



# ANTEPROYECTO DE UNA INSTALACIÓN DE PRODUCCIÓN DE TRINITROTOLUENO (TNT)

## ANEJOS

**Autor:** Jesús Giménez Cebrián

**Director:** Eva Francés  
**Especialidad:** Química  
**Convocatoria:** Septiembre 2011

**-Índice-**

<b>1. Emplazamiento.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Distribución en planta .....</b>	<b>6</b>
2.1. Distribución del edificio de oficinas y laboratorio.....	6
2.2. Distribución edificio de nitración .....	7
2.3. Distribución edificio de purificación.....	8
2.4. Almacén .....	8
<b>3. Proceso elegido y alternativas.....</b>	<b>9</b>
3.1. Métodos discontinuos:.....	9
3.2. Métodos continuos: .....	10
3.3. Método elegido.....	10
3.3.1. Descripción del proceso elegido y alternativas. ....	13
<b>4. Justificación de materias primás.....</b>	<b>17</b>
4.1. Tolueno .....	17
4.2. Ácido nítrico .....	18
4.3. Ácido sulfúrico.....	20
4.4. Agua y disoluciones de lavado. ....	22
<b>5. Balance de materia .....</b>	<b>23</b>
5.1. Base de cálculo.....	23
5.2. Balance de materia.....	24
5.2.1. Primera nitración.....	24
5.2.2. Segunda nitración.....	26
5.2.3. Tercera nitración.....	29
5.2.4. Purificación del TNT .....	31
5.2.5. Balances en fortificaciones de ácidos. ....	33
<b>6. Balance de energía .....</b>	<b>37</b>
6.1. Diluciones en contenedores de premezcla. ....	37
6.2. Balance del proceso principal.....	39
6.2.1. Calentamiento del tolueno y mezcla sulfonítrica .....	39
6.2.2. Calor de reacción de primera nitración .....	39
6.2.3. Calentamiento de MNT y mezcla sulfonítrica .....	40
6.2.4. Calor de reacción de la segunda nitración .....	40
6.2.5. Enfriamiento de los productos de segunda nitración.....	41
6.2.6. Calentamiento de la mezcla sulfonítrica de 3º nitración. ....	41
6.2.7. Calentamiento de DNT y mezcla sulfonítrica .....	42
6.2.8. Calor de reacción de la tercera nitración.....	43

<b>7. Justificación y dimensionamiento de equipos .....</b>	<b>44</b>
7.1. Silos y contenedores de almacenamiento .....	44
7.2. Contenedores o reactores de dilución (premezcla).....	48
7.3. Nitrador .....	49
7.4. Cristalizador y filtro.....	53
7.5. Cuba de lavado .....	54
7.6. Secador.....	55
7.7. Rodillo de conformado o “drum flaked”.....	57
7.8. Empaquetadora.....	59
7.9. Torre de refrigeración .....	61
<b>8. Trasportes internos .....</b>	<b>63</b>
8.1. Elevador de canjilones .....	63
8.2. Carretilla elevadora .....	65
<b>9. Calculo de tuberías y potencia de bombas.....</b>	<b>68</b>
9.1. Diámetro de las tuberías .....	69
9.2. Calculo de las pérdidas de carga.....	71
9.3. Potencia de las bombas .....	74
9.4. Elección de las bombas.....	75
<b>10. Control y seguridad en los procesos .....</b>	<b>80</b>
10.1. Lazos de control. ....	80
10.2. Válvulas de seguridad .....	83
10.3. Sala de control .....	84
<b>11. Régimen de fabricación.....</b>	<b>85</b>
11.1. Personal empleado.....	85
11.2. Personal en planta de producción .....	86
11.3. Oficinas .....	88
<b>12. Anexo.....</b>	<b>89</b>

## 1. Emplazamiento

La parcela estará ubicada en el Parque Huelva Empresarial, en Huelva, España. La parcela será la 20.1 situada en la calle Longitudinal-2, dispone de 74040,25 m<sup>2</sup> y una buena comunicación, estando cercana a carreteras nacionales y de autopistas, así como cercanía a puertos marítimos.

En cuanto al lugar geográfico acerca de España se barajaron otras posibilidades como Bilbao o Tarragona, zonas industriales de química pesada que favorecería la obtención de las materias primas. Otros factores a tener en cuenta han sido la cercanía a ciudades grandes, las comunicaciones y cercanía al mar.

La elección falló a favor de Huelva ya que cumplía todos los requisitos:

- Cercanía a ciudades como la misma Huelva y Sevilla.
- Buenas comunicaciones:
  - o Desde Huelva, en coche, por la carretera H-31 y tras diez minutos de trayecto tomar el desvío.
  - o Desde Sevilla, en coche, por la Autopista del Quinto centenario y tras recorrer 80 km (alrededor de 1 hora) tomar la salida de San Juan del Puerto.
  - o Puerto marítimo en Huelva.
- La parcela está lo suficientemente alejada de poblaciones civiles (tal como aconseja la normativa Seveso para las plantas químicas peligrosas).
- Cercanía a industrias suministradoras de materias primas:
  - o Refinerías de petróleo (obtención del tolueno como base del TNT).
  - o Industrias de producción de ácido sulfúrico y derivados (*Obtención de ácido sulfúrico en Huelva*. Rafael E.Romero, 2008).

Las condiciones climatológicas son bastante suaves debido a la cercanía al mar, si bien en verano las temperaturas suelen ser más elevadas de la media Española. No serán un inconveniente ya que la planta industrial estará a cubierto.

En cuanto al parque empresarial ofrece suministro eléctrico, agua potable y red de saneamiento de aguas. La parcela será lo suficientemente grande para albergar los edificios necesarios así como para dejar las superficies de separación requeridas para la seguridad (*Normativa Seveso*).

## 2. Distribución en planta.

La distribución de la planta se realizará en cuatro edificios: edificio reservado para las oficinas y laboratorio, edificio de nitración, edificio de purificación y almacén.

La razón por la que no se realiza todos los procesos en el mismo edificio es por motivos de seguridad. Separando los edificios de nitración de lavado de TNT evitamos que, en caso de explosión, los productos de cada edificio no detonen por onda simpática, minimizando los daños. El edificio que más alejado estará será el almacén, cubierto por muros de tierra.

### 2.1. *Distribución del edificio de oficinas y laboratorio*

El edificio, de base rectangular, que se encuentra en la entrada de la parcela, se destinará para oficinas y el laboratorio de calidad. El edificio se compondrá de tres plantas: sótano, planta calle y primera planta. La altura de cada planta será la estándar, como en un domicilio, entre 2,5 y 3 metros y el área de 262.5 m<sup>2</sup> (15x17.5m).

#### **Planta calle:**

Al entrar en el edificio se encuentra un hall desde donde se verán enfrente y a la derecha, pegada a la pared, unas escaleras con descansillo. Éstas nos conducirán hacia el laboratorio, en el sótano y a la segunda planta. A su izquierda estará el ascensor, el cual podrá llegar hasta las tres plantas.

En el hall habrá asientos y una recepción, situada a la izquierda de éste. Del hall saldrá un pasillo que nos conducirá a los servicios y a la sala de oficinas de administración, que a su vez conducirá al despacho del director.

#### **Sótano:**

En el sótano se encontrará el laboratorio. Una puerta con control de acceso separará el laboratorio del hall del sótano. En el laboratorio habrá una oficina pequeña, para el personal destinado a esta sección y un baño comunitario. Una salida de emergencia

situada al fondo de la sala comunicará el sótano con la plaza de carga y descarga de camiones.

#### **Primera planta:**

La primera planta, subiendo desde la planta calle, ofrecerá un pequeño hall con asientos. Un pasillo conectara este hall con los servicios, situados a la derecha del pasillo según se entra y el resto de salas que son las siguientes:

- Zona de descanso y comedor: Aquí los empleados podrán descansar y comer. La sala estará compuesta por sillas, mesas, una máquina de café y un horno microondas.
- Oficinas: estas oficinas estarán destinadas para los comerciales y demás ejecutivos que trabajen para la empresa.
- Sala de juntas: La sala de juntas, destinada para grandes reuniones, estará compuesta por una mesa alargada con asientos, un ordenador y un proyector.

## **2.2. *Distribución edificio de nitración***

En el edificio de nitración se llevarán a cabo las operaciones de dilución de ácidos, nitraciones sucesivas, cristalizado y filtrado del TNT bruto. El edificio, de planta rectangular, contará con aproximadamente con 3200m<sup>2</sup>, de 40 x 80m, de 5 metros de alto. Dispondrá de entradas por los cuatro costados, siendo la entrada oeste lo suficientemente grande para la entrada de un toro mecánico. Tendrá de las siguientes zonas:

- Muelle de carga: situado al sur del edificio, con una superficie aproximada de 1400 m<sup>2</sup> (no resta superficie al edificio), por donde se realizará el suministro de las materias primas y se recogerán los ácidos gastados.
- Sala de control: de aproximadamente 40m<sup>2</sup>. Dedicada para el seguimiento de las reacciones y condiciones de proceso. Tendrá un vestuario y un servicio.
- El resto de la superficie se dedica a la estancia de los silos, reactores y demás equipo. Los silos se colocarán en la zona sur, cerca del muelle de carga, los contenedores de premezcla próximos a los silos y los reactores y el resto del

equipo al norte de la sala. Los reactores estarán separados una distancia aproximada de 10 metros entre cada uno de ellos y otros 10 de los silos de almacenamiento.

### **2.3. *Distribución edificio de purificación***

En el edificio de purificación se llevarán a cabo las operaciones de lavado, secado y conformado del producto. El edificio será de planta rectangular, de 30 x 60 m y de 5 metros de altura, con entradas por los cuatro puntos cardinales, siendo la entrada norte especialmente grande para la cabida de una carretilla elevadora. Dispondrá de las siguientes salas:

- Zona de purificación y conformado: en esta sala se llevará acabo el lavado, secado y conformado.
- Muelle de carga: situado al Oeste del edificio, de características similares al construido en el edificio de nitración.
- Zona de empaquetado: dado que en esta sala es posible el contacto humano directo con el TNT se ha querido separar del resto del proceso. Los trabajadores de esta sala entrarán con el equipo recomendado para el trabajo en esta sala. Superficie aproximada de 200 m<sup>2</sup>.
- Vestuario y servicio. 40 m<sup>2</sup>

### **2.4. *Almacén***

El almacén es el edificio que más sistemas de protección deberá tener. Tendrá una superficie de 2500 m<sup>2</sup>, de planta cuadrada, de 2 metros de altura. Será un bunker de planta cuadrada, construido enteramente en hormigón y rodeado por un muro de tierra tan alto como el edificio, situado a 20 metros del edificio.

Dispondrá de una sola salida por la parte sur, donde se situará un pequeño muelle de carga y una caseta para los guardias de seguridad.

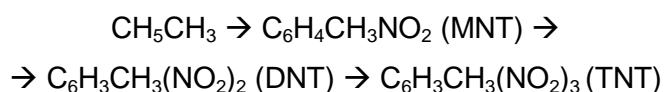
### 3. Proceso elegido y alternativas.

Dentro de todos los procesos existentes para la producción del TNT existen los métodos continuos y de obtención por lotes o discontinuos.

#### 3.1. *Métodos discontinuos:*

La mayoría de estos procesos fueron diseñados entre principios del siglo XX y la I Guerra Mundial como principales métodos de obtención de TNT. A finales de los 50 los métodos continuos comenzaron a desbancar a los discontinuos, si bien en la actualidad aun existen industrias que trabajan por lotes. Dentro de este grupo se distinguen dos tipos de procesos.

- Procesos en tres etapas (three-stage process): La nitración se lleva a cabo en tres etapas en el tiempo. En la mayoría de los casos obliga a disponer de tres nitradores (reactores) como mínimo. La nitración del tolueno sigue el siguiente paso:



Dentro de estos métodos se encuentran el método francés, método inglés, alemán y el antiguo soviético.

- Proceso en dos etapas (two-stage process): Solo el antiguo método Italiano se lleva a cabo por este proceso. La reacción de nitración se produce en dos etapas donde se fuerza la nitración del tolueno para obtener dinitrotolueno directamente:



Es un método más peligroso debido a reacciones más forzadas y que necesita alta pureza, sobretodo la ultima nitración debe estar libre de isómeros como m-nitrotoluene.

### **3.2. *Métodos continuos:***

Los métodos continuos nacieron entre la I y II Guerra Mundial, pero su puesta en marcha no vería la luz hasta el final de la II guerra, donde su producción apenas superaba a la de los métodos discontinuos, debido principalmente a la necesidad de equipos más sofisticados y la poca disponibilidad de equipos debido a la guerra. No obstante al ser métodos más eficientes se desarrollaron entre los años 50 y 60 y se establecieron como las principales rutas de producción del TNT. Las mejoras que introdujeron fueron:

- Mayor capacidad de producción.
- Mayor seguridad al poder acoplarse lazos de control.
- Mejores condiciones de higiene y salud para los trabajadores ya que exponen al trabajador en menor medida a los productos.
- Se acumula menor cantidad de explosivo en la fábrica.
- Los equipos requieren menor espacio.

Algunos de los métodos continuos son el método continuo Inglés, alemán, el método Bofors-Norell y Norwegian-Norsk, también conocidos estos dos últimos como métodos “modernos”.

Especial importancia tiene el método Bofors-Norell ya que su tecnología es la que se utiliza prácticamente en su totalidad en las plantas actuales (*Conversación con Jose A. Sanchidrían, catedrático de la Universidad Complutense de Madrid, 2010*). Es un método continuo donde los nitradores (reactores de mezcla perfecta) y los separadores se colocan en serie alternativamente y los reactivos se hacen circular en contra-corriente. Está diseñado de tal forma que no se necesitan bombas para impulsar los fluidos, el movimiento se basa en circulaciones por diferencia de densidad.

### **3.3. *Método elegido***

El método de producción elegido para nuestra planta será discontinuo, concretamente el método Francés por los siguientes motivos.

- Los métodos discontinuos ofrecen menor cantidad de producción que los continuos. El TNT es un explosivo que se ha producido desde principios de

siglo XX y del que se conserva cantidades ingentes procedentes de desmilitarizaciones, por lo que no se han instalados nuevas plantas prácticamente a nivel mundial (*Conversación con Jose A. Sanchidrán, catedrático de la Universidad Complutense de Madrid, 2010*), a pesar del alto grado de implicación de este compuesto en los explosivos modernos militares.

Por lo tanto la nueva producción de TNT está sujeta a causas especiales como necesidades de una alta pureza de producto, degradación de cargamentos en polvorines o por simple cuestión económica ante un transporte que resultase más costoso.

Por esta razón se sugiere la puesta en marcha de un proceso discontinuo, pues resultaría más económico que un proceso continuo, diseñados para la obtención de grandes cantidades (para necesidades en tiempo de guerra, en el cual no nos encontramos).

- Dado que la demanda de TNT no es constante y por las causas antes citadas, no se establecerá una producción anual fija, si no que se trabajará **bajo pedido**, en lotes. Por esta razón un método continuo resultaría inviable ya que las frecuentes puestas en marcha y paradas de producción estarían en función del número de encargos a realizar. Esto conllevaría paradas frecuentes en épocas de bajo pedido y por lo tanto pérdidas económicas.

En los métodos continuos se ha de alcanzar un estado estacionario en el sistema para obtener un buen rendimiento. Desde la puesta en marcha hasta alcanzar el estado estacionario no es más que un derroche de materias primas y de energía con conversiones poco relevantes. Por esta razón se ha elegido un proceso discontinuo.

- Dentro de los procesos discontinuos se ha elegido un proceso en tres etapas. En método en dos etapas o antiguo método Italiano conlleva una mayor peligrosidad dado que las dos primeras nitraciones se llevan a cabo en la misma etapa. Para conseguirlo se hace uso de mezclas sulfonítricas más agresivas para nitrar el tolueno, lo que puede dar a la obtención de isómeros no deseados que más adelante no se pueden nitrar, como el 3,5-dinitrotolueno o  $\alpha$ -nitrobenceno (*Chemistry and technology of explosives*, T. Urbanski, 1964).

Estos isómeros no deseados han de ser retirados en la siguiente nitración para evitar productos inestables que podrían provocar un accidente.

Los métodos en tres etapas requieren de mayor equipo, cuanto mínimo un tercer nitrador, pero aumentan el rendimiento final sobre el tolueno y ofrecen unas condiciones de seguridad mejores.

- Dentro de los procesos discontinuos en tres etapas el proceso elegido ha sido el Francés. Si bien es uno de los más antiguos, es también de los procesos más estudiados y más accesibles a la hora de obtener información.

El resto de métodos discontinuos no son tan accesibles debido a algunas de las especialidades derivadas de su diseño. Un ejemplo es método alemán: el tolueno empleado en la manufactura de TNT solo podía venir de fuentes de carbón o del reformado de gas de síntesis obtenido a partir del método Fischer-Tropsch. El diseño se debía a la escasez de petróleo en la II Guerra Mundial y la consiguiente ruta química para obtener el tolueno en tales momentos difíciles. Otro caso especial es el método Gorst de la antigua Unión Soviética donde los reactores son de lecho burbujeante (dificultad a la hora de encontrar datos de equilibrio) y cuyos tiempos de reacción son demasiado elevados.

El método Inglés es se presenta como buena alternativa ya que también está preparado para uso tanto de tolueno derivado de fracciones de petróleo como de carbón. Sin embargo el método Francés esta especialmente indicado para el uso de ácidos recuperados de otras nitraciones. Es este recirculado de ácidos “gastados” lo que convierte al método Francés en el más económicamente viable.

### 3.3.1. Descripción del proceso elegido y alternativas.

Se ha seguido el recorrido de síntesis original de 1914 introduciendo equipos más modernos y el uso de controladores. El método de obtención de TNT Francés sigue los siguientes métodos:

- 1. Pesada o medida de volúmenes de reactantes.** El tolueno se vierte en el primer reactor. Al ser un volumen fijo bastará con hacer uso de una tolva de vaciado automático que nos suministre la cantidad necesaria desde el silo de almacenamiento de tolueno. Una alternativa consistiría en un sensor de presión o pesada conectado a una válvula de cierre todo/nada en la tubería de conexión del silo de almacenaje de tolueno.

Por otro lado, el ácido sulfúrico y el nítrico, en sus cantidades ajustadas, se verterían en un contenedor de premezcla hasta que se obtenga una disolución homogénea. El ácido nítrico y sulfúrico son miscibles a cualquier proporción, la misión principal del contenedor de premezcla no es más que absorber el calor generado durante la dilución del sulfúrico en el agua que contiene el ácido nítrico del 66%. La temperatura a la que debe obtenerse la mezcla vendrá dada por la temperatura del tolueno (temperatura ambiente variable).

- 2. Nitración de tolueno a MNT.** Una vez contenido el tolueno en el primer nitrador y los ácidos en la cuba de premezcla se procederá a verter la mezcla sulfonítrica sobre el tolueno, siempre en ese **orden**. Si se alterase el orden y el tolueno se añadiera sobre la mezcla ácida se podría producir compuestos nitrados inestables. Durante la adición de la mezcla ácida y el tolueno la temperatura no aumentará de 40°C (de ahí que dependa la temperatura final de la mezcla sulfonítrica, ya que no se podrá saber a ciencia cierta la temperatura del tolueno que a su vez depende de la temperatura ambiente) y se mantendrá una agitación constante. Una vez vertido y mezclados los reactivos se aumentará la temperatura a 60 °C y se mantendrá durante 1 hora con agitación para que comience la reacción. Después de la reacción se dejará enfriar el contenido del reactor a temperatura ambiente (alrededor de 16 °C) y en reposo para que se formen dos capas: la capa superior, la orgánica, rica en MNT y la inferior, el ácido gastado. Se decantará la fase orgánica, dejando

evacuar el ácido por la parte inferior del reactor y se trasladará el MNT al siguiente reactor. En cuanto al ácido gastado de la primera nitración se conducirá a un tanque de ácido residual.

3. **Nitración de MNT a DNT.** El MNT de la primera nitración se llevará mediante un sistema de tuberías y bombas al reactor de segunda nitración. Mientras tanto una nueva mezcla sulfonítrica se estará preparando en un contenedor de premezcla y será vertido en el segundo nitrador. El ácido se verterá sobre el MNT en dos horas, durante la primera la temperatura no aumentará más allá de 40°C y en la segunda hora de 50°C, siempre con agitación mecánica constante. Cuando los reactivos se han mezclado completamente se elevará la temperatura a 90°C durante una hora y media. Tras finalizar la reacción se enfriará el contenido a 65°C (punto de fusión del DNT entre 56-58°C). Tras la formación de dos capas de evacuará el ácido gastado por la parte inferior y se llevará el DNT al tercer y último nitrador.
4. **Nitración de DNT a TNT.** El DNT obtenido se lleva al tercer y último nitrador donde se mezcla con ácido sulfúrico en una proporción 1:1 en peso, a una temperatura de 60°C. Mientras tanto, en el contenedor de premezcla una mezcla de ácidos concentrados se prepara para añadirla, a una temperatura de 80 – 90°C. Se mezcla en el nitrador con agitación constante durante dos horas en las cuales se ha de alcanzar una temperatura de 105 °C. Despues se eleva la temperatura a 120 °C y se mantiene durante una hora y media.

Cuando la reacción se ha completado se detiene la agitación mecánica. El TNT acabará formando la capa superior, separándose de los ácidos sobrantes.

5. **Separación del TNT de la mezcla nitrante.** La separación por decantación del trinitrotolueno en este caso resulta poco útil. A la temperatura de reacción la solubilidad del compuesto en ácido sulfúrico resulta apreciable. Es por esta razón por la que se suelen utilizar diversos métodos para recuperarlo:

- o La mezcla de reacción se lleva a un cristalizador refrigerado. El TNT se solidifica en la superficie del líquido, formando una costra que es retirada por centrifugación y lavada con agua. El ácido que sobra de esta operación es llevado a un nuevo recipiente, donde se le añade un 7% respecto del total de masa en agua, cambiando la solubilidad del

producto y obteniendo el TNT, antes disuelto en el ácido, en la superficie.

- Otro método consiste en llevar el TNT hasta el punto de cristalización añadiendo agua fría y agitando y después haciendo pasar la mezcla por un filtro donde se quedan retenidos los cristales.

El proceso que vamos a elegir va a ser una mezcla de ambos. Se hará uso de un cristalizador industrial combinado con filtros, de esta forma favoreceremos la recuperación del trinitrotolueno y mejoraremos su pureza.

**6. Lavado del TNT.** El TNT filtrado es recogido y llevado a una nueva cuba donde es lavado con una disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  al 7,5%, a temperatura ambiente y en periodo de dos horas. Se pretende con este paso eliminar posibles restos de ácidos adheridos a las paredes de los cristales. Después de retirar la disolución neutralizadora (que quedará en la capa superior,  $\text{sp.gr.}_{\text{tnt}} = 1,467$ ) se lavará el TNT cuatro veces con agua.

**7. Secado del TNT.** Para el secado del TNT se solía emplear un secador industrial de hierro similar al de la figura. Por la tubería superior se dejaba escapar las humedades y se recogía el producto seco por la parte inferior. Para el secado se introducía por la parte inferior aire seco. Se mantenía una temperatura de 90°C y al final de la operación se aumentaba a 105 °C.

En la actualidad se puede hacer uso de un secador industrial corriente, manteniendo las temperaturas dadas y haciendo pasar una corriente de gas seco.

**8. Conformación final del TNT.** El TNT se suele presentar en granos o “escamado” (“flaked” en inglés o a copos), partículas finas y alargadas como trozos de papel partido. La segunda opción es la más popular ya que permite al explosivo empaquetarse de mejor forma en el casquillo de los proyectiles sin dejar tantos huecos.

Para transformarlo a copos se hace uso de un “Flaked Drumm”, un cilindro grueso cuya parte inferior está sumergido en trinitrotolueno fundido a 80°C. Por una camisa exterior del cilindro se hace circular agua fría que, al contacto con el TNT, hace que este se solidifique en la superficie. El cilindro continúa

girando y una cuchilla situada cerca de la superficie despega el producto del cilindro, haciendo que caiga en un contenedor, obteniendo de esta forma un TNT puro y solidificado.

**9. Fortificación de los ácidos.** El método de producción de trinitrotolueno Francés se basa en el uso de ácidos diluidos de nitraciones superiores, es decir, del uso de ácidos gastados en la trinitración en la dinitración, así como los ácidos gastados de la dinitración en la mononitración.

Los porcentajes de las mezclas sulfonítricas se mantienen constantes fortificando las mezclas con ácidos concentrados y de esta forma se asegura una mayor conversión total del ácido nítrico y tolueno y una mejor conservación del sulfúrico. Estas fortificaciones de ácidos se llevan a cabo en contenedores de premezcla diferentes similares al descrito en el principio.

Especial mención tienen los ácidos gastados en la tercera trinitración ya que pueden contener una cantidad representativa de DNT no nitrado. En este caso

**10. Empaquetado.** El empaquetado se realizará en bolsas de plástico reforzadas de PE o PP. El tamaño de las bolsas variará entre 1 y 10 kg a petición del cliente.

## 4. Justificación de materias primas

### 4.1. Tolueno

El Tolueno es una sustancia incolora, inflamable y de baja viscosidad con un olor parecido al benceno. Es un buen solvente para grasas, aceites, resinas, sulfuros, fósforos, yoduros, etc. Es completamente miscible en la mayoría de disolventes orgánicos como éteres, esteres, alcoholes, fenoles y clorohidrocarburos. Es levemente soluble en agua (0,047 g/100 ml de agua a 16°C). Algunas de sus propiedades más relevantes son:

Masa molecular = 92.13 g/mol

Punto de fusión = -94.991 °C

Punto de ebullición (100 kPa) = 110.625 °C

Temperatura crítica = 320.8 °C

Presión crítica = 4.133 MPa

Compresibilidad crítica = 0.260

Volumen molar crítico = 0.32 L/mol

Densidad a 100 kPa y 25 °C = 0.8631 g/cm<sup>3</sup>

Tensión superficial a 100 kPa y 25 °C = 26.75 mN/m

Viscosidad a 100 kPa y 20 °C = 0.5864 mPa · s

Conductividad térmica en líquido a 100 kPa y 0 °C = 0.1438 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Entalpía de evaporación a 100 kPa = 32.786 kJ/mol

Flash point = 4 °C

Temperatura de ignición = 552 °C

Límites de explosión en aire:

Upper 1.27 vol %

Lower 6.75 vol %

El tolueno requerido en el proceso de obtención de TNT según el método francés no necesita una especial procedencia como en el caso alemán. Sus criterios de pureza (*Química de los explosivos*, Eduardo Ezama Sancho, 1946) vienen dados por:

- Densidad a 15°C : Máximo 0,875
- Temperatura de ebullición: 110°
- Residuos: 0,020 por 1000 c.c.

## 4.2. Ácido nítrico

El reactivo nitrador por excelencia. A lo largo de la historia de los explosivos se ha intentado obtener nitro derivados explosivos a partir de diversos métodos: en fase gaseosa, en disolventes orgánicos (*Earlier methods of nitration, Chemistry and technology of explosives*, p. 365). Y con numerosas sustancias como ácido nitroso, óxidos de nitrógeno, aminas, etc. No obstante ningún resultado ha sido tan favorable como la utilización de mezclas sulfonítricas.

El ácido nítrico es una sustancia conocida ya por los egipcios y estudiada por la alquimia medieval debido a su capacidad de separar el oro y la plata. Es miscible con agua en todas las proporciones. A la concentración de 69,2 % en peso forma un azeótropo con agua. Esta mezcla hierve a 121.8°C. Las propiedades físicas más importantes son las siguientes:

Punto de fusión = -41.59 °C

Punto de ebullición = 82.6 ± 0.2 °C

Densidad de líquido

a 0 °C = 1549.2 kg/m<sup>3</sup>

a 20 °C = 1512.8 kg/m<sup>3</sup>

a 40 °C = 1476.4 kg/m<sup>3</sup>

Viscosidad dinámica

a 0 °C 1.092 mPa · s

a 25 °C 0.746 mPa · s

a 40 °C 0.617 mPa · s

Tensión superficial

a 0 °C 0.04356 N/m

a 20 °C 0.04115 N/m

a 40 °C 0.03776 N/m

Conectividad térmica (20 °C) = 0.343 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

Entalpía estándar de formación

Líquido 2.7474 J/g

Gas 2.1258 J/g

Calor latente de vaporización (20 °C) = 626.3 J/g

Cp

a 0 °C 1.7601 J g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

a 20 °C 1.7481 J g<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>

En la mayoría de los métodos de producción se suele hacer uso casi exclusivo de ácido nítrico fumante (< 1% de agua) y el Francés no es una excepción. No obstante y por motivos económicos, algunas de las nitraciones se han querido llevar a cabo con ácido diluido al 66%.

El ácido nítrico fumante resulta más caro ya que para su obtención hay que romper el azeótropo que éste forma con el agua, requiriendo una destilación extractiva con ácido sulfúrico. Siempre que se pueda se hará uso de una porción de ácido diluido, de esta forma se ahorrará en cuanto a materias primas y servirá para ajustar las composiciones de agua en las mezclas sulfonítricas.

### 4.3. Ácido sulfúrico

El ácido sulfúrico puro es incoloro, parecido al agua y algo más viscoso. Es miscible con agua en todas las proporciones y sus concentraciones suelen expresarse en porcentaje de masa. Si éste no contiene nada de agua y lleva disuelto  $\text{SO}_3$  se le conoce como "oleum". Las propiedades del ácido sulfúrico están en función de la concentración, temperatura, presión...

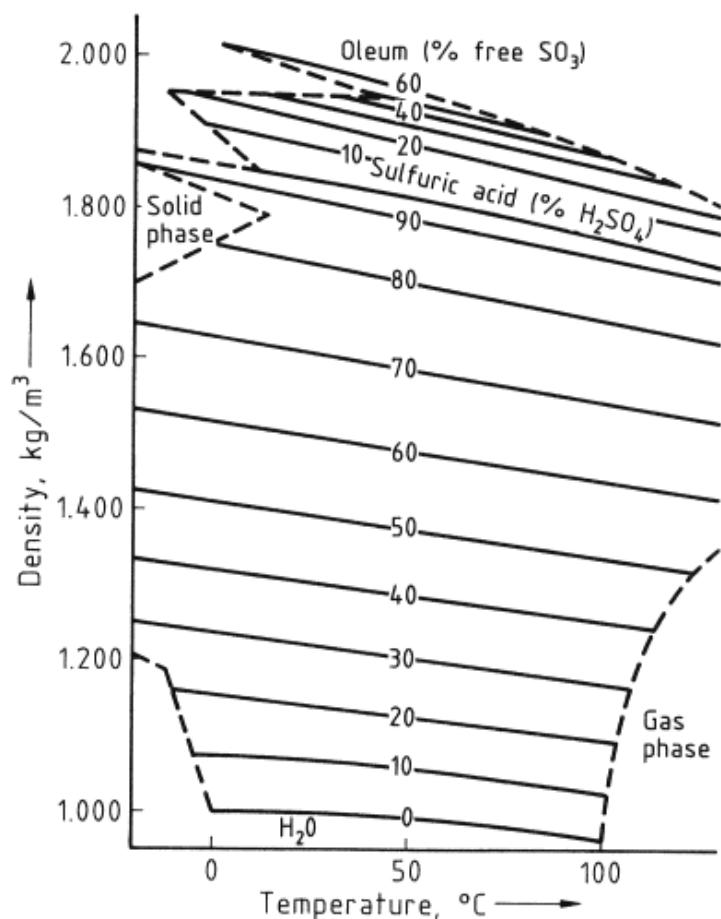


Figura 1. Variación de la densidad del ácido sulfúrico con la temperatura y composición.

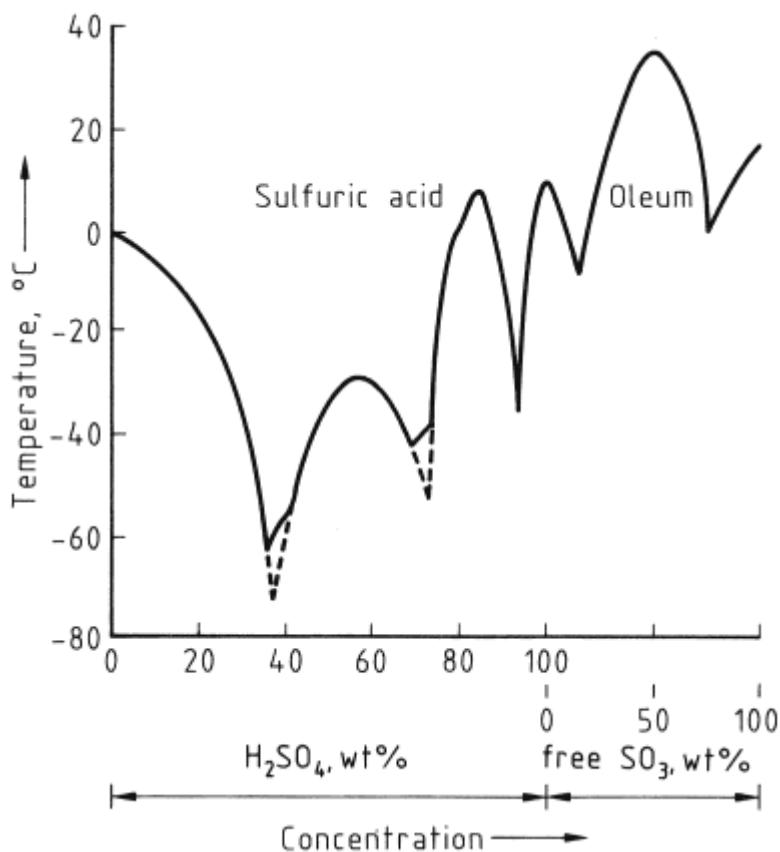


Figura 2. Variación del punto de fusión en función de la concentración.

Las figuras (1) y (2) muestran ejemplos de cómo varían las propiedades del ácido sulfúrico con la temperatura y concentración. El resto de propiedades importantes pueden encontrarse en tablas del anexo (figuras 25, 26 y 27).

El TNT en el proceso de nitración toma el papel de catalizador.



En el proceso de nitración el grupo nitro acaba desplazando uno de los hidrógenos del anillo de benceno, que junto con el otro protón derivado del catión hidronio, completarían las dos moléculas de ácido sulfúrico.

El ácido sulfúrico necesario en el presente proceso deberá ser concentrado, del 98% o, según la literatura más antigua, de densidad igual a 1,84 g/ml o 23 °Bé (*Química de los explosivos*, Eduardo Ezama Sancho, 1946). No se aconseja el uso

de oleum ya que potencia la nitración a niveles superiores, descontrolando la reacción y produciendo compuestos más inestables.

#### **4.4. Agua y disoluciones de lavado.**

En el proceso de lavado se lleva a cabo una neutralización y diversos lavados con agua:

- En la neutralización se hará uso de una disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , producto básico destinado a desacidificar el TNT fundido. Las trazas de sulfúrico que quedasen se reducen a sulfatos sódicos, que se arrastrarán con los posteriores lavados de agua.

La disolución estará compuesta de sulfito al 7% en masa, si bien se puede hacer uso, en caso de no disponer de tal compuesto, de sulfato de sodio o potasio o incluso carbonato de calcio (*Química de los explosivos*, Eduardo Ezama Sancho, 1946).

- El agua utilizada en los lavados de TNT no deberá tener ningún requisito especial. La suministrada por la red de abastecimiento será más que suficiente. No se necesitará de agua destilada.

## 5. Balance de materia

### 5.1. *Base de cálculo*

Para realizar el balance de materia se ha de tener en cuenta el régimen de producción de la fábrica. Anteriormente se ha hablado del proceso elegido, un método discontinuo y de cómo trabajaría la empresa, bajo pedido.

Dadas estas condiciones resultaría irrelevante hablar de una producción mensual o anual, pues los pedidos vendrían condicionados por las variaciones del mercado. Por esta razón se hablará de un balance de materia en cuanto a la **producción de un lote**.

La cantidad por lote viene dada por la cantidad inicial de tolueno introducido en el primer reactor, 650 kg (P. Pascal, *Poudres, explosifs, gaz de combat*, Hernan, Paris, 1925). A partir de esta cifra se comenzará a calcular las materias primas restantes a introducir para alcanzar la cantidad total de  $\alpha$ -trinitrotolueno.

Se ha de destacar también que en el caso de producción de lotes consecutivos existe la posibilidad de una “recirculación” de ácidos gastados, tras previo fortalecimiento, que será explicado posteriormente. Ésta ideado en caso de múltiples lotes, para ahorrar en materias primas y obtener mejores rendimientos en cuanto al tolueno.

## 5.2. Balance de materia.

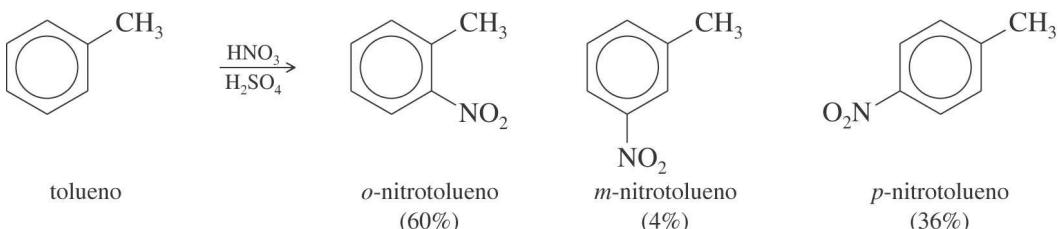
### 5.2.1. Primera nitración

Se introducen en el nitrador 650 kg de tolueno. Mientras tanto, en el contenedor de premezcla se han de obtener 1580 kg de mezcla sulfonítrica de la siguiente composición en peso (peso específico 1,672):

HNO <sub>3</sub>	28%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	56%
H <sub>2</sub> O	16%

Si para la primera nitración hacemos uso de nítrico del 66% y sulfúrico del 98% las cantidades a añadir son 677,17 kg y 902,86 respectivamente. Con estas cantidades de ácido nos aseguramos de la introducción del agua necesaria para completar los porcentajes de la mezcla sulfonítrica.

Si atendemos a la cantidad de ácido nítrico y tolueno y a la reacción química:



Puede observarse que la reacción de nitración es 1 a 1, tanto de formación de agua como de MNT. Un mol de tolueno necesita un mol de ácido nítrico. Sabiendo que:

$$\text{PM (tolueno)} = 92,14 \text{ g/mol}$$

$$\text{PM (ácido nítrico)} = 63,02 \text{ g/mol}$$

Las cantidades molares de ambos reactivos son:

$$n (\text{tolueno}) = 7054,48 \text{ mol}$$

$$n (\text{nítrico}) = 7091,91 \text{ mol}$$

Obsérvese que en el primer paso no se obtiene un exceso de nítrico más allá del 0,53%, un exceso prácticamente nulo.

Una vez mezclados todos los componentes y aumentada la temperatura se procede a la reacción de conversión del tolueno a mononitrotolueno. Se considera rendimiento sobre el tolueno del 96% y dado que la reacción química es 1 a 1:

$$n (\text{MNT}) = n (\text{tolueno}) * 1 \text{ mol MNT/1 mol tolueno} * 0,96 = 6772,3 \text{ mol}$$

ó 928,73 kg

La composición del ácido gastado que se retirará será (peso específico  $\approx 1,66$ ):

$\text{HNO}_3$ traza	< 2%
$\text{H}_2\text{SO}_4$	68%
$\text{H}_2\text{O}$	28%
Tolueno	2%

Éste será llevado a un tanque de ácidos gastados para su posterior recuperación. El MNT se llevará al siguiente nitrador, no obstante se han de calcular pérdidas significativas debido a la dilución de parte del MNT en el ácido gastado, en torno al 4,5% del total de MNT, lo cual nos da una producción de **886,93 kg de MNT** por lote.

### 5.2.2. Segunda nitración

Introducimos el MNT producido en el reactor y en el contenedor de premezcla se va preparando la mezcla sulfonítrica. La mezcla ha de tener la siguiente composición (en masa):

HNO <sub>3</sub>	32%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	61%
H <sub>2</sub> O	7%

La masa de mezcla viene determinada por el ácido nítrico, pues debe ser una masa equivalente a un exceso del 5% de nítrico sobre la base molar del MNT. Reaccionando 1 a 1 los reactivos esto será:

$$n(\text{MNT}) = 6467,55 \text{ mol} = n_{\text{estequiométrico}}(\text{nítrico})$$

$$n_{\text{total}}(\text{nítrico}) = n(\text{MNT}) * 1,05 = \mathbf{6790,93 \text{ mol ó 427,96 kg de nítrico}}$$

No obstante hay que tener especial cuidado con la procedencia del nítrico, pues en este caso hablamos de nítrico **anhidro** que ha de haber. A diferencia de la primera nitración donde solo era necesario nítrico del 66% en esta se va a necesitar de ácido nítrico puro. Si ajustamos la cantidad de agua necesaria sabiendo la cantidad de nítrico presente y sus concentraciones en la mezcla se puede deducir el agua que ha de haber presente.

$$427,96 \text{ kg nítrico anhidro} \cdot 0,07 / 0,32 = \mathbf{93,62 \text{ kg de agua}}$$

Por el mismo proceso se calcula la cantidad de sulfúrico anhidro necesario:

$$427,96 \text{ kg nítrico anhidro} \cdot 0,61 / 0,32 = 815,81 \text{ kg de sulfúrico anhidro}$$

$$\text{Al estar al 98\%} \rightarrow 815,81 \text{ kg de sulfúrico anhidro} / 0,98 =$$

$$= \mathbf{832,46 \text{ kg de disolución de sulfúrico del 98\%}}$$

A continuación se resta la masa de sulfuro anhidro a la masa de disolución del 98, con ello se consigue la cantidad de agua que viene presente con el ácido:

$$832,46 \text{ kg de disolución} - 815,81 \text{ kg de sulfúrico anhídrico} = 16,95 \text{ kg agua}$$

Basta con realizar otra resta para saber la cantidad de agua que ha de provenir del ácido nítrico: la resta de agua total menos el agua que viene con el sulfúrico.

$$93,62 - 16,95 = 76,97 \text{ kg de agua ha de venir con el ácido nítrico}$$

Esto a su vez es:

$$76,97 / (1 - 0,66) = \mathbf{226,38 \text{ kg de ácido nítrico del 66\%}}$$

El cuál da:

$$226,38 - 76,97 = 149,41 \text{ kg de nítrico anhídrico proveniente de la disolución del 66\%}$$

Ajustada la cantidad de agua y sulfúrico se procede a ajustar la cantidad de ácido nítrico con ácido nítrico puro o fumante. Si se necesitan 427,96 kg de nítrico anhídrico:

$$427,96 - 149,41 = \mathbf{278,56 \text{ kg de ácido nítrico puro.}}$$

Con estas cantidades se ajustan las proporciones a los datos bibliográficos y se cumple el exceso de nítrico del 5%.

Cabe destacar que en los métodos más antiguos (como los descritos anteriormente) no se almacenaba ácidos de concentraciones menores del 98%. Prácticamente se disponía de tres tanques de almacenamiento: los dos ácidos en estado puro o altamente concentrado y para el agua. La adicción de estos no era más que una sencilla mezcla.

En nuestro caso, la puesta de un tanque de nítrico del 66% nos permite ajustar el agua de misma forma, evitando en parte calores de dilución y haciendo uso de una materia prima significativamente más barata que el ácido nítrico

fumante, cuya producción y compra es más cara. Si bien dificulta los cálculos de balance de materia y, a priori significa un aumento del coste inicial de instalación, a la larga supone un ahorro en costes de operación.

Ajustadas las materias primas se procederá a realizar la segunda nitración:



Con una relación molar 1 a 1 y una conversión del MNT del 98% se obtiene:

$$886,93 \text{ kg MNT} = 6467,55 \text{ mol MNT}$$

$$6467,55 * 0,98 = \mathbf{6338,20 \text{ mol ó 1154,38 kg DNT}}$$

La composición del ácido gastado que se retirará será (peso específico  $\approx$  1,337):

HNO <sub>3</sub>	3%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	76%
H <sub>2</sub> O	19%
MNT	(<2%)

Tras la formación de las dos fases el ácido, situado en la parte baja, será retirado y el DNT decantado.

Como se ha mencionado anteriormente los ácidos de la segunda y tercera nitración serán fortalecidos y recirculados para anteriores nitraciones. En cuanto al DNT será trasportado por tubería hasta el tercer y último nitrador.

Se prevén perdidas de DNT en un 1% por arrastre de los ácidos gastados y por mojado del reactor. Esto da una producción de DNT de:

$$1154,38 \cdot (1 - 0,01) = \mathbf{1142,83 \text{ kg DNT por lote.}}$$

### 5.2.3. Tercera nitración

En la tercera nitración y antes de mezclar el DNT con la mezcla sulfonítrica, éste se disolverá en ácido sulfúrico en relación 1:1 en peso:



Mientras tanto la mezcla sulfonítrica se prepara a base de ácidos concentrados para obtener las siguientes proporciones:

HNO <sub>3</sub>	49%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	50%
H <sub>2</sub> O	≈1%

El nítrico en este caso estará en relación estequiométrica con el tolueno, lo que nos dará unas cantidades de reactivos de:

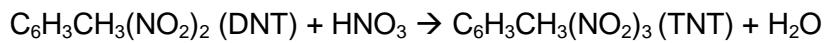
$$\begin{aligned} n \text{ (nítrico)} &= n \text{ (DNT)} = \mathbf{6274,82 \text{ mol}} \\ &\text{ó } \mathbf{395 \text{ kg de nítrico puro}} \end{aligned}$$

A partir de aquí se calcula la cantidad de sulfúrico a añadir, **411,75 kg de sulfúrico del 98%**, que nos da la cantidad de agua necesaria para ajustar las composiciones.

Completada la mezcla se vierte la mezcla sulfonítrica sobre el DNT disuelto en sulfúrico. Tras la adicción queda una composición de mezcla sulfonítrica de:

HNO <sub>3</sub>	20%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	78%
H <sub>2</sub> O	2%

Una vez mezclado todo y elevada la temperatura comienza la reacción:



Supuesta una conversión del DNT a TNT del 82% la cantidad de trinitrotolueno obtenida es:

$$6274,82 \text{ mol} \cdot 0,82 = \mathbf{5145,35 \text{ mol ó 1168,66 kg TNT}}$$

Después, la totalidad de la mezcla será llevada a un separador. Este consiste en un cristalizador y un filtro posterior que retenga los cristales de trinitrotolueno mientras el ácido gastado se recoge. Se prevén unas perdidas del 2% para el TNT, esto da:

$$1168,66 \text{ kg} \cdot (1 - 0,02) = \mathbf{1145,29 \text{ kg de TNT por lote}}$$

En cuanto a la mezcla de ácidos gastados de la tercera nitración tendrá una composición en masa de:

HNO <sub>3</sub>	4%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	89%
H <sub>2</sub> O	7%

Como se ha dicho anteriormente este ácido será fortalecido para un posterior uso en la 2º nitración. No obstante y atendiendo al rendimiento de la tercera nitración (de un 82%), puede que una cantidad significativa de DNT haya atravesado el filtro disuelto en los ácidos. Para una posterior recuperación de este DNT bastaría con colocar un nuevo separador antes de llevar los ácidos al contenedor de premezcla y dejándolos en reposo, decantar la fase orgánica formada. Sin embargo no se han conseguido datos sobre el coeficiente de reparto del DNT que atraviesa el filtro y el que queda adherido a los cristales de TNT, por lo que el diseño y recirculación de tal equipo será explicado de forma puntual y sin entrar en detalles.

#### 5.2.4. Purificación del TNT

##### 5.2.4.1. Neutralización y lavado.

El TNT recogido en el cristalizador se trasladará a la cuba de lavado, donde se procederá a la neutralización de los posibles ácidos adheridos a los cristales. Se hará uso de tantos litros de disolución de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  al 7,5% como kilogramos de TNT introducidos en la cuba. Esto es:

**1145,29 litros de disolución por lavado**

Neutralizados los ácidos, se evaca el líquido sobrante y se lavan los cristales con agua. Al igual que con la disolución neutralizadora, se vierten tantos litros de agua como kilogramos de TNT. Esto es:

1145,29 litros de agua

Se han de realizar cuatro lavados a los cristales, luego se han de utilizar

**$1145,29 \text{ L} \cdot 4 = 4581,16 \text{ litros de agua por lote}$**

Una vez evacuadas las aguas del último lavado se llevará el TNT al secador para eliminar la humedad retenida.

Se calculan unas pérdidas aproximadas de TNT en la sección de neutralización y lavado del 2%, manteniendo una cantidad de:

**$1145,29 \cdot (1 - 0,02) = 1122,38 \text{ kg de TNT por lote}$**

##### 5.2.4.2. Secado

Para el secado del TNT se procederá a la fusión de los cristales por calentamiento y una corriente de aire seco se introducirá en el secador para

arrastrar las posibles humedades. La cantidad de aire a circular varía de un lote a otro, no pudiendo especificarse el volumen a hacer circular.

Se calculan unas pérdidas de 1% en el secador por mojado y posibles volatilizaciones. Se obtienen:

$$1122,38 \text{ kg} \cdot (1 - 0,01) = 1111,16 \text{ kg de TNT}$$

#### 5.2.4.3. Conformación y empaquetado

La máquina empaquetadora tiene una precisión de  $\pm 10\text{g}$ . La imprecisión de las medidas y las posibles pérdidas en la máquina y en la tolva establecen unas pérdidas aproximadas de un 0,5%. Esto es:

$$1111,16 \text{ kg} \cdot (1 - 0,005) = \mathbf{1105,60 \text{ kg de TNT}}$$

### 5.2.5. Balances en fortificaciones de ácidos.

Se ha advertido con anterioridad que en el método francés se basa en la utilización de ácidos gastados de nitraciones superiores para las previas. A continuación se mostrará las cantidades de ácidos a añadir a las mezclas sobrantes para fortalecerlas y usarlas.

En los dos casos a ver se han calculado los balances de materia de forma similar a la segunda nitración: se ajusta en un primer momento la cantidad de sulfúrico, se calcula el agua que acompaña a éste y después de ajusta lo que queda de agua con nítrico del 66%. El resto de nítrico se acaba llevando a la concentración requerida por medio de ácido nítrico puro.

De esta forma se puede hacer uso de ácido del 66% con el consecuente ahorro que conlleva, no teniendo que fortificar solo con nítrico fumante.

#### 5.2.5.1. Ácido proveniente de la 2º nitración

Los ácidos provenientes de la segunda nitración tienen una composición del:

HNO <sub>3</sub>	2,71%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	77,55%
H <sub>2</sub> O	19,74%

(Porcentajes resultantes tras la eliminación de MNT)

El ácido gastado, en términos másicos, son:

HNO <sub>3</sub> .....	28,53 kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	815,81 kg
H <sub>2</sub> O.....	207,70 kg

Si se atiende a la primera nitración se necesitan 1580 kg de mezcla nitrante de composición:

HNO <sub>3</sub>	28%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	56%
H <sub>2</sub> O	16%

O lo que es lo mismo:

HNO <sub>3</sub> .....	446,93 kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	884,80 kg
H <sub>2</sub> O.....	248,29 kg

Siguiendo el protocolo se ajusta en un primer momento la cantidad de sulfúrico del 98% a añadir:

$$884,80 - 815,81 = 68,99 \text{ kg}$$

$$68,99 / 0,98 = \mathbf{70,40 \text{ kg de sulfúrico del 98\%}}$$

El agua necesaria que ha de provenir con los ácidos es de:

$$248,29 - 207,70 = 40,59 \text{ kg}$$

Si se le resta la cantidad que ya aporta el sulfúrico del 98% :

$$40,59 - 70,40 \cdot 0,02 = 39,18 \text{ kg de agua}$$

Esta es la cantidad de agua que ha de aportar el nítrico del 66%, de donde se puede saber la masa requerida de éste:

$$39,18 / (1 - 0,66) = \mathbf{115,24 \text{ kg de nítrico del 66\%}}$$

Ajustado el sulfúrico y el agua solo queda por calcular la cantidad de nítrico puro para llegar a la concentración deseada:

$$446,93 - 28,53 = 418,40 \text{ kg de nítrico se necesitan}$$

De los cuales ya viene una parte del nítrico del 66% y el resto es nítrico puro:

$$418,40 - 115,24 \text{ kg} \cdot 0,66 = \mathbf{342,29 \text{ kg de nítrico puro}}$$

Con las cantidades a añadir se fortalecerá el ácido hasta alcanzar las concentraciones necesarias para la primera nitración.

### 5.2.5.2. Ácido proveniente de la 2º nitración

Los ácidos provenientes de la tercera nitración tienen una composición del:

HNO <sub>3</sub>	4%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	89%
H <sub>2</sub> O	7%

(Porcentajes resultantes tras la eliminación de DNT)

El ácido gastado, en términos básicos, son:

HNO <sub>3</sub> .....	71,18 kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	1546,34 kg
H <sub>2</sub> O.....	123,54 kg

Si se atiende a la segunda nitración se necesita una composición de:

HNO <sub>3</sub>	32%
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	61%
H <sub>2</sub> O	7%

Y atendiendo a las cantidades básicas necesarias:

HNO <sub>3</sub> .....	427,96 kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	815,81 kg
H <sub>2</sub> O.....	93,62 kg

Observando las cantidades sobrantes de la tercera nitración puede verse que la cantidad de sulfúrico sobrante es mayor que la requerida, al igual que la del agua. En este caso se procederá a coger la parte de ácido sobrante que nos proporcione la cantidad exacta y necesaria de sulfúrico (ya que es el compuesto que está en mayor abundancia) y después se procederá a ajustar los demás reactivos.

Dividiendo la cantidad de sulfúrico requerido por la cantidad de sulfúrico sobrante:

$$815,81 / 1546,34 = 0,53$$

Para satisfacer la necesidad de sulfúrico se habrá de coger el **53%** de la masa de ácido gastado, la cual estará a la misma composición y tendrá las siguientes masas:

HNO <sub>3</sub> .....	37,55 kg
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	815,81 kg
H <sub>2</sub> O.....	65,18 kg

De esta forma no se necesitará hacer más gasto de sulfúrico y solo habrá que ajustar las cantidades de agua y nítrico a añadir:

$$93,62 - 65,18 = 28,44 \text{ kg de agua necesaria.}$$

$$28,44 / (1 - 0,66) = \mathbf{83,6 \text{ kg de nítrico del 66\%}}$$

$$427,96 - 37,55 - 83,6 \cdot 0,66 = \mathbf{335,21 \text{ kg de nítrico puro}}$$

El resto de ácido desechado de la tercera nitración será conducido a un tanque de almacenamiento de ácido gastado para su posterior recuperación.

## 6. Balance de energía

En este apartado se calculará las cantidades de refrigerante y de líquido calefactor que se utilizará para controlar temperaturas de reacción, enfriar, calentar y aplacar los calores generados por las diluciones de ácidos en agua.

Los balances se realizarán operación por operación y se basarán en balances sencillos de la forma  $Q = m \cdot cp \cdot \Delta T$  para calcular las kilocalorías necesarias y con ello los caudales de los líquidos.

En cuanto a los líquidos refrigerantes se hará uso de:

- Para calentar: vapor de agua saturado a 3 bares de presión ( $T^o 133,55^oC$ ), con una entalpía de vaporización de 2163,67 kJ/kg de vapor. Se supondrá que el vapor condensará a la misma presión.
- Para enfriar: agua líquida de circuito de refrigeración. Se instalará una torre de refrigeración cerrada para

### 6.1. *Diluciones en contenedores de premezcla.*

Las diluciones de los ácidos representan en la producción de TNT las etapas más exotérmicas en todo el proceso de fabricación. Su mezcla y la temperatura que pueda alcanzar son cruciales en el proceso de nitración, por ello se va a estudiar de que manera se ha de realizar la mezcla de estos reactivos.

Para la obtención de la mezcla sulfonítrica de la primera nitración a partir de ácidos "frescos" se ha de diluir 884,80 kg de ácido sulfúrico del 98% en 230,24 kg de agua (proveniente del nítrico del 66%). En este caso no se considerará la dilución del nítrico pues (aparte de que ya está bastante diluido), la cantidad de agua que acompaña al sulfúrico es despreciable.

Atendiendo a la tabla sobre calores de dilución del anexo (*Chemistry and technology of explosives*, Tadeuzs Urbanski, 1964), la dilución supone un desprendimiento de calor de:

$$Q_d = 8,77 \text{ Kcal} / (\text{kg de sulfúrico} \cdot \text{kg de agua añadida})$$

$$Q_T = Q_d \cdot 884,8 \cdot 230,24 = 1787254,1 \text{ Kcal}$$

Como puede observarse el calor desprendido es enorme. La cantidad de agua de refrigeración requerida para absorber todo este calor sería igual a:

$$m_{\text{agua}} = Q_T / (Cp_{\text{agua}} \cdot \Delta T) = 178725,41 \text{ kg de agua}$$

Suponiendo un  $\Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  y una capacidad calorífica de 1Kcal/Kg  $^{\circ}\text{C}$ . Esto implica una cantidad enorme de agua, en el caso de una toma de agua de río directa.

Atendiendo a la mezcla sulfonítrica necesitada en la segunda nitración se han de diluir 815,81 kg de sulfúrico y 278,56 kg de nítrico puro en 76,97 kg de agua. Según la tabla de calores de dilución del anexo la entalpía de dilución en este caso es de:

$$Q_d = 7,32 \text{ kcal} / (\text{kg de mezcla} \cdot \text{kg de agua añadida})$$

$$Q_T = Q_d \cdot (815,81 + 278,56) \cdot 76,97 = 616476,9 \text{ Kcal}$$

Si bien es un desprendimiento de calor bastante elevado, no es tan alto como el calor de dilución de la primera nitración. El resto de mezclas preparadas en el contenedor de premezcla no generan tanto calor como la primera, por esto, se establecerá el calor generado de la primera nitración como base del máximo caudal o cantidad de agua a hacer recorrer por el serpentín de la camisa del contenedor.

En los casos en el que se necesite parte del calor para calentar la mezcla sulfonítrica o los calores de dilución no sean tan elevados se establecerá un caudal de agua menor que será controlado por un lazo de control feedback,

conectado a la temperatura del tanque de premezcla y a una válvula de control que mida la cantidad de ácido que vierte. Estos lazos serán explicados en un apartado posterior.

## 6.2. *Balance del proceso principal.*

### 6.2.1. *Calentamiento del tolueno y mezcla sulfonítrica*

Una vez mezclados los reactivos se han de calentar desde los 40 a los 60º C.

Tabla 1. Calor necesario en nitrador 1.

	kg	$\Delta T$	Cp (kJ/kg K)	Calor (kJ)
Tolueno	650,00		1,72	22360,00
Sulfúrico 98%	902,86		1,38	24918,85
Nítrico 66%		20,00		
Nítrico sin agua	446,9322		1,75	15625,64
agua	230,24		4,18	9247,88
				<b>82152,38</b>

La tabla 1 muestra el calor: **82152,38 kJ han de aportarse** al nitrador para elevar la temperatura. El aporte se realizará con vapor de agua con las condiciones citadas:

$$Q = 82152,38 \text{ kJ} = \Delta H_v \cdot m_v \rightarrow m_v = 82152,38 \text{ kJ} / 2163,67 \text{ kJ/kg} = \\ = 29,35 \text{ kg de vapor de agua}$$

### 6.2.2. *Calor de reacción de primera nitración*

La reacción de nitración de tolueno a MNT es una reacción exotérmica que libera 30,34 kcal/mol de MNT producido. Si lo que se desea es mantener la temperatura a 60ºC se deberá retirar todo el calor generado en la reacción:

6772,30 mol de MNT producido  $\cdot$  30,34 kcal/mol = 205471,67 kcal ó 858871,58 kJ a retirar.

Este calor se retirará con agua de refrigeración proveniente de la torre de refrigeración.

Puesto que la reacción transcurre durante 1 hora la potencia a disipar será de

$$P = 858871,58 / 3600 \text{ s} = \mathbf{238.57 \text{ kW}}$$

### 6.2.3. Calentamiento de MNT y mezcla sulfonítrica

Una vez mezclados los reactivos se ha de calentar el contenido del reactor de 50 a 90 °C

Tabla 2.

	kg	$\Delta T$	Cp (kJ/kg K)	Calor (kJ)
MNT	886,93	40,00	1,48	52387,15
Sulfúrico 98%	832,46		1,38	45951,5653
Nítrico				
Nítrico sin agua	427,96421		1,75	29924,9694
agua	76,97		4,18	12869,0585
				<b>141132,743</b>

Se necesita pues 141132,74 kJ para calentar el contenido. Si se aporta el calor con vapor de agua se necesitará una masa de vapor de:

$$Q = 141132,74 \text{ kJ} = \Delta H_v \cdot m_v \rightarrow m_v = 141132,74 \text{ kJ} / 2163,67 \text{ kJ/kg} = \\ = \mathbf{65,23 \text{ kg de vapor de agua}}$$

### 6.2.4. Calor de reacción de la segunda nitración

La reacción de nitración de MNT a DNT es una reacción exotérmica que libera 24,36 kcal/mol de DNT producido. Si lo que se desea es mantener la temperatura a 90°C se deberá retirar todo el calor producido en la reacción:

$$6338,20 \text{ mol de MNT producido} \cdot 24,36 \text{ kcal/mol} = 154398,51 \text{ kcal}$$

ó 645385,77 kJ

Este calor se retirará con agua de refrigeración proveniente de la torre de refrigeración.

Puesto que la reacción transcurre durante 1 hora y media la potencia a disipar será de

$$P = 645385,77 / 5400 \text{ s} = 119.52 \text{ kW}$$

#### 6.2.5. Enfriamiento de los productos de segunda nitración

Una vez terminada la reacción se procederá a enfriar el producto hasta los 65 °C.

Tabla 3.

	Kg	ΔT	Calor (kJ)
DNT	1154,38	-25,00	-40406,01
Sulfúrico	815,81		-26513,72
nítrico	28,53		-1246,87
agua	207,70		-21705,15
			<b>-89871,7542</b>

**89871,75 kJ** habrán de ser retirados con ayuda de una corriente de agua fría.

$$M_{\text{agua}} = Q / (Cp_{\text{agua}} \cdot \Delta T) = 89871,75 / (4,18 \text{ kJ/kg} \cdot 10) =$$

**= 2150,04 kg de agua fría.**

Suponiendo incrementos de temperatura del agua de refrigeración de 10°C.

#### 6.2.6. Calentamiento de la mezcla sulfonítrica de 3º nitración.

La mezcla de ácidos concentrados ha de elevarse hasta una temperatura de 85 °C. Considerando que al no diluirse no se genera calor y que se toman

desde tanques a una temperatura ambiente próxima a 20 °C, se calcula que se necesita un aporte de calor de:

Tabla 4.

	kg	ΔT	Calor (kJ)
nítrico puro	395,44		44932,3416
sulfúrico		65,00	
98%	411,74		36933,4361
			<b>81865,78</b>

81865,78 kJ han de aportarse con vapor de agua, cuya cantidad másica será:

$$Q = 81865,78 \text{ kJ} = \Delta H_v \cdot m_v \rightarrow m_v = 81865,78 \text{ kJ} / 2163,67 \text{ kJ/kg} = \\ = 37,83 \text{ kg de vapor de agua}$$

Esta mezcla de ácidos a 85°C ha de mezclarse con el DNT disuelto en sulfúrico que previamente estaba aproximadamente a 60°C. Tras un pequeño balance de energía se obtiene que la masa total obtenida alcanza una temperatura de **71 °C**.

#### 6.2.7. Calentamiento de DNT y mezcla sulfonítrica

Desde los 71°C obtenidos tras la mezcla se ha de elevar la temperatura hasta los 105°C y después hasta los 120°C.

Tabla 5.

#### Calentamiento de 71 a 105°C

	kg	ΔT	Calor
Sulfúrico anhídrico	1546,34	33,99	68325,96
nítrico anhídrico	395,44		23495,39
agua	30,93		4393,88
DNT	1142,83		54384,88
			<b>150600,12</b>

Tabla 6.

**Calentamiento de 105 a 120º C**

	kg	$\Delta T$	Calor
Sulfúrico anhídrico	1546,34	15,00	30153,66
nítrico anhídrico	395,44		10369,00
agua	30,93		1939,11
DNT	1142,83		24001,17
			<b>66462,94</b>

Dados los calores, las respectivas masas de vapor requeridas son:

$$Q = 150600,12 = \Delta H_v \cdot m_v \rightarrow m_v = 150600,12 \text{ kJ} / 2163,67 \text{ kJ/kg} = \\ = \mathbf{69,60 \text{ kg de vapor de agua}}$$

$$Q = 66462,94 \text{ kJ} = \Delta H_v \cdot m_v \rightarrow m_v = 66462,94 \text{ kJ} / 2163,67 \text{ kJ/kg} = \\ = \mathbf{30,71 \text{ kg de vapor de agua}}$$

#### 6.2.8. Calor de reacción de la tercera nitración

La reacción de nitración de DNT a TNT es una reacción exotérmica que libera 17,8 kcal/mol de DNT producido. Si lo que se desea es mantener la temperatura a 120ºC se deberá retirar todo el calor aportado por la reacción:

$$5145,35 \text{ mol de TNT producido} \cdot 17,8 \text{ kcal/mol} = 91587,22 \text{ kcal ó } 382834,58 \text{ kJ}$$

Este calor se retirará con agua de refrigeración proveniente de la torre de refrigeración.

Puesto que la reacción transcurre durante 1 hora y media la potencia a disipar será de

$$\mathbf{P = 382834,58 / 5400 s = 70,89 \text{ kW}}$$

## 7. Justificación y dimensionamiento de equipos.

### 7.1. *Siros y contenedores de almacenamiento*

Se va a calcular el tamaño de los contenedores que almacenarán las materias primas a utilizar en el proceso. El tamaño de los equipos de almacenaje se ha diseñado de tal forma que puedan producir 6 lotes sin necesidad de suministro alguno. También se han diseñado suponiendo el caso de que todos los lotes se produzcan sin recirculado de ácidos gastados.

Se ha añadido una excepción en el caso de ácido sulfúrico, pues se ha tomado un tamaño de tanque que pueda abastecer la producción de 4 lotes (al ser la materia prima más necesitada, para la producción de 6 lotes el tamaño del contenedor de almacenamiento es demasiado grande):

Tabla 7.

producto	masa por lote	masa total (6 lotes)	volumen m <sup>3</sup>
tolueno	650,00	3900,00	4,50
nítrico 66%	903,55	5421,28	4,05
nítrico puro	673,99	4043,97	3,02
sulfúrico	3281,65	13126,62 *	7,13
agua	-	-	9,16 *
d. sulfito	-	-	4,58 *

(\*) Volúmenes diseñados para 4 lotes y no 6.

Se ha introducido un factor de seguridad del 10%, así se establece un volumen vacío en los silos para evitar llenados de contenedores completos. El resultado en los volúmenes es el siguiente:

Tabla 8.

producto	volumen total m <sup>3</sup>
tolueno	4,95
nítrico 66%	4,46
nítrico puro	3,33
sulfúrico	7,85
agua	10,08
d. sulfito	5,04

En cuanto a los materiales de los silos se barajan dos posibilidades:

- Acero inoxidable: ofrecen las características anticorrosivas y mecánicas necesarias. La aleación más favorable es la “Alloy 20” o “carpenter”, una aleación de acero con níquel, cromo y molibdeno. Está especialmente indicada para el uso tanto de sulfúrico como de nítrico.
- El PRFV (Poliester Reforzado con Fibra de Vidrio) es un material compuesto, formado, como su propio nombre indica, por dos materiales fundamentales:
  - Una matriz, constituida por una resina sintética de tipo poliéster.
  - Un refuerzo de fibra de vidrio que se ubica dentro de la matriz.

La matriz de Poliéster es un aglomerante perfecto para el refuerzo, ya que asegura la participación simultánea de todos los filamentos del mismo, siendo además una barrera excelente frente a los agentes químicos y ambientales.

La Fibra de Vidrio proporciona la armadura necesaria con la que logramos la resistencia mecánica precisa tanto para soportar la presión interna del recipiente hacia el exterior cuando este se encuentre lleno, como las cargas y presiones externas hacia el interior del recipiente en los depósitos enterrados.

En cuanto a tamaños que se ajusten a los requerimientos de volumen puede escogerse entre dos opciones:

- Realizar un pedido a una empresa y que los silos sean fabricados por encargo con las medidas que se desee.
- En un catalogo, escoger los silos que más se adecuen a las exigencias requeridas. En el caso de silos de PRFV se indica el siguiente catálogo:

Tabla 9. Catálogo Delf. Grupo España S.L.

CAPACIDAD Litros	Diámetro Metros	Altura Total Metros
<b>5.000</b>	1'70	2'55
<b>6.000</b>	1'70 2'12 2'45	3'00 2'03 1'62
<b>7.000</b>	2'12	2'31
<b>8.000</b>	1'70 2'12 2'45	3'87 2'60 2'04
<b>10.000</b>	2'12 2'45 3'00	3'16 2'47 1'86
<b>12.000</b>	2'12 2'45 3'00	3'73 2'90 2'15
<b>15.000</b>	2'12 2'45 3'00	4'58 3'53 2'57
<b>18.000</b>	2'45 3'00	4'17 3'00
<b>20.000</b>	2'45 3'00	4'59 3'28



Figura 1. Silo Delf. de PRFV

Se recomienda, bien sea de acero inoxidable u otro material, hacer uso de productos de serie y no de encargos, ya que estos incrementan el precio de construcción.

Para la automatización de las descargas de los productos desde las tolvas y depósitos se instalarán sobre módulos de pesada PINMOUNT SWC515, de la marca Mettler Toledo. Están diseñados para aplicaciones estáticas y dinámicas donde la carga implica fuerzas horizontales. El módulo PINMOUNT está disponible en capacidades de 7,5 t, 15 t y 22,5 t.



Figura 2. Módulo de pesada.

## 7.2. Contenedores o reactores de dilución (premezcla).

Estos contenedores se utilizarán para preparar las mezclas sulfonítricas que serán luego utilizadas en los nitradores. Al contener ácidos, el material deberá ser inoxidable y el reactor deberá disponer de una camisa refrigerante para disipar el calor generado por la dilución de los ácidos. A su vez, unas palas del mismo material agitarán la mezcla para homogenizar el calor generado.

El volumen de este reactor está calculado según la máxima capacidad de ácidos que tenga que albergar, en este caso, la mezcla sulfonítrica de la primera nitración:

Tabla 10.

producto	Masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
nítrico 66	677,17	0,51
sulfúrico 98	902,86	0,49
1,00 total		

Aplicando un factor de seguridad del 10% se obtiene un volumen total de:

$$1,00 * (1+0,1) = 1,10 \text{ m}^3$$

Con este volumen se asegura la cabida de todas las demás mezclas sulfonítricas por preparar. Se instalarán dos equipos como este.

Las dimensiones no se pueden establecer ya que lo suministradores de reactivos trabajan prácticamente bajo pedido, según normativas de construcción de reactores ASME o GMP. Para la obtención de las dimensiones es preciso contactar con los suministradores. En tal caso, no se ha podido. Para obtener una altura aproximada de los equipos (necesario en cálculo de tuberías) se ha contado tantos metros de altura como volumen más 1 metro adicional por las patas y los medidores de pesada.

### 7.3. *Nitrador*

Para calcular el tamaño de los nitradores se observará el volumen de reactivos que se introducen y se establecerá un tamaño que de cabida suficiente a las disoluciones más el factor de capacidad.

En este proyecto no se ha necesitado de un diseño de reactores más exhaustivo. Generalmente, en cualquier proceso de diseño suele estudiarse la conversión de los reactivos en función de la temperatura de reacción, del volumen de reacción o del tiempo de reacción. No obstante, todos los datos relevantes en cuanto a cinética de reacción ya han sido facilitados por las bibliografías estudiadas, por esta razón que el volumen sea calculado de una forma tan sencilla.

En el **primer nitrador** las masas a introducir son las siguientes:

Tabla 11.

producto	masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
tolueno	650,00	0,75
sulfúrico 98	902,86	0,49
nítrico 66%	677,17	0,51
		1,75

Aplicando el factor de seguridad del 10% se obtiene un volumen de reactor de:

$$1,75 * (1 + 0,1) = 1,92 \text{ m}^3$$

Con este volumen se asegura la total capacidad de los reactivos y los productos generados tras la reacción.

En el **segundo nitrador** las masas a introducir son las siguientes:

Tabla 12.

producto	masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
MNT	886,93	0,76
sulfúrico 98	832,46	0,45
nítrico 66%	226,38	0,17
nítrico puro	278,56	0,18
		1,57

Aplicando el factor de seguridad del 10% se obtiene un volumen de reactor de:

$$1,57 * (1 + 0,1) = 1,73 \text{ m}^3$$

En el **tercer nitrador** las masas a introducir son las siguientes:

Tabla 13.

producto	masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
DNT	1142,83	0,74
sulfúrico		
98	1554,58	0,84
nítrico		
puro	395,44	0,26
		1,85

Aplicando el factor de seguridad del 10% se obtiene un volumen de reactor de:

$$1,85 * (1 + 0,1) = 2,03 \text{ m}^3$$

En cuanto a las prestaciones de los reactores deberán ser de un material que aguante las condiciones abrasivas de los ácidos como por ejemplo un acero inoxidable. Deberán disponer de camisa exterior para el enfriamiento y de un serpentín interior para el calentamiento de la mezcla. A su vez dispondrán de agitación, también resistente a la corrosión.

La forma de los nitradores será cilindro-cónica, colocados en vertical sobre patas de acero, situando la forma cónica en la parte inferior. Los reactivos serán

introducidos por la parte superior y los productos se evacuarán desde una válvula situada en la parte cónica inferior. De esta manera se realizará mejor la decantación de las fases orgánicas.

Para una decantación de la fase orgánica más efectiva se instalará un sensor de conductividad en la parte inferior de reactor. Al estar en contacto con la disolución ácida permitirá el paso de los ácidos hacia el contenedor de ácidos gastados. Evacuados los ácidos, el sensor entrará en contacto con la fase orgánica, de conductividad prácticamente nula y cerrará el tramo hacia el tanque de ácidos gastados y abrirá (con una válvula rotativa en forma de T) una nueva vía hacia el siguiente nitrador. El sensor es el siguiente:

Sensor inductivo InPro7250 de la marca Mettler Toledo, diseñada para las medidas en línea de los niveles de conductivity/concentration de ácidos, de bases y de sales en medios líquidos. Características:

- Sensor inductivo, no produce chispas ni corrientes en el seno del fluido.
- Revestimiento especial para condiciones abrasivas.
- Fácil instalación y mínima perdida de carga.



Figura 3. Sensor de conductividad.

En el caso de la tercera nitración, al haber unas condiciones tan agresivas, es posible que se formen compuestos gaseosos e inestables (CO, tetranitrometano,

etc) que formen con el aire atmósferas explosivas. Por esta razón el tercer nitrador trabajará en condiciones aisladas, haciéndose pasar nitrógeno para eliminar el aire contenido en el reactor.

Las dimensiones no se pueden establecer ya que lo suministradores de reactivos trabajan prácticamente bajo pedido, según normativas de construcción de reactores ASME o GMP. Para la obtención de las dimensiones es preciso contactar con los suministradores. En tal caso, no se ha podido. Para obtener una altura aproximada de los equipos (necesario en cálculo de tuberías) se ha contado tantos metros de altura como volumen más 1 metro adicional por las patas.



Figura 4. Reactores marca Maivisa. Los aquí representados disponen de válvulas en la parte inferior y ruedas para su manejo por la planta.

## 7.4. Cristalizador y filtro

Los cristalizadores comerciales pueden operar de forma continua o por cargas, excepto para algunas aplicaciones especiales, es preferible la operación continua. La primera condición que debe de cumplir un cristalizador es crear una solución sobresaturada, ya que la cristalización no se puede producir sin sobresaturación. El medio utilizado para producir la sobresaturación depende esencialmente de la curva de solubilidad del soluto. Algunos solutos como la sal común, tiene solubilidades que son prácticamente independientes de la temperatura, mientras que otros, como el sulfato sódico anhidro y el carbonato sódico monohidratado, poseen curvas de solubilidad invertida y se hacen más solubles a medida que la temperatura disminuye. Para cristalizar estos materiales se precisa crear la sobresaturación mediante evaporación. En los casos intermedios resulta útil la combinación de evaporación y de enfriamiento.

Una forma de clasificar los aparatos de cristalización se basa en el método utilizado para crear la sobresaturación:

1. Sobresaturación producida por enfriamiento sin evaporación apreciable, por ejemplo, cristalizadores de tanque.
2. Sobresaturación producida por evaporación, con enfriamiento apreciable, por ejemplo, evaporadores de cristalización, cristalizadores-evaporadores.
3. Evaporación combinada con enfriamiento adiabático: cristalizadores al vacío.

En nuestro caso haremos uso de cristalizadores de sobresaturación por enfriamiento. El elegido ha sido el cristalizador DEGA ACP con filtro acoplado. Fabricado en acero inoxidable, filtros intercambiables, con capacidades para 2000kg de materia.



Figura 5. Cristalizador DEGA ACP

## 7.5. Cuba de lavado

La cuba de lavado tendrá unas dimensiones tales que den cabida al TNT y a los volúmenes de líquidos de lavado. Esto será:

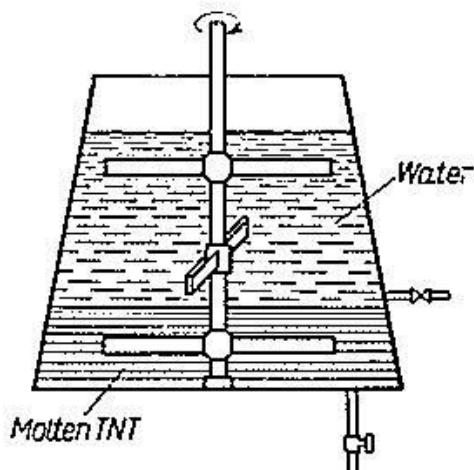
Tabla 14.

producto	masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
TNT	1145,29	0,69
sulfito/agua	-	1,15
		1,84

Aplicando el factor de seguridad del 10% se obtiene un volumen de reactor de:

$$1,84 * (1 + 0,1) = 2,02 \text{ m}^3$$

El método francés describía este equipo como una cuba de cono truncado, fabricado en madera robusta, con agitadores en el interior. En el presente caso se hará uso de un material de mayor aguante, como pudiera ser el acero inoxidable. Dispondrá de agitación y tendrá la forma aconsejada. También deberá construirse bajo pedido.



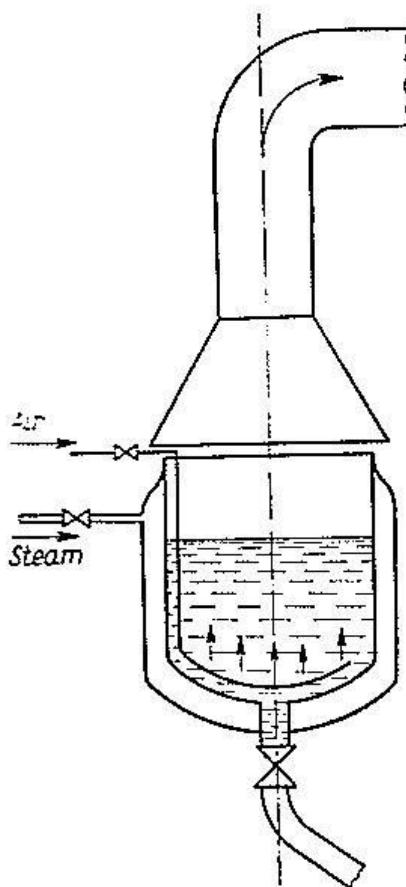
Wooden tank for washing TNT (Pascal [5]).

Figura 6. Forma de cuba de lavado según el método francés.

## 7.6. Secador

Un secador se utiliza para quitar la humedad de partículas finas mojadas, abarcando un cilindro inmóvil aislado en el cual se rota un tubo cilíndrico metálico ampliable, coaxial en una posición esencialmente horizontal. Las partículas mojadas se introducen en el extremo abierto mientras que el aire caliente circula entre el cilindro inmóvil y el tubo.

En el antiguo método francés el proceso de secado se llevaba a cabo con un equipo fabricado en hierro, como el de la figura 7.



Vessel for drying TNT.

Figura 7. Secador de TNT según método francés.

Haciendo pasar vapor de agua se conseguía la fusión de los cristales de TNT para luego hacer pasar aire seco desde la parte inferior. El aire cargado con la humedad del TNT abandonaba el secador por la parte superior.

Para el presente proyecto se hará uso de un secador industrial moderno, de acero inoxidable, con las mismas condiciones de proceso. Deberá tener una cabida para toda la masa de TNT a secar. Esto es:

Tabla 14.

producto	masa (kg)	volumen (m <sup>3</sup> )
TNT	1122,38	0,68



Figura 8. Secador industrial NOVATURN

La marca elegida de secador es NOVATURN (figura 8), secador centrífugo con capacidad para 1500 kg de producto.

### 7.7. **Rodillo de conformado o “drum flaked”.**

Secado el TNT y aun en estado líquido, se trasvasará a la cuba del rodillo. El rodillo, sumergido en el producto líquido comienza a girar, arrastrando por rozamiento el producto. El cilindro, enfriado por un sistema de refrigeración interno, hace que el TNT se solidifique en las paredes del cilindro. Al final del recorrido de giro una cuchilla separa el producto a un nuevo contenedor, ya en forma de copo o escama. Tiene las siguientes características:

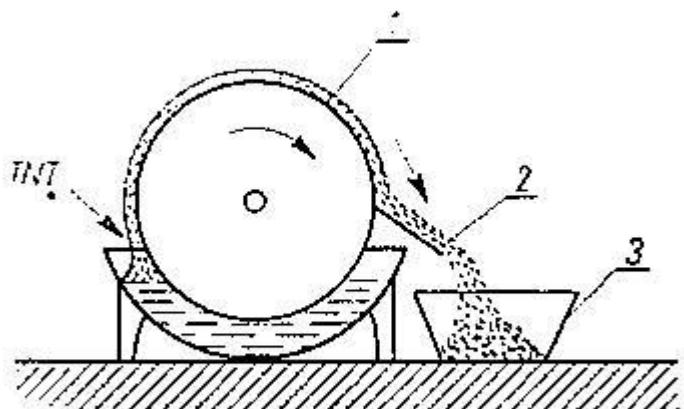
- El cuerpo del cilindro esta fabricado en acero inoxidable y dispone de una camisa refrigerante exterior.
- Esta diseñado tanto para el uso en continuo como para procesos por lotes.
- La cuchilla separadora está diseñada de forma que al modificar su posición se puede obtener distintos tamaños de partícula.
- Cerrado completamente para no exponer el producto al trabajador.



Figura 9. Cilindro de conformado marca SimonDryer.

Tabla 15. Catálogo de tamaños de rodillos.

Item No.	Specification mm	Motor Power Kw	hot Barrel speed r/min	Size (mm)		
				L	W	H
DZ-1	600x600	2.2-3	0.3-15	2400	1480	1410
DZ-2	800x1200	3-5.5	0.3-15	3360	2000	1600
DZ-4.5	1200x1200	5.5-7.5	0.3-15	3730	2250	2050
DZ-7.5	1400x1800	5.5-11	0.3-15	4460	2460	2350
DZ-9	1600x1800	7.5-15	0.3-15	4460	2600	2550
DZ-22	2300x3000	11-18.5	0.3-15	7200	3900	2350



Flaking of TNT.

Figura 10. Rodillo de conformado según el antiguo método francés.

## 7.8. *Empaquetadora*

Para el proceso de llenado de sacos se hará uso de una llenadora-pesadora EB – 50/N de gran precisión, adaptable a sacos de boca abierta, bolsas, cajas y bidones de 1 a 10 kg. La regulación de la carga se realiza mediante obturador de accionamiento neumático de gran precisión, manejando errores de  $\pm 10$  g. El sistema electrónico está gobernado por PLC. Se realizan ejecuciones especiales para zonas antideflagrantes y pueden equiparse con sistemas de cerrado de cajas, sistema totalmente estanco para polvos tóxicos o corrosivos, etc...



Figura 11. Llenadora – pesadora EB – 50/N

El suministro de TNT a la llenadora pesadora realizará desde una tolva colocada en la parte superior de la maquina. La tolva será de aproximadamente 1 m<sup>3</sup> de capacidad, fabricada en polímero PVC reforzado. La parte superior estará abierta

para la recepción del producto desde un elevador de canjilones. El cono inferior tendrá un Angulo de 45º.



Figura 12. Tolva de adición de sólidos.

Las dimensiones totales del equipo serán de 2100 x 1100 x 3450 mm (con tolva incluida).

## 7.9. Torre de refrigeración

Para el cálculo de la potencia de la torre de refrigeración se observará los máximos calores producidos en todo el proceso. Los calores de dilución son los más elevados, no obstante y dado que no se necesita un tiempo exacto para el vertido de los ácidos en el contenedor, se calculará la potencia de la torre según la necesidad de refrigeración en los reactores. Atendiendo a los caudales de calor en los reactores, el calor generado en la primera nitración es el más elevado y el servirá como base de cálculo.

$$P = 858871,58 / 3600 \text{ s} = \mathbf{238.57 \text{ kW}} \text{ generados en la 1º nitración.}$$

Necesitaremos pues de una torre con una potencia igual o superior a la necesitada. Observando los catálogos se ha elegido la siguiente torre:

Torre de refrigeración abierta **EWK 255** marca **J. Negre C.**

Características:

- Carcasa de poliéster auto-portante
- Internos en materiales plásticos
- Bajo consumo
- Fácil instalación
- Amplia gama desde 4 a 500 m<sup>3</sup>/h

Tabla 16. Tamaños y potencia de torres.

Modelo	*Disipación	Peso vacío	Peso servicio	Potencia ventilador	Largo	Ancho	Alto
	Kw.	Kg.	Kg.	Kw.	mm.	mm.	mm.
EWK 036	46	59	155	0.33	610	610	1590
EWK 064	103	130	295	0.55	812	812	2020
EWK 100	174	200	450	1.0	1020	1020	2320
EWK 144	260	315	855	2.2	1220	1220	2620
EWK 225	407	485	1445	3,0	1534	1534	2660
EWK 324	581	660	1925	4,0	1825	1825	2890
EWK 441	785	730	2890	5,5	2140	2140	2940
EWK 576	1046	850	3350	5,5	2440	2440	3425
EWK 680	1234	1450	4700	7,5	3010	2260	3920



Figura 13. Torre de refrigeración EWK

Se instalarán dos equipos como este en el edificio de nitración y uno en el edificio de purificación

## 8. Trasportes internos

### 8.1. *Elevador de canjilones*

Para el transporte del TNT en copos desde la cuba de lavado hasta el secador y del el rodillo de conformado hasta la tolva de la empaquetadora se hará uso de un elevador de canjilones cuyas características son las siguientes:

- Estructura: Robusta construcción de costados, sin mantenimiento, en perfil de acero especial con perforación sistemática. De este modo es posible sujetar todos los accesorios y patas de apoyo en un sitio cualquiera. La mercancía se transporta en el ramal superior de un modo deslizante sobre una base de chapa de acero. En el ramal inferior el transporte tiene lugar de un modo rodante. Las cintas pueden suministrarse en diversas calidades y composiciones de las superficies, según el fin para que se las determine.

El motor propulsor se enchufa directamente sobre el tambor propulsor y se encuentra al costado del transportador. Todos los elementos del transportador corresponden a las reglas válidas de la técnica y a las prescripciones preventivas de accidentes. Estructura modular del transportador, por lo cual es posible una ampliación sencilla.

- Accionamiento: Motor reductor con árbol hueco lateral contra tambor de cinta revestido con goma.
- Equipo adicional:
  - o Calidades especiales de las cintas
  - o Velocidades regulables del transportador
  - o Conexión eléctrica con guardamotor
  - o Cable, enchufe
  - o Pintura de color a elección

Tabla 17. Características elevador de cangilones.

Accionamiento	Motor reductor trifásico 220/380V, 50Hz, IP 54
Cinta	2 capas de tejido de poliéster, cara superior lisa, revestida de PVC, resistente al aceite y la grasa
Velocidad transp.	Estándar 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,8; 1,0 m/s. Volumen de plato de 2 litros.
Pintura	Electrostática de dos capas, RAL 5010



Figura 14. Elevador de cangilones.

## **8.2. Carretilla elevadora**

Se hará uso de una carretilla elevadora para transportar el TNT cristalizado desde el edificio de nitración al edificio de purificado en un contenedor, así como para trasportar los palés con el TNT ya empaquetado a la zona de almacén.

- Características:

- 1)** Buena estabilidad, sistema de frenado activado hidráulicamente, respuesta rápida y alta sensibilidad.
- 2)** Mástil con amplia visibilidad y espacio entre dientes ajustable hacen que la operación sea más fácil y flexible.
- 3)** Diseño aerodinámico amplía el espacio de operación y reduce el cansancio del operador.
- 4)** Sistema de entrada de aire elevado previene de la entrada de polvos. El filtro de aire secundario mejora la calidad del aire succionado y prolonga la vida del motor.
- 5)** El aceite en el sistema hidráulico es proporcionado por una bomba doble y una bomba simple que hace que el sistema sea más estable y confiable.
- 6)** Las ruedas frontales dobles mejoran la seguridad al viajar.
- 7)** Transmisión hidráulica con nuevo diseño con par de torsión amplio y alta confiabilidad.
- 8)** Motor Chaochai 6102 de muy alta potencia.
- 9)** El cilindro es montado transversalmente al eje de dirección, de esta forma el ángulo de giro es más amplio y el radio de giro es más pequeño.

Tabla 18. Características carretilla elevadora.

Tipo de motor	Motor diesel
Índice de carga (kg)	10000
Centro de carga (mm)	600
Altura máx. de alzado (mm)	3000
Altura de alzado libre (mm)	100
Dimensiones de la horca (mm)	1200x175x80
Ángulo de inclinación del mástil (grados)	6/12
Radio de giro mín. (mm)	4000
Ancho de intersección mín. (mm)	3540
Velocidad de transportación máx. (carga completa/sin carga) (Km/h)	25/27
Velocidad de alzado máx. (carga completa/sin carga) (mm/s)	310/350
Gradeabilidad máx. (%)	20
Sobresalientes frontales (mm)	720
Sobresalientes traseros (mm)	780
Peso de la máquina (kg)	12000
Ancho de la banda de rodamiento (frontal/trasera)	1600/1700
Distancia entre ejes (mm)	2800
<b>Dimensiones generales</b>	
Longitud general (con horca) (mm)	5500
Ancho general (mm)	2240
Altura (Mástil levantado) (mm)	2850
Altura del soporte de seguridad (mm)	2600
<b>Distancia a tierra mín.</b>	
Mástil (mm)	240
Estructura (mm)	300



Figura 15. Carretilla elevadora marca CAT.

## 9. Calculo de tuberías y potencia de bombas

En este apartado se explicará los detalles de los cálculos de tuberías y potencias de bombas necesarias.

Atendiendo en un primer momento a los materiales de las tuberías los posibles a elegir son los siguientes:

- Tubería de cobre: Es el más resistente, se corta mediante un elemento denominado corta-cobre y puede complementarse con dispositivos en forma de L, racores, etc. Es resistente a ácidos como el clorhídrico, pero es atacado por ácido nítrico y mezclas sulfonítricas. Esto y alto precio que alcanza en el mercado actualmente descartan esta opción.
- Tubería de plomo: Son tuberías totalmente desaconsejadas debido a la poca resistencia que presentan a la corrosión cuando circulan fluidos a alta temperatura, además el plomo es un material tóxico muy contaminante y tóxico para el ser humano.
- Tubería de PVC: La utilización de tuberías de tipo PVC es limitada, esto se debe que las altas temperaturas ( $180^{\circ}\text{C}$ ) suelen alterar el material; a su vez las bajas temperaturas originan rigidez en el plástico y lo convierten mucho más sensible a los golpes, a pesar de que ninguno de estos inconvenientes nos afecta en nuestro proceso y de que el PVC es un material “barato”, éste es descartado por motivos obvios descritos más abajo.
- Tubería de Acero Inoxidable: Es el material idóneo para el transporte de sustancias ácidas, debido a su higiene, sus buenas propiedades ante la corrosión y sus propiedades mecánicas.

Se recomienda usar, pues, cualquier acero de la serie AISI 300 o AISI 400. En cuanto al espesor se tomará el *Extra Strong*. Los tamaños y diámetros están normalizados.

## 9.1. Diámetro de las tuberías

Para el cálculo del diámetro de la tubería se ha recurrido a una ecuación sencilla derivada del balance de materia del tipo  $Q = v \cdot A$ , todas las variables en el S.I., lo que resulta caudales en  $\text{m}^3/\text{s}$ , velocidad en  $\text{m/s}$  y área en  $\text{m}^2$ .

En cuanto al transporte de los fluidos por las tuberías se ha considerado que las velocidades de las sustancias inflamables, corrosivas y explosivas no superen velocidades de 2 m/s, situándolas entre 1 y 2. Para líquidos acuosos y agua las velocidades recomendadas de transporte son de 1 – 3 m/s. Para todos los efectos y casos se ha tomado una velocidad inicial de cálculo de **1,5 m/s**, asegurándonos con este valor rangos seguros de transporte y de eficiencia energética.

Sabiendo las materias primas salientes y entrantes de cada reactor (o contenedor) y estableciendo un tiempo de llenado y descarga de **15 minutos**, se ha calculado el caudal circulante por cada tubería con ayuda de la formula antes mencionada.

Tabla 19. Diámetro de tubería requerido.

Recorrido	kg	$\text{m}^3$	$Q (\text{m}^3/\text{s})$	D (m)
Máximo silo sulfúrico	1142,83	0,6211	0,00069	0,024
Máximo silo nítrico 66%	677,17	0,5062	0,00056	0,022
Máximo silo nítrico puro	395,44	0,2614	0,00029	0,016
Máximo agua	-	1,1453	0,00127	0,033
Máximo disol. Sulfito	-	1,1453	0,00127	0,033
Máximo silo tolueno	650,00	0,7498	0,00083	0,027
Máximo contenedor				
premezcla	1580,03	0,9725	0,00108	0,030
Regreso ácidos gastados N1	1301,14	0,7838	0,00087	0,027
Regreso ácidos gastados N2	1069,78	0,6458	0,00072	0,025
Regreso ácidos gastados N3	1741,06	0,9854	0,00109	0,030
N1 --> N2 (MNT)	886,93	0,7632	0,00085	0,027
N2 --> N3 (DNT)	1142,83	0,7431	0,00083	0,026
N3 --> cristalizador (TNT)	1168,66	0,7066	0,00079	0,026

Secador --> rodillo 1122,38 0,67858776 0,00075 0,025

Puesto que por muchas de las tuberías circularán distintos caudales, se han calculado a partir del caudal máximo que vaya a circular por ésta. Un ejemplo es el caso del “máximo contenedor premezcla” que indica el caudal máximo que va a descargarse del contenedor de premezcla o diluidor. Esta mezcla, que son 1580 kg, irá a parar en este caso al primer nitrador y con los cálculos derivados de este caudal que, como se ha mencionado, es el mayor de todos los que deriven de este contenedor, se asegura el suministro de las mezclas sulfonítricas para la segunda y tercera nitración, aunque los susodichos caudales discurran por diámetros más grandes de lo requerido. Con esta medida evitamos la instalación de múltiples tuberías para solo colocar una de diámetro mayor. Casos idénticos a éste son los que ocurren en los silos, que han de suministrar diversos caudales.

Obtenidos los diámetros óptimos de tubería se garantiza el suministro del caudal requerido. No obstante las tuberías con los diámetros obtenidos, en el caso de pedirlas a una empresa por encargo, resultarían demasiado costosas. Por esta razón se compararán los diámetros obtenidos con los normalizados y que generalmente son suministrados por los comerciales. Los diámetros comerciales (en pulgadas) elegidos son:

Tabla 20. Diámetros comerciales.

Recorrido	D (m)	D (")	D comercial (")	v final (m/s)
Máximo silo sulfúrico	0,024	0,95	1,00	1,36
Máximo silo nítrico 66%	0,022	0,86	1,00	1,11
Máximo silo nítrico puro	0,016	0,62	0,75	1,02
Máximo agua	0,033	1,29	1,50	1,12
Máximo disol. Sulfito	0,033	1,29	1,50	1,12
Máximo silo tolueno	0,027	1,05	1,25	1,05
Máximo contenedor premezcla	0,030	1,19	1,25	1,36
Regreso ácidos gastados N1	0,027	1,07	1,25	1,10

Regreso ácidos gastados N2	0,025	0,97	1,00	1,42
Regreso ácidos gastados N3	0,030	1,20	1,25	1,38
N1 --> N2 (MNT)	0,027	1,06	1,25	1,07
N2 --> N3 (DNT)	0,026	1,04	1,25	1,04
N3 --> cristalizador (TNT)	0,026	1,02	1,25	1,00
Secador --> rodillo	0,025	0,996	1,00	1,49

Obtenidos los diámetros comerciales se ha procedido al cálculo de la velocidad resultante, manteniendo el caudal constante, para verificar que ninguna de las velocidades supera los valores deseados.

## 9.2. *Calculo de las pérdidas de carga*

Las pérdidas de carga en la instalación se deben principalmente a accesorios en las tuberías, como codos y tes (pérdidas secundarias) y a la rugosidad de la tubería y por regímenes turbulentos (pérdidas primarias).

En un primer lugar se calculará las pérdidas secundarias derivadas de accesorios colocados en las tuberías. Las pérdidas derivadas de codos y tes se introducirán en los cálculos como **longitudes equivalentes**.

$$h_s = K \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Con unos valores de K de 0,75 y 1,8 para codos y tes respectivamente, se obtienen las siguientes longitudes equivalentes para los tramos de tuberías dados, la cual se ha sumado a la altura a la que hay que elevar el fluido:

Tabla 21. Accesorios y pérdidas secundarias.

Recorrido	altura			altura equivalente (m)
	real	codos	tes	
Tolueno --> N1	3	2	0	3,17
Sulfúrico --> diluidor	2	2	1	2,38
Nítrico --> diluidor	2	2	1	2,38
Nítrico 66 --> diluidor	2	1	1	2,29
diluidor --> N1	3			
Diluidor --> N2	3	3	2	3,67
Diluidor --> N3	3			
N1 --> N2	3	2	0	3,17
N2 --> N3	3	2	0	3,17
N3 --> cristalizador	3	2	0	3,17
Secador --> rodillo	1	2	0	1,17
Regreso de ácidos gastados	2	2	0	2,17

El número de codos y tes deriva de un diseño de plano de tubería preliminar que da un número aproximado de accesorios.

Calculadas las pérdidas de carga secundarias y obtenida la longitud equivalente se procederá al cálculo de pérdidas primarias con la ecuación de Darcy-Weisbach y diagrama de Moody.

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

El cálculo de densidades se ha realizado a partir de los porcentajes del balance de materia y las viscosidades de las mezclas sulfonítricas se han obtenido de tablas de los anexos.

Tabla 22. Regímenes de flujo y factores de fricción.

Recorrido	viscosidad				
	fluído (Pa·s)	D ("")	e/D	Re	f
Tolueno --> N1	0,00059	1,25	0,00157	49089,12	0,026
Sulfúrico --> diluidor	0,022	1,00	0,00197	5,70	11,237
Nítrico --> diluidor	0,000746	0,75	0,00262	39365,27	0,029
Nítrico 66 --> diluidor	0,0025	1,00	0,00197	15086,61	0,026
Diluidor --> N1	0,0075	1,25	0,00157	9387,01	0,034
Diluidor --> N2					
Diluidor --> N3					
N1 --> N2	0,0005	1,25	0,00157	79039,67	0,025
N2 --> N3	0,000654	1,25	0,00157	77862,55	0,025
N3 --> cristalizador	0,01086	1,25	0,00157	7492,10	0,040
Secador --> rodillo	0,01086	1,00	0,00197	5756,33	0,039
Regreso ácidos gastados N1	0,0055	1,25	0,00157	10317,42	0,033
Regreso ácidos gastados N2	0,013	1,00	0,00197	4583,38	0,041
Regreso ácidos gastados N3	0,022	1,25	0,00157	3526,27	0,044

Tabla 23. Pérdidas de carga totales.

Recorrido	Altura + Leq	dist.	Perdida de	
	(m)	Horizontal (m)	hf (m)	carga total (m)
Tolueno --> N1	3,17	15	0,83	4,01
Sulfúrico --> diluidor	2,38	2	183,34	185,71
Nítrico --> diluidor	2,38	2	0,35	2,73
Nítrico 66 --> diluidor	2,29	2	0,27	2,57
Diluidor --> N1	3,67	28	3,24	6,91
Diluidor --> N2		-		
Diluidor --> N3		-		
N1 --> N2	3,17	10	0,60	3,77
N2 --> N3	3,17	10	0,57	3,74
N3 --> cristalizador	3,17	10	2,05	5,22
Secador --> rodillo	1,17	5	1,07	2,24
Regreso ácidos gastados N1	2,17	28	1,95	4,12
Regreso ácidos gastados N2	2,17	28	4,95	7,12
Regreso ácidos gastados N3	2,17	28	4,06	6,23

En la primera tabla se ha calculado el factor  $f$  de Moody a partir del número de Reynolds y una rugosidad absoluta del acero inoxidable de  $e = 0,05$  mm. Las velocidades son las obtenidas en la tabla de diámetros óptimos y la longitud de las tuberías deriva de distancias entre equipos supuestas, según un plano aproximado de cómo podrían situarse los equipos.

Como puede observarse, en los recorridos del diluidor (o contenedor de premezcla) a los reactores solo se ha tenido en cuenta el viaje más “largo” que se ha de recorrer, que corresponde con el trayecto del contenedor de premezcla al primer nitrador. En esta tubería, como se había explicado antes se ha obtenido un diámetro según el mayor caudal que fuera a circular. En el caso del cálculo de la pérdida de carga se ha considerado también el mayor trayecto, que da con ello la mayor pérdida de carga y con esto, una mayor potencia de bomba requerida. De esta forma se asegura una potencia suficiente para todos los caudales y todas las pérdidas de carga posibles que pudieran ocurrir.

### 9.3. *Potencia de las bombas*

La potencia de las bombas será la misma que las perdidas de carga sufridas en las cañerías. No obstante, no todos los suministradores de bombas dan la potencia de sus productos en metros, si no en watos. Procederemos a continuación al cambio de unidades según la expresión:

$$Potencia = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$$

Atendiendo a los balances de materia, de donde se obtienen las densidades y los caudales, y a la altura a la que se necesita impulsar el fluido, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 24. Potencia requerida.

Recorrido	Potencia (m)	Potencia (W)
Tolueno --> N1	4,01	28,35
Sulfúrico --> diluidor	185,71	2311,07
Nítrico --> diluidor	2,73	11,75
Nítrico 66 --> diluidor	2,57	18,93

diluidor --> N1	6,91	118,85
Diluidor --> N2		
Diluidor --> N3		
Secador --> rodillo	2,24	27,37
Regreso ácidos gastados N1	4,12	58,42
Regreso ácidos gastados N2	7,12	82,89
Regreso ácidos gastados N3	6,23	118,13

Nótese la falta de los recorridos de los productos de nitración entre los reactores (recorridos N1 → N2 y sucesivos). Esto se debe a que tanto los nitroderivados como los ácidos gastados se descargarán por la parte inferior del reactor, haciendo uso de una única bomba. Esta bomba estará diseñada para mover los caudales de ácidos gastados, caudales mucho más grandes, viscosos y pesados. La potencia derivada de estos cálculos dará suficiente energía para mover también los caudales de los nitrocompuestos. De esta manera se ahorra la instalación de dos bombas en cada reactor o nitrador para solo colocar una en cada.

#### **9.4. Elección de las bombas**

Para transportar el fluido por las tuberías se emplearán bombas centrífugas, ya que son las más adecuadas para este tipo de trabajo.

Una bomba centrífuga es un tipo de bomba hidráulica que transforma la energía mecánica de un impulsor rotatorio llamado rodete en energía cinética y potencial requeridas. El fluido entra por el centro del rodete, que dispone de unos álabes para conducir el fluido, y por efecto de la fuerza centrífuga es impulsado hacia el exterior, donde es recogido por la carcasa o cuerpo de la bomba, que por el contorno su forma lo conduce hacia las tuberías de salida o hacia el siguiente rodete (siguiente etapa).

Aunque la fuerza centrífuga producida depende tanto de la velocidad en la periferia del impulsor como de la densidad del líquido, la energía que se aplica por unidad de masa del líquido es independiente de la densidad del líquido. Por tanto, en una bomba dada que funcione a cierta velocidad y que maneje un volumen definido de líquido, la energía que se aplica y transfiere al líquido, (en Pascales, Pa, metros de columna de agua m.c.a. o o pie-lb/lb de líquido) es la misma para

cualquier líquido sin que importe su densidad. Tradicionalmente la presión proporcionada por la bomba en metros de columna de agua o pie-lb/lb se expresa en metros o en pies y por ello que se denomina genéricamente como "altura", y aun más, porque las primeras bombas se dedicaban a subir agua de los pozos desde una cierta profundidad (o altura).

Las bombas centrífugas tienen un uso muy extendido en la industria ya que son adecuadas casi para cualquier uso. Las más comunes son las que están construidas bajo normativa DIN 24255 (en formas e hidráulica) con un único rodetes, que abarcan capacidades hasta los 500 m<sup>3</sup>/h y alturas manométricas hasta los 100 metros con motores eléctricos de velocidad normalizada. Estas bombas se suelen montar horizontales, pero también pueden estar verticales y para alcanzar mayores alturas se fabrican disponiendo varios rodetes sucesivos en un mismo cuerpo de bomba. De esta forma se acumulan las presiones parciales que ofrecen cada uno de ellos. En este caso se habla de bomba multifásica o multietapa, pudiéndose lograr de este modo alturas del orden de los 1200 metros para sistemas de alimentación de calderas.

Constituyen no menos del 80% de la producción mundial de bombas, porque es la más adecuada para mover más cantidad de líquido que la bomba de desplazamiento positivo.

No hay válvulas en las bombas de tipo centrífugo; el flujo es uniforme y libre de impulsos de baja frecuencia.

Las bombas a elegir son las siguientes:

Para los tramos de tubería que necesitan una potencia menor a 60 W, utilizaremos la bomba centrífuga marca **Salmson** monofásica que opera a una potencia de **60 W**.

Características.

- Construida con el cuerpo en hierro fundido.
- Impulsor en noryl.
- Eje en acero inoxidable.
- Sello mecánico simple.

- Provisto con motor eléctrico de 0,25 HP -220 V-50 Hz - 2900 rpm – IP 54.

En total harán falta 5 bombas de este tipo.



Figura 16. Bomba Salmson de 60W.

Para los tramos con mayor demanda de potencia se hará uso de bomba centrífuga marca Motorarg monofásica. Características:

- Impulsor de bronce.
- Eje y rodete en acero inoxidable.
- Máxima estanqueidad.
- Porta sello y eje de acero inoxidable.
- Potencia de hasta 150 W para diversos DN.
- Motor eléctrico monofásico de 0,5 HP - 220 V - 50 HZ - 2900 rpm - IP 68.



Figura 17. Bomba Motorarg de 150W.

Para el caso especial, los caudales de ácido sulfúrico desde el silo hasta el contenedor de premezcla, se hará uso de una bomba diseñada para caudales altamente viscosos. La bomba Salmson Type R tiene las siguientes características:

- Cuerpo, eje y rodetes fabricados en acero inoxidable.
- Caudales de hasta 350 m<sup>3</sup>/h.
- Puede trabajar con viscosidades de hasta 200.000 cP.
- Alta impermeabilidad.



Figura 18. Bomba Salmson para fluidos viscosos.

## 10. Control y seguridad en los procesos.

Con la finalidad de hacer más seguro el proceso de obtención del producto se ha establecido cierto grado de control y automatización en la línea. Con esto se consigue:

- Mejor control en los procesos, evitando situaciones indeseadas como picos de temperatura, concentraciones elevadas o sobrepresiones.
- Reducir el número de operarios en la línea de producción.
- Reducir la exposición de los operarios a las materias primas y productos generados en el proceso.

Las medidas que se van a tomar son las siguientes:

- Lazos de control.
- Válvulas de seguridad.
- Sala de control.

### 10.1. Lazos de control.

Los lazos de control feedback o de retroalimentación se basan en la captura de información sobre una variable para actuar sobre un elemento “aguas arriba” que modifica un parámetro con el objetivo de llevar la variable a un rango de valores establecidos, o set-point.

En el presente proyecto no se estudiará que tipo de controlador se instalará (P,PI,PID,...), ni se calcularán los parámetros de control (banda proporcional, acción integradora,...) simplemente se señalarán los procesos y situaciones donde conviene instalar los lazos.

Algunos de los lazos son los siguientes:

- **Lazo de control en el contenedor de premezcla.**

La dilución del ácido sulfúrico y del nítrico puro para la preparación de las mezclas sulfonítricas resulta un proceso muy exotérmico en la que hay que evacuar una gran cantidad de calor. No obstante, este gran calor generado puede también ayudarnos a conseguir la temperatura necesaria en la mezcla para su posterior adición en la nitración.

Para obtener la temperatura necesaria se dispondrá de un sensor de temperatura en el contenedor de premezcla, conectado a una válvula de control a la tubería de suministro de ácido sulfúrico, ya que este caudal será el que más calor genere. El set point se variará según la mezcla nitrante a preparar, ya sea desde el mismo controlador del dispositivo o desde la sala de control. En cualquier caso se introducirá manualmente.

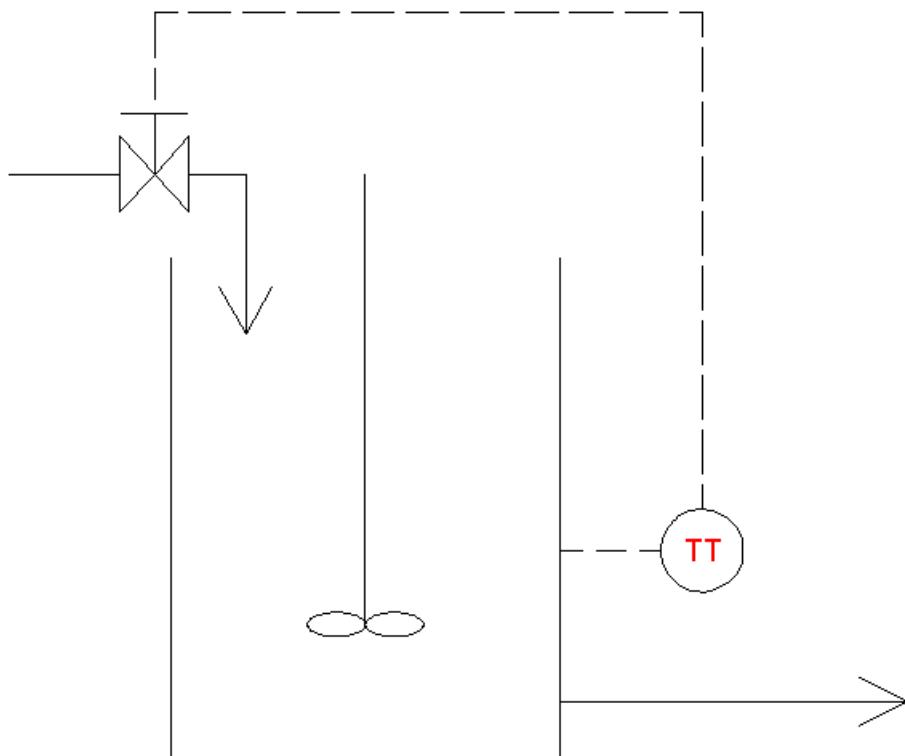


Figura 19. Lazo de control propuesto para contenedor de premezcla.

Manteniendo un caudal constante de agua de refrigeración y de ácido nítrico, la temperatura se controlará por medio del caudal de ácido sulfúrico.

- **Lazo de control en los nitradores.**

Puesto que las nitraciones son reacciones exotérmicas se establecerá un lazo de control similar al instalado en el contenedor de premezcla. Al trabajar en un reactor discontinuo no se puede actuar sobre las corrientes de reactivos, ya que estos ya están introducidos, por esta razón se actuará directamente sobre la corriente de refrigeración, como muestra la figura 20. Con esto se pretende homogenizar la temperatura dentro del reactor y evitar posibles picos en zonas concretas.

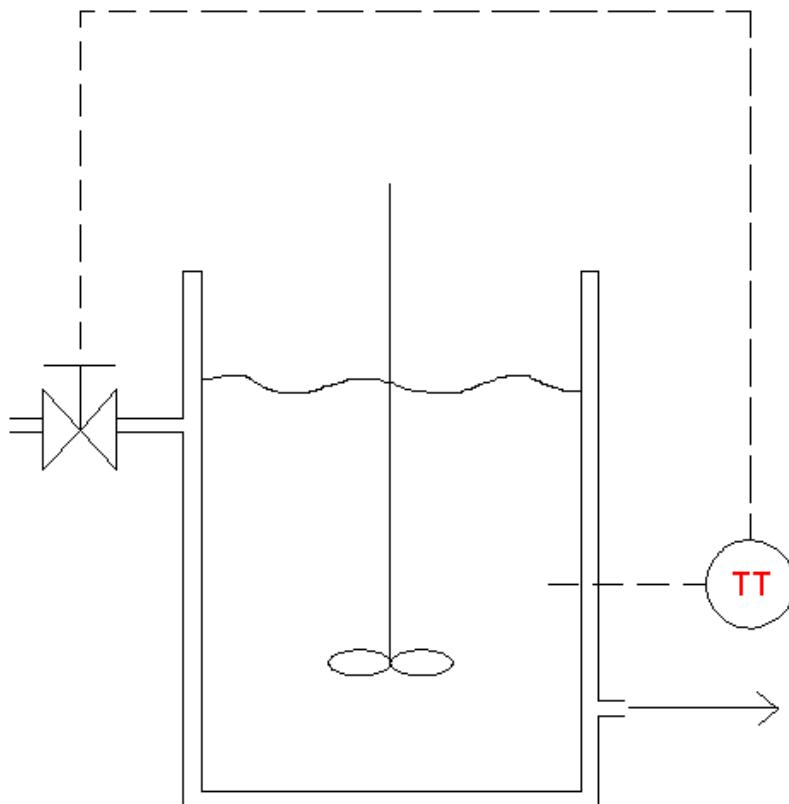


Figura 20. Lazo de control propuesto para nitrador.

Las válvulas de control elegidas para estos dos procesos son válvulas de mariposa de la marca Compás S.L., de acero inoxidable y que ofrecen baja pérdida de carga:



Figura 21. Válvulas de mariposa Compás para el control de caudales.

## 10.2. Válvulas de seguridad

Se ha explicado que en el tercer nitrador ocurren las reacciones más agresivas en cuando a nitración y puede ocurrir que se generen productos de nitración gaseosos no deseados, como monóxido de carbono o tetranitrometano.

En un primer momento se estableció como medida de seguridad el paso de nitrógeno gas para evitar la formación de atmósferas explosivas. Como segunda medida de seguridad se establecerá una válvula de seguridad en la cubierta del tercer nitrador, para en caso de sobrepresiones por generación de gases, se pueda evacuar de una forma segura. Este gas será conducido a través de una chimenea a un pequeño post quemador situado a las afueras del edificio de nitración.

Las dimensiones y cálculos de la válvula y del postquemador no se pueden reflejar en el presente informe ya que se desconoce completamente la generación de gases explosivos formados en la tercera nitración. Si este riesgo llegará a resultar un problema grave se deberá tomar la medida aquí indicada, siempre atendiendo a los valores empíricos obtenidos tras la puesta en funcionamiento de la planta. Este apartado constituye pues una solución a un **possible problema**, pero no se indica que su suceso sea seguro.

### **10.3. Sala de control**

Según el planteamiento del método productivo descrito en este documento habría que disponer de una multitud de operarios encargados de la apertura y cierre de válvulas y alerta de las condiciones de operación de los reactores. Si bien algunas de las válvulas de control antes explicadas ayudan a la automatización de la planta, existen muchos procesos que requieren de la atención continua de los trabajadores.

La obtención de las mezclas sulfonítricas, por ejemplo, resulta un proceso largo, donde dependiendo de la procedencia de los ácidos (si son gastados, frescos, vienen con mayor o menos concentración...) puede generarse situaciones caóticas a la hora de calcular las cantidades de ácidos frescos a añadir.

Se propone para casos como estos la instalación de una sala de control en el edificio de nitración. De esta forma, el operario encargado de las reacciones podrá asegurarse de las válvulas que habrá de abrir y cerrar y hacerlo desde la misma sala, sin necesidad de recorrer la fábrica.

Esta medida evitará la exposición del empleado a posibles ambientes nocivos y la reducción del número de empleados.

## 11. Régimen de fabricación

Con el fin de poder cubrir la demanda solicitada, y poder amortiguar posibles fluctuaciones de esta, el régimen de funcionamiento de la planta será:

- 22 días mensuales, modificables si la demanda es muy elevada.
- Turnos de 8 horas.
- El número de turnos diario dependerá de la sección de trabajo:
  - o En el edificio de nitración se establecerán 2 turnos. Esto incluye: salas de nitración, control y trasportes internos.
  - o En el edificio de purificación y empaquetamiento 2 turnos. Incluye operaciones de lavado, secado, conformado y empaquetado.
  - o En el almacén se establecerán 2 turnos, encargados del transporte, almacenaje y carga del producto en los camiones de recogida.
  - o En el edificio reservado para las oficinas y laboratorio se establecerá 1 turno para las labores administrativas y 2 turnos para el laboratorio de calidad.
  - o Se contratará una empresa de limpieza especial que realizará 2 turnos de limpieza, por la mañana y por la tarde.
  - o La empresa contratada a cargo de la seguridad y vigilancia realizará 3 turnos, cubriendo así las 24 horas del día.

### 11.1. Personal empleado

Horario de oficinas y atención al público:

- El horario de oficinas será de lunes a jueves de 8:00 a 13:00 y de 14:00 a 18:00 y los viernes de 9:00 a 13:00.

- Servicio de limpieza:
  - o Este servicio será subcontratado a una empresa de limpiezas y constará de 2 turnos al día, de lunes a viernes, a realizar en turnos de 6:00 a 14:00 y de 15:00 a 23:00.

## ***11.2. Personal en planta de producción***

En la planta de producción, el personal requerido se explicará edificio por edificio.

- Edificio de nitración: Se dispondrá de un encargado/a por turno, es decir, dos encargados en total. Este controlará el proceso y guiará los productos y reactivos desde una sala de control. A su vez por cada turno habrá 1 operario de mantenimiento que asegure un correcto funcionamiento de la maquinaria (reactores, tanques de premezcla, cristalizador y filtro).
- Edificio de purificación: Se dispondrá de 1 encargado/a de zona y 1 operario de mantenimiento del equipo (cuba de lavado, secador, tambor de conformado, elevador de cangilones y empaquetadora).
- Almacén: 1 encargado/a de almacén cuya función será hacer el recuento de las materias primas que entran y registrar los productos que salen del almacén, así como encargarse de adecuar la sala para el almacenamiento del TNT. Contará con la ayuda de 1 almacenero y una carretilla elevadora que distribuirá los palés y ayudará a cargar los camiones que transporten la mercancía.
- Transportes internos: 1 conductor de carretilla elevadora ayudará a trasvasar el TNT cristalizado desde el edificio de nitración hasta el edificio de purificación. Purificado el TNT, llevará la mercancía al almacén. También colaborará con las tareas de carga y descarga en los muelles y en el almacén.
- Vigilancia: se dispondrá siempre de un guardia de seguridad en el almacén y otro en la entrada de la parcela. A 3 turnos por día, esto es un total de 6 guardias de seguridad. También deberá establecerse rutinas de seguridad y vigilancia durante los fines de semana.

- Control de calidad: 1 técnico de laboratorio por turno se encargará de certificar la calidad del producto y supervisar los procesos en los que se requiera un seguimiento especial. El laboratorio se situará en los sótanos del edificio de oficinas.
- Todos los trabajadores mencionados anteriormente serán dirigidos por un jefe de producción que supervisará el trabajo de los subordinados.

En resumen, el número de trabajadores que se habrá de disponer en la planta de producción es:

Tabla 25.

<b>Tipo trabajador</b>	<b>Cantidad</b>
Encargado/a edificio nitradores	2
Encargado/a almacén	1
Encargado/a purificación	2
Jefe/a producción	1
Operarios de mantenimiento	1
Guardia seguridad	6
Almaceneros	2
Conductores carretillas elevadoras	2
Operarios de laboratorio	2

### **11.3. Oficinas**

- Instalaremos un total de 3 despachos con 1 oficinista cada uno, para atender los pedidos y preguntas de nuestros clientes.
- Además se necesitará de un comercial que se encarguen del marketing y del estudio de mercado a la hora de vender el producto.
- Se dispondrá de un técnico/a informático que se encargará del correcto funcionamiento de los ordenadores.
- También hace falta 1 abogado/a en caso de que se reciba alguna denuncia por parte de algún cliente insatisfecho o accidente.
- Luego está el jefe/a de la empresa, que es el que manda a todos y toma decisiones.
- Los despachos de la oficina serán limpiados por el personal de limpieza, que constará de 3 empleados/as.

En resumen:

Tabla 26.

<b>Tipo trabajador</b>	<b>Cantidad</b>
Oficinista	3
Comercial	1
Técnico/a informático	1
Abogado	1
Jefe/a empresa	1
Personal limpieza	3

## 12. Anexo

Tabla 27. Calores de dilución de mezclas sulfonítricas

TABLE 16  
HEAT OF DILUTION OF NITRATING ACID

Ratio H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HNO <sub>3</sub>	Ratio		Total heat of dilution by adding 500 moles of H <sub>2</sub> O			
	mole	weight	mole	weight %	kcal/mole	kcal/kg
$\frac{100}{0}$	$\frac{100}{0}$	0.0	0.0	18.26	84.4	
		0.5	8.42	14.53	61.5	
		1.0	15.5	11.57	45.1	
		1.5	21.6	9.47	34.3	
		2.0	26.9	8.28	28.0	
		3.0	35.5	6.56	19.7	
$\frac{85.3}{14.7}$	$\frac{90}{10}$	0.016	0.3	15.10	73.6	
		0.435	7.78	12.83	57.7	
		0.943	15.47	10.19	42.1	
		1.56	23.22	8.06	30.2	
		3.41	39.8	5.08	14.9	
$\frac{68.5}{30.5}$	$\frac{78}{22}$	0.015	0.3	13.23	68.5	
		0.277	5.4	11.70	57.5	
		0.631	11.5	10.15	46.1	
		1.282	20.9	7.65	31.5	
		2.14	30.6	5.78	20.9	
		3.485	41.8	4.10	12.3	
$\frac{54.7}{45.3}$	$\frac{65.3}{34.7}$	0.014	0.3	11.67	64.3	
		0.418	8.4	9.66	48.9	
		0.818	15.2	8.34	39.1	
		1.47	24.4	6.14	25.7	
		2.91	38.9	3.95	15.4	
$\frac{39.2}{60.8}$	$\frac{50}{50}$	0.013	0.3	10.13	59.9	
		0.27	5.97	8.90	49.4	
		1.008	19.15	6.16	29.5	
		1.93	31.2	4.35	17.6	
		3.03	41.6	3.03	10.3	
$\frac{0}{100}$	$\frac{0}{100}$	0.0	0.0	7.43	53.4	
		1.0	22.2	4.16	23.2	
		2.0	36.4	2.65	12.1	
		3.0	46.2	1.72	6.7	

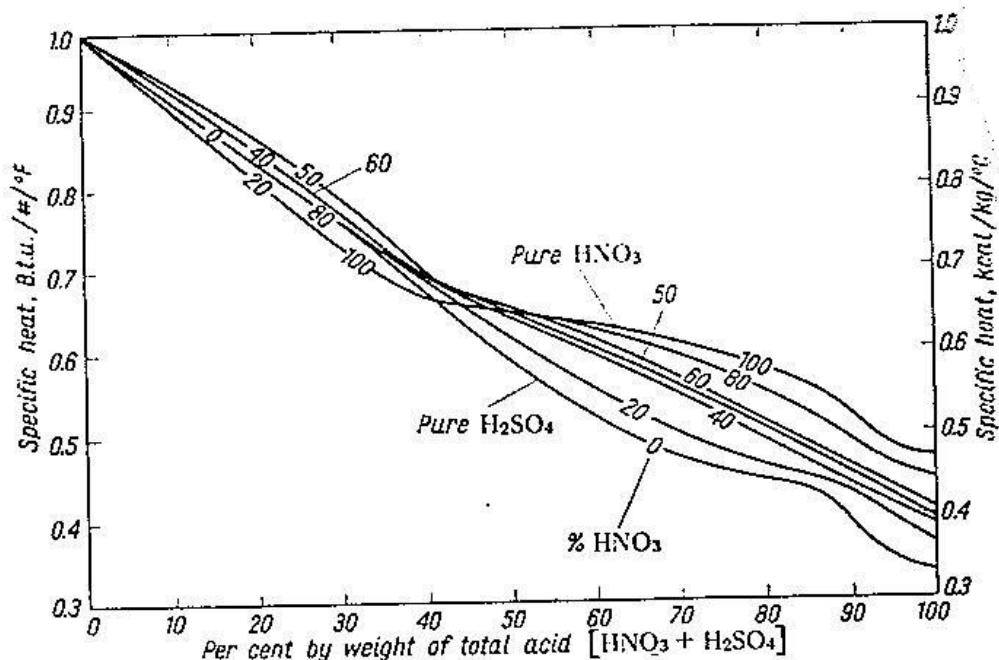


Fig. 22. Specific heat of nitric acid, sulphuric acid, and water mixtures (McKinley and Brown [6]).

Figura 22. Capacidad calorífica específica de mezclas sulfonítricas.

Tabla 28. Valores de K para diversos accesorios.

Accesorios	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2.5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0.2	13
Válvula de compuerta (abierta $\frac{3}{4}$ )	1.15	35
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{2}$ )	5.6	160
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{4}$ )	24.0	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
"T" por la salida lateral	1.80	67
Codo a $90^\circ$ de radio corto (con bridas)	0.90	32
Codo a $90^\circ$ de radio normal (con bridas)	0.75	27
Codo a $90^\circ$ de radio grande (con bridas)	0.60	20
Codo a $45^\circ$ de radio corto (con bridas)	0.45	-
Codo a $45^\circ$ de radio normal (con bridas)	0.40	-
Codo a $45^\circ$ de radio grande (con bridas)	0.35	-

## CHEMISTRY AND TECHNOLOGY OF EXPLOSIVES

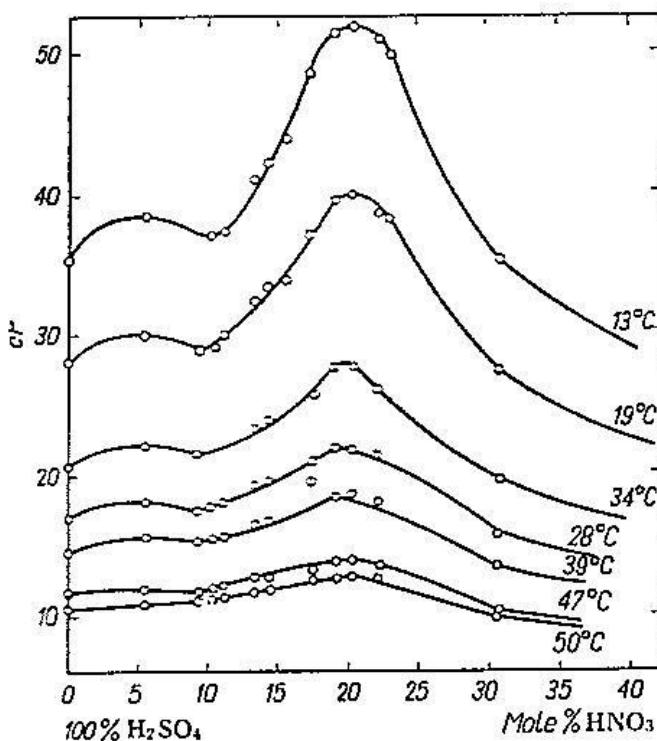


FIG. 14. Viscosity of solutions  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ . Change in viscosity with increase of  $\text{HNO}_3$  content at various temperatures (Swinarski and Piotrowski [52]).

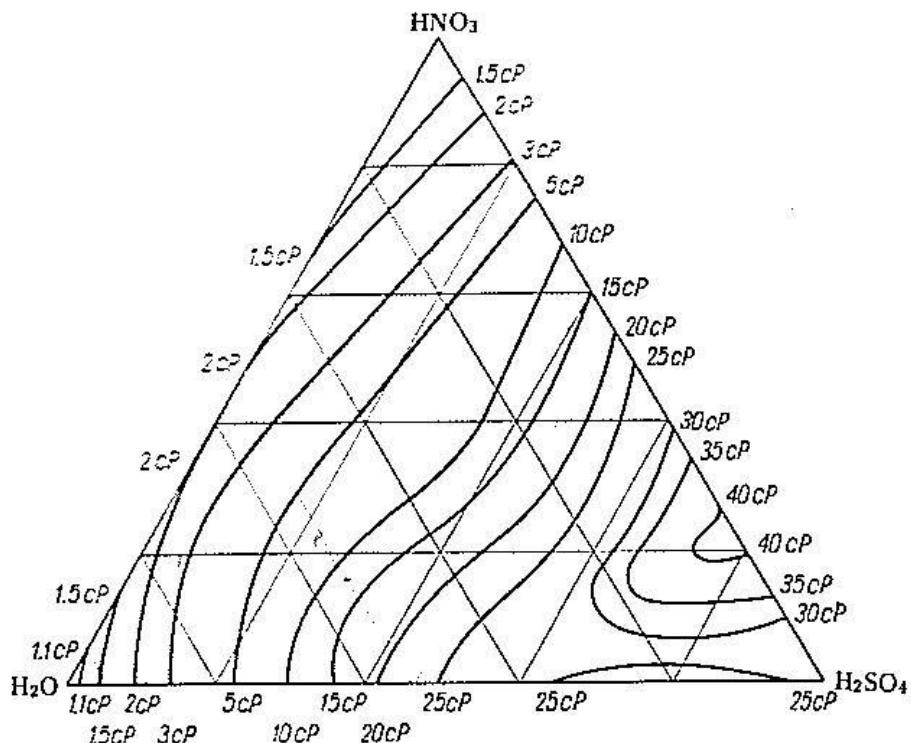


FIG. 15. Curves of equal viscosities of the solutions  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  (Hackel, T. Urbański, Kutkiewicz and Sterniński [80]). (Composition in mole %)

Figuras 23 y 24. Gráficas para el cálculo de la viscosidad de mezclas sulfonítricas.

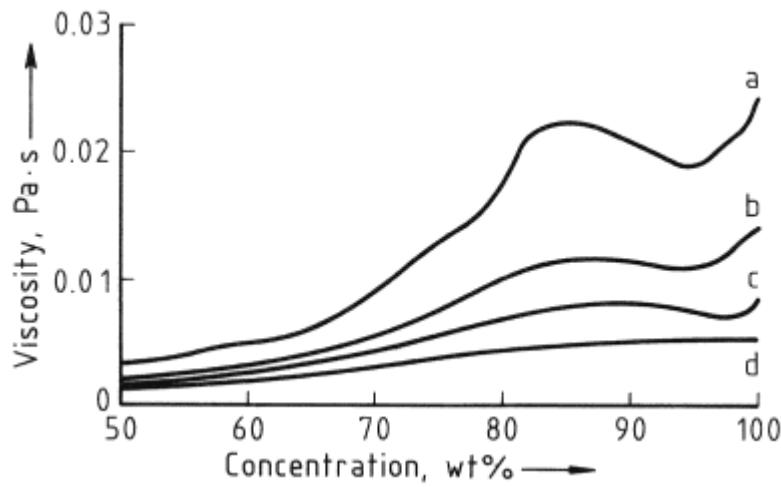


Figura 25. Viscosidad del ácido sulfúrico según la concentración.

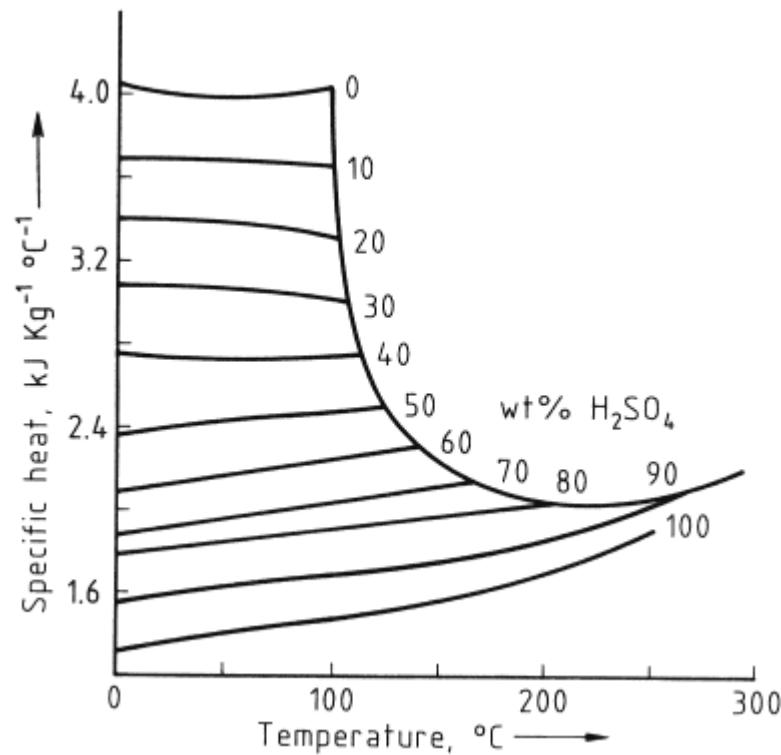


Figura 26. Capacidad calorífica específica del ácido sulfúrico según la concentración y temperatura.

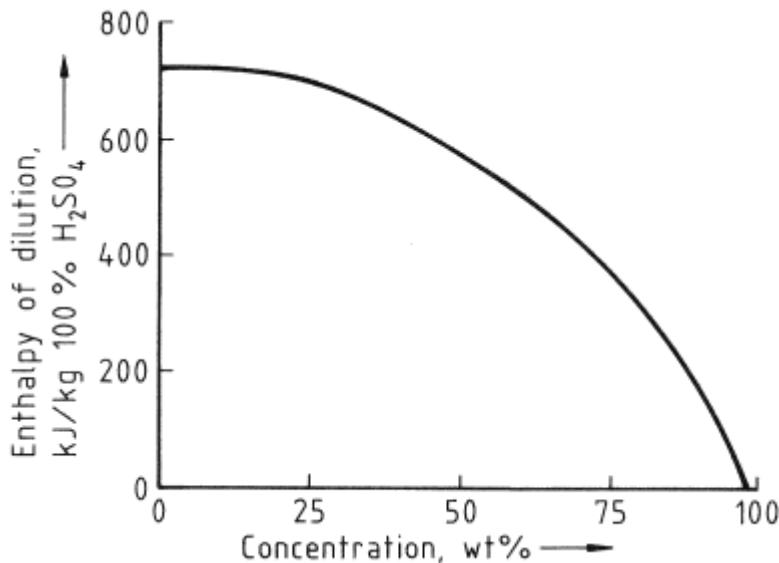


Figura 27. Calor de dilución del ácido sulfúrico según la concentración.

Tabla 29. Propiedades del ácido nítrico según la concentración.

$\text{HNO}_3$ concentration, wt%	Density (20 °C), g/cm <sup>3</sup>	$mp$ , °C	$bp$ , °C	Partial pressure (20 °C), kPa	
				$\text{HNO}_3$	$\text{H}_2\text{O}$
0	0.99823	0	100.0		2.23
10	1.0543	-7	101.2		2.26
20	1.1150	-17	103.4		2.02
30	1.1800	-36	107.0		1.76
40	1.2463	-30	112.0		1.44
50	1.3100	-20	116.4	0.03	1.05
60	1.3667	-22	120.4	0.12	0.65
70	1.4134	-41	121.6	0.39	0.35
80	1.4521	-39	116.6	1.4	0.12
90	1.4826	-60	102.0	3.6	0.03
100	1.5129	-42	86.0	6.0	0

Tabla 30. Propiedades de algunos fluidos empleados.

Producto	PM (g/mol)	Cp (kJ/kg)		
		K	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (cP)
Tolueno	92,14	1,72	866,9	0,59
Nítrico	63,02	1,75	1512,9	0,746
MNT	137,136	1,48	1162,2	0,5
DNT	182,13	1,40	1538	0,654
TNT	227,13	1,37	1654	10,86
Agua	18,01	4,18	998	1
Sulfúrico	98,08	1,30	1840	25