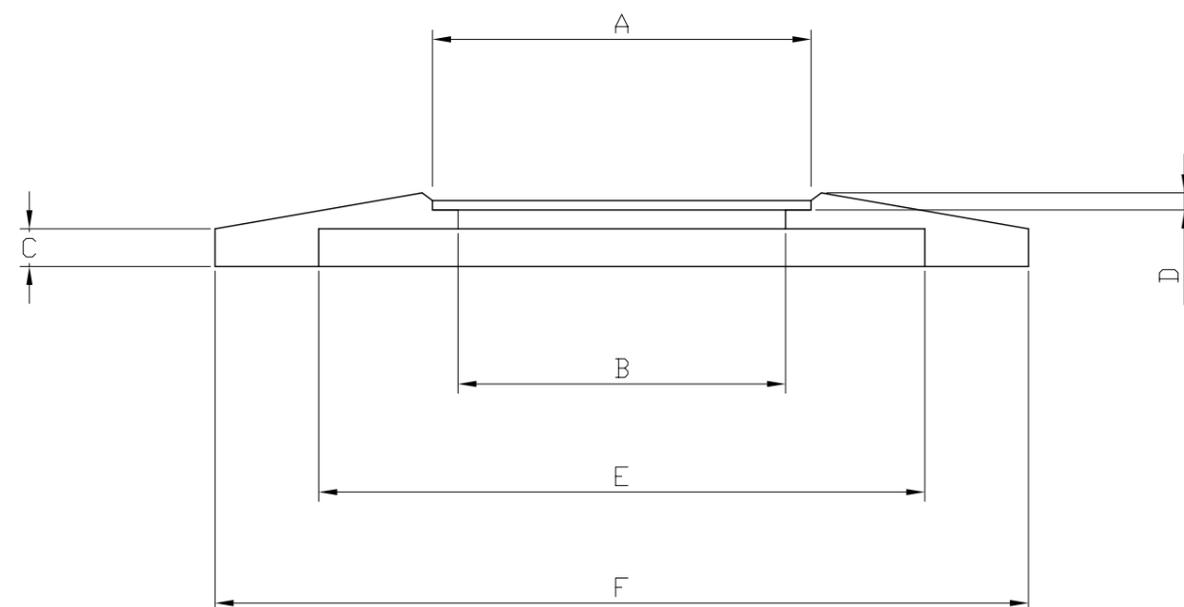
VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR

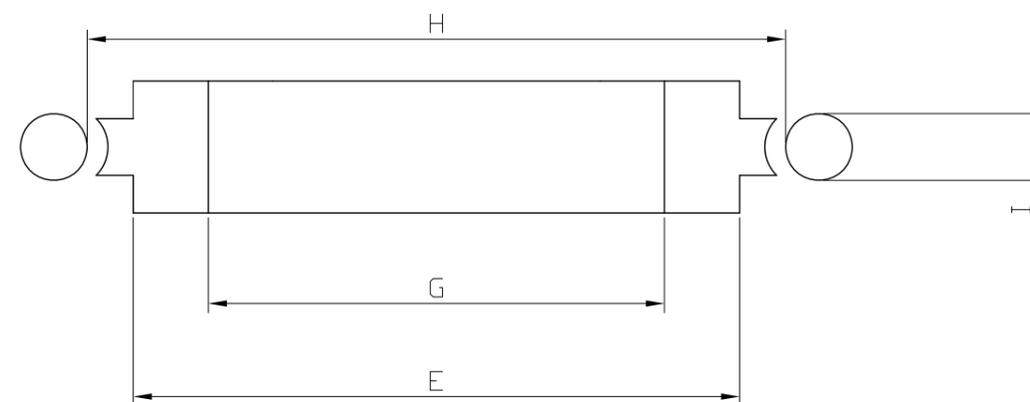


CORTE SEGUN P



| Brida | A | B | C | D | E | F |
|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| NW 25 | 25.53 | 22.10 | 2.54 | 1.27 | 40.60 | 55.00 |
| NW 8 | 8 | 11.43 | 2.54 | 1.27 | 12.51 | 33.00 |

ANILLO DE CENTRADO Y JUNTA DE VITÓN



| Brida | G | H | I |
|-------|-------|-------|------|
| NW 25 | 40.00 | 40.90 | 5.30 |
| NW 8 | 11.01 | 12.81 | 5.30 |

| PLANO | FECHA | NOMBRE Y APELLIDOS | FIRMA | Sistema de recateado para resinas epóxicas reforzadas por fibra de carbono de uso en el sector aeronáutico |
|-------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| DIMENSIONES mm | / / | Cristina Alcantarilla Parra | | |
| ESCALA Sin escala | BRIDAS DE VACIO NW 25 - 8 | | FACULTAD DE CIENCIAS | |

