

Unai Duarte Unzaga

Diseño de un tanque de almacenamiento de acrilonitrilo

**Trabajo de Final de Máster
dirigido por el Dr. Christophe Bengoa**

Máster en Ingeniería Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2023

Índice

1	Introducción.....	1
1.1	Objeto	1
1.2	Alcance.....	1
1.3	Antecedentes	2
2	Bases de diseño.....	2
2.1	Características de la sustancia.....	2
2.2	Procedimiento de almacenamiento	3
2.2.1	Procedimiento general.....	3
2.2.2	Procedimiento interno de BASF	4
2.2.3	Localización de la instalación	6
2.3	Normas y referencias	7
2.3.1	Legislación	7
2.3.2	Códigos de diseño y otros documentos	7
3	Ingeniería básica	8
3.1	P&ID de la instalación	8
3.1.1	Simbología y leyenda.....	8
3.1.2	Descripción de la instalación.....	12
3.2	Diseño del tanque	14
3.2.1	Condiciones de operación	14
3.2.2	Código de diseño	15
3.2.3	Material.....	15
3.2.4	Dimensiones del tanque	17
3.2.5	Geometría del tanque	17
3.2.6	Cálculo del espesor del cuerpo.....	18
3.3	Diseño de las bombas	18
3.3.1	Caudales requeridos por las bombas	18
3.3.2	Altura requerida y pérdidas por fricción.....	19
3.3.3	Elección del tipo de bomba.....	20
3.3.4	Elección del modelo de bomba.....	21
3.4	Diseño del intercambiador.....	25
3.4.1	Condiciones ambientales.....	26
3.4.2	Condiciones de operación	26
3.4.3	Selección del tipo de intercambiador	27
3.4.4	Cálculo del intercambiador.....	28

4	Instrumentación y control.....	33
4.1	Sistema de control.....	33
4.1.1	Safety PLC y Lazos Z	35
4.2	Enclavamientos y lazos de control del tanque.....	35
4.3	Lazos Z de la instalación	37
4.4	Selección de la instrumentación.....	42
4.4.1	Presión.....	42
4.4.2	Nivel	45
4.4.3	Temperatura.....	47
4.4.4	Caudal.....	52
5	Seguridad de proceso	54
5.1	HAZOP.....	54
5.2	Árbol de fallos	62
5.2.1	Estructura y simbología	62
5.2.2	Probabilidades de eventos básicos	63
5.2.3	Estructura final.....	65
5.3	Análisis Cuantitativo de Riesgos.....	67
5.3.1	Introducción.....	67
5.3.2	Identificación de los sucesos iniciadores genéricos y específicos.....	69
5.3.3	Determinación de las frecuencias de los iniciadores.....	72
5.3.4	Determinación de las probabilidades de los sucesos que condicionan la evolución del iniciador hasta el accidente.....	75
5.3.5	Determinación de las distancias letales de los sucesos finales.....	81
6	Requisitos legales	85
7	Obra civil	87
8	Bibliografía y referencias.....	88
A.	Cálculo del espesor del tanque con el método de 1 pie.....	91
B.	Cálculo del intercambiador de calor.....	94
C.	Cálculo de las bombas P-6310 y P-6320	102
D.	Ficha de seguridad del Acrilonitrilo.....	110

1 Introducción

1.1 Objeto

La idea principal del proyecto es diseñar un tanque para el almacenamiento de un producto inflamable, que en este caso se trata de acrilonitrilo. Se aprovechará la instalación de un tanque existente en el parque de tanques de BASF en La Canonja, desmantelando todo lo que fuera necesario y diseñando la instalación de manera que permita la descarga de cisternas al tanque, el reciclo del producto dentro del propio tanque, y el envío a planta mediante bombas centrífugas.

El parque de tanques interior (PTI) de la empresa BASF Española, ubicado en La Canonja, dispone de un tanque de acero al carbono fuera de servicio. Se pretende rediseñar este tanque para el almacenamiento de un producto inflamable, asegurando que las características del tanque permitan el almacenamiento de la sustancia escogida. En este caso, el producto almacenado será acrilonitrilo, que se trata de una sustancia altamente inflamable además de tóxica, irritante, y nociva para la salud en general, por lo que el diseño del tanque deberá cumplir con los requisitos para almacenar este tipo de sustancias.

Un aspecto fundamental del proyecto es diseñar el sistema de almacenamiento que permita evitar la reacción de polimerización del acrilonitrilo, principalmente manteniendo la temperatura de almacenamiento adecuada para ello. Por lo tanto, el diseño de un intercambiador de calor será clave para asegurar la refrigeración del producto a una temperatura segura para su almacenamiento.

1.2 Alcance

El alcance del proyecto abarca los requisitos de almacenamiento del producto, incluyendo las condiciones de operación, temperatura y presión necesarias, así como la atmosfera interior del tanque. Será necesario considerar el efecto de la radiación solar en el tanque para garantizar la seguridad del almacenamiento, así como la determinación de las temperaturas críticas que determinan la seguridad de almacenamiento del acrilonitrilo.

También se incluye el diseño del tanque, que recoge la elección de un estándar de diseño (API, ASME), el cálculo matemático de los requisitos mecánicos (espesor del tanque), y la elección de la geometría del tanque. De la misma manera, se deberá realizar el cálculo de los equipos necesarios para el proceso de descarga de cisternas, almacenamiento del producto, y envío a planta, principalmente bombas e intercambiador de calor.

Se deberá definir un P&ID de la instalación, donde se refleje toda la instrumentación empleada en el proceso, y se determinarán los modelos de instrumentos empleados para la instalación en función de los requisitos del sistema. También se definirá el control de los diferentes actuadores del sistema (válvulas automáticas) en función de los instrumentos instalados.

El alcance del proyecto también incluye un estudio de seguridad de proceso. Se deberá realizar un estudio HazOp del proceso a partir del P&ID de la instalación, así como un árbol de fallos y un AQR, que incluirá una determinación de los iniciadores de accidentes, las frecuencias de los accidentes finales, y la determinación de las distancias de seguridad para los diferentes eventos finales, como puede ser dispersión de gases tóxicos, incendios de charco, llamaradas, o explosiones.

1.3 Antecedentes

El site de BASF Española en La Canonja, Tarragona, está formado por una multitud de plantas de producción, almacenamiento y servicios. El departamento de Site Logistics gestiona diversos parques de tanques donde se almacenan productos destinados a la venta o producción en otras plantas del site.

Concretamente, el Parque de Tanques Interior (PTI) se encarga de suministrar ciertas sustancias al Clúster ED, las cuales se emplean en diversos procesos de producción de dispersiones, resinas y otros productos similares. Muchos de los reactivos empleados en estos procesos de producción son acrilatos, y entre ellos se encuentra el acrilonitrilo.

Actualmente, en PTI no se dispone de ningún tanque de almacenamiento de acrilonitrilo, por lo que las descargas de cisternas se realizan directamente a un tanque de menor tamaño propiedad del Clúster ED. Sin embargo, debido a la cercanía entre las dos plantas, y la disponibilidad de tanques en PTI, añadir un tanque de almacenamiento de acrilonitrilo al parque de tanques supondría una opción estratégica viable para aumentar la capacidad de producción del Clúster ED, suministrando directamente el producto desde PTI.

2 Bases de diseño

2.1 Características de la sustancia

El acrilonitrilo es un monómero producido mediante la reacción de propileno y amoníaco en la presencia de un catalizador.

El acrilonitrilo es una sustancia sintética líquida incolora o de color amarillo pálido, con un olor pungente similar al de la cebolla. Es volátil, así como soluble en agua y disolventes orgánicos como acetona, benceno o tolueno. Se trata de una sustancia altamente inflamable, tóxica, irritante, cancerígena y nociva para la salud en general. Es un producto altamente reactivo que a menudo requiere la presencia de un inhibidor y agua en pequeñas cantidades para prevenir su polimerización.

Su estructura molecular es la siguiente:

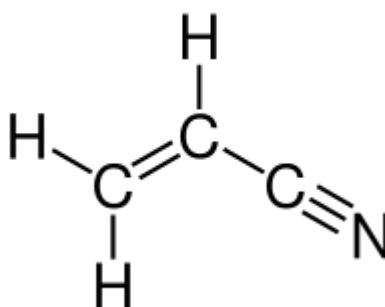


Figura 2.1.1. Estructura molecular del acrilonitrilo

Debido a sus características, presenta una gran variedad de usos como monómero en la producción de fibras acrílicas, polímeros acrílicos, plásticos, o resinas. Uno de los motivos por los que resulta una sustancia tan versátil es que puede formar copolímeros con otros compuestos como el butadieno o el estireno. La combinación de estos monómeros da lugar al

copolímero ABS (Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno), un plástico muy usado por su gran resistencia al impacto, rigidez, y tenacidad.

Las principales propiedades físicas del acrilonitrilo, extraídas de la Guía de Almacenamiento y Manipulación del Acrilonitrilo de INEOS [1], se recogen a continuación:

Tabla 2.1.1. Propiedades del acrilonitrilo

Propiedad	Valor
Densidad	0,81 g/mL
Viscosidad	0,34 cP
Punto de ebullición	77,30°C
Punto de fusión	-83,50°C
Presión de vapor a 20°C	0,12 bar
Temperatura de autoignición	481,00°C
Límite superior de explosividad en el aire	17% volumen
Límite inferior de explosividad en el aire	3% volumen
Flash point	0°C
Calor de polimerización	1365 kJ/kg

La ficha de seguridad del acrilonitrilo se adjunta en el anexo D.

2.2 Procedimiento de almacenamiento

2.2.1 Procedimiento general

A nivel general, se establecen una serie de pautas pensadas para prevenir la polimerización descontrolada del acrilonitrilo en situación de almacenamiento. En condiciones adecuadas, la polimerización del acrilonitrilo no debería producirse si se siguen las medidas adecuadas, pero algunas de las siguientes causas pueden llevar al inicio de la reacción:

- Concentraciones de inhibidor (o agua) demasiado bajas
- Presencia de productos contaminantes que puedan actuar como iniciadores de la polimerización
- Temperatura del ambiente demasiado alta
- Evaporación y condensación. Cuando el monómero de acrilonitrilo se evapora y posteriormente vuelve a condensar en zonas más frías del tanque, queda fuera del alcance del inhibidor, por lo que es susceptible de iniciar una reacción de polimerización.

Para minimizar la posibilidad de polimerización, se definen las siguientes prácticas adecuadas para el almacenamiento seguro del acrilonitrilo en recipientes cerrados.

- Almacenar acrilonitrilo solo en recipientes limpios y puros, que no sean utilizados para el almacenamiento de otras sustancias.
- Evitar mantener el mismo acrilonitrilo almacenado durante más de 6 meses; el producto deberá ser transferido siguiendo una metodología FIFO (First-In, First-Out).
- Recircular el acrilonitrilo mediante el uso de bombas para evitar el almacenamiento durante largos períodos de producto estancado.

- Comprobar de manera periódica que los niveles de inhibidor y agua son los necesarios y no están por debajo del mínimo, y reponer éstos si fuera necesario. También se debe comprobar el pH de forma habitual.

2.2.2 Procedimiento interno de BASF

2.2.2.1 Condiciones generales

BASF define unos principios de seguridad mínimos para el almacenamiento y descarga del acrilonitrilo monómero. Una instalación de almacenamiento de acrilonitrilo se considera como un peligro de proceso elevado debido a sus propiedades. Para minimizar la polimerización inducida por la temperatura, se emplea un sistema inhibidor formado por los siguientes componentes:

- Agua (0,2 a 0,5 % en masa)
- MEHQ (35 a 45 ppm)
- Trazas de oxígeno

El MEHQ (monometil eter de hidroquinona, o mequinol) es un fenol usado como inhibidor de reacciones de polimerización en monómeros como acrilatos o estireno. El oxígeno disuelto también actúa como inhibidor de la polimerización, además de acentuar el efecto inhibidor del MEHQ.

Otro aspecto que controlar es el pH del producto, puesto que la polimerización iónica puede producirse en presencia de pH básico. El pH del acrilonitrilo se encuentra entre 6,0 y 7,0, y la presencia de agua inhibe la polimerización iónica atrapando intermedios básicos o ácidos.

La presencia de determinados productos químicos también puede producir reacciones violentas como la polimerización exotérmica del acrilonitrilo, incluso en presencia del estabilizador. Estas sustancias totalmente incompatibles con el acrilonitrilo son:

- Bromo.
- Oxidantes fuertes.
- Ácidos fuertes (como el ácido sulfúrico).
- Bases fuertes (como el hidróxido de potasio, hidróxido de sodio, o el amoníaco).
- Trifluoruro de boro, tetracloruro de titanio, borohidruro de sodio, y otros ácidos de Lewis.
- Peróxidos u otros iniciadores de radicales libres.
- Cobre y aleaciones de cobre.

2.2.2.2 Límites de temperatura en productos térmicamente inestables

La empresa BASF define unos pasos específicos a la hora de llevar a cabo el almacenamiento de productos térmicamente inestables. Este término se refiere principalmente a productos que puedan llevar a cabo una reacción exotérmica durante su almacenamiento.

Para establecer un protocolo estándar de seguridad ante situaciones en las que un producto almacenado podría aumentar su temperatura de manera peligrosa debido a una reacción exotérmica, BASF considera que se deben definir límites de temperatura permitidos para cada sustancia o mezcla de sustancias almacenados. Estos límites de temperatura deben ser definidos de tal manera que sea posible llevar a cabo las operaciones requeridas por el proceso, sin superar estos límites.

La clasificación de los límites de temperatura tal y como los define BASF, así como el nivel de peligro que suponen, se muestran a continuación:

Tabla 2.2.1. Definición de los límites de temperatura de almacenamiento.

Temperatura	Definición
T1	Máxima temperatura de almacenamiento permisible.
T2	Temperatura de alarma TA+ para iniciar investigaciones y notificación temprana de la respuesta de emergencia.
T3	Respuesta de emergencia inmediata para para la aplicación de enfriamiento adicional.
T4	Temperatura de evacuación.

Los valores de T1, T2, T3 y T4 no han sido establecidos de manera firme por BASF, ya que los resultados de las pruebas llevadas a cabo no han determinado que el acrilonitrilo comience a polimerizar a una velocidad que provoque una reacción descontrolada incluso a temperaturas elevadas (150°C durante 60 h).

Para el almacenamiento de acrilatos en general, BASF define una serie de valores de temperatura generales para estos límites de almacenamiento [2]. Estos valores se consideran aplicables al acrilonitrilo debido a que no hay evidencias que apoyen la posibilidad de que el acrilonitrilo polimerice a temperaturas inferiores a 60°C. Por ello, serán los valores empleados para el almacenamiento del producto.

Tabla 2.2.2. Límites de temperatura establecidos para el sistema.

Temperatura	Valor
T1	35,00°C
T2	35,00°C
T3	40,00°C
T4	60,00°C

Debido a que T1 se define como la temperatura máxima de almacenamiento admisible, el intercambiador se dimensionará de manera que el acrilonitrilo no supere este valor de temperatura.

2.2.2.3 Visión general del proceso

El diseño básico del tanque requiere la inertización de la atmósfera interior, ya sea mediante el uso de nitrógeno o bien de aire pobre, para reducir el peligro de explosión en el interior del tanque. Debido a que el acrilonitrilo llega en cisternas con la correcta composición de oxígeno en mezcla, se considera que la cobertura de nitrógeno en el interior del tanque es la opción más adecuada para evitar la formación de atmósferas explosivas en el interior del tanque, minimizando la cantidad de O₂ presente en el interior.

La descarga de acrilonitrilo al tanque se llevará a cabo mediante uno de los siguientes tres sistemas:

- Descarga mediante nitrógeno: se aplica presión mediante nitrógeno para alimentar el tanque, ya sea directamente o mediante el uso de una bomba.
- Descarga mediante contenedor de succión: se emplea un contenedor de succión juntamente con una bomba de alimentación.

- Descarga mediante ambos sistemas en conjunto.

Una vez en el tanque, el producto será enviado a planta mediante bombas.

La elección del sistema de descarga a emplear depende de los inconvenientes que presenta cada método. El uso de bombas presenta un mayor riesgo de fugas debido al mayor número de uniones bridadas y conexiones de instrumentación, mientras que el uso de presión de nitrógeno genera una mayor cantidad de off-gas contaminado con acrilonitrilo. En general, la descarga mediante una bomba es el método más común, ya que una buena instalación y mantenimiento permiten reducir al mínimo el riesgo de fugas en uniones bridadas.

Además de los peligros ya mencionados (inflamabilidad y toxicidad, polimerización autoinducida, mezcla con sustancias incompatibles), hay que prevenir los siguientes escenarios que pueden suponer peligro para la instalación:

- Sobrellenado, sobrepresión o vacío en el tanque de acrilonitrilo o en la cisterna.
- *Dry-running, blocked-in, o dead-head pumps*

Para evitar el agotamiento del estabilizador en zonas sin flujo del tanque, se requiere incluir en el diseño un sistema de recirculación de producto de manera que el acrilonitrilo almacenado pueda ser homogeneizado, y no se formen zonas "muertas" donde no se mezcle de manera adecuada el inhibidor con el producto.

2.2.2.4 Sistema RESTAB

BASF almacena y produce una gran cantidad de monómeros acrílicos y sustancias similares, las cuales presentan un riesgo característico, la polimerización descontrolada. Para minimizar aún más el riesgo que supone tratar con este tipo de sustancias, además de planificar y emplear toda una serie de medidas de prevención (inhibidores, instrumentación, diseño seguro de las instalaciones...), la empresa desarrolló una tecnología llamada RESTAB para estabilizar depósitos de monómeros en proceso de reacción.

La tecnología RESTAB consiste en unos depósitos portátiles a presión que contienen una mezcla capaz de captar una reacción de polimerización por radicales en proceso de inicio y estabilizar la sustancia de manera que esta polimerización no se descontrole. Este sistema supone una medida de seguridad extra muy eficaz, ya que puede emplearse mediante conducciones al tanque desde una posición segura, no requiere de servicios como energía eléctrica para funcionar, y presenta un diseño robusto y con un mínimo de piezas para minimizar la posibilidad de que se produzca un fallo en alguno de los elementos que componen el sistema.

El diseño básico del sistema consiste en un depósito presurizado similar a un extintor, el cual presenta una manguera con un acople de desconexión en seco para minimizar la posibilidad de fugas a la hora de conectar el equipo a la instalación. El equipo contiene una mezcla de gas pobre (94% nitrógeno y 6% oxígeno) que se encarga de transportar el inhibidor PTZ (fenotiazina) hacia el interior del tanque, deteniendo así la reacción en cadena de polimerización.

Se decide emplear este sistema en la instalación para garantizar un nivel extra de protección frente a una posible polimerización descontrolada, reduciendo de esta manera el riesgo que supone el almacenamiento de acrilonitrilo.

2.2.3 Localización de la instalación

El tanque se instalará en el Parque de Tanques Interior (PTI) del Site de Tarragona de BASF. El Site se encuentra en la Carretera de Valencia, 241, delante del municipio de La Canonja. El Site pertenece a los ayuntamientos de Reus, La Canonja y Vilaseca, y la zona de

PTI en concreto pertenece al ayuntamiento de La Canonja. La localización del Parque de Tanques se muestra mediante imagen satélite en la figura 2.3.1.



Figura 2.3.1. Vista en 3D del Parque de Tanques Interior (PTI).

En los anexos se muestra un plano de implantación de PTI donde se señala la ubicación del tanque B-63 dentro del parque. Se ha eliminado toda la información sensible de manera que no se trate de información confidencial, y solo se muestra la ubicación del hipotético tanque de almacenamiento de acrilonitrilo en relación con el resto de los tanques de la zona.

2.3 Normas y referencias

2.3.1 Legislación

Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas. [3]

Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ-1, MIE APQ-2, MIE APQ-3, MIE APQ-4, MIE APQ-5, MIE APQ-6 y MIE APQ-7. [4]

Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10. [5]

Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo. [6]

Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y por el que se modifican y derogan las Directivas 67/548/CEE y 1999/45/CE y se modifica el Reglamento (CE) nº 1907/2006. [7]

2.3.2 Códigos de diseño y otros documentos

API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage: Código de diseño para tanques de almacenamiento a presión atmosférica o baja presión, con autoría del Instituto Estadounidense del Petróleo (American Petroleum Institute). [8]

UNE-EN 60079-10-1: Atmósferas explosivas. Parte 10-1: Clasificación de emplazamientos. Atmósferas explosivas gaseosas. [9]

3 Ingeniería básica

3.1 P&ID de la instalación

Se ha realizado el P&ID (Piping & Instrumentation Diagram) de la instalación, que abarca desde la estación de descarga de cisternas, hasta el envío a planta del acrilonitrilo. La idea del diagrama es incluir todos los equipos que participan en el proceso de descarga, almacenamiento, reciclado y envío del producto, así como la instrumentación necesaria para poder llevar a cabo este proceso de manera adecuada.

3.1.1 Simbología y leyenda

La empresa BASF emplea símbolos y códigos que permiten transmitir información sobre los elementos que se encuentran en la instalación, como puede ser la instrumentación empleada, las tuberías, el modelo de válvula, o los lazos de control, entre otros. A continuación, se resume brevemente qué códigos y símbolos se emplean en cada caso para poder extraer toda la información presente en el plano.

3.1.1.1 Simbología de instrumentación

Los instrumentos presentes en la instalación se representan mediante una burbuja en la que aparece el TAG del instrumento y su función. Esta función del instrumento se representa mediante un código de letras que tienen un significado dependiendo del lugar en el que se encuentren: la primera letra da información sobre la variable de proceso medida por el instrumento, y las que se encuentran después de la primera indican las características del instrumento (si es indicador, tiene una alarma, o un enclavamiento, entre otros).

En caso de que el instrumento mande una señal al PLC, se dibuja con una línea horizontal en mitad de la burbuja; en caso contrario, por ejemplo, un manómetro local, esta línea no se dibuja.



Figura 3.1.1. Simbología para un manómetro local (izquierda) y un transmisor de temperatura con señal al PLC (derecha).

Esta representación también se emplea en el caso de las válvulas automáticas, puesto que disponen de su propio TAG, así como los finales de carrera, que pueden ser tanto locales como con señal al DCS.

A continuación, la tabla 3.1.1 muestra un breve resumen del significado de las letras empleadas en esta representación.

Tabla 3.1.1. Significado de las letras en la simbología de instrumentación.

Letra	Significado (primera letra)	Significado (posterior a la primera)
P	Presión	-
T	Temperatura	-
L	Nivel	-
F	Caudal	-
Q	Analizador/tomamuestras	-
H	Válvula automática	-
G	Final de carrera	-
A	-	Alarma
C	-	Controlador/regulación
I	-	Indicador
K	-	Acción del sistema de control (binario)
S	-	Enclavamiento del sistema
V	-	Función de la válvula de control
Z	-	Acción de límites de proceso en el sistema instrumentado de seguridad (Safety PLC)
+	-	Límite superior
-	-	Límite inferior

De esta manera, a partir de la información en esta tabla, en el ejemplo de la figura 3.1.1 se puede deducir que el primer caso se trata de un indicador de presión local (manómetro), y en el segundo caso el instrumento es un transmisor de temperatura con indicación en campo y alarma por temperatura alta y baja.

3.1.1.2 Válvulas manuales

En el caso de las válvulas manuales, no se les asigna un TAG determinado puesto que no aparecen en el sistema de control. En su lugar, dado que principalmente se trata de modelos genéricos codificados en el sistema interno de la empresa, en el plano se indica directamente el código interno del modelo empleado, el cual proporciona información sobre el tipo de válvula empleado, el modelo, o la brida empleada. Además, se indica el DN de la válvula, que coincidirá con el DN de la línea.

En la figura 3.1.2 se muestra un ejemplo de representación de válvulas manuales en un P&ID.

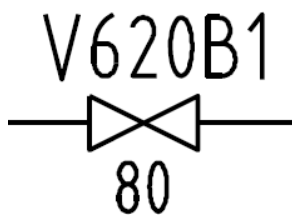


Figura 3.1.2. Representación de una válvula manual en un P&ID.

La información más importante de este código es la primera letra, que informa sobre el tipo de válvula en concreto. En la tabla 3.1.2 se resumen los tipos de válvula principales empleados en BASF.

Tabla 3.1.2. Tipos de válvulas manuales en función del código.

Letra	Tipo de válvula
H	Válvula de bola
S	Válvula de compuerta
V	Válvula de asiento/globo
K	Válvula de mariposa
R	Válvula antirretorno

El código numérico se refiere a la codificación interna de BASF. En la tabla 3.1.3 se muestra una explicación general de los posibles códigos numéricos empleados. En general, siempre se usarán válvulas estándar de BASF (códigos 600 al 699).

Tabla 3.1.3. Códigos numéricos de codificación de válvulas.

Rango de números	Uso
600 a 699	Válvulas estándar BASF
900 a 999	Válvulas que no se conforman a diseños regulares o no son de interés general
7000 a 7999	Válvulas de alta presión

En cuanto al tipo de brida, el más común es el B1. Se trata de un modelo estándar, y en general es el que se empleará siempre en la instalación, por lo que no se considera necesario especificar otros tipos de brida.

3.1.1.3 Descripción de tuberías

Cada línea de proceso se define mediante una nomenclatura específica que proporciona información sobre las características de la tubería (DN, PN, material, etcétera). A continuación, se muestra un ejemplo de identificación de una tubería en la figura 3.1.3.



Figura 3.1.3. Identificación de tubería.

Este código se divide en partes, cada una de las cuales informa sobre un aspecto diferente de la tubería. En la tabla 3.1.4 se divide este ejemplo en las diferentes partes que componen la especificación de la línea:

Tabla 3.1.4. Identificación de línea.








Código	Significado
24	Número de zona correlativo con el plano
002	Número de línea dentro del plano
N957	Código interno del producto que circula por la línea
80	DN de línea
10	PN de línea
BA10	Material de línea (en este caso acero al carbono)
F01	Tipo de junta
B1	Tipo de brida

Es importante mencionar que, en el caso del presente trabajo, se emplearán 3 códigos para referir la sustancia que circula por la línea: N100 para el acrilonitrilo, N200 para el agua, y N300 para el nitrógeno.

3.1.1.4 Simbología de equipos

Por último, se recogen en la tabla 3.1.5 los diferentes símbolos empleados en la elaboración del P&ID para poder identificar de qué manera se representan los elementos de proceso. Se trata de la simbología común empleada por BASF en todos los diagramas de instrumentación de la planta.

Tabla 3.1.5. Simbología de elementos comunes en el P&ID.

Símbolo	Elemento
	Válvula manual
	Válvula automática
	Válvula reguladora de presión
	Válvula antirretorno
	Válvula de seguridad de alivio de presión
	Válvula de sobrepresión y vacío con apagallamas
	Línea calorifugada

3.1.2 Descripción de la instalación

El proceso empieza en el camión cisterna que trae el acrilonitrilo, el cual se conecta a la línea de descarga mediante la manguera A-6600. Esta línea de descarga presenta la válvula automática H63001, que servirá para abrir o cerrar la conexión con el camión cisterna. Se incluyen válvulas manuales antes y después de la automática para poder aislar la línea en caso de tener que reemplazar la válvula automática o realizar trabajos de mantenimiento.

Para evitar que la cisterna llegue a una presión demasiado baja en la descarga, se emplea una línea de compensación que se conecta al techo de la cisterna para alimentar N2 al interior de ésta, de manera que la presión se mantiene en el valor deseado de 80 mbar. Esta línea proviene de la red de nitrógeno a 3 bar que discurre por todo el parque de tanques, y en esta línea se instala un contador de caudal F63500, una válvula reguladora de presión PC63510 y un manómetro P63501 a la salida de ésta para comprobar que la presión es la correcta, un transmisor de presión P63502 que permita detener el proceso en caso de que la presión suba a valores demasiado elevados, y una válvula de seguridad SV63.2 para aliviar la presión de la línea en caso de que fuera necesario. Esta SV descargará el alivio a la línea de off-gas que discurre por el rack en dirección a la antorcha.

A continuación, la bomba P-6310 se encarga de impulsar el producto la altura suficiente para introducirlo al tanque B-63, y antes de esta bomba se instala el transmisor de nivel L63100. Este instrumento permite asegurar que la bomba dispone de producto para empezar

a trabajar, y en caso de que no haya caudal de acrilonitrilo en la línea, se encargará de enclavar la bomba de manera que no se pueda producir un caso de *dry-running*. Esto se da cuando la bomba se pone en marcha sin que haya un caudal adecuado a impulsar, y puede causar cavitación en la bomba, provocando daños graves a los componentes internos.

En la impulsión de la bomba, se instala un transmisor de presión P63103 que servirá para asegurar que la presión en la impulsión no aumenta en exceso. También se instala un transmisor de temperatura T63102 en la bomba para medir la temperatura dentro de la misma. Por último, los dos sensores de temperatura T63103 y T63104 se instalan para garantizar un nivel de seguridad extra. Estos instrumentos tienen la misión de enclavar la bomba en caso de que esta trabaje con la impulsión cerrada (*dead-head*). Este fenómeno se produce cuando se bloquea la línea de impulsión de la bomba, con lo cual el fluido no podrá avanzar y seguirá girando continuamente en el interior de la bomba, produciéndose un aumento rápido de la temperatura del fluido.

Esto puede tener graves consecuencias en la integridad de cualquier bomba, pudiendo producir cavitación debido a la evaporación del fluido impulsado, pero el incremento descontrolado de la temperatura es especialmente crítico en el caso de acrilonitrilo, puesto que puede provocar la iniciación de la polimerización descontrolada del producto, con lo que es importante asegurar que la bomba deje de trabajar inmediatamente en caso de que se produzca este fenómeno. El enclavamiento del motor de la bomba mediante estos instrumentos es una garantía de que la bomba no trabajará con la impulsión cerrada.

También se coloca en la impulsión de la bomba una válvula antirretorno que impida la posibilidad de *backflow* en la bomba, ya que la aparición de este flujo inverso puede dañar mecánicamente el rodete de la bomba.

Finalmente, antes de la entrada al tanque se añade otra válvula automática H63002 que permita cerrar rápidamente la entrada al tanque incluso aunque quede algo de producto después de la primera válvula automática H63001.

En la parte superior del tanque se instalará un transmisor de nivel L63200 con enclavamientos tanto por nivel bajo como por sobrellenado. En caso de llegar al *set point* de nivel bajo, cerrará la válvula de la línea de salida del tanque y enclavará el motor de la bomba de envío/reciclo P-6320. En caso de sobrellenado, cerrará la válvula de la línea de entrada al tanque, y enclavará el motor de la bomba de descarga P-6310.

De la misma manera, también habrá un transmisor de presión P63201 que impida que la presión del tanque llegue a estar por encima o por debajo de los valores establecidos. En caso de sobrepresión, actuará cerrando la válvula de entrada al tanque y el motor de la bomba P-6310. En caso de vacío, actuará cerrando la válvula de salida H63003 y el motor de la bomba P-6320. La alarma de baja presión permitirá garantizar que el tanque no trabaja sin cobertura de N₂, cosa que podría provocar polimerización en el interior del tanque debido a la evaporación del acrilonitrilo, separándose del inhibidor.

Para asegurar que la temperatura del tanque no supera el valor crítico, se instalarán dos transmisores de temperatura, T63202 y T63204, en el fondo del tanque, para conocer en todo momento la temperatura a la que se encuentra el acrilonitrilo almacenado en el interior.

En cuanto a los equipos de seguridad del tanque, éste dispondrá una válvula de sobrepresión y vacío, que tendrán la doble función de aliviar la presión interna del tanque en caso de que esta aumente demasiado, así como facilitar la entrada de aire al interior del tanque en caso de que se dé una situación de vacío, evitando así que el tanque se arrugue. La presión de tarado de esta válvula KT63001.10 será de +14 / -7 mbar. También se instala una tapa de seguridad, Y63001.20, tarada a 25 mbar, de manera que, en caso de que la presión suba de manera repentina, como por ejemplo en el caso de un incendio externo, se pueda desalojar todo el producto del tanque.

Para mantener la atmósfera interior del tanque inerte, así como asegurar que el acrilonitrilo no genera vapores que puedan condensar fuera del alcance del inhibidor e iniciar la polimerización, se introduce en el tanque un recubrimiento de nitrógeno a una presión de 10 mbar. Esto se hace mediante la línea de servicio de nitrógeno a 5 bar, de la cual sale un ramal en el que se instala un transmisor de caudal con alarma de bajo caudal, y una válvula reguladora de presión PC63410 que baja la presión del nitrógeno a 10 mbar antes de entrar al tanque, instalándose después de ésta un manómetro P63403 para comprobar que la presión es la correcta.

En la línea de salida se instala una válvula automática H63003 para controlar el vaciado del tanque, y un nivel L63300 que sirva para proteger la bomba de envío/reciclo P-6320 evitando que trabaje sin producto en la aspiración. Se instala un transmisor de temperatura T63001 en la bomba, y un transmisor de presión P63302 en la impulsión, junto con otros dos transmisores de temperatura T63203 y T63204, para parar la bomba en caso de que se produzca un fenómeno de *dead-head* en este punto. Se utilizan las válvulas automáticas H63004 y H63005 para poder alternar entre envío a planta o recirculación del acrilonitrilo para enfriar el interior del tanque.

El intercambiador W-6410 se encuentra en la línea de reciclo del tanque. Se trata de un intercambiador de placas que utiliza agua glicolada para enfriar el acrilonitrilo que se recircula hacia el interior del tanque, de manera que la temperatura del producto no aumente por encima del valor límite de 35°C. En caso de que el sistema de agua de refrigeración falle, para evitar introducir acrilonitrilo caliente en el interior del intercambiador y provocar daños, se instala una línea de *bypass* del intercambiador. El caudalímetro F64100, en caso de detectar bajo caudal en la entrada de agua de refrigeración, actuaría cerrando las válvulas H63006 y H63008, y abriendo la válvula H63007, para permitir el paso del producto a través de este *bypass*.

3.2 Diseño del tanque

A continuación, se lleva a cabo el diseño del tanque teniendo en cuenta la normativa empleada, las condiciones de operación, el material empleado, y la capacidad requerida para el tanque.

3.2.1 Condiciones de operación

El tanque operará a una temperatura adecuada para minimizar el riesgo de inflamabilidad del acrilonitrilo, así como evitar la polimerización de este. La presión de operación del tanque deberá ser superior a la presión de vapor del acrilonitrilo, para evitar la presencia de acrilonitrilo fase gas en el interior del tanque. Esto se debe a dos motivos: el primero, prevenir lo máximo posible la fuga de acrilonitrilo gas a la atmósfera, y el segundo y más importante, evitar que el acrilonitrilo se adhiera a las paredes del tanque y polimerice, puesto que al pasar a fase gas deja de estar en contacto con el inhibidor MEHQ y corre el peligro de iniciar la polimerización.

En circunstancias en las que el acrilonitrilo se encuentra estabilizado (debido a la presencia de MEOH y oxígeno disuelto), la temperatura de almacenamiento puede alcanzar los 100°C sin peligro de polimerización descontrolada. Sin embargo, tal y como se expone previamente, se considera que la temperatura adecuada de almacenamiento no deberá superar los 35°C para minimizar las posibilidades de polimerización del producto, puesto que la elevada temperatura ambiente y radiación solar pueden hacer que la temperatura del tanque aumente más rápidamente de lo esperado de manera peligrosa.

En cuanto a la presión de operación, el acrilonitrilo presenta una presión de vapor de 120 mbar a 20°C. Esta presión se usará como referencia a la hora de diseñar el tanque, por lo que se deberá tener en cuenta a la hora de decidir el estándar de diseño del tanque.

3.2.2 Código de diseño

Se debe determinar el estándar de diseño que se seguirá para el cálculo del tanque. Los principales códigos de diseño son:

- Código ASME, sección VIII.
- Código API 650.
- Código API 620.

La norma API es un estándar definido por el American Petroleum Institute para el diseño de tanques de almacenamiento industriales, con el objetivo de facilitar la compra y construcción de estos equipos industriales. Por su parte, el código ASME tiene su origen en la American Society of Mechanical Engineers, y a pesar de que también se trata de un estándar para el diseño de tanques y recipientes industriales, se centra más en los equipos sometidos a presión.

El código ASME contempla el diseño de recipientes de proceso sometidos a presiones de hasta 200 bar, que pueden ser tanto verticales como horizontales, y con diferentes configuraciones geométricas en el fondo y la cabeza del tanque. Sin embargo, en este caso se pretende diseñar un tanque cilíndrico vertical de fondo plano, y sometido a una presión alrededor de 150 mbar, por lo que se considera que el estándar API es más adecuado para el tipo de tanque que se pretende diseñar.

A continuación, se lleva a cabo una comparación entre el código API 650 y el API 620 [10] para ver cual se adecúa más al diseño especificado:

Tabla 3.2.1. Comparación entre código API 650 y API 620.

Condición de diseño	API 650	API 620
Temperatura máxima (°C)	260	93,3
Temperatura mínima (°C)	-29	-198
Presión máxima (bar)	0,17	1,03
Espesor máximo del cuerpo (mm)	444	NE
Espesor mínimo del cuerpo (mm)	4,76	4,76

En general, el código API 620 suele ser utilizado para fluidos con una presión interna alrededor de 1 bar, y en condiciones de temperatura muy bajas. Es especialmente utilizado en el ámbito de los tanques criogénicos. Por el contrario, el código API 650 se emplea para tanques a presiones internas más bajas, cercanas a la atmosférica, pero la máxima temperatura a la que pueden ser sometidos es superior que en el caso del API 620.

En este caso, debido a que la presión interna del tanque no superará los 170 mbar y la temperatura nunca bajará de los 0°C, se decide emplear el código API 650.

3.2.3 Material

Para elegir el material empleado para el tanque, se comprueban las incompatibilidades que presenta el acrilonitrilo. El contacto con oxidantes, bases, latón, cobre (y sus aleaciones), amoníaco y aminas vuelve al acrilonitrilo altamente reactivo y puede causar el inicio de la polimerización descontrolada. En concreto, se debe evitar el uso de cobre como material para el tanque, las tuberías, o cualquier parte que pueda estar en contacto con el acrilonitrilo.

Los materiales empleados comúnmente para los tanques de acrilonitrilo son el acero al carbono o el acero inoxidable. Ambos materiales son aceptados según el estándar API 650, por lo que se realizará una comparación entre ambos para elegir el más indicado.

Acero al carbono

Se trata de acero formado por hierro y un contenido de carbono entre 0,12 y 2% de carbono. También contiene otros elementos, como el manganeso o el silicio, que no deben superar un determinado porcentaje en la composición. Un menor porcentaje de carbono aumenta la maleabilidad y la ductilidad del acero, así como su soldabilidad, mientras que un aumento en su proporción hará que el acero resulte más duro y rígido.

En cuanto a sus ventajas, el acero al carbono supone una inversión inicial menor que en el caso del acero inoxidable, y presenta una mayor dureza y durabilidad. Además, al presentar una superficie más porosa, se puede pintar con facilidad, característica a tener en cuenta para el diseño de un tanque. Como inconvenientes, el acero al carbono presenta una mayor tendencia a la corrosión que el acero inoxidable, por lo que los costes de mantenimiento pueden hacer que el acero al carbono sea más caro que el acero inoxidable a largo plazo, a pesar de que el coste de fabricación sea más bajo.

Acero inoxidable

El acero inoxidable es una aleación formada principalmente por hierro, carbono, y un 10,5% de cromo. Es este cromo el que le confiere su resistencia a la corrosión, puesto que el cromo genera una capa protectora que reacciona con el oxígeno, previniendo la oxidación de hierro.

El acero inoxidable presenta unas excelentes propiedades mecánicas, especialmente ductilidad, elasticidad y dureza, así como una alta resistencia al fuego. Su característica más destacable es su resistencia a la corrosión, que lo protege tanto en contacto con oxígeno como con agua, por lo que son indicados para trabajar en ambientes con un alto porcentaje de humedad. También son más fáciles de limpiar debido a la poca porosidad de su superficie.

Como inconvenientes a destacar, el acero inoxidable implica unos costes de fabricación más elevados que el acero al carbono, a pesar de que los costes de mantenimiento puedan acabar decantando la balanza a favor del acero inoxidable. También presenta una menor dureza y durabilidad que el acero al carbono, y debido a las características de su superficie, resulta muy complicado pintar un tanque de acero inoxidable.

Comparación de ambos materiales

Comparando los dos materiales, los principales aspectos para tener en cuenta son los siguientes:

- Propiedades mecánicas: debido a que el tanque no se verá sometido a grandes tensiones, ambos materiales son suficientes para el almacenamiento de acrilonitrilo.
- Resistencia a la corrosión: el acrilonitrilo no presenta un efecto corrosivo sobre los metales, por lo que no será necesario emplear un material especialmente resistente a la corrosión. El acero al carbono será suficiente para el almacenamiento de acrilonitrilo.
- Facilidad de pintar: para poder garantizar que el tanque absorberá la mínima cantidad de radiación solar, y así prevenir el aumento de temperatura, el tanque será pintado de blanco. El acero al carbono resulta mucho más fácil de pintar que el acero inoxidable.
- Coste de fabricación: el acero al carbono resulta mucho más barato de fabricar que el acero inoxidable.

Por lo tanto, el material empleado para la construcción del tanque será acero al carbono. Se usará un acero con un bajo porcentaje de carbono (<0,3%) para maximizar la ductilidad y la maleabilidad del material.

El acero al carbono escogido será de especificación A 283M, Grado C. Se trata de un acero al carbono con bajo contenido en carbono (0,24%). Las propiedades mecánicas del acero al carbono A 283M Grado C se exponen a continuación [11]:

Tabla 3.2.2. Características del acero al carbono ASTM A-283M Grado C.

Grado de acero	Resistencia a la tracción (MPa)	Límite elástico (MPa)
ASTM A-283M Grado C	380-515	205

3.2.4 Dimensiones del tanque

El tanque tendrá una capacidad nominal de 100 m³. Tendrá un diámetro de 3,6 m y una altura de 10 m, sin contar el techo. Se diseñará siguiendo el estándar API 650, para tanques diseñados a bajas presiones (de 0 a 2,5 psi). El tanque será de techo fijo, y no se incluirá un techo flotante interior.

El tanque dispondrá de dos bocas de hombre de DN600 para la inspección y limpieza del interior del tanque.

3.2.5 Geometría del tanque

La geometría del tanque está formada por 3 secciones diferentes; el techo del tanque, el cuerpo, y el fondo del tanque.

Techo del tanque

En cuanto al techo del tanque, se deberá decidir la forma empleada, y si se requerirá soporte adicional. El código de diseño API 650 no especifica ningún criterio para escoger entre diferentes geometrías, y las principales mencionadas son: cónica, domo, y paraguas. Debido a que el diámetro del tanque es pequeño (3,6 m), el soporte de cargas no será un problema, por lo que se podrá emplear un techo cónico sin soporte adicional. Esto se debe a que el techo cónico es el más fácil de construir debido a su geometría, por lo que los gastos de construcción son menores. Se trata del tipo de configuración más habitual para tanques de diámetros pequeños.

Cuerpo del tanque

Para el cuerpo del tanque, la normativa API 650 contempla tanques de cuerpo cilíndrico verticales, por lo que el diseño del tanque seguirá esta geometría. Esta forma permite soportar las tensiones generadas por la presión que ejerce el fluido almacenado en el interior, y se considera el estándar para el diseño de tanques de almacenamiento de productos en fase líquida.

Fondo del tanque

Para el fondo del tanque, las principales geometrías contempladas son las de fondo esférico (o cónico) y fondo plano. La principal ventaja del fondo esférico es la facilitación del vaciado del contenido del tanque, pero el diseño esférico o cónico del fondo puede concentrar los esfuerzos soportados por el fondo (así como la corrosión sufrida) en el punto central del fondo, mientras que el fondo plano repartirá este estrés causado por el fluido de manera uniforme.

Finalmente, se decide emplear un fondo plano con una pendiente de 1% para facilitar el vaciado del tanque. La base del tanque estará soportada de manera uniforme por un soporte de hormigón.

3.2.6 Cálculo del espesor del cuerpo

Una vez determinada la geometría del tanque, se procede a calcular el espesor de las paredes del tanque según la norma API 650. Esta norma define el espesor mínimo requerido como el mayor espesor de entre los dos siguientes: el espesor de diseño calculado, y el espesor de prueba hidrostática calculado. Así mismo, el espesor mínimo requerido nunca será inferior a los siguientes valores:

Tabla 3.2.3. Espesores mínimos requeridos en el tanque.

Diámetro nominal del tanque (m)	Espesor nominal de la placa (mm)
$\emptyset < 15$	5
$15 \leq \emptyset < 36$	6
$36 \leq \emptyset \leq 60$	8
$\emptyset > 60$	10

Para determinar estos valores de espesor de diseño y espesor de prueba hidrostática, el código API 650 propone el método de 1 pie. En el anexo A.1. se exponen los cálculos llevados a cabo para la determinación del espesor del tanque mediante este método. En la tabla siguiente se muestran los espesores obtenidos para el tanque:

Tabla 3.2.4. Espesores finales del tanque.

Parte del tanque	Espesor (mm)
Cuerpo	5
Techo	5

3.3 Diseño de las bombas

La instalación requerirá dos bombas centrífugas que permitan llevar a cabo las operaciones de descarga, reciclo y envío de producto en el tanque B-63.

La bomba P-6310 se encargará de descargar los camiones cisterna, por lo que la capacidad de las cisternas y el tiempo que debe durar una descarga serán los parámetros que determinarán el caudal requerido para esta bomba.

La bomba P-6320 se utilizará para recircular el producto en el interior del tanque, así como realizar el envío de acrilonitrilo a planta para su uso en los procesos de producción, por lo que se deberá tener en cuenta la demanda de planta, así como el tiempo de residencia que se desea fijar para la recirculación del contenido total del tanque.

3.3.1 Caudales requeridos por las bombas

En primer lugar, se deberá determinar el caudal que debe ser capaz de dar cada una de las bombas, puesto que este será un valor necesario para determinar los modelos comerciales a elegir. Además, el caudal, y por consiguiente la velocidad del fluido, serán parámetros requeridos para determinar la altura necesaria que debe dar la bomba, así como el NPSH disponible.

3.3.1.1 Caudal requerido por la bomba P-6310

Las cisternas de producto que llegan al parque de tanques suelen tener una capacidad promedio entre 15 y 20 m³ de producto. En este caso, para asegurar que la bomba es capaz de dar el caudal requerido en las peores condiciones, se estima que las cisternas tendrán una capacidad de 20 m³.

En cuanto al tiempo de descarga, se considera que un promedio de 30 minutos por descarga es más que suficiente para no entorpecer el funcionamiento del parque de tanques, con lo que se considera que la descarga de producto no deberá durar más que este tiempo. Teniendo en cuenta estas condiciones, se realiza una estimación del caudal que deberá proporcionar la bomba:

$$Q = \frac{20 \text{ m}^3}{0,5 \text{ h}} = 40 \text{ m}^3/\text{h} \quad (3.3.1)$$

De esta manera, se define un caudal de 40 m³/h para la bomba P-6310.

3.3.1.2 Caudal requerido por la bomba P-6320

La bomba P-6320 tendrá la función principal de recircular el contenido del tanque de manera que no se formen zonas de producto sin mezclar, además de refrigerar el contenido del tanque mediante el uso del intercambiador W-6410.

Tal y como se define en el diseño del intercambiador, se pretende que el sistema sea capaz de recircular el contenido del interior del tanque en un período de 8 horas, por lo que este será el requisito de caudal que se le exigirá a la bomba. Suponiendo que el tanque B-63 se encuentre a máxima capacidad, es decir, 100 m³:

$$Q = \frac{100 \text{ m}^3}{8 \text{ h}} = 12,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,0035 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (3.3.2)$$

La bomba P-6320 deberá ser capaz de proporcionar un caudal de 12,5 m³/h. En la práctica, el caudal requerido será menor, puesto que el tanque tiene sistemas de control para evitar que el nivel llegue al máximo de su capacidad, pero este será el caudal con el que se trabajará para tener un margen de seguridad en los cálculos.

3.3.2 Altura requerida y pérdidas por fricción

A continuación, se realiza una estimación de la altura que deberá ser capaz de dar la bomba. Esta altura no solo dependerá de la altura física a la que se encuentra la entrada del tanque, sino también a las pérdidas de presión que sufrirá el fluido, tanto por el efecto de la fricción a lo largo de la tubería (pérdidas mayores), como por efecto de los codos, válvulas y otros elementos que se encuentren en la línea (pérdidas menores).

El procedimiento de cálculo llevado a cabo para determinar todos los parámetros necesarios y obtener, finalmente, la altura requerida por la bomba, así como el NPSH disponible, se recogen en el anexo C. Los cálculos llevados a cabo para las bombas P-6310 y P-6320 son idénticos, teniendo en cuenta las diferentes condiciones de cada bomba, y añadiendo a la bomba P-6320 la pérdida de carga provocada por el intercambiador W-6410.

Los resultados de los cálculos se exponen a continuación:

Tabla 3.3.1. Cálculos de las bombas P-6310 y P-6320.

Parámetro	Bomba P-6310	Bomba P-6320
Caudal – $Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$	40	12,5
Longitud de línea – L (m)	15	25
Diámetro de impulsión – Dd (m)	0,08	0,05
Diámetro de aspiración – Ds (m)	0,10	0,08
Viscosidad dinámica – μ (Pa·s)	0,00034	0,00034
Número de Reynolds – Re	419212,04	2096060,02
Rugosidad de la tubería – ϵ (m)	0,000045	0,000045
Factor de fricción – F	0,02	0,02
Pérdidas mayores – h_f (m)	0,85	1,64
Pérdidas menores – h_L (m)	5,98	3,82
Pérdidas en el intercambiador – h_E (m)	0,00	5,80
Pérdidas totales – h (m)	6,83	10,60
Altura requerida – H (m)	16,83	20,60
Presión antes de la bomba – P_1 (Pa)	109325	102325
Altura antes de la bomba – Z_1 (m)	0,00	0,00
Presión de vapor – P_v (Pa)	12000	12000
NPSH Disponible – $NPSH_{disp}$ (m)	12,05	19,31

3.3.3 Elección del tipo de bomba

El primer parámetro por determinar será el tipo de bomba que se quiere utilizar para la instalación, puesto que, en función de las características del producto, así como las condiciones de operación del sistema, será más adecuado un tipo de bomba u otro. Los dos grupos principales en los que se clasifican las bombas son:

- Bombas de desplazamiento positivo: algunos ejemplos son las bombas de pistón, de diafragma, peristálticas, o de lóbulos.
- Bombas dinámicas: las más comunes son las centrífugas, que pueden ser de flujo radial, axial, mixto, o incluso periféricas.

A continuación, se incluye un breve resumen de cada tipo de bomba y sus características, para poder elegir qué tipo se adecúa más a los requisitos del sistema.

- Bombas centrífugas: son más sensibles a la viscosidad del producto, por lo que no son adecuadas para fluidos altamente viscosos. Son de uso común para mover altos caudales a presiones no demasiado elevadas.
- Bombas de desplazamiento positivo: son empleadas para mover volúmenes más reducidos y presiones muy elevadas. Son capaces de funcionar con fluidos altamente viscosos.

En este caso, se opta por emplear bombas centrífugas en la instalación debido a que no se requieren altas presiones, y no se trabaja con fluidos altamente viscosos. Por lo tanto, ambas bombas P-6310 y P-6320 serán bombas centrífugas.

3.3.4 Elección del modelo de bomba

Una vez calculados los parámetros requeridos por la bomba, y determinado el tipo de bomba que se va a emplear, se procede a escoger el modelo comercial de las bombas.

El primer paso es escoger el proveedor consultado para obtener las bombas. Una vez encontrado, y habiendo definido la altura y caudal requeridos, se consultarán catálogos para ver qué modelo se adecua más a las necesidades del proceso. Finalmente, se escogerá el tamaño de rodete de la bomba.

El proveedor escogido es Grundfos [12]. Esto se debe a que se trata de uno de los suministradores más populares de bombas, además de contar con una herramienta de búsqueda propia que permite introducir los parámetros de trabajo deseados para encontrar la bomba que más se adecúa a las condiciones de trabajo.

A continuación, se muestra en una tabla resumen el caudal y la altura requeridos por cada bomba:

Tabla 3.3.2. Condiciones de operación de las bombas.

Bomba	Altura (m)	Caudal (m ³ /h)
P-6310	16,83	40,00
P-6320	21,26	15,00

Para determinar el modelo a emplear en la bomba P-6310, se introducen estos parámetros en la herramienta, así como las propiedades del acrilonitrilo, así como la temperatura a la cual se llevará a cabo la descarga. Para determinar la viscosidad cinemática del acrilonitrilo, se parte del valor de referencia de viscosidad dinámica, 0,34 centipoise, y se divide entre la gravedad específica del acrilonitrilo, 0,806. De esta manera, se obtiene una viscosidad cinemática de 0,42 mm²/s. En la tabla 3.3.3 se muestran las características de la sustancia:

Tabla 3.3.3. Propiedades del fluido de trabajo introducidas en el simulador.

Densidad (kg/m ³)	Viscosidad (mm ² /s)	Temperatura de operación (°C)
806	0,42	25

Una vez introducidos estos datos, y las condiciones de caudal y altura, se obtiene que el modelo más adecuado para realizar la función de la bomba P-6310 es el NBG 100-65-200/219. Se trata de una bomba centrífuga monoetapa preparada para trabajar con presiones de hasta 16 bar, hecha de acero al carbono y acero inoxidable. La curva de la bomba es la siguiente:

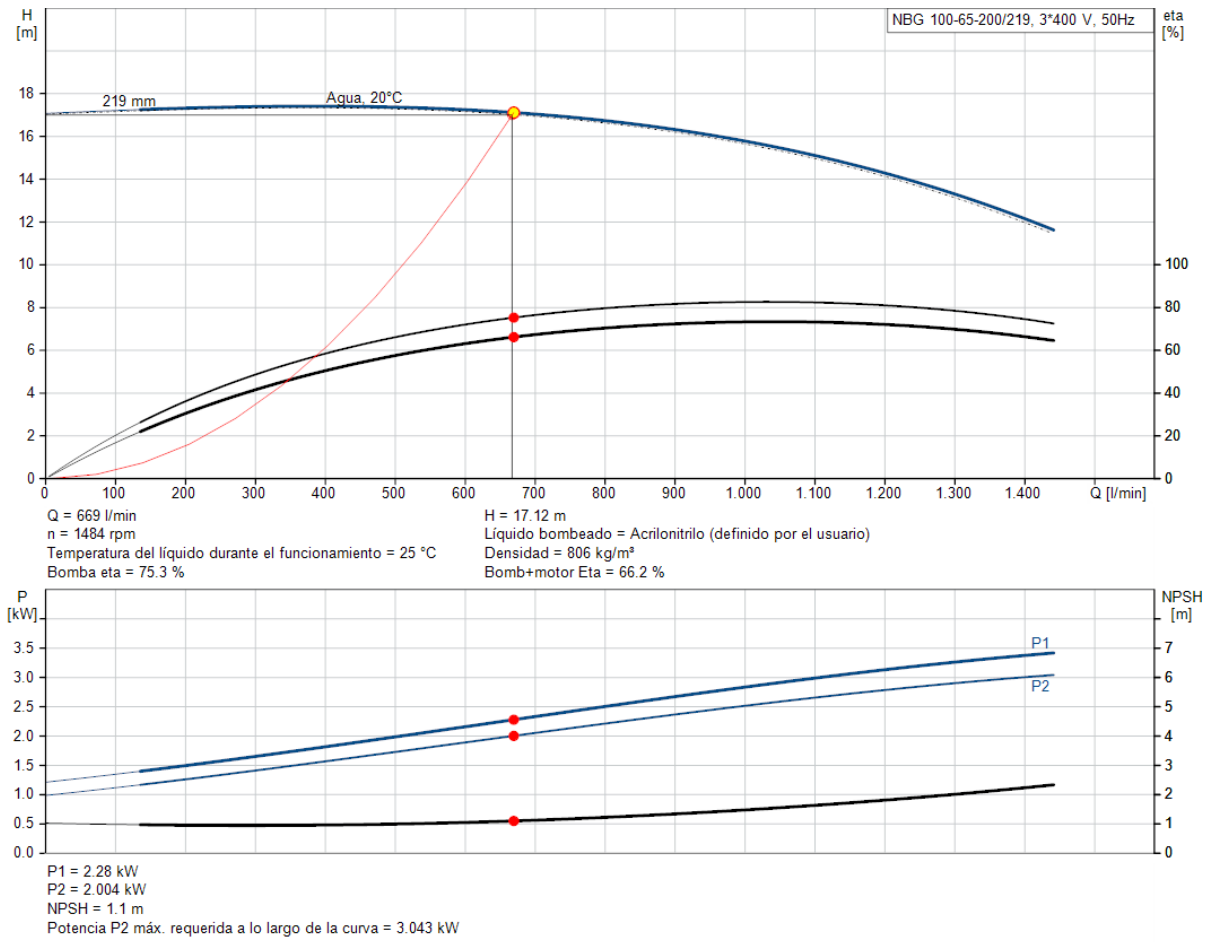


Figura 3.3.1. Curva de la bomba NBG 100-65-200/219, con el punto de trabajo especificado [12].

Como se puede comprobar, la bomba es capaz de trabajar proporcionando un caudal de 669 l/min, que equivalen a unos 40,14 m³/h, y 17,12 m de altura. En estas condiciones, la bomba trabaja a un rendimiento del 75,3%. Debido a que el rango de trabajo de una bomba centrífuga siempre debería estar alrededor del 70% para bombas grandes y el 55% para bombas pequeñas [13], se puede considerar que esta bomba es óptima para las condiciones requeridas.

A continuación, se incluye una imagen del modelo escogido en la figura 3.3.1..



Figura 3.3.2. Modelo de bomba NBG 100-65-200/219.

La tabla 3.3.4 muestra un resumen de las características de este modelo, según proporcionadas por Grundfos.

Tabla 3.3.4. Características de la bomba NBG 100-65-200/219.

Parámetro	Valor
Velocidad (rpm)	1460
Caudal de trabajo (m ³ /h)	40,14
Altura de la bomba (m)	17,12
Diámetro nominal del rodete (cm)	20
Rango de temperatura del fluido (°C)	0 a 120
Presión máxima de operación (bar)	16
Diámetro del eje (mm)	32
Material de la carcasa	EN-GJL-250
Material del rodete	EN-GJL-200
Material del eje	AISI 304
Tamaño de la conexión de aspiración	DN100
Tamaño de la conexión de impulsión	DN65
Presión nominal de las conexiones	PN16

Para el caso de la bomba P-6320, se realiza la misma operación, y se obtiene que el modelo más adecuado es el NBG 50-32-125/130. La curva de la bomba obtenida es la siguiente:

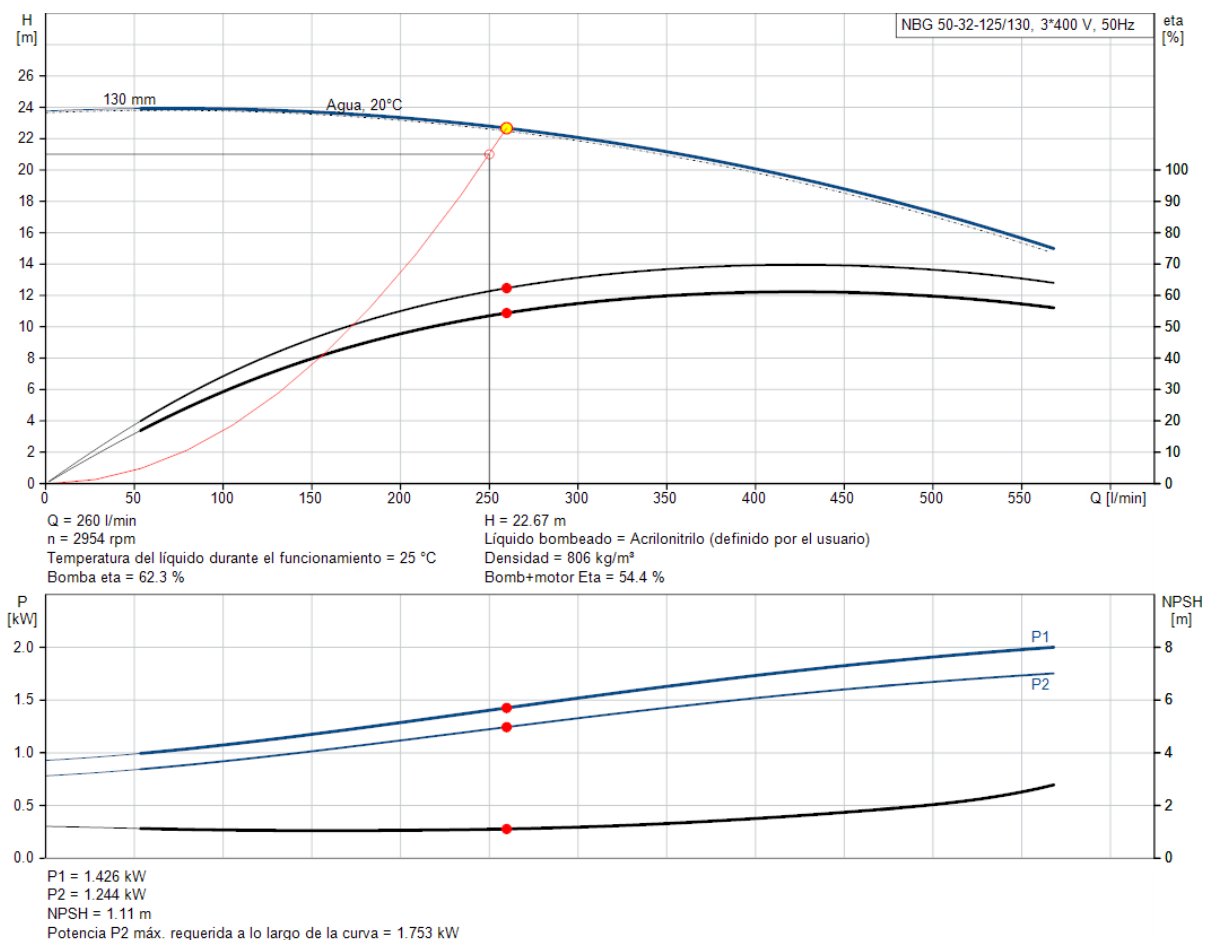


Figura 3.3.3. Curva de la bomba NBG 50-32-125/130 [12].

Como se puede comprobar, en este caso el rendimiento de la bomba es del 62,3%. Se trata de un valor inferior al 70% mencionado anteriormente, pero que se encuentra por encima del valor de 55% para bombas pequeñas. Debido a que el caudal que tiene que proporcionar la P-6310 es más de dos veces el que debe proporcionar la bomba P-6320, se considera coherente que se tenga que emplear una bomba más pequeña para esta última, con su correspondiente valor de rendimiento inferior.

Finalmente, se decide emplear este modelo para la bomba P-6320. En la tabla 3.3.5 se recogen las características del modelo escogido.

Tabla 3.3.5. Características de la bomba NBG 50-32-125/130.

Parámetro	Valor
Velocidad (rpm)	2900
Caudal de trabajo (m ³ /h)	15,58
Altura de la bomba (m)	22,67
Diámetro nominal del rodete (cm)	12,5
Rango de temperatura del fluido (°C)	0 a 120
Presión máxima de operación (bar)	16
Diámetro del eje (mm)	24
Material de la carcasa	EN-GJL-250
Material del rodete	EN-GJL-200
Material del eje	AISI 304
Tamaño de la conexión de aspiración	DN50
Tamaño de la conexión de impulsión	DN32
Presión nominal de las conexiones	PN16

La figura 3.3.4 muestra el modelo escogido. Debido a tratarse de la misma serie que el modelo escogido para la bomba P-6310, el aspecto es similar.



Figura 3.3.4. Modelo NBG 50-32-125/130.

3.4 Diseño del intercambiador

Se realiza el cálculo del intercambiador de calor W-6410, que servirá para refrigerar el acrilonitrilo almacenado en el tanque. Esta operación se llevará a cabo usando la bomba P-6320 para recircular el producto, enviándolo a través del intercambiador.

Para enfriar el acrilonitrilo, el intercambiador usará agua glicolada como fluido frío para extraer el calor de la corriente caliente. Esta agua glicolada proviene de dos equipos Chiller instalados en planta, que forman un circuito de refrigeración que mantiene el agua glicolada a 10°C. Esta agua a 10°C se envía a diversos intercambiadores que se encargan de refrigerar tanques de productos con riesgo de polimerización, como butadieno, mediante un sistema de recirculación muy similar al definido en el proyecto actual.

Para poder llevar a cabo el cálculo del intercambiador, primero se deberán especificar las condiciones ambientales, las condiciones de operación, y el tipo de intercambiador escogido para este caso.

3.4.1 Condiciones ambientales

El tanque se ubicará en el Parque de Tanques Interior de BASF Española, en el municipio de Tarragona. Para poder estimar el efecto de la radiación solar en la temperatura del tanque, se considerará el valor máximo de radiación solar en verano en la zona de Tarragona, para comprobar que el intercambiador sea capaz de extraer todo el calor necesario del acrilonitrilo en las peores condiciones posibles.

El dato de la radiación solar máxima en Tarragona se extrae del Atlas de radiación solar en España, proporcionado por la Agencia Estatal de Meteorología (Aemet) [14]. Este Atlas proporciona el siguiente dato: en el territorio de Tarragona, la irradiancia máxima global se da en el mes de junio, con un valor de $7,44 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia}$. Este valor se convierte de la siguiente manera:

$$7,44 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia} \cdot \frac{3600 kJ}{1 kWh} \cdot \frac{1 dia}{24 h} = 1116 \frac{kJ}{m^2 \cdot h} \quad (3.4.1)$$

De esta manera, se obtiene la energía máxima irradiada sobre el tanque por unidad de superficie y por hora. Este valor será necesario para calcular la aportación de calor por causas ambientales que deberá eliminar el intercambiador.

3.4.2 Condiciones de operación

Será necesario definir las condiciones de operación del intercambiador para poder llevar a cabo su diseño. Estas condiciones de operación se refieren principalmente a la temperatura máxima que el intercambiador debe ser capaz de disminuir, y el tiempo máximo que debe tardar en enfriar todo el tanque.

En cuanto a la temperatura, en el procedimiento de almacenamiento se menciona el protocolo de la empresa BASF para el almacenamiento de productos térmicamente inestables. Este procedimiento consiste en definir una serie de temperaturas de alarma ante las cuales se debe actuar. El valor de T1, considerada como la temperatura de almacenamiento máxima del acrilonitrilo, se ha definido en 35°C. Esta temperatura es fácil de alcanzar en verano a causa de la irradiancia solar que impacta sobre el tanque. Por lo tanto, el intercambiador deberá ser capaz de enfriar el acrilonitrilo desde esta temperatura de 35°C hasta un valor seguro, idealmente por debajo de los 30°C.

Se decide establecer una temperatura de 25°C como la temperatura objetivo a la cual el intercambiador debe ser capaz de refrigerar el producto en un ciclo de enfriamiento. El calor que deberá disipar el calor suficiente para enfriar el acrilonitrilo de 35°C a 25°C, además del calor irradiado sobre el tanque durante este ciclo de refrigeración. Se considerará que el tanque no dispone de ninguna protección solar ni aislamiento térmico de cara al efecto de esta irradiación solar sobre el mismo, aunque no se tendrá en cuenta el efecto del sol sobre las

líneas ni el propio intercambiador debido a que estos se cubrirán del sol mediante láminas de protección solar y/o calorifugado.

El siguiente paso es definir el tiempo que durará este ciclo de enfriamiento. El intercambiador debe ser capaz de refrigerar todo el contenido del interior del tanque en un margen de tiempo suficiente, considerando las peores condiciones posibles, es decir, que el tanque se encuentre completamente lleno (100 m^3) y a una temperatura de 35°C . Se considera un promedio de tiempo solar de 8 horas a lo largo del año, por lo que este será el tiempo de ciclo de refrigeración, de manera que además el sistema de reciclo pueda recircular por completo el contenido del tanque 3 veces por día suponiendo que el tanque esté trabajando al 100% de capacidad.

Por la parte del fluido frío, como se ha mencionado anteriormente, se trata de agua glicolada, enfriada mediante equipos Chiller a una temperatura de 10°C . Esta agua es enviada a planta a esta temperatura, y la temperatura máxima de retorno al tanque de agua glicolada es de 20°C . Para asegurar que no hay problemas en el circuito de agua glicolada, se fijará una temperatura de salida del fluido frío ligeramente inferior, de 18°C , de manera que no se corra el riesgo de aumentar la temperatura por encima de los límites de operación, y a la vez impidiendo que la pérdida de carga sea demasiado grande debido a requerir grandes caudales con un menor incremento de temperatura.

3.4.3 Selección del tipo de intercambiador

Los dos principales tipos de intercambiadores considerados son los intercambiadores de carcasa y tubo, y los intercambiadores de placas. Se trata de los dos tipos más comunes de intercambiador, y se buscará cuál de los dos se adecúa más a las necesidades del proceso.

3.4.3.1 Intercambiadores de tubo y carcasa

Se trata del tipo más común de intercambiador. Su diseño consiste en una carcasa alargada que contiene un gran número de tubos en disposición longitudinal. Uno de los fluidos circulará por el lado de la carcasa, mientras que el otro discurrirá a lo largo de los tubos. Para intentar aumentar la eficiencia de la transferencia de calor, se introducen desviadores (baffles) en la carcasa para forzar al fluido que circula por ella a moverse en dirección transversal a la carcasa, aumentando así la superficie de contacto entre el fluido que circula por la carcasa y los tubos.

Se trata de un tipo de intercambiador adecuado para trabajar con grandes caudales, con presiones y temperaturas elevadas, y muchos tipos de fluido. Pueden trabajar en diversas configuraciones, incluso aunque uno de los fluidos esté en fase gas.

Sin embargo, presenta una serie de inconvenientes. No se trata de un equipo tan estanco como los intercambiadores de placas, y se acostumbra a colocar el fluido más tóxico o peligroso en el interior de los tubos para minimizar la posibilidad de contacto en caso de fuga. También son equipos con un gran peso y tamaño, por lo que no acostumbran a ser utilizados para caudales más pequeños, y no son tan eficientes como los intercambiadores de placas en cuanto a la transferencia de calor. El *fouling* (incrustación de suciedad) en los tubos también puede ser un problema común.

3.4.3.2 Intercambiadores de placas

Estos intercambiadores consisten en una serie de placas unidas entre sí, cada una de las cuales presenta pasos corrugados y aplastados. Los dos fluidos que circulan por el intercambiador cruzan las placas en pasos alternados, de manera que el área de intercambio de calor es muy grande.

Se trata de intercambiadores con una gran eficiencia de transferencia, debido a su elevada área de contacto entre fluidos. Además, el área de intercambio puede incrementarse añadiendo más placas a la serie, por lo que se trata de intercambiadores muy eficaces para el caso de intercambio de calor entre dos líquidos. Por último, se trata de intercambiadores con una gran estanqueidad, resistencia al *fouling* y tolerancia a fluidos corrosivos.

Su principal inconveniente es que no están pensados para grandes caudales o temperaturas. Sin embargo, para intercambio entre fluidos a la misma presión, y caudales moderados, resultan muy adecuados.

Finalmente, se decide que un intercambiador de placas es el más adecuado para este proceso, debido a que se trata de un caudal moderado (12,5 m³/h), con temperaturas relativamente bajas, y poco gradiente de temperatura, por lo que un intercambiador de elevada eficiencia será lo ideal.

3.4.4 Cálculo del intercambiador

Una vez definidos las condiciones de operación y el tipo de intercambiador, se procede a dimensionar el equipo para ser capaz de llevar a cabo la transferencia de calor requerida. A continuación, se muestran los cálculos llevados a cabo para el diseño del intercambiador de placas W-6410.

3.4.4.1 Flujo de calor requerido

En primer lugar, se calcula la cantidad de calor que se deberá extraer del sistema por el intercambiador para disminuir la temperatura del acrilonitrilo desde los 35°C hasta los 25°C. Este flujo de calor tendrá en cuenta tanto el calor acumulado en el propio acrilonitrilo, como la irradiancia solar que sufrirá el producto a lo largo de las 8 horas que tarda el intercambiador en enfriar todo el producto; de esta manera, se garantiza que el intercambiador podrá cumplir su función incluso en las peores condiciones de radiación solar. Por otro lado, el calor aportado por la bomba se considera negligible debido a que aporta poca energía al fluido.

El flujo de calor a extraer para disminuir la temperatura del acrilonitrilo 10 grados se calcula a partir de su calor específico a presión constante, su peso molecular, y su densidad. Los datos de su calor específico, así como su densidad, se obtienen a partir de la base de datos del NIST [15]. La densidad del acrilonitrilo se extrae de la Guía de Almacenamiento y Manipulación del Acrilonitrilo de INEOS. A continuación, se recogen todas las propiedades del acrilonitrilo necesarias para el cálculo del flujo de calor a extraer:

Tabla 3.4.1. Propiedades físicas del acrilonitrilo [1][15].

Propiedad física (Unidades)	Valor
Calor específico $\left(\frac{J}{mol \cdot K}\right)$	108,78
Peso molecular $\left(\frac{g}{mol}\right)$	53,06
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	806

Estas propiedades se convierten a unidades que permitan realizar el cálculo de manera más sencilla:

$$108,78 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot \frac{1 kJ}{1000 J} \cdot \frac{1 mol}{53,06 g} \cdot \frac{1000 g}{1 kg} = 2,05 \frac{kJ}{kg \cdot K} \quad (3.4.2)$$

Una vez se tiene el dato de calor específico en las unidades adecuadas, se puede calcular el flujo de calor a extraer a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_{ACN} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.4.3)$$

Donde:

- Q = Calor extraído o añadido a la sustancia, en kJ.
- m = Cantidad de masa de la sustancia, en kg.
- Cp = Calor específico de la sustancia a presión constante, en kJ/kg·K.
- ΔT = Incremento de temperatura de la sustancia, en K.

Se calcula la masa de acrilonitrilo que deberá enfriarse en el caso de que el tanque esté a capacidad máxima (100 m³):

$$m = \rho \cdot V = 806 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 100 \text{ m}^3 = 80600 \text{ kg} \quad (3.4.4)$$

Una vez conocida la masa de acrilonitrilo, se puede calcular el calor total a extraer:

$$Q_{ACN} = 80600 \text{ kg} \cdot 2,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 10 \text{ K} = 1653 \text{ MJ} \quad (3.4.5)$$

Como se ha definido un tiempo de operación de 8 h durante el cual el intercambiador deberá ser capaz de extraer todo este calor, se calcula el flujo de calor que deberá generar el intercambiador:

$$\dot{Q}_{ACN} = \frac{Q}{t} = \frac{1652406 \text{ kJ}}{8 \text{ h}} = 206550,80 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \quad (3.4.6)$$

Con esto, se determina el calor que deberá ser extraído teniendo en cuenta únicamente la temperatura del acrilonitrilo. A este calor, deberá sumarse el generado por la irradiancia solar sobre las paredes del tanque, que se calculará a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_{Sol} = I \cdot A \cdot t \quad (3.4.7)$$

Donde:

- I = Irradiancia solar por unidad de superficie y tiempo, en $\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$
- A = Superficie del tanque irradiada por la luz del sol, en m².
- t = Tiempo de exposición a la radiación solar, en h.

Tal y como se ha determinado previamente, el factor de irradiancia solar para la provincia de Tarragona en el mes de julio (el mes con mayor valor de irradiancia solar) es de $1116 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$. En cuanto al área del tanque, teniendo en cuenta que tiene una altura de 10 m y un diámetro de 3,6 m:

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (3.4.8)$$

Donde:

- r = Radio del tanque, en m.
- L = Altura del tanque, en m.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{3,6}{2}\right) m \cdot 10 m = 113,10 m^2 \quad (3.4.9)$$

Finalmente, se calcula el calor a disipar provocado por la irradiancia solar a lo largo de las 8 h de recirculación:

$$Q_{Sol} = 1116 \frac{kJ}{m^2 \cdot h} \cdot 113,10 m^2 \cdot 8 h = 1009733 kJ \quad (3.4.10)$$

Un total de 1010 MJ kJ deberán disiparse a lo largo del ciclo de refrigeración. Por último, se calcula el flujo de calor:

$$\dot{Q}_{Sol} = \frac{Q}{t} = \frac{1009733}{8} = 126216,60 \frac{kJ}{h} \quad (3.4.11)$$

Por lo tanto, ya puede calcularse el flujo de calor total que se extraerá mediante el intercambiador W-6410:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{ACN} + \dot{Q}_{Sol} = 206550,80 \frac{kJ}{h} + 126216,60 \frac{kJ}{h} = 332767,40 \frac{kJ}{h} \quad (3.4.12)$$

El flujo de calor total será de 333 MJ/h. Esto equivale a un flujo de 92,44 kW.

3.4.4.2 Propiedades del fluido frío

Para poder calcular el caudal de agua glicolada necesario, primero se deberán conocer las propiedades de la mezcla de agua empleada para la refrigeración. A pesar de que el sistema de enfriamiento mediante un circuito de agua glicolada enfriada en Chillers es el empleado actualmente en planta para otros tanques, se desconoce la composición concreta de esta mezcla, por lo que se deciden emplear datos correspondientes a las mezclas más habituales de agua glicolada en el mercado [16].

Finalmente, se decide emplear una mezcla de agua con etilenglicol al 30%, puesto que las temperaturas no serán especialmente bajas, y se considera que con esta proporción de etilenglicol será más que suficiente. Las propiedades de esta mezcla se indican en la tabla siguiente:

Tabla 3.4.2. Propiedades del agua glicolada [16].

Propiedad (Unidades)	Valor
Conductividad térmica, $k \left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	0,61
Calor específico, $C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K}\right)$	3729,95
Viscosidad dinámica, μ (Pa·s)	0,001864
Densidad, ρ (kg/m ³)	1035,02

Una vez definidas las propiedades, se procede a calcular el caudal de agua glicolada requerido para enfriar el acrilonitrilo de 35°C a 25°C. Para ello, se emplea la siguiente expresión empleada anteriormente:

$$Q_{\text{Agua}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (3.4.13)$$

El calor recibido por el agua glicolada será el mismo que el que deberá ceder el acrilonitrilo, por lo que ya se conoce este valor. El siguiente paso es definir el incremento de temperatura deseado. Se realiza el cálculo del caudal másico requerido fijando una temperatura de 18°C, puesto que el límite de entrada en el retorno del chiller es de 20°C, y es recomendable intentar no alcanzar este límite. Por otro lado, con un incremento de temperatura menor, la pérdida de carga aumenta de manera muy significativa. De esta manera:

$$m_{\text{agua}} = \frac{2662139,34 \text{ kJ}}{3,73 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (18-10) \text{ } ^\circ\text{C}} = 89214,98 \text{ kg} \quad (3.4.14)$$

$$\dot{m}_{\text{Agua}} = \frac{89214,98 \text{ kg}}{8 \text{ h}} = 11151,87 \text{ kg/h} = 3,10 \text{ kg/s} \quad (3.4.15)$$

Se requerirá un caudal de 11151,87 kg/h de agua glicolada. Con esta información, se puede realizar el cálculo geométrico y de transferencia de calor del intercambiador de placas.

3.4.4.3 Resultados del dimensionamiento del intercambiador

En este apartado se recogen los resultados obtenidos mediante los cálculos llevados a cabo para el dimensionamiento del intercambiador. Se muestran tanto los resultados del dimensionamiento geométrico, como de la transferencia de calor estimada en el intercambiador. El procedimiento llevado a cabo para obtener estos resultados se muestra en el anexo B del informe.

Tabla 3.4.3. Parámetros básicos del intercambiador.

Parámetro	Acrilonitrilo	Agua glicolada
$C_p \left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right) [1][15]$	2,05	3,73
Densidad $\left(\frac{kg}{m^3} \right) [1][15]$	806,00	1035,02
Temperatura inicial (°C)	35	10
Temperatura final (°C)	25	18
Flujo de calor a eliminar (kW)		92,44
Caudal másico $\left(\frac{kg}{s} \right)$	2,80	3,10

En la tabla 3.4.4 se muestran los parámetros geométricos calculados del intercambiador.

Tabla 3.4.4. Parámetros geométricos del intercambiador.

Parámetro	Valor
HPCD (m)	0,17
VPCD (m)	0,46
D (m)	0,05
W (m)	0,24
Ap (m ²)	0,115
Le (m)	0,48
Grosor de placa – ϵ (m)	0,0004
Número de placas	50
Profundidad (m)	0,14
Separación entre pacas – B (m)	0,0023
Área de paso por canal – SC (m ²)	0,00056
Parámetro ϕ	1,17
Diámetro equivalente – De (m)	0,004
Número de canales por fluido – Nc	24,5

Por último, en la tabla 4.5.5 se indican los parámetros de transferencia de calor calculados para el sistema.

Tabla 4.5.5. Parámetros de transferencia de calor.

Parámetro	Acrilonitrilo	Agua glicolada
Caudal por canal – $Mc \left(\frac{kg}{s} \right)$	0,11	0,13
Velocidad másica – $M \left(\frac{kg}{s \cdot m^2} \right)$	203,65	225,41
Viscosidad dinámica – μ (Pa·s)	$3,40 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$
Número de Reynolds	2382,94	481,12
Conductividad térmica – $k \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$	0,17	0,49
Capacidad calorífica – $Cp \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$	2050,13	3729,95
Número de Prandtl – Pr	4,20	14,19
Nusselt – Nu	68,46	56,49
Coefficiente de transferencia – $h \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	2856,34	6957,26
Resistencia al fouling – $Rf \left(\frac{m^2 \cdot K}{W} \right)$	0,00018	0,00053
Coefficiente de transferencia global – $U \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$		812,68
Pérdida de carga en los canales – ΔP_c (Pa)	43979,42	41894,37
Pérdida de carga en los puertos – ΔP_p (Pa)	1890,39	1803,98
Pérdida de carga total – ΔP (Pa)	45869,81	43697,98

4 Instrumentación y control

Se pretende dotar a la instalación de un sistema de control con su correspondiente instrumentación que permita llevar a cabo al operativa indicada y a la vez sea capaz de proteger el tanque y las instalaciones de posibles peligros. En este apartado se explicará de manera general el funcionamiento del sistema de control mediante el PLC, los enclavamientos definidos para el tanque, y la instrumentación escogida para la instalación.

4.1 Sistema de control

El sistema de control de la planta está basado en un PLC, siglas de Controlador lógico programable (Programmable Logic Computer). Se trata de una computadora central que puede ser programada para automatizar los procesos de la planta a partir de la monitorización de las señales de entrada que se conectan a este sistema. A partir de estas señales de entrada, y mediante la programación lógica, es capaz de enviar señales de salida hacia los dispositivos finales que actúan sobre el proceso, controlando de esta manera el sistema en función de la información que recibe de los instrumentos.

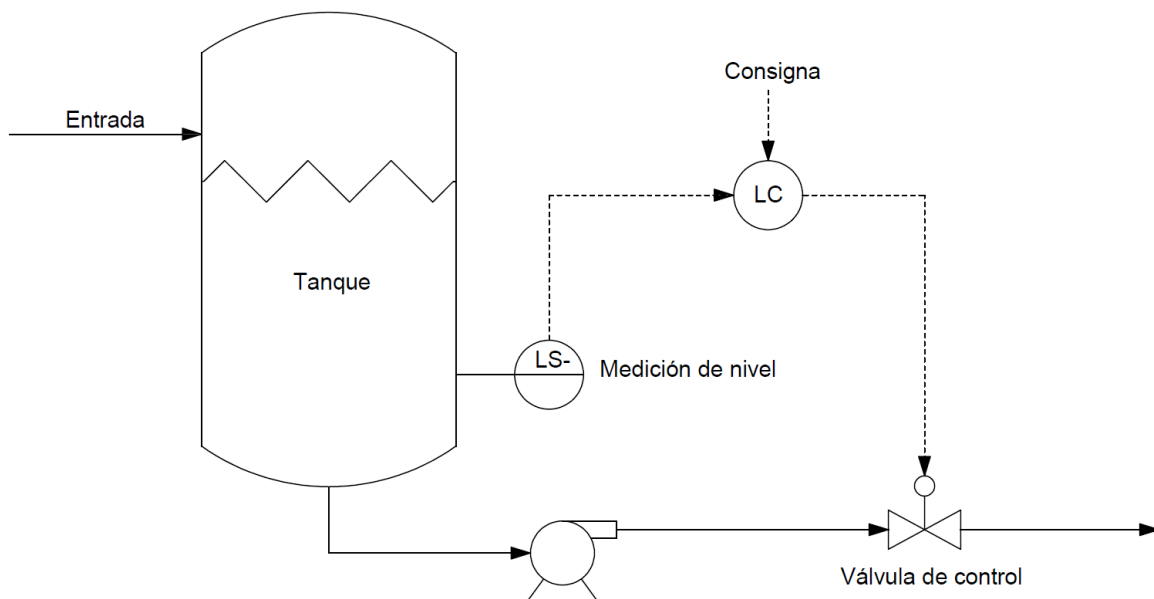


Figura 4.1.1. Esquema típico de control del nivel de un tanque mediante un transmisor de nivel.

Los instrumentos que se instalan en campo (que pueden ser sensores de temperatura, de presión, finales de carrera de válvulas, etcétera) son capaces de leer una determinada variable en campo, convertir esa información a corriente eléctrica, y transmitir esa señal hacia el PLC. La señal de los instrumentos puede ser analógica (un valor de temperatura), en cuyo caso se transmitiría en un rango de 4 a 20 mA, o digital (un final de carrera que informe si la válvula se encuentra abierta o cerrada), y normalmente se instalan en el lazo barreras de seguridad intrínseca para prevenir la formación de chispas, provocando así posibles incendios o explosiones.

El PLC recibe estas señales, y puede ser programado para actuar en consecuencia sobre dispositivos de salida en el proceso. Un ejemplo es una válvula de entrada al tanque que se cierra cuando el sensor de nivel del mismo tanque indica que éste ha alcanzado el nivel de llenado deseado. Esta programación puede ser utilizada tanto por motivos de operativa, como de seguridad.

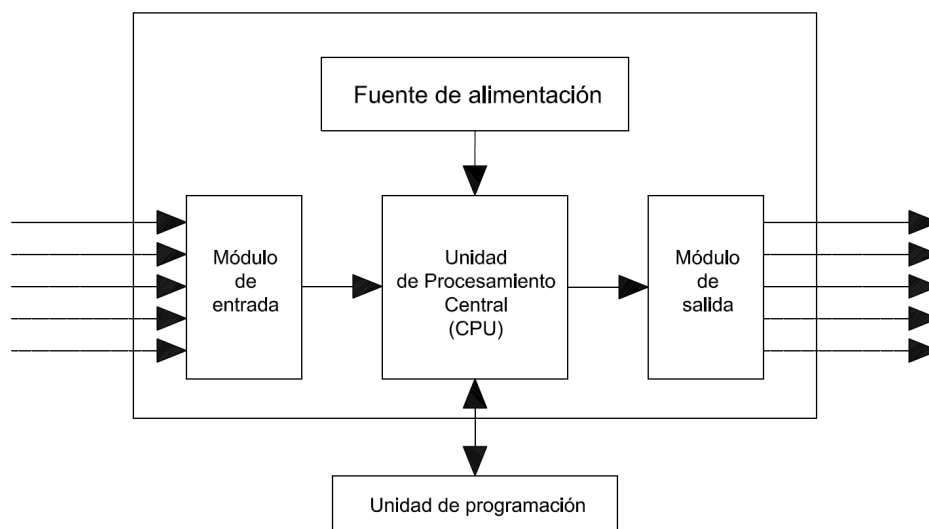


Figura 4.1.2. Esquema básico de entradas y salidas de un PLC.

Es importante mencionar que, a pesar de que todas las válvulas automáticas pueden ser controladas de manera automática mediante el PLC, también pueden ser operadas desde el panel por los operadores y panelistas, ya que el PLC permite cambiar el control de las válvulas a manual, de manera que el criterio humano siempre pueda sobreponerse a la programación previa.

4.1.1 Safety PLC y Lazos Z

Para garantizar un nivel de seguridad extra en el funcionamiento de la planta, se dispone de un Safety PLC independiente del PLC normal, el cual se emplea para programar lazos de control con un nivel de seguridad más elevado (SIL2 o SIL3), de manera que, aún en el caso de fallo del PLC normal, el sistema disponga de un mecanismo de seguridad para los instrumentos más críticos de planta.

Estos lazos de control son programados directamente en el Safety PLC, sin pasar por el PLC, y reciben el nombre de lazos Z. Son los sistemas instrumentados de seguridad más importantes de la planta, y garantizan un nivel de seguridad extra en equipos críticos.

Cualquier instrumento que forme parte de un lazo Z deberá estar duplicado como mínimo, de manera que, en caso de una discrepancia superior a un determinado umbral entre las dos señales, el sistema de control avise a los operadores de que algo no funciona correctamente en el proceso. Además, si la señal llega a un determinado valor definido previamente (trip point), se encargan de cesar el funcionamiento del equipo de inmediato.

Todos los lazos Z deberán estar documentados mediante su correspondiente Formulario Especificación y Revisión de Función de Seguridad Instrumentada, o SRS, el cual se divide en dos partes. La primera parte consiste en información sobre las entradas y salidas del sistema, es decir, los sensores y actuadores que forman parte del lazo. En la segunda parte se describe la lógica que sigue para aplicar el control sobre el proceso, así como la información de la programación del Safety PLC. Por motivos de confidencialidad, se realizará una versión simplificada de este formulario en la elaboración de este trabajo.

4.2 Enclavamientos y lazos de control del tanque

Para garantizar que el proceso se lleva a cabo correctamente y de manera segura, sin poner en peligro la integridad de la instalación, los equipos o las personas, se definen aquellos

enclavamientos que controlarán el sistema a partir de la señal de los diferentes instrumentos. Estos enclavamientos sirven para dar orden de paro a un determinado equipo o cerrar una válvula en concreto en caso de que una determinada variable de proceso supere un valor límite definido. Los enclavamientos del sistema se programan a través del PLC, y van separados del SPLC.

Cabe mencionar que los enclavamientos programados en el PLC pueden ser ignorados mediante la colocación de un *bypass* en el sistema de control. Esta acción puede ser útil, por ejemplo, para llevar a cabo la revisión de un lazo Z, puesto que los enclavamientos del PLC tienen un tiempo de respuesta menor a la hora de actuar frente a un valor anómalo del sistema en comparación a aquellos del Safety PLC. De esta manera, realizando un *bypass* en los enclavamientos del PLC se puede comprobar si un determinado lazo Z funciona correctamente haciendo parar una bomba, por ejemplo.

A continuación, en la tabla 4.2.1 se recogen los enclavamientos asociados a los diferentes transmisores de señal de la instalación.

Tabla 4.2.1. Enclavamientos del tanque B-63.

Instrumento	Efecto	Causa	Set point
L63100	Orden de paro a la bomba P-6310	Bajo nivel en la aspiración.	0%
P63103	Orden de paro a la bomba P-6310	Presión alta en la impulsión.	10 bar
T63103	Orden de paro a la bomba P-6310	Temperatura alta en la impulsión.	35°C
T63104	Orden de paro a la bomba P-6310	Temperatura alta en la impulsión.	35°C
L63200	Cierre de válvula H63002	Nivel alto en B-63.	95%
	Orden de paro a la bomba P-6310	Nivel alto en B-63.	95%
	Cierre de válvula H63003	Nivel bajo en B-63.	10%
	Orden de paro a la bomba P-6320	Nivel bajo en B-63.	10%
P63201	Cierre de válvula H63002	Presión alta en B-63.	14 mbar
	Orden de paro a la bomba P-6310	Presión alta en B-63.	14 mbar
	Cierre de válvula H63003	Presión baja en B-63.	-5 mbar
	Orden de paro a la bomba P-6320	Presión baja en B-63.	-5 mbar
L63300	Orden de paro a la bomba P-6320	Nivel bajo en aspiración.	0%
P63302	Orden de paro a la bomba P-6320	Presión alta en la impulsión.	10 bar
T63203	Orden de paro a la bomba P-6310	Temperatura alta en la impulsión.	35°C
T63204	Orden de paro a la bomba P-6310	Temperatura alta en la impulsión.	35°C
T63202	Apertura de válvula H63005	Temperatura alta en B-63.	35°C
T63204	Apertura de válvula H63005	Temperatura alta en B-63.	35°C
F64100	Apertura de válvula H63007	Caudal bajo de agua de refrigeración.	0 m ³ /h
	Cierre de válvula H63006		
	Cierre de válvula H63008		

4.3 Lazos Z de la instalación

La necesidad o no de instalar un lazo Z se debe considerar en cada caso, analizando los puntos críticos de la instalación. Herramientas como el HazOp pueden ayudar a identificar los puntos en los que es necesario un nivel extra de seguridad.

En este caso, a partir del árbol de fallos realizado en el apartado 6, se determina la necesidad de programar un lazo Z que controle la temperatura en la impulsión de las bombas P-6310 y P-6320. Esto se debe a que un aumento en la temperatura de impulsión podría implicar un funcionamiento de la bomba con la impulsión bloqueada, lo que podría provocar, además de daños graves en la bomba, una rotura con derrame de producto y posible incendio o explosión.

La nomenclatura de los lazos Z acostumbra a ser un prefijo UZ seguido de una serie de 5 números que dan información sobre la zona de proceso donde se encuentran. En este caso, se deciden emplear los TAGs UZ63001 y UZ63002.

Para controlar el lazo UZ63001, se instalan dos sensores de temperatura, T63104 y T63105, en la impulsión de la bomba P-6310. Estos instrumentos serán las entradas del lazo Z, y a partir de los valores de temperatura medidos, actuarán sobre las salidas. En este caso, una activación del lazo Z actuará dando orden de paro a la bomba P-6310.

El lazo sigue una lógica 1oo2 (1 *out of 2*, refiriéndose al número de votos necesarios de entre los totales) en la que se revisan dos señales y un cambio de valor en una sola de las señales se tiene en cuenta. La lógica actúa de la siguiente manera: en caso de que cualquiera de las dos señales alcance el *trip point*, que en este caso es de 35°C, el lazo actúa parando la bomba P-6310.

Sin embargo, aún en el caso de que ninguno de los dos valores alcance el *trip point*, si la discrepancia entre los valores medidos supera el 3%, el sistema interpretará que uno de los dos instrumentos podría estar averiado. En este caso, activará una alarma de lazo Z en el panel de control, y comenzará una cuenta atrás de 8 horas conocida como MTTR (*Maximum Time To Repair*), y si el error no se repara durante este período de tiempo, el sistema actúa de igual manera parando la bomba y cerrando la válvula.

En el caso del lazo UZ63002, el procedimiento es el mismo, empleando las temperaturas T63203 y T63204 en la salida de la bomba P-6320.

A continuación, se realiza una versión simplificada del formulario SRS para los lazos UZ63001 y UZ63002.

Tabla 4.3.1. Primera parte del SRS del lazo UZ63001.

Part A: Technology / Operation			
Specification & Review Form for Safety Instrumented Function UZ63001			
A01 Hazardous Event and possible Effects			
Temperatura alta en la bomba P-6310 al trabajar con impulsión bloqueada o aspiración e impulsión bloqueadas. Daño en la bomba, derrame del producto, explosión.			
A02 SIF Description			
Se cuenta un tiempo inicial de 30 segundos al arrancar la bomba P-6310, y si la temperatura es mayor a 35°C, actúa parando la bomba			
A03 Safe State of the Process			
T63103 < 35°C T63104 < 35°C			
A04 Normal Operating Range and Safe Operating Range			
25°C < T63103 < 35°C 25°C < T63104 < 35°C			
A06 SIL (Safety Integrity Level) acc. IEC 61511			
SIL 2			
A07 Maximum SIF Response time (in seconds) requirements			
30 s			
A08 Process Inputs and Trip Points			
Descripción	TAG	Votación	Trip Point
Temperatura impulsión P-6310	T63103	1oo2	35°C
Temperatura impulsión P-6310	T63104	1oo2	35°C
A09 Process Outputs and Actions			
Descripción	TAG	Votación	Acción
Bomba descarga acrilonitrilo a B-63	P-6310	1oo1	Paro de bomba
A10 Maximum Time (in hours) To Repair			
8 h			
A11 Action(s) to be taken on loss of energy to SIS or loss of other auxiliary supplies			
En caso de fallo de energía, la instalación pasa a posición segura (Posición de seguridad: bomba parada)			
En caso de fallo de energía hay un SAI			

Tabla 4.3.2. Segunda parte del SRS del lazo UZ63001.

Part B: Process Control / E&I
B01 Inputs / Outputs relationship
Una medición de temperatura lleva a la activación (1oo2). Paro de la bomba con votación (1oo1). Tras un retardo inicial de 30s desde la confirmación de marcha de P-6310, si T63103 y/o T63104 es mayor a 35°C, actúa parando la bomba P-6310.
B02 Automatic diagnosis measures and response to (automatic detected) faults
Sensor(es): Detección de circuito abierto, corto circuito de la señal 4-20 mA (<3,6 mA, >21 mA) Solver lógico: Sistema de diagnósticos propio del SPLC. Activación del SIF -> desenergización de las señales de las salidas Elemento(s) final(es): Señalización on/off y feedback desde las válvulas a BPCS (Sistemas Básicos de Control de Procesos)
B03 Measurement Principle
T63103: RTD PT100 T63104: RTD PT100
B04 Measurement Range
-40°C < T63103 < 85°C -40°C < T63104 < 85°C
B05 Measurement Accuracy
± 0,20 °C
B06 Specific Test Requirements
Realizar prueba del lazo con un intervalo de 1 año.

Tabla 4.3.3. Primera parte del SRS del lazo UZ63002.

Part A: Technology / Operation			
Specification & Review Form for Safety Instrumented Function UZ63002			
A01 Hazardous Event and possible Effects			
Temperatura alta en la bomba P-6320 al trabajar con impulsión bloqueada o aspiración e impulsión bloqueadas. Daño en la bomba, derrame del producto, explosión.			
A02 SIF Description			
Se cuenta un tiempo inicial de 30 segundos al arrancar la bomba P-6320, y si la temperatura es mayor a 35°C, actúa parando la bomba			
A03 Safe State of the Process			
T63203 < 35°C T63204 < 35°C			
A04 Normal Operating Range and Safe Operating Range			
25°C < T63203 < 35°C 25°C < T63204 < 35°C			
A06 SIL (Safety Integrity Level) acc. IEC 61511			
SIL 2			
A07 Maximum SIF Response time (in seconds) requirements			
30 s			
A08 Process Inputs and Trip Points			
Descripción	TAG	Votación	Trip Point
Temperatura impulsión P-6320	T63203	1oo2	35°C
Temperatura impulsión P-6320	T63204	1oo2	35°C
A09 Process Outputs and Actions			
Descripción	TAG	Votación	Acción
Bomba reciclo / envío a planta	P-6320	1oo1	Paro de bomba
A10 Maximum Time (in hours) To Repair			
8 h			
A11 Action(s) to be taken on loss of energy to SIS or loss of other auxiliary supplies			
En caso de fallo de energía, la instalación pasa a posición segura (Posición de seguridad: bomba parada)			
En caso de fallo de energía hay un SAI			

Tabla 4.3.4. Segunda parte del SRS del lazo UZ63002.

Part B: Process Control / E&I
B01 Inputs / Outputs relationship
Una medición de temperatura lleva a la activación (1oo2). Paro de la bomba con votación (1oo1). Tras un retardo inicial de 30s desde la confirmación de marcha de P-6320, si T63203 y/o T63204 es mayor a 35°C, actúa parando la bomba P-6320.
B02 Automatic diagnosis measures and response to (automatic detected) faults
Sensor(es): Detección de circuito abierto, corto circuito de la señal 4-20 mA (<3,6 mA, >21 mA) Solver lógico: Sistema de diagnósticos propio del SPLC. Activación del SIF -> desenergización de las señales de las salidas Elemento(s) final(es): Señalización on/off y feedback desde las válvulas a BPCS (Sistemas Básicos de Control de Procesos)
B03 Measurement Principle
T63203: RTD PT100 T63204: RTD PT100
B04 Measurement Range
-40°C < T63203 < 85°C -40°C < T63204 < 85°C
B05 Measurement Accuracy
± 0,20 °C
B06 Specific Test Requirements
Realizar prueba del lazo con un intervalo de 1 año.

4.4 Selección de la instrumentación

En este apartado, se escogerán los modelos a emplear en la instrumentación de la instalación. Esto incluye transmisores de presión, de temperatura, de nivel y de caudal. Se deberá tener en cuenta el producto tratado, el rango del instrumento, las condiciones de proceso, y el funcionamiento del propio instrumento.

Es importante asegurar que, debido a la posible formación de atmósferas explosivas, se deberá asegurar que todos los instrumentos empleados son certificados ATEX. De lo contrario, se pondría en peligro la integridad de la instalación.

4.4.1 Presión

El uso de instrumentos capaces de medir la presión es fundamental para garantizar la seguridad de los equipos de la planta. Se requiere el uso de transmisores de presión que permitan conocer y enviar señal al PLC con la presión en el interior del tanque y en la impulsión de las bombas, así como manómetros locales que permitan conocer la presión en puntos concretos de la línea a los operadores que se encuentren en la planta.

Los transmisores de presión funcionan mediante el uso de sensores que captan la presión en un punto del proceso y la convierten en una señal eléctrica, la cual será proporcional a la variación de la presión aplicada por el fluido dentro del rango de trabajo del instrumento. Uno de los proveedores más populares de instrumentos de presión es WIKA [17], el cual será empleado para la elección de los instrumentos de presión empleados en la instalación debido a su amplia variedad de productos.

Dentro del catálogo de productos de medición de presión de WIKA, se busca un modelo de transmisor de presión absoluta, con señal 4-20 mA en concordancia con el resto de los instrumentos de la planta. El rango de medida deberá ser superior a 1 bar absoluto, puesto que la presión puede ser superior a este valor en diferentes puntos del proceso, por lo que se escoge la opción de transmisores con un rango de medida igual o inferior a 40 bar. También se priorizará que el transmisor disponga de un *display* que muestre el valor de presión medido en planta.

A partir de estas condiciones, los modelos más adecuados son el IPT-20 y el IPT-21. Se trata de modelos válidos para la industria química y zonas potencialmente explosivas, con certificado de protección Ex y aplicaciones hasta SIL2 y SIL3, y con seguridad en caso de vacío. Se escoge el modelo IPT-20 con conexión roscada estándar, por su practicidad de uso.



Figura 4.4.1. Transmisor de presión modelo IPT-20 (izquierda), y IPT-21 (derecha).

Las características del modelo escogido se muestran en la tabla 4.4.1.

Tabla 4.4.1. Características del transmisor de presión WIKA IPT-20.

Característica	Valor
Rango de medición (bar)	0..40
Seguridad de vacío	Si
Protección a sobrepresión (≤ 40 bar)	3 veces
Señal de salida	4-20 mA con señal HART superpuesta
Temperatura de operación ($^{\circ}\text{C}$)	$-40 \leq T_{\text{op}} \leq 105$
Material en contacto con el medio	Acero inoxidable 316L

Para el modelo de manómetros, se escoge un manómetro de presión relativa con un rango de 0 a 600 mbar para aquellos manómetros ubicados después de válvulas reductoras de presión, y un manómetro con rango superior a 1 bar para el manómetro P63400 ubicado antes de la reductora P63410.

Para el primer caso se escoge el modelo 632.50, apto para todo tipo de medios agresivos en industrias química y petroquímica, entre otras. Se escoge este modelo ya que resulta suficiente para las condiciones de trabajo del sistema.



Figura 4.4.2. Manómetro WIKA Modelo 632.50.

En la tabla 4.4.2 se indican las características de este modelo de manómetro.

Tabla 4.4.2. Características del modelo 632.50.

Característica	Valor
Rango de medición (mbar)	0...600
Elemento de medida	Membrana encapsulada
Diámetro nominal	DN63, DN100, DN160
Temperatura de operación (°C)	-20...+100
Material en contacto con el medio	Acero inoxidable 316L

Para el caso de la línea de nitrógeno de 3 bar, se emplea un manómetro con un rango de 0 a 4 bar. El modelo escogido es el 232.50.



Figura 4.4.3. Manómetro WIKA Modelo 232.50.

En la tabla 4.4.3 se adjuntan las características principales del modelo.

Tabla 4.4.3. Características del modelo 232.50.

Característica	Valor
Rango de medición (bar)	$0 \leq P_{op} \leq 4$
Elemento de medida	Muelle tubular, tipo C o helicoidal
Diámetro nominal	DN63, DN100, DN160
Temperatura de operación (°C)	$-40 \leq T_{op} \leq 200$
Material en contacto con el medio	Acero inoxidable 316L

4.4.2 Nivel

Uno de los parámetros críticos en la instrumentación de un tanque es la medición del nivel de éste. Conocer el nivel en el interior del tanque es crítico tanto por seguridad de la

instalación como por operativa. Los instrumentos de nivel que se instalarán en el tanque serán un transmisor de nivel continuo que transmita en todo momento el nivel del tanque, y un sensor de sobrellenado que realice el enclavamiento en caso de que el nivel llegue a un valor máximo.

Dentro de la amplia gama de suministradores de instrumentación de control, y específicamente de transmisores de nivel, Emerson es uno de los más populares, disponiendo incluso de guías y manuales sobre instrumentación industrial y las ramas más comunes de esta [18]: medición de nivel, temperatura o caudal, entre otros.

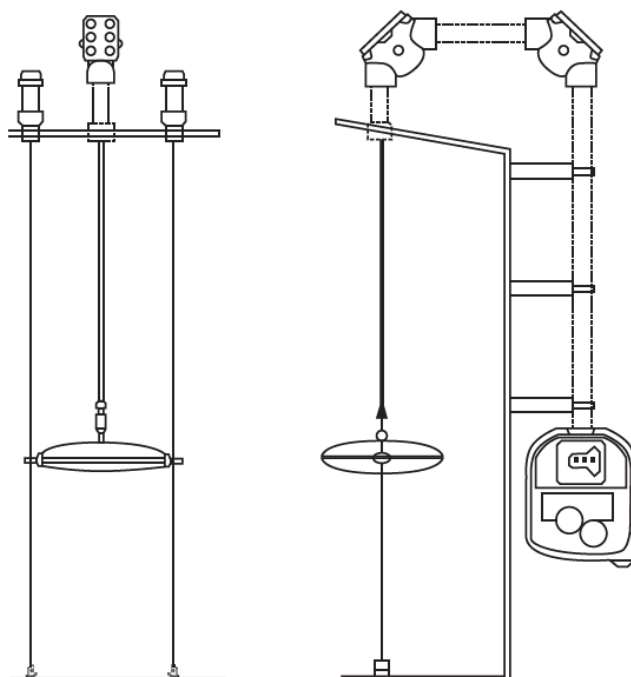


Figura 4.4.4. Transmisor de nivel por boya o cuerda [19].

Las principales tecnologías para la medición de nivel consisten en transmisores de boya, de presión diferencial, y de radar. Los transmisores de boya son los menos precisos debido al movimiento de la cuerda y la pieza flotante, además de que requieren la instalación de un tubo tranquilizador que estabilice la medición, y los transmisores de presión diferencial, a pesar de ser efectivos, requieren de una instalación más complicada puesto que se debe poder instalar un ramal del transmisor en el fondo del tanque para poder medir correctamente la presión ejercida por la columna de líquido. Por lo tanto, se decide emplear un transmisor de nivel por radar para la medición del tanque.

La ventaja de los medidores por radar es que ni disponen de partes móviles ni llegan a estar en contacto con el líquido en ningún momento, por lo que el mantenimiento resulta especialmente sencillo y es apto para productos sucios. Tampoco influye la densidad del fluido medido, por lo que un cambio en el producto del tanque no supone un problema que requiera recalibrar de nuevo el instrumento.

El modelo escogido es el Rosemount 5408 Level Transmitter [19]. Se trata de un modelo con una precisión de ± 2 mm, certificación ATEX y nivel de seguridad SIL 2, un rango de hasta 40 m, y comunicación 4-20 mA con HART. Por lo tanto, cumple con los requisitos del sistema para el tanque diseñado.



Figura 4.4.5. Transmisor de nivel Rosemount 5408.

En la tabla 4.4.4. se adjuntan las características del modelo de transmisor de nivel escogido.

Tabla 4.4.4. Características del modelo Rosemount 5408.

Característica	Valor
Precisión (mm)	± 2
Rango de medida (m)	40
Presión de operación (bar)	100
Temperatura de operación (°C)	-60 a +250
Protocolo de comunicación	4-20 mA con HART
Seguridad	SIL 2

4.4.3 Temperatura

La medición de la temperatura es un elemento crítico en el control de la planta. En este caso particular, el control de la temperatura del proceso tiene dos objetivos principales:

- Evitar que la temperatura del producto alcance valores de riesgo.
- Evitar que la bomba trabaje con la impulsión cerrada, provocando un posible accidente.

Emerson dispone de una guía básica [20] sobre la medición de temperatura en ámbitos industriales donde se explican por encima los fundamentos de la instrumentación enfocada a la temperatura, los diferentes tipos de sensores, las partes de las que dispone un transmisor de temperatura, y los posibles criterios que se deben tener en cuenta a la hora de escoger los productos.

Las condiciones de proceso no son demasiado extremas: el acrilonitrilo no deberá alcanzar temperaturas superiores a los 60°C bajo ningún concepto, y no se trata de un producto especialmente corrosivo o agresivo con los materiales empleados, por lo que no se requieren sensores de temperatura con rangos muy amplios o de un material específico que sea compatible con el acrilonitrilo.

Un sistema de medición de temperatura se compone principalmente de tres partes que deberán escogerse en función de las características del proceso: el sensor, el transmisor y el termopozo.

El termopozo es la vaina metálica en la cual se introduce el sensor de temperatura para proteger a éste de los posibles peligros de estar en contacto con el fluido de proceso, como puede ser la corrosión o el estrés mecánico debido a las corrientes de fluido. Por lo tanto, esta será la única parte del transmisor en contacto con el producto, y el principal criterio a la hora de escoger un termopozo es que el material sea compatible tanto con la sustancia en cuestión como con el material de la línea, para evitar casos de corrosión debido a incompatibilidad de metales (corrosión galvánica). También se deberá comprobar que el termopozo escogido es capaz de soportar las presiones y temperaturas del proceso.



Figura 4.4.6. Diferentes tipos de termopozos.

Para la elección del material, en la figura 4.4.7 se muestra una tabla de compatibilidad de materiales obtenida de la guía de Emerson mencionada anteriormente, en la cual se muestran los límites de presión y temperatura de cada material, así como su tolerancia a ambientes corrosivos o agresivos. En este caso, la tabla indica que la presión límite del acero al carbono en las condiciones más extremas (900°F, que equivalen aproximadamente a unos 480 °C) es de 2000 psi, o 137 bar. Debido a que estas condiciones no se van a llegar a alcanzar en ningún caso en el proceso, el acero al carbono es más que suficiente para este caso, de manera que se escoge este material para que sea el mismo de la línea.

Tabla 4.4.5. Tabla de compatibilidades de materiales en termopozos [20].

Materials	Recommended Usage	Process Rating ⁽¹⁾ (psi) at Temperature (°F)						
		0 °F	300 °F	500 °F	700 °F	900 °F	1000 °F	1300 °F
304 SST	Good resistance to oxidation.	5600	4800	4700	4600	3400	2400	780
316 SST	Good resistance to corrosion. Better resistance to chemical attack than 304 SST.	5600	5400	5300	5200	4400	3200	1250
Carbon Steel	For non-corrosive service.	3700	3700	3700	3650	2000	–	–

En cuanto al tipo de unión, puede ser tanto roscada, soldada o bridada. No se considera la opción roscada debido a que es la más propensa a fugas, y soldar el termopozo resulta poco práctico en caso de que se quiera realizar mantenimiento o sustitución, por lo que se decide por un termopozo de unión bridada, siendo el más cómodo a la hora de instalar, desmontar y sustituir. Se trata de un tipo de unión que tolera altas temperaturas y presiones sin riesgo de fugas o daños.

Respecto al sensor empleado, se debe escoger entre un sensor RTD (Resistance Temperature Detectors) o un sensor Termopar.

El sensor RTD mide la variación en la resistencia del sensor, en Ohms, la cual aumenta con la temperatura. Este fenómeno se conoce como resistividad térmica. El rango y la linealidad de esta medición depende del material empleado. Los materiales más comúnmente empleados son el platino, el níquel y el cobre, entre los cuales destaca el platino como principal opción debido a que presenta una gran linealidad, alta precisión, y una elevada variación de resistencia por grado de temperatura incrementado.

Los termopares consisten en una unión entre dos metales diferentes, que al presentar una diferencia de temperatura entre la unión caliente (en contacto con el proceso) y la unión fría (temperatura de referencia), presentan una diferencia de potencial proporcional a la diferencia de temperatura entre ambos extremos.

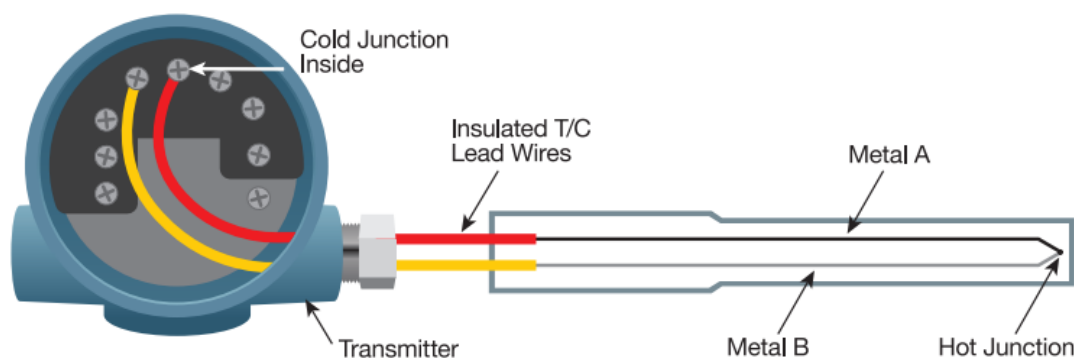


Figura 4.4.7. Estructura de un termopar [20].

A la hora de escoger entre los dos tipos de sensor, se deben conocer las condiciones del proceso que se va a medir para ver cuál es el tipo de sensor que se adecua más a las condiciones. El rango máximo teórico de los RTD puede ir de -200 a 850°C como máximo, mientras que los termopares están preparados para soportar temperaturas de hasta 2300°C , pero presentan una menor estabilidad que los RTD, los cuales son más precisos y fáciles de calibrar. Los sensores RTD también presentan un mayor ciclo de vida, mayor repetibilidad, y una linealidad superior.

Por estos motivos, y teniendo en cuenta que las temperaturas de proceso nunca van a llegar a valores en los que un termopar sea la única opción, se considera que la mejor opción es un sensor RTD.

Por último, también será necesario seleccionar un transmisor adecuado para el sistema. El transmisor se encarga de convertir la señal de entrada enviada por el sensor en una señal de salida robusta, que puede ser tanto analógica como digital. Esta señal de salida del transmisor presenta una alta resistencia al ruido, por lo que puede ser enviada a lo largo de

distancias considerables. En el caso que se trate de una señal analógica, lo más común es emplear una señal 4-20 mA.

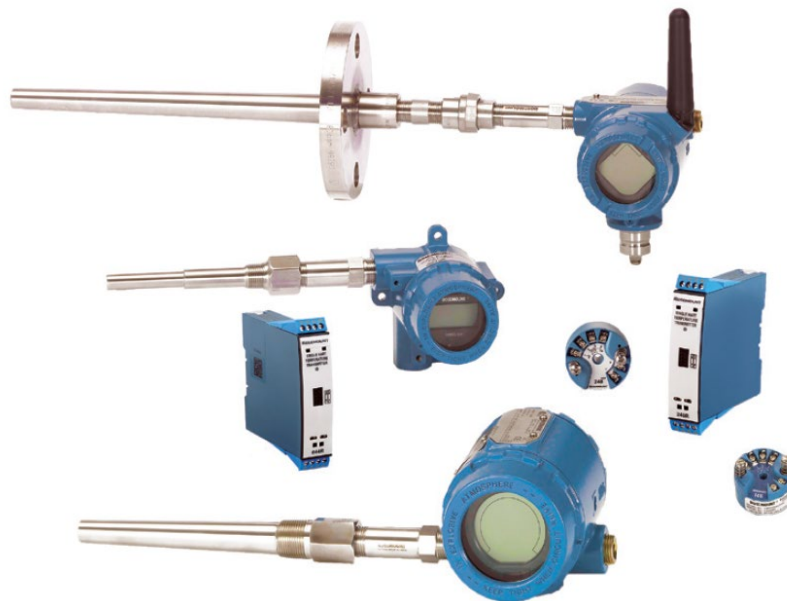


Figura 4.4.8. Diferentes tipos de transmisor.

El propio catálogo de Emerson recomienda modelos de transmisor usados de manera conjunta con los sensores escogidos, y de igual manera ocurre con los termopozos.

Finalmente, como sensor se escoge el modelo Rosemount 214C. Se trata de un sensor de tipo RTD PT100 que presenta un rango de -50 a 450 °C, con un nivel de precisión Clase A según IEC 60751. El modelo será de señal única con 4 hilos para mejorar los resultados medidos. El producto presenta certificación ATEX Seguridad intrínseca, Antideflagrante, Zona 2, y A prueba de ignición de polvos inflamables, entre otras certificaciones. En la tabla 4.4.4 se recogen las características del sensor.



Figura 4.4.9. Diferentes configuraciones del sensor modelo Rosemount 214C.

Tabla 4.4.4. Características del sensor Rosemount 241C.

Característica	Valor
Rango de temperatura (°C)	$-50 \leq T_{op} \leq 450$
Material del recubrimiento	321 SST
Precisión del sensor	Clase A según IEC 60751
Número de elementos	1 elemento, 4 hilos
Tiempo de respuesta (s)	$T_{50} = 8,5$; $T_{90} = 22,9$

El termopozo empleado para este modelo es el Rosemount 114C. Se trata de un termopozo fabricado en concordancia con el código de diseño ANSI B16.5, diseñado para conectarse a proceso mediante bridas que permitan montar y desmontar el instrumento de manera sencilla. El material de fabricación es acero al carbono.



Figura 4.4.10. Termopozo Rosemount 114C.

Finalmente, el transmisor escogido es el modelo Rosemount 248, que es el modelo habitualmente empleado con el sensor 241C. Se trata de un transmisor montado en carril, con capacidad para un solo sensor, señal de salida 4-20 mA con protocolo HART. Dispone de certificación de seguridad SIL 2.

Tabla 4.4.7. Características del transmisor Rosemount 248.

Característica	Valor
Salidas	2 líneas 4-20 mA, con señal de salida digital superpuesta.
Fuente de alimentación externa	Externa, mínimo 17,75 V CC con carga de 250 Ω
Límites de temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	$-40 \leq T_{op} \leq 85$
Tasa de actualización (s)	< 0,5
Amortiguación (s)	32 máximo, 5 por defecto
Precisión (Pt100)	$\pm 0,20$ $^{\circ}\text{C}$; $\pm 0,10$ % de span

En la figura 4.4.11 se muestra el transmisor modelo Rosemount 248.



Figura 4.4.11. Transmisor Rosemount 248.

4.4.4 Caudal

Se deberá seleccionar un modelo de transmisor de caudal empelado en la instalación. El transmisor de caudal permitirá conocer la cantidad de flujo que circula por la línea en cada momento, lo que permite evitar, por ejemplo, que la bomba funcione sin producto en la aspiración, provocando así daños irreparables.

Los caudalímetros se dividen principalmente en caudalímetros volumétricos, que informan sobre el volumen de fluido que atraviesa la línea, y caudalímetros másicos, que realizan un cálculo para estimar la cantidad de masa que atraviesa la línea. Los caudalímetros másicos pueden funcionar estimando el caudal másico a partir del caudal volumétrico y la densidad del fluido, mediante el cambio de temperatura del producto, o de manera directa en el caso de los caudalímetros de efecto Coriolis.

Los 3 tipos más comunes de caudalímetro son de tipo Vortex, de presión diferencial, y de efecto Coriolis.

Los caudalímetros de tipo Vortex funcionan en base al comportamiento de un fluido circulando a una velocidad determinada, al encontrarse con un obstáculo en su camino. El flujo se separa, y al volver a formarse, genera vórtices a ambos lados del obstáculo.

La distancia entre estos vórtices es constante y proporcional a la velocidad del fluido, por lo que de esta manera se puede determinar la velocidad del fluido, y a partir de ella, el caudal volumétrico. La frecuencia de los vórtices se mide mediante la diferencia de presión entre el lado en el que se forma vórtice y el contrario, ya que estos vórtices se forman de manera alternativa a cada lado.

Se trata de un tipo de caudalímetro muy económico y versátil a la hora de emplearlo en gran variedad de fluidos y condiciones de trabajo, aunque no sea tan preciso como otros tipos, como puede ser el caudalímetro de efecto Coriolis.

Los caudalímetros de presión diferencial funcionan restringiendo el área de paso de la tubería, formando así una diferencia de presión y, por lo tanto, de velocidad. Con esta caída de presión y consiguiente incremento de velocidad, se calcula el caudal volumétrico que pasa por la tubería.

Se trata de un tipo de caudalímetro muy empleado, pero no se considera debido a que introduce una pérdida de carga considerable en la línea, y económicamente el caudalímetro Vortex se considera mejor opción.

El caudalímetro más empleado a la hora de determinar caudales máxicos es el de efecto Coriolis. Se trata de un tipo de caudalímetro que funciona mediante un tubo en forma de U que oscila mediante un excitador. Al pasar por ese tubo, el fluido genera una inercia que hace que la oscilación del tubo tenga un desfase respecto a la vibración original. Este cambio en la oscilación depende únicamente de la cantidad de masa que atraviesa el tubo, por lo que se puede medir el caudal máxico de manera directa.

Se trata de un tipo de caudalímetro que funciona con todo tipo de productos, tanto líquidos como gases, y que es incluso capaz de medir densidades, y de esta manera obtener un caudal volumétrico. Es un modelo de caudalímetro con una gran precisión, por lo que es ampliamente utilizado hoy en día. Sin embargo, también se trata de un tipo de caudalímetro de elevado coste, por lo que se debe considerar si es un gasto necesario en cada caso.

Analizando las opciones, se considera que la mejor alternativa es emplear un caudalímetro de tipo Vortex, ya que no se necesita una elevada precisión como la que garantiza un Coriolis, y la pérdida de carga del caudalímetro de presión diferencial supone un inconveniente notable. Por ello, el caudalímetro de tipo Vortex supone una opción económica y suficiente para el caso que se ocupa.

El suministrador Endress+Hauser [21] dispone de una herramienta de selección en su página web para poder escoger los modelos más adecuados de instrumento en función de los requisitos del sistema. Mediante esta herramienta, el caudalímetro de tipo Vortex más adecuado es el modelo Proline Prowirl F 200. En la tabla 4.4.8 se recogen las características del modelo escogido.

Tabla 4.4.8. Características del modelo Proline Prowirl F 200.

Característica	Valor
Rango de medición en líquidos (m ³ /h)	$0,08 \leq Q \leq 2100,00$
Error volumétrico (líquidos) (%)	$\pm 0,75$
Temperatura del medio (°C)	$-40 \leq T_{op} \leq 260$
Presión de trabajo máxima	PN100

La figura 4.4.12 muestra el modelo de caudalímetro escogido, Proline Prowirl F 200.



Figura 4.4.12. Caudalímetro modelo Proline Prowirl F 200.

5 Seguridad de proceso

Para prevenir posibles accidentes en la instalación, se realiza un estudio de seguridad de proceso en el que se identificarán posibles peligros para determinar la probabilidad de que ocurran y sus posibles consecuencias. Este estudio consistirá en un análisis HAZOP, un árbol de fallos sobre la posible polimerización descontrolada del producto en el interior del tanque, y un AQR (Análisis Cuantitativo de Riesgos) en el que se determinarán las frecuencias de los posibles eventos iniciadores de accidentes, las frecuencias de los propios accidentes, y las posibles distancias que pueden afectar estos accidentes.

5.1 HAZOP

Se realiza un HAZOP de la instalación para identificar los posibles peligros de la instalación, así como las medidas tomadas para prevenir y proteger a los equipos. El HAZOP realizado se muestra en la tabla 5.1.1.

Tabla 5.1.1. HAZOP de la instalación.

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
1. Control de peligros asociados a las sustancias	1. Acrilonitrilo Flash point=0°C H225 Líquido y vapores muy inflamables H301 Tóxico en caso de ingestión H311 Tóxico en caso de contacto con la piel H331 Tóxico en caso de inhalación H315 Provoca irritación cutánea H317 Puede provocar reacción alérgica en la piel H318 Provoca lesiones oculares graves H335 Puede irritar las vías respiratorias H350 Puede provocar cáncer H411 Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos	1. Fuga de producto, toma de muestra, conexión y desconexión de mangueras, sondeo.	1. Fuego debido a la inflamabilidad del producto.	1. Toda la instrumentación y equipos empleados en la instalación deberán ser certificados ATEX. Las prendas empleadas por los operarios deberán ser ATEX.	
				2. Aportación de nitrógeno al tanque para evitar la formación de atmósferas inflamables. La concentración de O2 en el tanque nunca deberá ser superior al 8%.	
				3. Línea de compensación en el cargadero con aporte de nitrógeno para evitar la formación de atmósferas inflamables.	
				4. Llenado del tanque mediante tubo buzo al fondo para evitar electricidad estática o neblina en el interior del tanque.	
				5. Instalaciones contra incendios en el tanque: anillo de sprinklers, espumógeno en el cubeto.	
				6. Evitar el contacto con la piel mediante el uso de EPIs y ropa adecuada.	
		2. Tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel e inhalación, provoca irritación cutánea, puede provocar reacción			

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
			alérgica en la piel, puede irritar las vías respiratorias, puede provocar cáncer.	7. Instalar una válvula automática en el fondo del tanque para que se aisle el tanque en caso de que se produzca una fuga.	
				8. Tomamuestras estanco que impida el contacto con el producto.	
				9. Procedimientos de higiene estandarizados para evitar contacto.	
			3. Provoca lesiones oculares graves.	10. Colocar cubre bridas en las bridas de la instalación.	
			4. Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.	11. Instalación de un cubeto de retención que evite que el producto se dirija a la red de aguas.	
2. Peligros asociados a la reacción de sustancias químicas.	1. Polimerización del producto	1. Concentración de inhibidor MEHQ por debajo de la requerida (<35 ppm).	Polimerización descontrolada. Aumento de la presión en el interior del tanque.	Análisis del pH del producto almacenado para garantizar la composición.	Añadir válvula tomamuestras a la salida del tanque B-63.
				Composición del producto descargado certificado por el proveedor.	
		2. Aumento de la temperatura en el interior del tanque por causas externas (radiación solar).	Polimerización descontrolada. Aumento de la presión en el interior del tanque.	Sensores de temperatura con enclavamientos.	
				Intercambiador W-6410 diseñado para refrigerar el contenido del tanque teniendo en cuenta el calor aportado por la radiación solar en el tanque.	
		3. Recirculación insuficiente del producto en el interior del tanque.	Polimerización descontrolada. Aumento de la presión en el interior del tanque.	Capacidad para recircular el contenido entero del tanque en un plazo máximo de 8 horas. Se instala una alarma que avise en caso de que las bombas no se pongan en marcha en un período superior a 7 días.	
Aumento de la temperatura debido a la energía aportada por la bomba.	Polimerización descontrolada. Aumento de la presión en el interior del tanque.	Sensor de temperatura en las bombas P-6310 y P-6320 con enclavamientos en los motores de las bombas. Sensor de temperatura en el tanque con alarma por alta temperatura.			
Aumento de la temperatura debido a incendio externo.	Polimerización descontrolada. Aumento de la presión en el interior del tanque.	El tanque cuenta con un sistema de rociadores contra incendios que permite mantener la temperatura de este.			

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
		Evaporación de acrilonitrilo sin inhibidor, que se adhiere a las paredes e inicia la polimerización.	Formación de polímero en tubuladuras y dispositivos de seguridad, taponándolos. Polimerización descontrolada. Aumento de la presión en el interior del tanque.	Cobertura de nitrógeno a una presión de 10 mbarg en el interior del tanque, para prevenir la evaporación del acrilonitrilo por equilibrio líquido-vapor. Transmisor de presión en el tanque permite saber si la cobertura de nitrógeno no se mantiene en el tanque.	
		Descarga de producto con polímeros o con trazas de otras impurezas.	Posible inicio de polimerización en el interior del tanque, desencadenando una polimerización descontrolada.	Instalar filtro en la línea de descarga de cisternas.	
	2. Descarga de producto incompatible en el tanque.	Error humano.	Posibilidad de polimerización descontrolada.	Se lleva a cabo una identificación previa del producto a descargar. Se emplea un formulario estándar con supervisión a 4 ojos para contrastar que el producto sea el correcto.	Con cada descarga de producto, se rellena un formulario en el que tanto el operador encargado de la descarga como el supervisor de la zona comprueban que se cumplen todos los puntos del <i>checklist</i> .
3. Más concentración	1. Más concentración de O ₂	Concentración de O ₂ por encima del 8% en el interior del tanque.	Posibilidad de formar atmósfera inflamable o explosiva en el interior del tanque.	Ver punto 1. Cobertura de nitrógeno en el interior del tanque y línea de compensación en el cargadero para la descarga de cisternas.	
4. Menos concentración	Menos concentración de inhibidor.	Fallo del suministrador.	Riesgo de polimerización.	Se requiere certificado de calidad a la hora de realizar una descarga conforme el producto cumple los parámetros mínimos.	
		Almacenamiento durante demasiado tiempo del producto.	Riesgo de polimerización.	Se lleva a cabo de manera periódica (1 vez por semana) un análisis de la composición del contenido del tanque.	
				Alarma avisa cuando el producto lleva 1 semana sin recircular. Ver punto 2.	
5. Más caudal	1. Más caudal de nitrógeno	Ver "Más presión en tanque".			
6. Menos caudal	1. Backflow al tanque	Ver "Más presión en tanque".			
	2. Backflow del tanque a la cisterna.	Ver "Más presión en cisternas".			
	3. Backflow a línea de nitrógeno.	1. Fallo de utilities.	Contaminación de la red de nitrógeno, con vapores inflamables.	Instalar válvula automática en línea de nitrógeno con enclavamiento por caudal bajo.	

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
7. Más temperatura	1. Más temperatura en B-63 (T _{diseño} =260°C)	1. Reacción descontrolada.	Ruptura del tanque debido a una temperatura por encima de la Temperatura de diseño.	Transmisores de temperatura duplicados T63202 y T63204.	Se instalan los transmisores a 180° para garantizar homogeneidad en la lectura de temperatura.
		2. Nivel del tanque por debajo del punto de lectura de los transmisores de temperatura.	Aumento de la temperatura sin que pueda ser observado.	Transmisor de temperatura en el fondo del tanque. Alarma de bajo nivel.	
	2. Más temperatura en líneas.	1. Radiación solar.	1. Polimerización del producto en el interior de la línea.	Instalar cubiertas en las líneas para protegerlas del sol.	Se coloca un techo de material aislante en las líneas que puedan ser susceptibles a calentarse por la radiación del sol.
	3. Más temperatura en el intercambiador	1. Radiación solar.	Sin consecuencias de seguridad.		
8. Menos temperatura	1. Sin consecuencias de seguridad (Punto de fusión= -83,5°C).				
9. Más presión	Más presión en el tanque B-63 (P _d =170 mbar).	Polimerización del producto.	Ver parámetro "Peligros asociados a la reacción de sustancias químicas".		
		Bomba de descarga de cisternas (P _{max} = 16 bar)	Presión por encima de la tolerada por el tanque (170 mbar). Rotura del tanque con posible disparo de fragmentos.	Sensor de presión en el interior del tanque P63201 con enclavamientos para detener la descarga en caso de que la presión suba por encima del límite definido.	
				Tanque equipado con válvula de sobrepresión y vacío + tapa de seguridad para caso de sobrepresión. -KT63001.10: +14 mbar. -Y63001.20: +25 mbar.	
		Fallo de la válvula reductora en la entrada de nitrógeno al tanque (P _{max} = 5 bar)	Presión por encima de la tolerada por el tanque (170 mbar). Ruptura del tanque con posible disparo de pedazos.	Tanque equipado con válvula de sobrepresión y vacío + tapa de seguridad para caso de sobrepresión. -KT63001.10: +14 mbar. -Y63001.20: +25 mbar.	
	Fuego externo.	Rotura del tanque con posible disparo de pedazos.	Y63002.10 tarado a +25 mbar diseñado para caso de fuego externo.		

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
		Backflow del producto polimerizado desde planta.	Presión por encima de la tolerada por el tanque (170 mbar). Rotura del tanque con posible disparo de pedazos.	Válvulas antirretorno en la línea de envío a planta. Instalar SV en la línea.	
	Más presión en la cisterna.	Backflow del tanque a la cisterna de producto.	La presión de diseño de la cisterna es superior a la presión del tanque. Sin consecuencias de seguridad.		
	Más presión en las tuberías.	Bombas de descarga o de envío a planta.	Intrínsecamente seguro, ya que el PN de la línea es superior a la presión de trabajo de las bombas. Sin consecuencias de seguridad.		Todas las líneas que transportan acrilonitrilo se diseñan con un PN16 para garantizar que pueden soportar la presión máxima posible que pueden aportar las bombas.
		Expansión térmica del producto.	Rottura de las tuberías de producto.	Instalar SVs en la línea de envío a planta.	La SV descargará en un colector específico de la planta a la que se envía el producto.
	Más presión en el intercambiador.	Presión de la bomba de recirculación (Pmax = 16 bar)	Presión de diseño por encima de la presión máxima de la bomba. intrínsecamente seguro.		
10. Menos presión	Menos presión en el tanque B-63.	Vacío en el interior del tanque al descargar mediante la bomba P-6320.	Ruptura del tanque. Fuga de producto.	Tanque equipado con válvula de sobrepresión y vacío + tapa de seguridad para caso de sobrepresión. -KT63001.10: +14 mbar. -Y63001.20: +25 mbar.	
				Cubeto de retención para caso de derrame. Ver punto 1.	
	Menos presión en la cisterna.	Vacío en el interior de la cisterna al descargar mediante la bomba P-6310.	Ruptura de la cisterna. Fuga de producto.	Línea de compensación con aporte de nitrógeno.	
11. Más nivel	Más nivel en el tanque B-63.	Sobrellenado del tanque por error humano.	Derrame del producto a través de los equipos de seguridad instalados.	Transmisores de nivel instalados en el tanque con enclavamientos que detienen la bomba de descarga P-6310.	
		Backflow por la línea de envío a planta.	Sobrellenado del tanque con posibilidad de derrame y/o polimerización.	Válvula antirretorno en la línea.	
	Más nivel en la cisterna.	Backflow desde el tanque por vasos comunicantes.	Sobrellenado de la cisterna con posible formación de atmósfera explosiva.	El producto entra al tanque mediante un tubo buzo con agujeros desde el techo.	

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
12. Menos nivel	Menos nivel en el tanque B-63.	Fallo de instrumentación.	Bomba P-6320 trabaja sin caudal, se produce <i>dry-running</i> .	Transmisores de nivel en el tanque enclavan la bomba P-6320.	
				Transmisor de nivel en la aspiración de la bomba detiene su funcionamiento en caso de que no haya producto.	
13. Fuentes de ignición	Fuente de ignición en el tanque B-63.	1. Cargas electrostáticas.	1. Posible explosión.	Velocidad de descarga de cisterna inferior a 7 m/s.	
				El llenado del tanque se lleva a cabo mediante tubo buzo.	
				Válvula de sobrepresión y vacío con apagallamas (flame arrester).	
	Fuente de ignición en la descarga de la cisterna.	1. Cargas electrostáticas	1. Posibilidad de explosión (zona EX).	Toma a tierra en la cisterna y los equipos de descarga.	
14. Peligro en las bombas	1. Dry running en la bomba P-6310.	1. Válvulas cerradas en la aspiración, o cisterna sin producto.	1. Sobrecalentamiento de la bomba. Posibilidad de daños mecánicos y fuga de producto en la siguiente descarga.	Secuencia de descarga comprueba que las válvulas de aspiración se encuentran abiertas.	Para arrancar las bombas, la secuencia de envío programada en el sistema de control obliga a comprobar que la aspiración se encuentra abierta.
	2. Dead head en la bomba P-6310.	1. Válvulas cerradas en la impulsión.	1. Sobrecalentamiento de la bomba, con posibilidad de polimerización del producto. Ruptura de la bomba.	Transmisores de temperatura T63103 y T63104 detiene la bomba en caso de que la temperatura de la bomba suba demasiado.	
	3. Dry running en la bomba P-6320.	1. Válvulas cerradas en la aspiración, o tanque sin producto.	1. Sobrecalentamiento de la bomba. Posibilidad de daños mecánicos y fuga de producto.	Secuencia de envío/reciclo comprueba que las válvulas de aspiración se encuentran abiertas.	Para arrancar las bombas, la secuencia de envío programada en el sistema de control obliga a comprobar que la aspiración se encuentra abierta.
	4. Dead head en la bomba P-6310.	1. Válvulas cerradas en la impulsión.	1. Sobrecalentamiento de la bomba, con posibilidad de polimerización del producto. Ruptura de la bomba.	Transmisores de temperatura T63203 y T63204 detiene la bomba en caso de que la temperatura de la bomba suba demasiado.	
15. Fallo de utilities	1. Fallo de aire de instrumentación.	1. Fallo del suministro.	1. Válvulas automáticas no pueden funcionar.	Las válvulas automáticas se colocan en posición segura definida previamente.	
	2. Fallo de nitrógeno.	1. Fallo de suministro.	1. Pérdida de cobertura de nitrógeno en el interior del tanque. Posibilidad de formar atmósfera explosiva.	Sin fuentes de ignición en el interior del tanque.	

Elemento de discusión	Peligro	Causa	Consecuencias	Acción	Descripción de la acción
	3. Fallo eléctrico.	1. Fallo del suministro.	1. Bombas no pueden entrar en funcionamiento. No se puede recircular el contenido del tanque.	1. Uso de generadores auxiliares.	

5.2 Árbol de fallos

Un árbol de fallos es una herramienta empleada para determinar la probabilidad de que ocurra un determinado accidente a partir de las frecuencias de los eventos iniciadores. Se parte del evento final (top event), y a partir de éste se definen las condiciones que deberán darse para que ocurra. Estos sucesos se van estructurando en forma de árbol, y mediante puertas lógicas se especifica si deben darse todos a la vez para que ocurra un determinado evento, o por el contrario solo es necesario que ocurra uno de ellos.

Las frecuencias de cada evento básico pueden obtenerse mediante bibliografía, a partir de la experiencia, consultando a profesionales de la materia, o asumiendo valores coherentes, entre otros.

5.2.1 Estructura y simbología

El árbol de fallos se compone principalmente de dos elementos: los eventos que pueden ocurrir, y las puertas lógicas que los relacionan.

Los eventos básicos son aquellos que inician una cadena que pueda desembocar en accidente. Estos eventos iniciales se identifican porque se marcan con un círculo, y siempre se encuentran abajo del todo en la estructura del árbol.

Los eventos intermedios suceden a los eventos básicos, y son aquellos que ocurren como consecuencia de los iniciadores y acaban desembocando en un accidente final. Tanto los eventos intermedios como el top event se identifican con un rectángulo.

En la figura 5.2.1 se muestra un posible esquema de árbol de dos eventos básicos que conducen a un evento final si se dan a la vez.

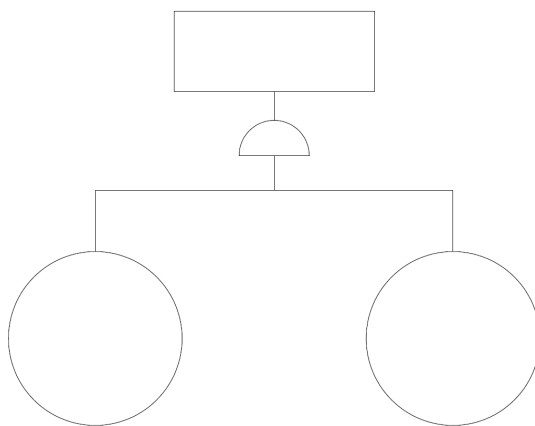


Figura 5.2.1. Estructura de dos eventos básicos y un evento final unidos mediante una puerta lógica "AND".

Las puertas lógicas se emplean para especificar las condiciones necesarias para que se de un determinado evento. Las puertas lógicas más empleadas son las de tipo "AND" y las de tipo "OR". En caso de emplear una puerta "AND", el evento principal solo sucederá si se producen los dos eventos iniciadores. De lo contrario, una puerta "OR" indica que solo es necesario que se dé una de las condiciones para que el evento superior ocurra.

En la figura 5.2.2 se muestra la simbología empleada para las puertas lógicas mencionadas.

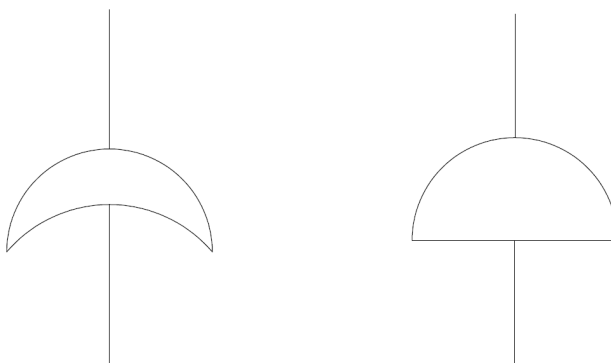


Figura 5.2.2. Puerta lógica "OR" (izquierda) y "AND" (derecha).

5.2.2 Probabilidades de eventos básicos

La probabilidad de que suceda un determinado accidente se determina a partir de las probabilidades de cada uno de los eventos básicos que pueden desembocar en el accidente. Para ello, se requiere partir de una estimación de la tasa de fallos de los elementos primarios que inician una cadena de eventos.

Para la elaboración de este árbol de fallos, se extraen una serie de tasas de fallos de la bibliografía (Crowl & Louvar, *Chemical Process Safety*, página 475) [22]. Las tasas de fallo de bombas, tanto fallo mecánico como fallo de motor, se obtienen a partir de datos de BASF. La tasa de incendios por año se aproxima a partir de casos reales de incendios notificados en los Estados Unidos a lo largo de un período de 12,5 años [23].

Esta tasa es un valor medio del número de fallos por año a los que tiende un determinado equipo. A partir de este valor, se calcula un coeficiente de fiabilidad, R , mediante la siguiente ecuación:

$$R = e^{-\mu t} \quad (5.2.1)$$

Donde:

- R = Fiabilidad de un determinado equipo.
- μ = Tasa de fallos, fallos/año.
- T = Período de tiempo, en este caso un año.

Una vez determinada la fiabilidad de cada equipo, se determina la probabilidad de fallo, P :

$$P = 1 - R \quad (5.2.2)$$

Donde:

- P = Probabilidad de fallo de un determinado equipo.

En la tabla 5.2.1 se recogen las tasas de fallo extraídas de la bibliografía, así como las fiabilidades y probabilidades calculadas.

Tabla 5.2.1. Fiabilidades y probabilidades de fallo de cada elemento.

Componente	Tasa de fallo, μ (fallos/año)	Fiabilidad, R	Probabilidad de fallo, P
Controlador [22]	0,29	0,75	0,25
Válvula de control [22]	0,60	0,55	0,45
Caudalímetro (fluidos) [22]	1,14	0,32	0,68
Caudalímetro (sólidos) [22]	3,75	0,02	0,98
Interruptor de caudal [22]	1,12	0,33	0,67
Válvula manual [22]	0,13	0,88	0,12
Luz indicadora [22]	0,044	0,96	0,04
Medidor de nivel (fluidos) [22]	1,70	0,18	0,82
Medidor de nivel (sólidos) [22]	6,86	0,001	0,998
Analizador de oxígeno [22]	5,65	0,0035	0,99
pHímetro [22]	5,88	0,0028	0,99
Medidor de presión [22]	1,41	0,24	0,76
Válvula de alivio de presión [22]	0,022	0,98	0,02
Interruptor de presión [22]	0,14	0,87	0,13
Válvula solenoide [22]	0,42	0,66	0,34
Termopar [22]	0,52	0,59	0,41
Termómetro [22]	0,027	0,97	0,03
Posicionador de válvula [22]	0,44	0,64	0,36
Fallo mecánico bomba	0,26	0,77	0,23
Fallo eléctrico motor de bomba	0,06	0,94	0,06
Fuego en planta [23]	$2,00 \cdot 10^{-3}$	0,99	0,01

Un evento que se debe tener en cuenta y no aparece en la bibliografía es el fallo de suministro de utilities, como puede ser nitrógeno o agua contra incendios. En el caso de agua contra incendios, debido a que se disponen de tanques de reserva, no se contempla el caso de que no se disponga de este servicio. Para el caso del suministro de nitrógeno, se le asigna una fiabilidad de 0,99 ya que no se considera probable que ocurra.

Una vez se determinan la fiabilidad de los eventos básicos, se procede a determinar la probabilidad de los eventos intermedios y finalmente del top event. La manera de calcular estas probabilidades se basa en la puerta lógica que lleva a cada evento: si se trata de una puerta AND, se multiplicarán las probabilidades; en caso de ser una puerta OR, lo que se multiplicarán son las fiabilidades.

5.2.3 Estructura final

Una vez definida la fiabilidad de cada evento, se realiza la estructura general del árbol de fallos. En este caso, para un evento final de polimerización del contenido del tanque, se consideran las siguientes condiciones:

- El evento final "polimerización descontrolada" se producirá si se da un inicio de polimerización en el interior del tanque y el sistema RESTAB no es capaz de inhibir la reacción.
- El inicio de polimerización en el tanque puede deberse a un aumento de la temperatura del producto, o a un fallo del suministro de nitrógeno.
- El fallo del suministro sólo afectará al sistema si, además, falla la medición de presión en el tanque, con lo que el operador no podrá saber que se ha cortado el suministro de nitrógeno y tomar las medidas necesarias (finalizar el envío de producto).
- El aumento de temperatura del tanque requiere tanto un calentamiento del producto, causado por las bombas o por fuego externo, como un fallo del sistema de refrigeración.

Con estas condiciones, se elabora el árbol de fallos final. Se obtiene una probabilidad de fallo del sistema igual a $3 \cdot 10^{-4}$. Siguiendo el mismo criterio que se empleará en el AQR, al tratarse de una frecuencia superior a 10^{-9} , no se considera apropiado descartar este posible evento.

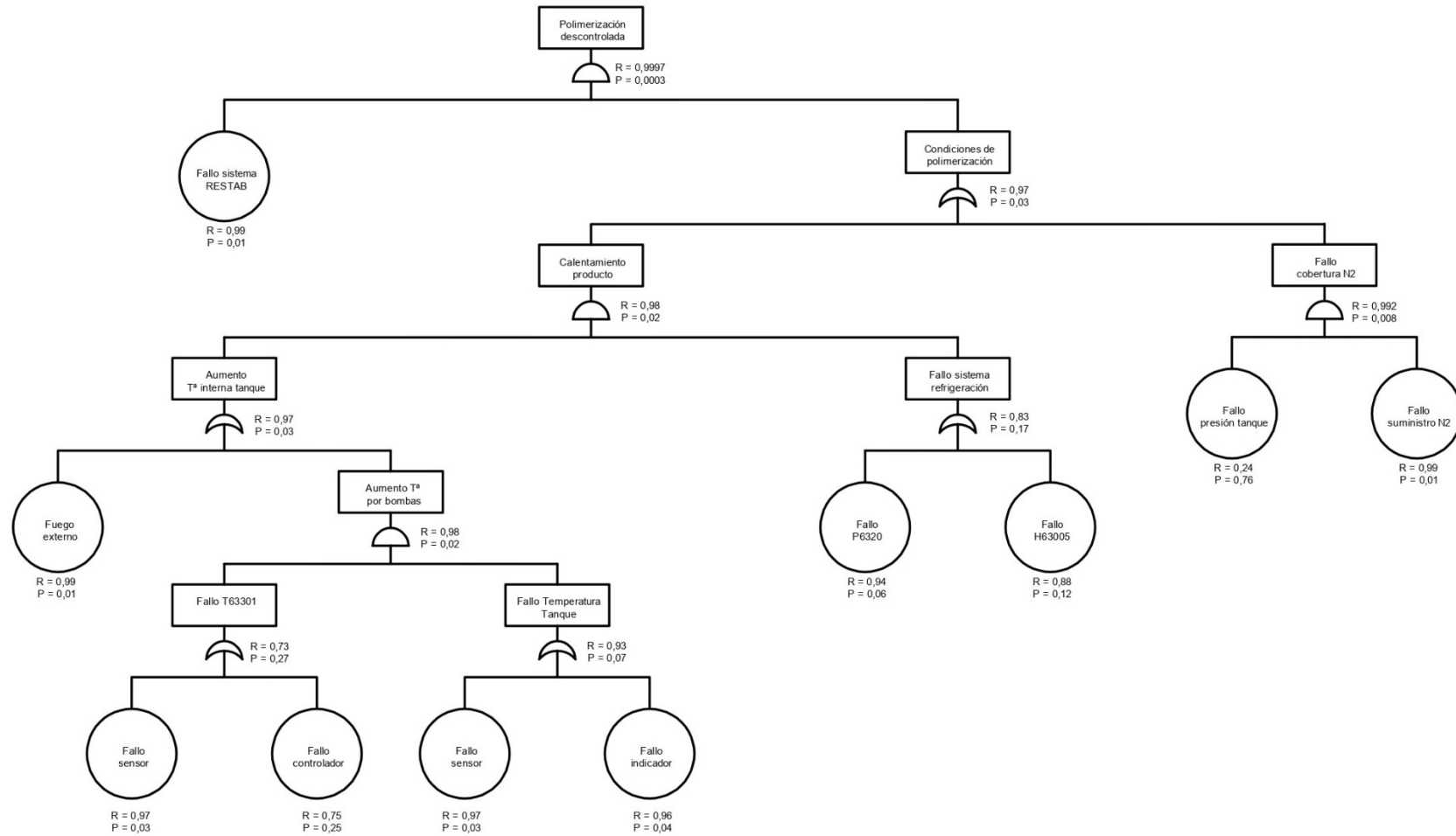


Figura 5.2.3. Árbol de fallos del sistema.

5.3 Análisis Cuantitativo de Riesgos

5.3.1 Introducción

Se realiza un Análisis Cuantitativo de Riesgos (AQR por sus siglas en catalán) debido a la implantación en la planta de un tanque de acrilonitrilo, sustancia que no se encontraba previamente en las instalaciones. Este análisis se realiza en concordancia con el Real Decreto 840/2015, del 21 de septiembre, en el cual se determinan aquellas sustancias consideradas como peligrosas. Según la Parte 1 del Anexo I de este documento, el acrilonitrilo se considera sustancia peligrosa al tratarse de un líquido inflamable de categoría 2. En la tabla 5.3.1 se describen las frases de peligrosidad del acrilonitrilo de acuerdo con el Reglamento 1272/2008.

Tabla 5.3.1. Frases de peligro del acrilonitrilo [7].

Categoría	Frases de peligro
H225	Líquidos inflamables (Categoría 2)
H301	Toxicidad aguda, Oral (Categoría 3)
H331	Toxicidad aguda, Inhalación (Categoría 3)
H311	Toxicidad aguda, Cutáneo (Categoría 3)
H315	Irritación cutánea (Categoría 2)

Debido a que para la elaboración de este documento solo se tendrá en cuenta el tanque de acrilonitrilo, el cual tiene la capacidad de almacenar hasta 80.600 kg de producto, no se realizará un documento previo AG-1 (Accidentes Graves) en el que se recopilen las sustancias presentes en la instalación.

En la tabla 5.3.3 y 5.3.4 se recogen las características del tanque de almacenamiento y del cubeto de contención. En el caso de este último, las dimensiones son una aproximación cercana a la realidad, y se considera el número de tanques reales, a pesar de que en el alcance del trabajo sólo se considere el tanque de acrilonitrilo.

La ubicación geográfica se menciona en las bases de diseño del trabajo. En la tabla 5.3.2 se especifican las distancias aproximadas a los diferentes núcleos urbanos más cercanos a la ubicación de la planta.

Tabla 5.3.2. Distancias a las poblaciones más cercanas.

Población	Distancia desde el establecimiento (m)
La Canonja	500
Bonavista	900
Vilaseca	3.000
La Pineda	3.500
Torreforta	3.100

Tabla 5.3.3. Características del tanque B-63.

Tanque	Sustancia	Capacidad		Dimensiones		Material y grosor (mm)	Presión (bar)		Temperatura (°C)	
		t	m ³	Ø (m)	Altura (m)		Diseño	Trabajo	Diseño	Trabajo
B-63	Acrilonitrilo	80,6	100	3,6	10	Acero al carbono 5	0,17	0,01	257	25

Tabla 5.3.4. Características del cubeto de retención.

Cubeto	Superficie (m ²)	Capacidad de almacenamiento (m ³)	Dimensiones (m)		Tanques en el cubeto
			Longitud	Anchura	
B-46	970	1.455	51	25	6

5.3.2 Identificación de los sucesos iniciadores genéricos y específicos

En la primera fase, se determinan, en primer lugar, las sustancias y instalaciones AG (Accidentes Graves) relevantes para el análisis. En este caso, la única sustancia almacenada es acrilonitrilo, por lo que se trata de la única sustancia que se tiene en cuenta.

Las instalaciones AG son las instalaciones de proceso que contienen las sustancias implicadas, se pueden considerar independientes entre sí, y son susceptibles de sufrir un accidente. Las instalaciones seleccionadas se recogerán en una tabla donde se incluyan sus características. Se realizará un plot plan que muestre las instalaciones AG y su ubicación relativa en la planta. Cabe destacar que, al trabajar con una única sustancia, no se considera necesario separar las zonas, aunque se considerarán las características de cada sector a la hora de determinar las frecuencias de los iniciadores.

Las instalaciones consideradas como AG se recogen en la tabla 5.3.5.

Tabla 5.3.5. Instalaciones AG.

Zona	Sustancias	Características
Tanque B-63	Acrilonitrilo	Temperatura de diseño = 260 °C Presión de diseño = 1,03 bar Volumen = 100 m ³ Diámetro = 3,6 m
Bomba P-6310	Acrilonitrilo	Caudal = 40 m ³ /h Presión máxima = 16 bar
Bomba P-6320	Acrilonitrilo	Caudal = 15 m ³ /h Presión máxima = 16 bar
Tuberías	Acrilonitrilo	Longitud = 35 m
Intercambiador W-6410	Acrilonitrilo	Temperatura de diseño = -190 / 225 °C Presión de diseño = 30 bar
Zona de carga y descarga de cisternas	Acrilonitrilo	Descarga mediante manguera.

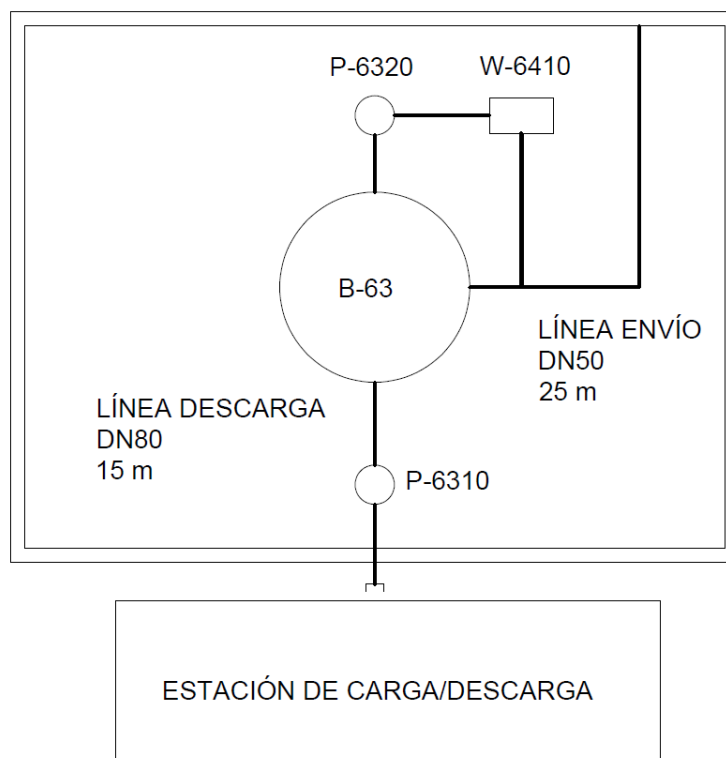


Figura 5.3.1. Plot plan de las instalaciones AG.

Una vez definidas las instalaciones AG, se procede a determinar los iniciadores de accidentes. Los iniciadores se dividen en genéricos y específicos.

Los iniciadores genéricos son aquellos escenarios que conducen a una pérdida del producto por causas no específicas. Los iniciadores genéricos correspondientes a cada tipo de instalación, así como sus frecuencias, se recogen en el apartado 3.2 del Purple Book [24].

Los iniciadores específicos son característicos de cada instalación, y tanto los iniciadores como sus frecuencias se determinan a partir de la elaboración de árboles de fallos. En este caso, el iniciador específico que se incluye el análisis es el caso de *runaway* de la reacción de polimerización del acrilonitrilo en el interior del tanque.

En la tabla 5.3.6 se indican los iniciadores genéricos considerados para cada instalación.

Tabla 5.3.6. Iniciadores genéricos para cada instalación.

Unidad	Tipo de instalación	Iniciadores genéricos	Frecuencias
Tanque B-63	Recipiente presurizado	G.1 Fuga instantánea del contenido completo del tanque.	$5 \cdot 10^{-7} \text{ y}^{-1}$
		G.2 Fuga continua del contenido completo del tanque en 10 minutos a ritmo constante.	$5 \cdot 10^{-7} \text{ y}^{-1}$
		G.3 Fuga continua por un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm.	$1 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$
Líneas de proceso	Tuberías	G.1 Rotura total, con fuga por ambos lados de la rotura.	$3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ y}^{-1}$
		G.2 Fuga por agujero con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, un máximo de 50 mm	$2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ y}^{-1}$
Bombas P-6310 y P-6320	Bombas	G.1 Fallo catastrófico, rotura total de la tubería más grande conectada	$5 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$
		G.2 Fuga por orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal de la tubería más grande conectada, con un máximo de 50 mm.	$2,5 \cdot 10^{-4} \text{ y}^{-1}$
Intercambiador W-6410	Intercambiador	G.1 Fuga instantánea del contenido completo del tanque.	$5 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$
		G.2 Fuga continua del contenido completo del tanque en 10 minutos a ritmo constante.	$5 \cdot 10^{-5} \text{ y}^{-1}$
		G.3 Fuga continua por un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm.	$1 \cdot 10^{-3} \text{ y}^{-1}$
Camión cisterna	Cisternas y camiones en un establecimiento	L.1a Rotura total de la manguera de carga/descarga.	$4 \cdot 10^{-6} \text{ h}^{-1}$
		L.2a Fuga de la manguera de carga/descarga por un orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, con un máximo de 50 mm.	$4 \cdot 10^{-5} \text{ h}^{-1}$

En la tabla 5.3.7 se incluye la lista de iniciadores específicos del proceso, en este caso, la polimerización descontrolada del producto en el interior del tanque B-63. Tal y como se

determina en el árbol de fallos, la fiabilidad de este evento es de 0,9997, por lo que la tasa de fallos es de $3 \cdot 10^{-4} \text{ y}^{-1}$.

Tabla 5.3.7. Iniciadores específicos.

Equipo	Iniciador específico	Frecuencia
B-63	<i>Runaway</i> de la reacción de polimerización	$3 \cdot 10^{-4} \text{ y}^{-1}$

5.3.3 Determinación de las frecuencias de los iniciadores

Se determinan las frecuencias de los iniciadores determinados en el apartado anterior. En el caso de los iniciadores específicos, la frecuencia ya se ha determinado a partir de la elaboración del árbol de fallos, por lo que esta será la frecuencia final para un determinado iniciador específico. Se podrán descartar aquellos iniciadores específicos que requieran la ocurrencia de cuatro fallos consecutivos para que el evento ocurra.

En el caso de los iniciadores genéricos, se podrán descartar aquellos iniciadores que presenten una frecuencia inferior a 10^{-9} por año. Para determinar esta frecuencia final, se realiza el siguiente cálculo:

$$Frecuencia = base \cdot n^{\circ} \text{ de equipos} \cdot \frac{\text{horas de funcionamiento}}{8760 \text{ h anuales}} \cdot \text{efecto dominó} \quad (5.3.1)$$

Las horas de funcionamiento anuales se consideran 8760 para todas las instalaciones AG, excepto en el caso de la estación de descarga de cisternas, que se estima que realiza unas 4 descargas de cisternas promedio por semana, con una duración de una hora por descarga.

El factor de efecto dominó representa la probabilidad de que determinados iniciadores ocurran como consecuencia de que ocurra un iniciador previo. Esto se considera un aumento en la frecuencia del iniciador en cuestión, y se considera un factor general de 2 para este efecto dominó según el Purple Book.

A continuación, se recogen en las tablas los resultados de las frecuencias de los iniciadores genéricos para cada instalación AG.

Tabla 5.3.8. Iniciadores genéricos de la instalación.

Hipótesis	Descripción del iniciador	Consideraciones	Frecuencia (ocurrencias/año)	
			Base	Final
AG1.TA1.G1	Fuga instantánea del contenido completo del tanque	1 tanque	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
AG1.TA1.G2	Fuga continua del contenido completo del tanque en 10 minutos a ritmo constante	8.760 h de funcionamiento anual Efecto dominó x 2	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$1,00 \cdot 10^{-6}$
AG1.TA1.G3	Fuga continua por un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm		$1,00 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-5}$
AG1.LP1.G1	Rotura total, con fuga por ambos lados de la rotura	15 m tubería DN80	$3,00 \cdot 10^{-7}/m$	$2,20 \cdot 10^{-7}$
AG1.LP1.G2	Fuga por agujero con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, un máximo de 50 mm	208 horas/año Efecto dominó x 2	$2,00 \cdot 10^{-6}/m$	$1,92 \cdot 10^{-6}$
AG1.LP2.G1	Rotura total, con fuga por ambos lados de la rotura	20 m tubería DN80	$3,00 \cdot 10^{-7}/m$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
AG1.LP2.G2	Fuga por agujero con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, un máximo de 50 mm	8760 horas/año Efecto dominó x 2	$2,00 \cdot 10^{-6}/m$	$8,00 \cdot 10^{-5}$
AG1.PB1.G1	Fallo catastrófico, rotura total de la tubería más grande conectada	Bomba P-6310: 208 horas/año	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$2,40 \cdot 10^{-6}$
AG1.PB1.G2	Fuga por orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal de la tubería más grande conectada, con un máximo de 50 mm	Efecto dominó x 2	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$
AG1.PB2.G1	Fallo catastrófico, rotura total de la tubería más grande conectada	Bomba P-6320:	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$

Hipótesis	Descripción del iniciador	Consideraciones	Frecuencia (ocurrencias/año)	
			Base	Final
AG1.PB2.G2	Fuga por orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal de la tubería más grande conectada, con un máximo de 50 mm	8.760 horas/año Efecto dominó x 2	$2,50 \cdot 10^{-4}$	$5,00 \cdot 10^{-4}$
AG1.HE1.G1	Fuga instantánea del contenido completo del intercambiador	1 intercambiador 8.760 h de funcionamiento anual	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
AG1.HE1.G2	Fuga continua del contenido completo del intercambiador en 10 minutos a ritmo constante	Efecto dominó x 2	$5,00 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-4}$
AG1.HE1.G3	Fuga continua por un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm		$1,00 \cdot 10^{-3}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$
AG1.DC1.L1a	Rotura total de la manguera de carga/descarga	1 estación de descarga	$3,50 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-3}$
AG1.DC1.L2a	Fuga de la manguera de carga/descarga por un orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, con un máximo de 50 mm	208 h de funcionamiento anual Efecto dominó x 2	$3,50 \cdot 10^{-1}$	$1,66 \cdot 10^{-2}$

5.3.4 Determinación de las probabilidades de los sucesos que condicionan la evolución del iniciador hasta el accidente

Una vez determinadas las frecuencias finales de los iniciadores, se calculan las probabilidades de que ocurra cada uno de los posibles eventos finales que puedan provocar, como incendios de charco, explosiones, llamaradas, o dispersiones de producto tóxico. Estas probabilidades se determinan mediante la elaboración de árboles de sucesos. La estructura de estos árboles, así como las probabilidades de cada suceso intermedio, se extraen del apartado 3.4.6 del Bevi [25].

En el caso del acrilonitrilo, se contempla el escenario de fuga de líquido inflamable. El árbol de sucesos correspondiente a este caso es el siguiente:

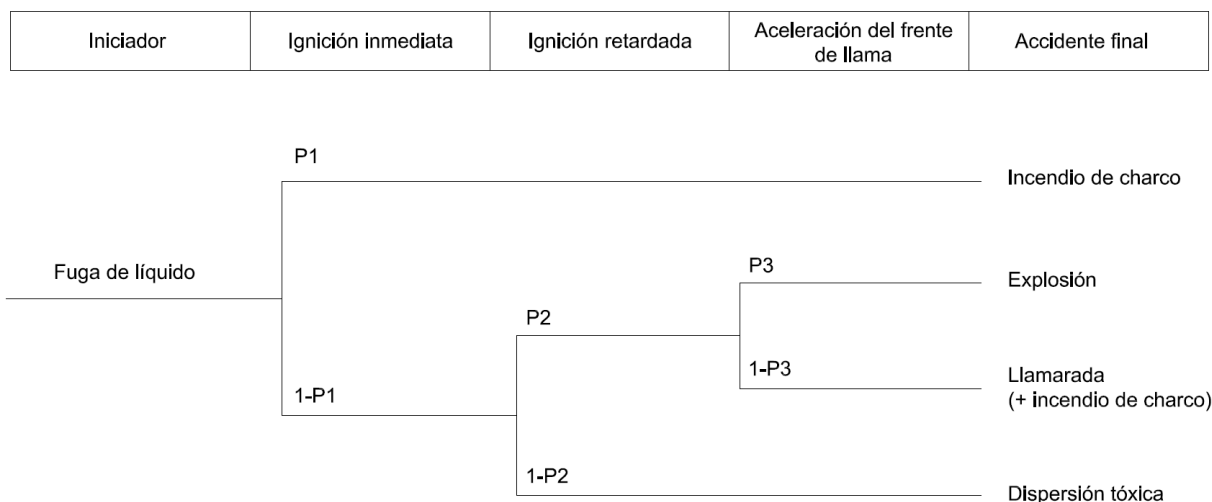


Figura 5.3.2. Árbol de sucesos para una fuga continua de líquido inflamable y tóxico.

Para determinar los valores de P1, P2 y P3, en primer lugar, se define la categoría de la sustancia tratada.

Según la tabla 9 del apartado 3.4.6.6 del Bevi, el acrilonitrilo se considera como una sustancia de categoría 1, altamente inflamable, que incluye todas aquellas sustancias con un *flash point* por debajo de 21°C que no se incluyen dentro de la categoría 0. La categoría 0 incluye las sustancias con un *flash point* por debajo de 0°C y una temperatura de ebullición por debajo o igual a 35°C. Para sustancias de categoría 1, la tabla 7 del mismo apartado indica una probabilidad de ignición directa, P1, igual a 0,065.

A continuación, se deben determinar las probabilidades de ignición retardada (P2) y dispersión tóxica (1-P2). Estas probabilidades se definen en la Instrucción 14/2008 [26], apartado F3-11, para el caso de áreas de almacenamiento y de proceso. Los valores proporcionados son los siguientes:

Tabla 5.3.13. Probabilidades de ignición retardada.

Situación de la fuga	Probabilidad de ignición retardada
Áreas de proceso	0,7
Áreas de almacenamiento	0,3

El Purple Book define una instalación de un único tanque como un área de almacenamiento, incluso aunque disponga de equipos como intercambiadores de calor y sistemas de recirculación. Por lo tanto, la probabilidad de ignición retardada P2 en este caso será 0,3.

Finalmente, la misma instrucción 14/2008 define en el apartado F3-12 las probabilidades de que se produzca una llamarada o una explosión después de una fuga de gas inflamable con ignición retardada. Las probabilidades son de 0,6 en el caso de la llamarada y 0,4 en el caso de la explosión.

Con estos valores, el árbol de consecuencias queda de la siguiente manera:

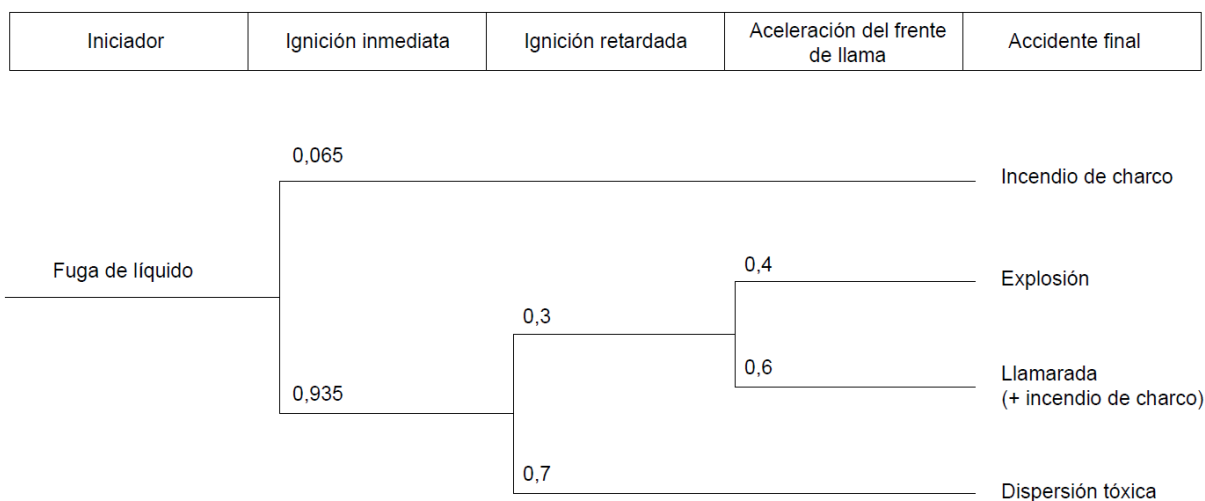


Figura 5.3.3. Árbol de consecuencias final para una fuga continua de líquido inflamable y tóxico.

A partir de esta figura, se calculan las frecuencias finales de estos posibles eventos para cada iniciador genérico. Estas frecuencias finales se recogen en la tabla 5.3.9.

Tabla 5.3.9. Frecuencias finales para accidentes en la instalación.

Hipótesis	Iniciador	Frecuencia final del iniciador	Frecuencia final del accidente			
			Ignición inmediata	Dispersión tóxica	Llamarada	Explosión
AG1.TA1.G1	Fuga instantánea del contenido completo del tanque	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$6,55 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$
AG1.TA1.G2	Fuga continua del contenido completo del tanque en 10 minutos a ritmo constante	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$6,55 \cdot 10^{-7}$	$1,68 \cdot 10^{-7}$	$1,12 \cdot 10^{-7}$
AG1.TA1.G3	Fuga continua por un agujero con un diámetro efectivo de 10 mm	$2,00 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-6}$	$2,24 \cdot 10^{-6}$
AG1.LP1.G1	Rotura total, con fuga por ambos lados de la rotura	$2,20 \cdot 10^{-7}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$	$1,44 \cdot 10^{-7}$	$3,70 \cdot 10^{-8}$	$2,47 \cdot 10^{-8}$
AG1.LP1.G2	Fuga por un agujero con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, un máximo de 50 mm	$1,92 \cdot 10^{-6}$	$1,25 \cdot 10^{-7}$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$3,23 \cdot 10^{-7}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$
AG1.LP2.G1	Rotura total, con fuga por ambos lados de la rotura	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$7,85 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$
AG1.LP2.G2	Fuga por un agujero con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, un máximo de 50 mm	$8,00 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-6}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	$1,35 \cdot 10^{-5}$	$8,98 \cdot 10^{-6}$

Hipótesis	Iniciador	Frecuencia final del iniciador	Frecuencia final del accidente			
			Ignición inmediata	Dispersión tóxica	Llamarada	Explosión
AG1.PB1.G1	Fallo catastrófico, rotura total de la tubería más grande conectada	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$4,04 \cdot 10^{-7}$	$2,70 \cdot 10^{-7}$
AG1.PB1.G2	Fuga por un orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal de la tubería más grande conectada, con un máximo de 50 mm	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$7,80 \cdot 10^{-7}$	$7,85 \cdot 10^{-6}$	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$1,35 \cdot 10^{-6}$
AG1.PB2.G1	Fallo catastrófico, rotura total de la tubería más grande conectada	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$6,50 \cdot 10^{-6}$	$6,55 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
AG1.PB2.G2	Fuga por un orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal de la tubería más grande conectada, con un máximo de 50 mm	$5,00 \cdot 10^{-4}$	$3,25 \cdot 10^{-5}$	$3,27 \cdot 10^{-4}$	$8,42 \cdot 10^{-5}$	$5,61 \cdot 10^{-5}$
AG1.HE1.G1	Fuga instantánea del contenido completo del intercambiador	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$6,50 \cdot 10^{-6}$	$6,55 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$
AG1.HE1.G2	Fuga continua del contenido completo del intercambiador en 10 minutos a ritmo constante	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$6,50 \cdot 10^{-6}$	$6,55 \cdot 10^{-5}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$

Hipótesis	Iniciador	Frecuencia final del iniciador	Frecuencia final del accidente			
			Ignición inmediata	Dispersión tóxica	Llamarada	Explosión
AG1.HE1.G3	Fuga continua por un orificio con un diámetro efectivo de 10 mm	$2,00 \cdot 10^{-3}$	$1,30 \cdot 10^{-4}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$2,24 \cdot 10^{-4}$
AG1.DC1.L1a	Rotura total de la manguera de carga/descarga	$1,66 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$2,80 \cdot 10^{-4}$	$1,86 \cdot 10^{-4}$
AG1.DC1.L2a	Fuga de la manguera de carga/descarga por un orificio con diámetro efectivo del 10% del diámetro nominal, con un máximo de 50 mm	$1,66 \cdot 10^{-2}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-2}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$

Debido a que ninguna de las frecuencias es inferior a 10^{-9} , no se considera que se pueda descartar ninguna, por lo que se deberán considerar todos los riesgos a la hora de operar la instalación.

5.3.5 Determinación de las distancias letales de los sucesos finales

Por último, se determinan las distancias letales para cada uno de los posibles escenarios determinados en el apartado 5.3.4. Para ello, se emplea el software ALOHA [27], versión 5.4.1.2. Se trata de un programa de uso libre empleado para calcular las distancias letales de determinados sucesos en función de las características geográficas, atmosféricas, el tipo de fuga, y el origen de ésta.

Para ello, se introducen los datos geográficos aproximadas de la ubicación del site. La información introducida es la siguiente:

Tabla 5.3.10. Información geográfica introducida en ALOHA.

Elevación (m)	Latitud N (°)		Longitud E (°)	
	Grados	Minutos	Grados	Minutos
68	41	6	1	10

El siguiente paso es definir la sustancia y las condiciones atmosféricas. El programa cuenta con una amplia base de datos referente a sustancias químicas y sus peligros, de manera que se selecciona el acrilonitrilo y automáticamente se reconocen sus propiedades físicas, termodinámicas, y sus riesgos.

En cuanto a las condiciones atmosféricas, los cálculos se realizarán en dos posibles escenarios: condiciones de estabilidad D (neutral) y estabilidad F. Esta información se extrae de la Ficha Meteorológica del Complejo Educativo de Tarragona [28]. Los datos son los siguientes:

Tabla 5.3.11. Condiciones atmosféricas de la zona.

Estabilidad	Temperatura del aire (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento	Altura de la medición (m)
D	17,40	76	4,05	Oeste	10
F	17,40	76	1,46	Norte	10

Una vez definidos todos los parámetros anteriores, solo queda introducir el origen de la fuga. Para realizar el estudio, se decide calcular los dos casos de mayor gravedad: fuga en el tanque principal, y fuga en el camión cisterna. Se trata de los dos tipos de iniciadores más peligrosos debido a la capacidad de almacenamiento de los equipos, por lo que, en caso de comprobar que ninguno de los dos eventos supone distancias letales por encima de los límites, se podrán descartar el resto de los iniciadores.

Para ello, se escoge el iniciador más probable de cada caso. En el tanque, se calculará el caso de fuga constante por un orificio de diámetro efectivo de 10 mm, puesto que es el iniciador con una frecuencia más elevada. Para la cisterna, se calculará considerando una fuga por orificio en la manguera con un diámetro nominal del 10% del diámetro de la manguera, en este caso, un orificio de 10 mm.

Los eventos finales para los que se determinan distancias, tal y como se ha definido en el apartado anterior, son: dispersión tóxica, llamarada, explosión e incendio de charco. En la fuga del tanque, se establece que el orificio se produce a un 10% de la altura del tanque (1 m), que permitirá que se vacíe el 90% del tanque, por lo que se considera una opción bastante conservadora. En el caso de la cisterna, como la manguera se conecta al fondo del depósito, el orificio se establece a un 0% de la altura de este, de manera que la fuga sea del contenido total de la cisterna.

Los resultados finales son los siguientes: en ambos casos, para todos los tipos de estabilidad, el único accidente para el cual el programa es capaz de definir distancias es la dispersión tóxica. En el resto de los accidentes, la distancia se considera menor de 10 m, y en el caso de explosión directamente se considera que en ningún momento llegará a producirse, por lo que las únicas distancias obtenidas serán las de dispersión de producto tóxico.

Para el fenómeno de dispersión tóxica, ALOHA considera los umbrales determinados por las ERPG (Emergency Response Planning Guidelines), que determinan los límites de concentraciones de una determinada sustancia en función de sus efectos bajo una exposición prolongada. La clasificación, junto con la concentración de cada nivel para el acrilonitrilo, es la siguiente [29]:

- ERPG-1 (10 ppm): máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar nada más que efectos adversos ligeros y transitorios o percibiendo un olor claramente definido.
- ERPG-2 (35 ppm): máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar o desarrollar efectos serios o irreversibles o síntomas que pudieran impedir la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.
- ERPG-3 (75 ppm): máxima concentración en aire por debajo de la cual se cree que casi todos los individuos pueden estar expuestos hasta una hora sin experimentar o desarrollar efectos que amenacen su vida. No obstante, pueden sufrir efectos serios o irreversibles y síntomas que impidan la posibilidad de llevar a cabo acciones de protección.

A continuación, se indican las distancias obtenidas para cada caso estudiado, junto con la representación gráfica de las distancias. El diámetro de charco calculado por el programa es de 6 m en todos los casos. En ningún caso las distancias resultantes superan los límites físicos del complejo industrial de BASF. Además, ALOHA realiza los cálculos estableciendo hasta un máximo de 1 hora de fuga, mientras que, en la realidad, a partir de la instrumentación instalada en el tanque y la presencia de operadores haciendo rondas y supervisando la carga y descarga del tanque, se podría considerar un tiempo máximo de fuga de media hora.

Tabla 5.3.12. Distancias máximas de dispersión tóxica calculadas.

Umbral de peligrosidad	Tanque		Cisterna	
	Estabilidad D	Estabilidad F	Estabilidad D	Estabilidad F
ERPG-1	213 m	645 m	196 m	646 m
ERPG-2	109 m	284 m	100 m	284 m
ERPG-3	72 m	173 m	66 m	174 m

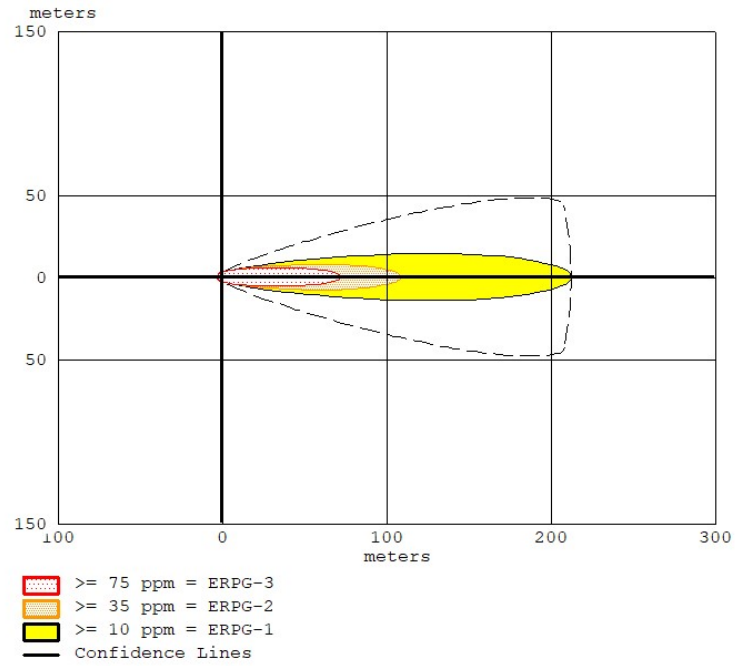


Figura 5.3.4. Distancias de dispersión tóxica por fuga del tanque, con estabilidad D.

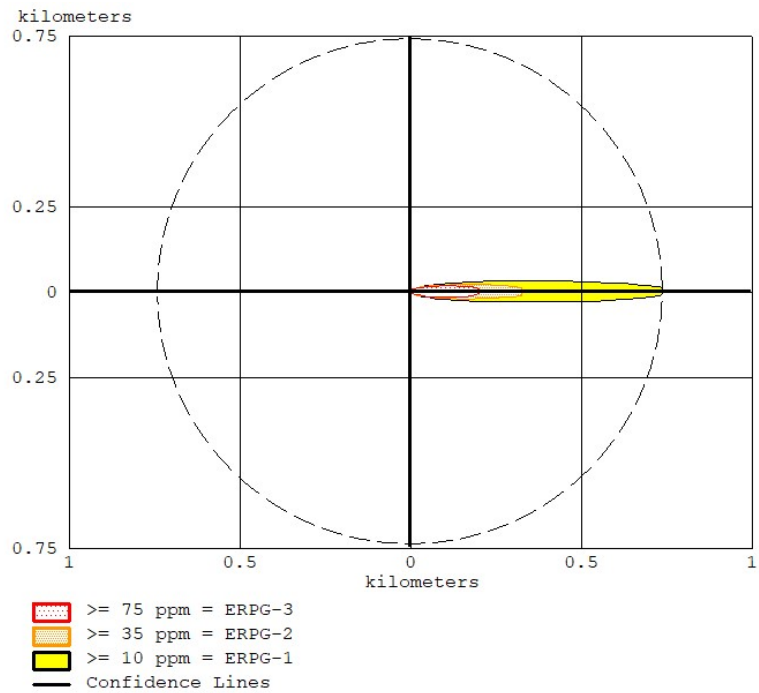


Figura 5.3.5. Distancias de dispersión tóxica por fuga del tanque, con estabilidad F.

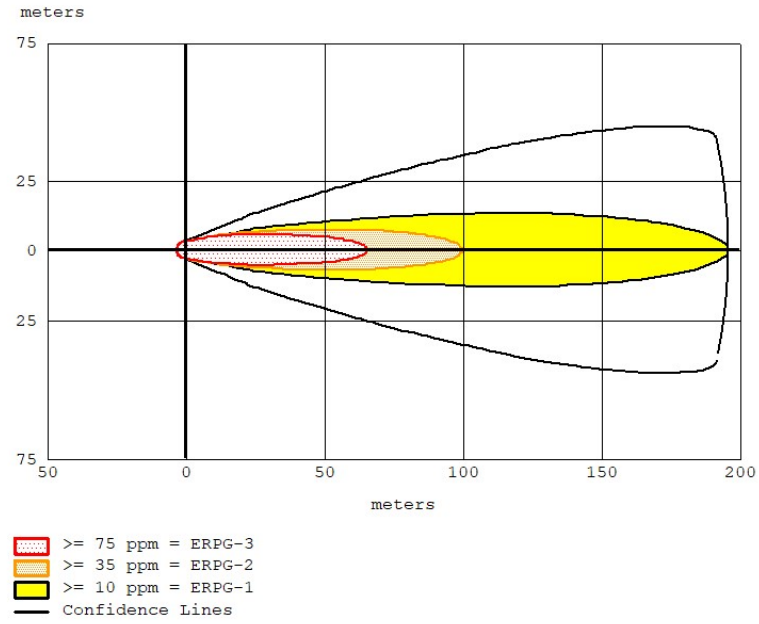


Figura 5.3.6. Distancias de dispersión tóxica por fuga de la cisterna, con estabilidad D.

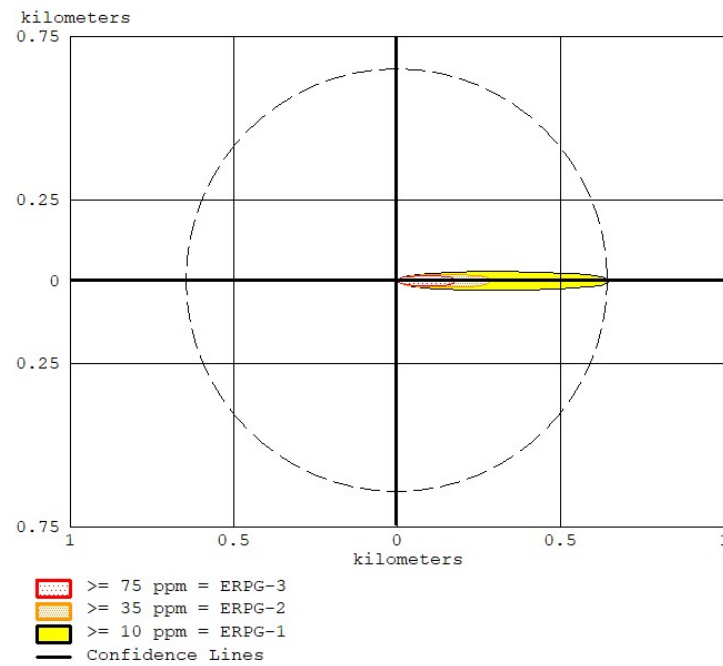


Figura 5.3.7. Distancias de dispersión tóxica por fuga de la cisterna, con estabilidad F.

Las distancias de PTI aproximadas a los límites del Site de BASF se determinan mediante imágenes satélite proporcionadas por Google Maps, y se indican en la tabla 5.3.15.

Tabla 5.3.13. Distancias límite del Site de BASF en cada dirección.

Dirección	Distancia (m)
Norte	240
Sur	780
Este	280
Oeste	1680

Debido a que los casos de máximas distancias se producen con Estabilidad F, donde el viento sopla de norte a sur, la fuga nunca llega a salir de los límites del Site de BASF. Lo mismo ocurre en el caso de estabilidad D, con el viento soplando hacia el este. Por ello, se determina que la afectación de zonas externas a BASF es nula. Todo esto considerando distancias de fuga superiores a las reales, puesto que el tiempo de fuga máximo sería de aproximadamente la mitad del calculado por el programa.

6 Requisitos legales

Cualquier tanque que se instale en una planta química deberá cumplir con la normativa correspondiente. En la mayoría de los casos, debido a que los tanques son equipos diseñados para almacenar sustancias, la normativa que aplica a la hora de legalizar el tanque es el APQ (Almacenamiento de Productos Químicos). Esta normativa se encarga de regular todas las instalaciones destinadas al almacenamiento de sustancias químicas, ya sean tanques, unidades portátiles, o almacenes, entre otros, y se clasifica en función de los peligros de las sustancias en cuestión, dividiéndose en 10 Instrucciones Técnicas Complementarias para cada una de las categorías de peligro definidas. Las 10 categorías APQ son las siguientes:

- ITC MIE-APQ 0: Definiciones generales.
- ITC MIE-APQ 1: Almacenamiento de líquidos inflamables y combustibles en recipientes fijos.
- ITC MIE-APQ 2: Almacenamiento de óxido de etileno en recipientes fijos.
- ITC MIE-APQ 3: Almacenamiento de cloro.
- ITC MIE-APQ 4: Almacenamiento de amoníaco anhidro.
- ITC MIE-APQ 5: Almacenamiento de gases en recipientes a presión móviles.
- ITC MIE-APQ 6: Almacenamiento de líquidos corrosivos en recipientes fijos.
- ITC MIE-APQ 7: Almacenamiento de líquidos tóxicos en recipientes fijos.
- ITC MIE-APQ 8: Almacenamiento de fertilizantes a base de nitrato amónico con alto contenido en nitrógeno.
- ITC MIE APQ-9: Almacenamiento de peróxidos orgánicos y de materias autorreactivas.
- ITC MIE APQ-10: Almacenamiento en recipientes móviles.

En este caso, se trata de un tanque que será empleado para el almacenamiento de una sustancia inflamable y tóxica como es el acrilonitrilo. Por ello, las principales normativas que aplican son las ITC MIE-APQ 1 y ITC MIE-APQ 7. El Real Decreto 656/2017 recoge estas instrucciones técnicas complementarias.

La ITC MIE-APQ 1 define los requisitos que debe cumplir cualquier instalación de almacenamiento de productos inflamables. Algunos de los aspectos cubiertos por la normativa

son: tipo de recipiente, materiales empleados, venteo del tanque, diseño de los cargaderos, sistemas contra incendios de la instalación, o alarmas de emergencia, entre otros. La norma define una clasificación de sustancias en función de su grado de inflamabilidad. La clasificación es la siguiente:

Tabla 6.1.1. Clasificación de los productos inflamables según la ITC MIE-APQ 1.

Categoría	Definición
Clase A	Productos licuados cuya presión absoluta de vapor a 15°C sea superior a 1 bar
Subclase A1	Productos de la clase A que se almacenan licuados a una temperatura inferior a 0°C
Subclase A2	Productos de la clase A que se almacenan licuados en otras condiciones
Clase B	Productos cuyo punto de inflamación es inferior a 55°C y no están comprendidos en la clase A
Subclase B1	Productos de clase B cuyo punto de inflamación es inferior a 38°C
Subclase B2	Productos de clase B cuyo punto de inflamación es igual o superior a 38°C e inferior a 55°C
Clase C	Productos cuyo punto de inflamación está comprendido entre 55 y 100°C
Clase D	Productos cuyo punto de inflamación es superior a 100°C

Según esta clasificación, el acrilonitrilo, que presenta un punto de inflamación a 0°C, se considera una sustancia de clase B1. A partir de este dato, la Instrucción Técnica establece los requisitos que debe cumplir la instalación.

La ITC MIE-APQ 7, por su parte, fija las prescripciones técnicas a las que han de ajustarse las instalaciones que pretendan almacenar productos tóxicos líquidos. Para ello, de igual manera que el APQ 1, establece una clasificación para las sustancias tóxicas, en función de su grado de peligrosidad.

- Clase T+: muy tóxicos.
- Clase T: tóxicos.
- Clase Xn: nocivos.

Esta catalogación se realiza a partir de la determinación de la toxicidad aguda de la sustancia sobre los animales, expresada en dosis letal (DL50) o concentración letal (CL50). La NTP 459 [30], que trata sobre la peligrosidad de productos químicos, define los límites de exposición de cada categoría. En la tabla 6.1.2 se recoge esta clasificación:

Tabla 6.1.2. Clasificación de toxicidad según NTP 459.

Categoría	DL50 oral rata mg/kg	DL50 cutánea rata o conejo mg/kg	CL50 inhalatoria rata mg/l/4 horas	
			Aerosoles o partículas	Gases y vapores
Muy tóxicos	≤ 25	≤ 50	≤ 0,25	≤ 0,50
Tóxicos	25-200	50-400	0,25-1	0,5-2
Nocivos	200-2000	400-2000	1-5	2-20

Los valores de dosis letal media y concentración letal media del acrilonitrilo se extraen de la ficha de seguridad, y se indican en la tabla 6.1.3.

Tabla 6.1.3. Valores de toxicidad del acrilonitrilo.

Componente	DL50 Oral	DL50 Cutánea	CL50 Inhalación
Acrilonitrilo	193 mg/kg rata	63 mg/kg conejo	0,47 mg/L/4 horas

A partir de esta información, se determina que el acrilonitrilo es una sustancia tóxica de categoría T. Esta categorización será la que rija los requisitos que debe cumplir la instalación según la ITC MIE-APQ 7.

7 Obra civil

El tanque se instalará en una zona previamente adaptada para la presencia de recipientes de almacenamiento similares. Tal y como se puede comprobar en el plano de implantación, la ubicación del tanque ya presenta un cubeto existente preparado para contener el volumen total de los tanques instalados en su interior. Por lo tanto, los trabajos de obra civil se reducirán considerablemente en comparación a una instalación completamente nueva.

En primer lugar, se describe brevemente la constitución del pavimento del cubeto existente. Se trata de un pavimento con una primera capa de hormigón, de 15 cm de espesor, que constituirá la superficie en contacto con el exterior. El hormigón empleado es HA-25/B/20/Qa. Las propiedades características de este hormigón [31] se detallan en la tabla 7.1.1.

Tabla 7.1.1. Características del hormigón HA-25/B/20/Qa.

Elemento	Característica
HA	Hormigón armado
25	Resistencia característica a compresión en 28 días de 25 N/mm ²
B	Consistencia de asentamiento blanda, para uso general
20	Tamaño máximo del árido de 20 mm
Qa	Exposición a sustancias con una agresividad química débil

Por debajo de la capa de hormigón, se coloca una lámina de polietileno (PE-HD) para impermeabilizar la estructura. Bajo esta capa, se emplea zahorra reciclada procedente de machaqueo de residuos de construcción y demolición (RCD) [32], compactada al 98%. Esta capa presenta un espesor de 30 cm. Por debajo de ésta, se emplea un asentamiento de árido grueso de macadam reciclado [33] de 1,20 m para acabar de definir la estructura.

Tal y como se especifica en la ITC MIE-APQ 1, el tanque requerirá una cimentación por encima del nivel del cubeto de 30 cm de alto. Esta se realizará en hormigón armado, y tendrá una pendiente de 1% para el caso de fugas. Es importante que, a la hora de instalar el tanque, la tubuladura de fondo de tanque por la que saldrá el producto se oriente siguiendo esta pendiente, de manera que se facilite el vaciado del tanque cuando sea necesario.

También se requerirán dos cimentaciones para las bombas P-6310 y P-6320, de manera que queden protegidas en caso de lluvia. Estas cimentaciones permitirán cubrir la superficie total de la bomba, y tendrán una altura de 10 cm.

8 Bibliografía y referencias

[1] Acrylonitrile: Safe Storage and Handling Guide.

https://www.ineos.com/globalassets/ineos-group/businesses/ineos-nitriles/she/acrylonitrile_brochure.pdf

[2] Emergency Restabilisation with RESTAB™ Technology.

<https://chemicals.basf.com/global/en/Petrochemicals/acrylic-monomers.html>

[3] Real Decreto 840/2015, de 21 de septiembre, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2015-11268>

[4] Real Decreto 379/2001, de 6 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de almacenamiento de productos químicos y sus instrucciones técnicas complementarias MIE APQ-1, MIE APQ-2, MIE APQ-3, MIE APQ-4, MIE APQ-5, MIE APQ-6 y MIE APQ-7.

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-8971>

[5] Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10.

<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2017-8755>

[6] Real Decreto 681/2003, de 12 de junio, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores expuestos a los riesgos derivados de atmósferas explosivas en el lugar de trabajo.

<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2003-12099>

[7] Reglamento (CE) nº 1272/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2008, sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas, y por el que se modifican y derogan las Directivas 67/548/CEE y 1999/45/CE y se modifica el Reglamento (CE) nº 1907/2006.

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-82637>

[8] API Standard 650, 13th Ed.

<https://www.api.org/products-and-services/standards/important-standards-announcements/standard650>

[9] Asociación Española de Normalización: UNE.

<https://www.une.org/>

[10] CRYOSPAIN: Diferencias entre el API 620 y el API 650.

<https://cryospain.com/es/tanques-api-620>

[11] TJC Steel: ASTM A283/A283M Grade C Structural Carbon Steel Plate

https://www.tjcsteel.com/e_products/show/?203-ASTM-A283-A283M-Grade-C-Structural-Carbon-Steel-Plate-203.html

[12] Grundfos Pump Manufacturer

<https://www.grundfos.com/>

[13] Pumps & Systems: How to Define & Measure Centrifugal Pump Efficiency

<https://www.pumpsandsystems.com/how-define-measure-centrifugal-pump-efficiency-part-1#:~:text=Centrifugal%20pumps%20can%20approach%2094,will%20vary%20by%20plant%20type.>

[14] AEMET: Atlas de radiación solar en España utilizando datos del SAF de Clima de EUMETSAT.

https://www.aemet.es/en/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/atlas_radiacion_solar

[15] Libro Web de Química del NIST

<https://webbook.nist.gov/chemistry/>

[16] Guasch: Componentes y electrónica de potencia. Características del líquido de refrigeración.

https://www.e-guasch.com/onlinedocs/catalogue/appnotes/AN090903_c.pdf

[17] Instrumentos de medición WIKA.

https://es.shop.wika.com/home_shop_es_es.WIKA?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_term=wika&utm_content=Online_shop_general&utm_campaign=Online_shop&gclid=CjwKCAjw3dCnBhBCEiwAVvLcuzF_0ss5Zbrg2q0Nh6swO9UGR8XHjuwfbt_6xOB7mD05Ve-iQ2ZcdRoCbFAQvD_BwE

[18] Emerson: Manuales y guías.

<https://www.emerson.com/es-es/support/manuals-and-guides>

[19] Emerson: Level Measurement.

<https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation/level>

[20] Emerson: Temperature Measurement.

<https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation/temperature-measurement>

[21] Endress + Hauser. Medidores de caudal de líquidos, gases y vapor.

<https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-caudal>

[22] Crowl & Louvar: Chemical Process Safety. Fundamentals with Applications.

[23] Bluefield Process Safety. External Plant Fires: What's the Likelihood?

- <https://bluefieldsafety.com/2017/09/external-plant-fires-whats-the-likelihood/>
- [24] Guidelines for quantitative risk assessment CPR18E Purple Book.
- [25] Reference Manual Bevi Risk Assessments. Versión 3.2.
- [26] Instrucció 14/2008 SIE. Criteris per la realització de les anàlisis quantitatives de risc a Catalunya (Purple Book i criteris complementaris).
- <http://www.ictonline.es/pdfsnoI/20104892.pdf>
- [27] United States Environmental Protection Agency: ALOHA Software.
- <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>
- [28] Fitxa Meteorologica de Tarragona (Complex Educatiu).
- https://campusvirtual.urv.cat/pluginfile.php/4491325/mod_resource/content/0/Tema_1_1_Dispersions/Fitxa_Meteorologica_Tarragona_Complex_Educatiu.pdf
- [29] Índices de toxicidad en emergencias AEGL / ERPG / TEEL / PAC.
- <https://firestation.wordpress.com/2013/12/08/indices-de-toxicidad-en-emergencias-aegl-erpg-teel-pac-cameo-software-suitechemicals/>
- [30] NTP 459: Peligrosidad de productos químicos: etiquetado y fichas de seguridad.
- https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_459.pdf/d308a072-28df-440f-a1c2-7744713afa34?version=2.0&t=1638264145643
- [31] Prontuarios de Ingeniería Civil. Hormigón estructural.
- <http://prontuarios.info/materiales/hormigon>
- [32] Reciclados Roster. Zahorra de hormigón.
- <https://www.recicladosroster.com/venta-de-aridos-reciclados/zahorra-hormigon.html>
- [33] Reciclados Roster. Macadam RDCs.
- <https://www.recicladosroster.com/venta-de-aridos-reciclados/macadam-rcds.html>
- [34] Càlcul i Disseny de Bescanviadors. V-Bescanviadors de Plaques (Moodle).
- [35] Nordic Tec. Plate Heat Exchanger NORDIC Tec BA-95.
- <https://nordictec-store.com/gb/66-ba-95-serie-0095mplate-2-thread->
- [36] Instal·lacions Tèrmiques I Hidràuliques. Hydraulic Machines and Pipe Flows. 3: Fluid transport in pipes.
- https://campusvirtual.urv.cat/pluginfile.php/4281387/mod_resource/content/7/03_FluidTransport.pdf
- [37] Instal·lacions Tèrmiques I Hidràuliques. Hydraulic Machines and Pipe Flows. 1: Energy Equation.
- https://campusvirtual.urv.cat/pluginfile.php/4281380/mod_resource/content/6/01_EnergyEquation.pdf
- [38] Munson, Young, Okiishi: Fundamentos de Mecánica de Fluidos.
- [39] Merck Millipore. Acrilonitrilo CAS 107-13-1.
- https://www.merckmillipore.com/ES/es/product/Acrylonitrile,MDA_CHEM-800834?ReferrerURL=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

A. Cálculo del espesor del tanque con el método de 1 pie

El método de 1 pie consiste en calcular, a partir de las fórmulas definidas, el espesor requerido a una altura de 0,3 metros (aproximadamente 1 pie) por encima del fondo de cada virola del tanque. Estas virolas son los anillos formados por chapas y soldados entre sí que forman el tanque. Las virolas suelen tener una altura de entre 1 y 2 m, en función del diámetro requerido para el tanque.

En este caso, se han definido unas virolas de 1,25 m, con lo que el tanque tendrá un total de 8 virolas. El método de 1 pie define las siguientes ecuaciones para el cálculo de los espesores mínimos:

Espesor de diseño:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot D(H-0,3)G}{S_d} + CA \quad (\text{A.1})$$

Espesor de prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot D(H-0,3)G}{S_t} \quad (\text{A.2})$$

Donde cada una de las variables se definen como:

- t_d = espesor de diseño, en mm.
- t_t = espesor de prueba hidrostática, en mm.
- D = diámetro nominal del tanque, en m.
- H = nivel de diseño de líquido, en m. Se define como la altura del fondo de la virola siendo calculada hasta el límite superior del cilindro.
- G = gravedad específica del líquido almacenado.
- CA = corrosión permitida, en mm.
- S_d = estrés máximo de diseño, en MPa.
- S_t = estrés máximo de prueba hidrostática, en MPa.

El diámetro nominal del tanque viene especificado previamente. La gravedad específica se define como el cociente entre la densidad del producto elegido entre la densidad del agua a 4°C. Los valores de estrés máximo vienen dados por la tabla 5-2a del apartado 6.5.2 del código API 650. Para la corrosión permitida, se coge un valor de 0,3 mm de referencia. Los valores de H se calcularán de manera individual para cada virola. En la tabla A.1 se recogen los valores de cada una de estas variables. Los valores de H se adjuntan en la tabla A.2.

Tabla A.1. Variables del sistema.

Variable	Valor
D (m)	3,6
G	0,806
CA (mm)	0,3
Sd (MPa)	137
St (MPa)	154

Tabla A.2. Valores de H.

Número de virola	Altura (m)
H1	10,00
H2	8,75
H3	7,50
H4	6,25
H5	5,00
H6	3,75
H7	2,50
H8	1,25

La única condición para aplicar este método según la norma API 650 es que el diámetro del tanque sea inferior a 61 m. Como en este caso el diámetro es de 3,6 m, se procede a aplicar el método.

Se realiza el desarrollo para el cálculo de la primera virola:

Para el espesor de diseño:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 3,6(10-0,3)0,806}{137} + ,03 = 1,31 \quad (\text{A.3})$$

Para el espesor de prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 3,6(10-0,3)0,806}{154} = 0,90 \quad (\text{A.4})$$

Como se puede comprobar, el espesor de diseño es superior al espesor de prueba hidrostática. En la tabla A.3 se adjuntan los resultados del cálculo de espesores para todas las alturas de líquido:

Tabla A.3. Espesores para cada valor de H.

Altura de líquido de diseño	t_d (mm)	t_t (mm)
H1	1,31	0,90
H2	1,18	0,78
H3	1,05	0,66
H4	0,92	0,55
H5	0,79	0,43
H6	0,66	0,32
H7	0,53	0,20
H8	0,40	0,09

Comparando los valores de espesor de diseño y de prueba hidrostática, se obtiene que en todos los casos el espesor mínimo de diseño es superior al espesor mínimo de prueba hidrostática. Sin embargo, tal y como se menciona en la tabla X.X, el espesor mínimo para un tanque de diámetro nominal inferior a 15 m nunca será inferior a 5 mm, por lo que este será el espesor definido para el cuerpo del tanque.

Para definir el diseño del techo del tanque, primero habrá que determinar la pendiente del techo. Como se trata de un techo cónico sin soporte adicional, el apartado 5.10.5.1 del código API 650 define las siguientes condiciones para la pendiente del techo:

- Ángulo $\theta \leq 37^\circ$ (Pendiente = 9:12)
- Ángulo $\theta \geq 9,5^\circ$ (Pendiente = 2:12)

Finalmente se decide por una pendiente de 2:12, que corresponde a un ángulo de $9,5^\circ$.

Para techos sin soporte, el apartado 5.10.2.2 del código API 650 especifica que el grosor mínimo del techo del tanque será de 5 mm, que se verá incrementado en caso de que el techo sea de cono soportado. Debido a que el resto del cuerpo no requiere espesores superiores al mínimo, y no se trata de un techo soportado, se decide emplear el valor de 5 mm en concordancia con el resto del cuerpo.

B. Cálculo del intercambiador de calor

En el anexo B se muestran los cálculos llevados a cabo para el dimensionamiento del intercambiador de calor.

Se lleva a cabo el cálculo geométrico del intercambiador mediante un procedimiento proporcionado por la URV [34].

En primer lugar, para poder calcular los parámetros geométricos, hay una serie de datos del intercambiador proporcionados por los fabricantes. Para poder llevar a cabo estos cálculos, se ha seleccionado un modelo comercial que pueda servir como ejemplo proporcionando estos parámetros [35], y usando estas dimensiones como patrón, se comprobará si las dimensiones escogidas son suficientes para que se produzca el intercambio de calor requerido.

Los parámetros proporcionados por el fabricante y usados como modelo son los siguientes:

Tabla B.1. Parámetros proporcionados por el fabricante.

Parámetro (Unidades)	Valor
Área efectiva de la placa, A_p (m ²)	0,115
Distancia horizontal entre puertos, HPCD (m)	0,174
Distancia vertical entre puertos, VPCD (m)	0,456
Grosor de la placa, ε (m)	0,0004
Diámetro de los puertos, D (m)	0,05
Número de placas	50
Material de las placas	316L
Profundidad del intercambiador, F (m)	0,135

Con estos valores definidos, se procede a calcular los parámetros necesarios para el intercambiador. En primer lugar, se puede calcular el área del intercambiador, A:

$$A = (n - 2) \cdot A_p \quad (\text{B.1})$$

Siendo n el número de placas, y A_p el área efectiva por placa mencionada anteriormente. Asignando los valores correspondientes:

$$A = (50 - 2) \cdot 0,115 = 5,52 \text{ m}^2 \quad (\text{B.2})$$

Se obtiene un área de 5,52 m² para el intercambiador. A continuación, se define el ancho de la placa, W, y la longitud equivalente, L_e :

$$W = (HPCD) + D + 0,015 \text{ (m)} \quad (\text{B.3})$$

Con los valores definidos anteriormente:

$$W = 0,174 \text{ m} + 0,05 \text{ m} + 0,015 \text{ m} = 0,239 \text{ m} \quad (\text{B.4})$$

Se obtiene un ancho de placa de 0,239 m. A partir de este valor, y el área efectiva por placa, se procede a calcular el valor de L_e :

$$A_p = L_e \cdot W \quad (\text{B.5})$$

$$L_e = \frac{0,115 \text{ m}^2}{0,239 \text{ m}} = 0,48 \text{ m} \quad (\text{B.6})$$

Conociendo el ancho de placa, se puede calcular el área de paso por canal, S_c :

$$S_c = W \cdot b \quad (\text{B.7})$$

Donde b es la separación entre placas, en m. Esta se puede calcular de la siguiente manera:

$$b = \frac{F - (n \cdot \varepsilon)}{(n - 1)} \quad (\text{B.8})$$

Aplicando valores:

$$b = \frac{0,135 \text{ m} - (50 \text{ placas} \cdot 0,0004 \text{ m})}{(50 \text{ placas} - 1)} = 0,000235 \text{ m} \quad (\text{B.9})$$

Se obtiene una separación entre placas de $2,35 \cdot 10^{-4}$ m. Conociendo este valor, se determina S_c :

$$S_c = 0,239 \cdot 0,000235 = 0,000561 \text{ m}^2 \quad (\text{B.10})$$

El valor de S_c será de $5,61 \cdot 10^{-4}$ m². A continuación, se calcula el diámetro equivalente, D_e :

$$D_e = \frac{4 \cdot b \cdot W}{2 \cdot (b + W \cdot \phi)} \quad (\text{B.11})$$

Donde \emptyset es un valor que aparece en las hojas de características de la placa. Para la mayoría de las placas, este valor es 1,17. Aplicando valores:

$$D_e = \frac{4 \cdot 0,000235 \text{ m} \cdot 0,239 \text{ m}}{2 \cdot (0,000235 \text{ m} + 0,239 \text{ m} \cdot 1,17)} = 0,00397 \text{ m} \quad (\text{B.12})$$

El diámetro equivalente tiene un valor de $3,97 \cdot 10^{-3}$ m. Por último, se calcula en número de canales para cada fluido, N_c .

$$N_c = \frac{n-1}{2} \quad (\text{B.13})$$

$$N_c = \frac{50-1}{2} = 24,5 \quad (\text{B.14})$$

Se obtiene que, para cada fluido, hay un total de 24,5 canales. Una vez definidos estos parámetros, se pueden calcular los valores de transferencia de calor para cada fluido.

El siguiente paso es llevar a cabo el cálculo de la transferencia de calor que se producirá en el intercambiador. En este caso, se muestran los cálculos llevados a cabo para el acrilonitrilo. Para ello, se determina M_c , el caudal que pasa por cada canal, en kg/s.

$$M_c = \frac{M}{N_c} \quad (\text{B.15})$$

M se refiere al caudal total de fluido que entra al intercambiador, en kg/s.

$$M = \frac{m_{ACN}}{t} \quad (\text{B.16})$$

$$M = \frac{80600 \text{ kg}}{8 \cdot 3600 \text{ s}} = 2,80 \text{ kg/s} \quad (\text{B.17})$$

Por lo tanto, N_c será:

$$M_c = \frac{2,80 \text{ kg/s}}{24,5} = 0,11 \text{ kg/s} \quad (\text{B.18})$$

A continuación, se determina la velocidad másica en el canal, m:

$$m = \frac{M_c}{S_c} \quad (\text{B.19})$$

$$m = \frac{0,11 \text{ kg/s}}{0,00056 \text{ m}^2} = 203,65 \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}^2} \quad (\text{B.20})$$

Se calcula el número de Reynolds mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{m \cdot D_e}{\mu} \quad (\text{B.21})$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del acrilonitrilo, en Pa·s. El valor calculado es el siguiente:

$$Re = \frac{203,65 \frac{\text{kg}}{\text{s}\cdot\text{m}^2} \cdot 0,0040 \text{ m}}{0,00034 \text{ Pa}\cdot\text{s}} = 2382,94 \quad (\text{B.22})$$

A partir de este número de Reynolds, se puede obtener el número de Nusselt mediante la siguiente gráfica, que relaciona el número de Reynolds y el de Nusselt para cada ángulo de corrugación posible.

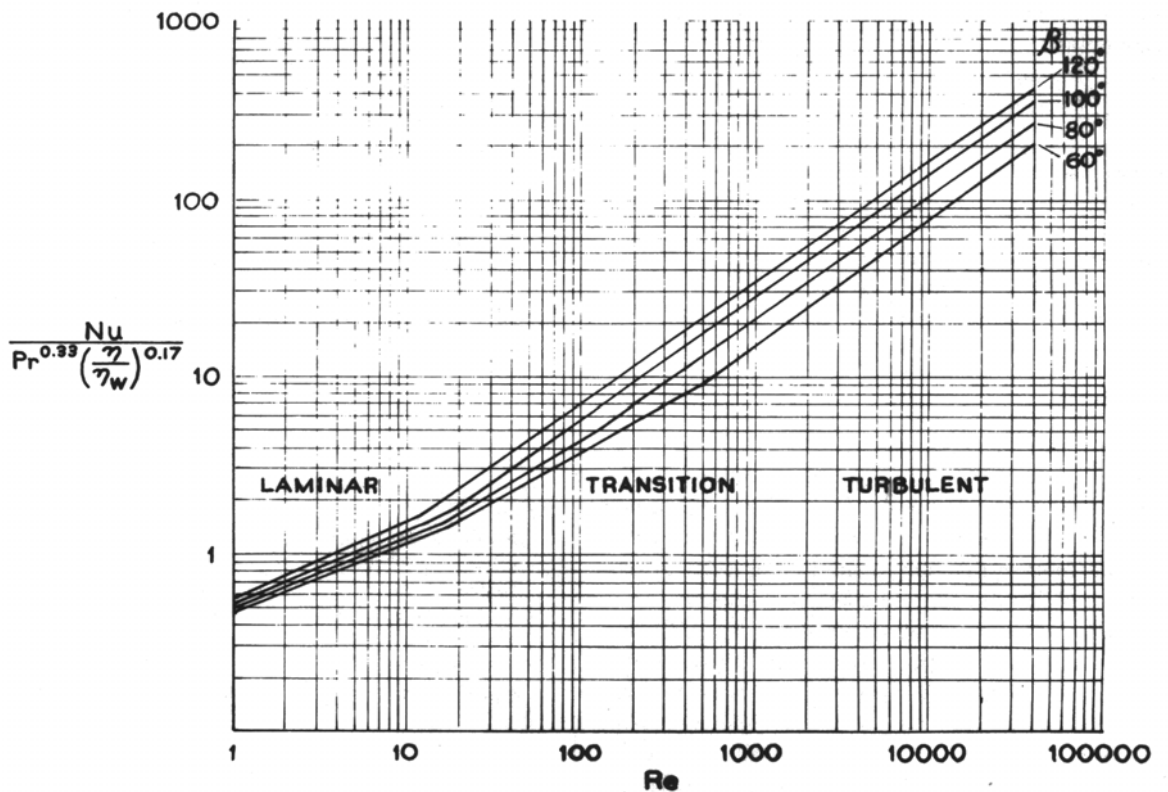


Figura B.1. Número de Nusselt para placas con corrugación de Chevron.

Para poder obtener el valor de Nusselt, se requiere conocer el número de Prandtl de la sustancia en cuestión. Este valor se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad (\text{B.23})$$

Donde C_p es la capacidad calorífica, en J/kg·K, μ la viscosidad dinámica en Pa·s, y k la conductividad térmica de la sustancia. Para el acrilonitrilo, a continuación, se muestran los valores de estas propiedades:

Tabla B.2. Propiedades del acrilonitrilo.

Propiedad	Valor
C_p (J/kg·K)	2050,13
μ (Pa·s)	0,00034
K (W/m·K)	0,17

Se calcula el número de Prandtl:

$$Pr = \frac{2050,13 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 0,00034 \text{ Pa}\cdot\text{s}}{0,17 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}} = 4,20 \quad (\text{B.24})$$

Con un número de Prandtl de 4,20 se procede a calcular el número de Nusselt para cada uno de los diferentes ángulos de corrugación de las placas. Los resultados de los 4 valores se muestran a continuación, pero los cálculos definitivos usarán un ángulo de corrugación igual a 60° para disminuir lo máximo posible la pérdida de carga causada en el intercambiador.

Tabla B.3. Valores de Nusselt calculados para cada ángulo de corrugación.

Ángulo de corrugación	Nusselt
60°	68,46
80°	93,96
100°	126,18
120°	136,91

A partir de este valor, finalmente es posible calcular el coeficiente de transferencia de calor, h , para el acrilonitrilo. La ecuación empleada es la siguiente:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D_e} \quad (\text{B.25})$$

$$h_c = \frac{68,46 \cdot 0,17 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}}{0,0040 \text{ m}} = 2856,34 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad (\text{B.26})$$

Este procedimiento de cálculo se repite para el caso del agua glicolada, obteniendo el siguiente valor de h:

$$h_f = 6957,26 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (B.27)$$

Finalmente, se procede a calcular el coeficiente de transferencia global del intercambiador. Este valor se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{\varepsilon}{k} + \frac{1}{h_f} + R_{f,c}'' + R_{f,f}'' \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) \quad (B.28)$$

Donde:

- U = Coeficiente global de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$.
- h_c = Coeficiente de transferencia de calor del fluido caliente (Acrilonitrilo) $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$.
- h_f = Coeficiente de transferencia de calor del fluido frío (Agua glicolada) $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$.
- k = Conductividad térmica del material de la placa, en este caso acero inoxidable 316L $\left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$.
- ε = Espesor de la placa (m).
- $R_{f,c}''$ = Resistencia de fouling del fluido caliente $\left(\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right)$.
- $R_{f,f}''$ = Resistencia de fouling del fluido frío $\left(\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W} \right)$.

Los valores de resistencia de fouling deben obtenerse bibliográficamente. En la siguiente tabla, se recogen los valores de cada una de estas variables:

Tabla B.4. Valores de las variables para el cálculo del coeficiente global de transferencia, U.

Variable	Valor
Hc (W/(m ² ·K))	2856,34
Hf (W/(m ² ·K))	6957,26
ε (m)	0,0004
K (W/(m·K))	15
Rf,c ((m ² ·K)/W)	0,00018
Rf,f ((m ² ·K)/W)	0,00053

Aplicando estos valores:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2856,34 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + \frac{0,0004}{15 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{1}{6957,26 \frac{W}{m^2 \cdot K}} + 0,00018 \frac{m^2 \cdot K}{W} + 0,00053 \frac{m^2 \cdot K}{W} \quad (B.29)$$

$$U = 812,68 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (B.30)$$

Se obtiene un coeficiente de transferencia global de $812,68 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Por último, sólo queda calcular la pérdida de carga en el intercambiador. Se calcularán las pérdidas de carga en ambos lados, tanto en el acrilonitrilo como en el agua glicolada. Sin embargo, únicamente se incluirán los cálculos de la parte del acrilonitrilo.

Para comenzar, se extrae de la siguiente figura el factor de fricción de Fanning en función del número de Reynolds y el ángulo de corrugación.

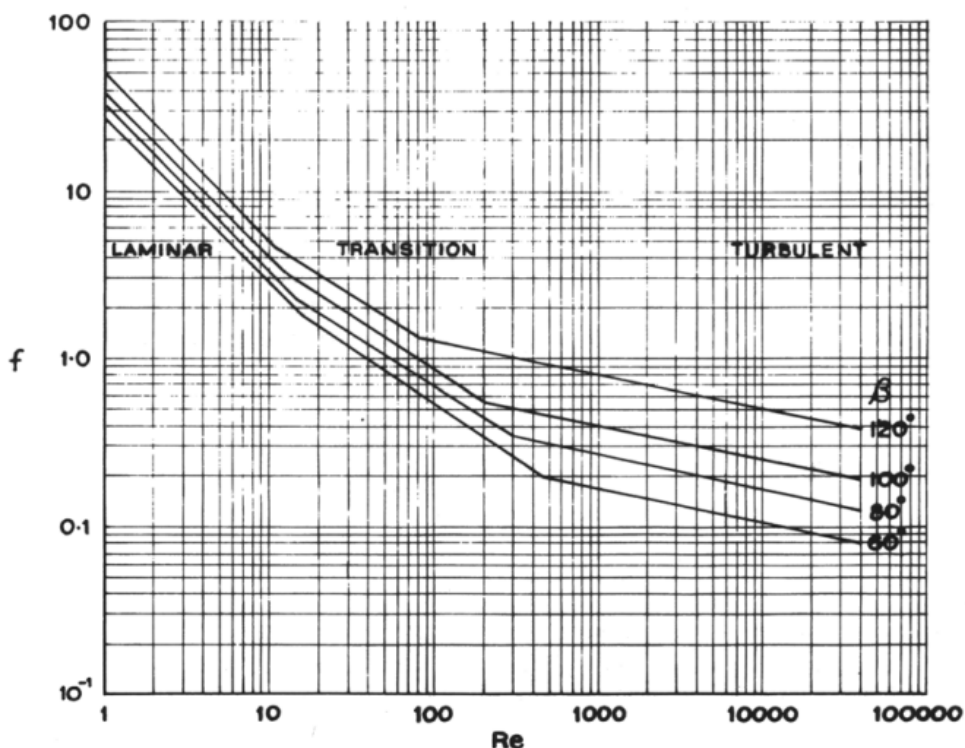


Figura B.2. Factor de fricción de Fanning en función del ángulo de corrugación y el número de Reynolds.

En la siguiente tabla, se recogen los valores del factor F determinados para cada ángulo:

Tabla B.5. Factor de fricción de Fanning en función del ángulo de corrugación.

Ángulo de corrugación	Factor de fricción
60°	0,12
80°	0,19
100°	0,28
120°	0,55

Una vez obtenido este factor de fricción, se procede a calcular la pérdida de carga en los canales mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P_C = \frac{2 \cdot f \cdot m^2 \cdot L_e \cdot N_p}{\rho \cdot D_e} \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{-0,17} \quad (Pa) \quad (B.31)$$

$$\Delta P_C = \frac{2 \cdot 0,12 \cdot 203,65^2 \frac{kg}{s \cdot m^2} \cdot 0,48 m \cdot 24,5}{806 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0040 m} \cdot \left(\frac{0,00034 Pa \cdot s}{0,001 Pa \cdot s} \right)^{-0,17} = 43979,42 Pa \quad (B.32)$$

De esta manera, se obtiene una pérdida de carga en los canales de 43979,42 Pa. A continuación, se calcula el área de paso por puerto, S_p , y la velocidad de fluido por el puerto, V_p .

$$S_p = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (m^2) \quad (B.33)$$

$$S_p = \frac{\pi \cdot 0,05^2 m}{4} = 0,0020 m^2 \quad (B.34)$$

$$V_p = \frac{M}{\rho \cdot S_p} \quad \left(\frac{m}{s} \right) \quad (B.35)$$

$$V_p = \frac{2,80 \frac{kg}{s}}{806 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,0020 m^2} = 1,77 \frac{m}{s} \quad (B.36)$$

Con estos valores calculados, se obtiene la pérdida de carga en el puerto:

$$\Delta P_P = 1,5 \cdot \frac{V_p^2 \cdot \rho}{2} \quad (Pa) \quad (B.37)$$

$$\Delta P_P = 1,5 \cdot \frac{1,77^2 \frac{m}{s} \cdot 806 \frac{kg}{m^3}}{2} = 1803,61 Pa \quad (B.38)$$

Finalmente, se procede a calcular la pérdida de carga total sumando la pérdida de carga en los canales y en el puerto:

$$\Delta P = 43979,42 Pa + 1803,61 Pa = 45869,81 Pa \quad (B.39)$$

Se obtiene una pérdida de carga total en el lado del acrilonitrilo de 45869,81 Pa. Se repite el mismo cálculo para el lado del agua glicolada, y se obtiene una pérdida de carga de 43697,98 Pa.

C. Cálculo de las bombas P-6310 y P-6320

En este apartado, se muestra el procedimiento llevado a cabo para calcular la altura necesaria que deben proporcionar las bombas P-6310 y P-6320.

En primer lugar, se calculan las pérdidas por fricción en la bomba P-6310. Esta bomba tendrá que ser capaz de proporcionar una altura igual a la suma de la altura del tanque, y las pérdidas por fricción en la línea. El tanque tendrá una altura de 10 m, que se tendrá que sumar a las pérdidas mayores y menores calculadas para obtener una estimación final de la altura que tendrá que ser capaz de proporcionar la bomba.

Para calcular las pérdidas mayores, en primer lugar, se estima una longitud de línea total que tendrá que recorrer el fluido. En este caso, la estación de descarga se encuentra en el exterior del cubeto, por lo que el acrilonitrilo no deberá recorrer mucha distancia hasta llegar al tanque más allá de los 10 metros de tubería vertical. Se considera que una longitud de línea de 15 m es más que suficiente para considerar las pérdidas por fricción en la tubería.

El siguiente paso será determinar la velocidad a la que circulará el fluido por la línea, así como el diámetro de esta. Se considera que, para procesos industriales, los valores de velocidad de fluido aceptados en el caso de líquidos van de 1 a 3 m/s [36], por lo que se deberá escoger un diámetro de tubería que permita cumplir estos límites. El motivo es que velocidades muy altas pueden suponer peligros para la instalación generando pérdidas de carga mayores, ruido o vibraciones.

Para un caudal de 40 m³/h la velocidad del fluido, en m/s, vendrá dada por la siguiente ecuación en función del diámetro de línea:

$$v = \frac{40 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}}}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}} = \frac{4}{90 \cdot \pi \cdot D^2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (\text{C.1})$$

A continuación, se adjunta una tabla con los cálculos de las diferentes velocidades de línea obtenidas para diferentes diámetros de tubería estándar.

Tabla C.1. Diámetros nominales de línea y velocidades de fluido.

Diámetro nominal DN (mm)	Velocidad del fluido (m/s)
DN40	8,84
DN50	5,66
DN65	3,35
DN80	2,21
DN90	1,75
DN100	1,41
DN125	0,91

De esta tabla, se concluye que los diámetros de línea admisibles serían DN80, DN90, y DN100. Se opta por escoger tuberías de DN80 debido a que su uso es común, y es la única medida que garantiza una velocidad por encima de 2 m/s.

Habiendo determinado la longitud de línea, el diámetro, y la velocidad a la cual circula el fluido, es posible calcular las pérdidas de carga mayores mediante la ecuación de Darcy-Weisbach [37]:

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{C.2})$$

Donde:

- h_f = Pérdidas mayores por fricción, en m.
- Δp = Pérdida de carga de la línea, en Pa.
- ρ = Densidad del fluido que circula, en kg/m^3 .
- g = Aceleración de la gravedad, $9,81 \text{ m/s}^2$.
- f = Factor de fricción de Darcy.
- L = Longitud de la línea, en m.
- D = Diámetro de la línea, en m.
- V = Velocidad del fluido por el interior de la línea, en m/s.

Todos estos parámetros son conocidos, excepto el factor de fricción de Darcy, que deberá ser calculado.

Para calcular el factor de fricción de Darcy, existen dos procedimientos posibles: o bien estimar el factor f gráficamente mediante el diagrama de Moody, o bien determinar este factor analíticamente mediante las ecuaciones de Swanee & Jain y Colebrook [37]. Se decide emplear este segundo método, ya que se considera de mayor precisión.

El método consiste en determinar un primer factor f inicial mediante la ecuación de Swanee & Jain, y a continuación emplear este valor para realizar una iteración de la ecuación de Colebrook para obtener un factor f más preciso. Las ecuaciones mencionadas se adjuntan a continuación.

- Ecuación de Swanee & Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \right]^2} \quad (\text{C.3})$$

- Ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (\text{C.4})$$

Donde:

- f = Factor de fricción de Darcy
- D = Diámetro de la línea, en m.
- ε = Coeficiente de rugosidad de línea, en m.
- Re = Número de Reynolds.

El número de Reynolds, que determina la turbulencia de un flujo, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (C.5)$$

Donde:

- ρ = Densidad del fluido, en kg/m³.
- V = Velocidad del fluido, en m/s.
- D = Diámetro de la línea, en m.
- μ = Viscosidad dinámica, en Pa·s.

El acrilonitrilo presenta una densidad de 806 kg/m³ y una viscosidad dinámica de 0,34 centipoise, que equivale a 0,00034 Pa·s. El resultado es el siguiente:

$$Re = \frac{806 \cdot 2,21 \cdot 0,08}{3,40 \cdot 10^{-4}} = 419212 \quad (C.6)$$

Se obtiene un número de Reynolds de 419212, que implica un flujo altamente turbulento. Una vez conocido este valor, el único parámetro por determinar es el coeficiente de rugosidad del material ϵ , que ha sido determinado experimentalmente para cada material. Para acero comercial, el coeficiente de rugosidad es de 0,045 mm [37]. Se introducen todos los valores conocidos en la ecuación de Swamee & Jain para obtener una primera estimación del factor de fricción.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{0,000045/0,08}{3,7} + \frac{5,74}{419212^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0183 \quad (C.7)$$

Se obtiene un factor f inicial de $1,83 \cdot 10^{-2}$. Este valor se introducirá en la ecuación de Colebrook para obtener un factor de fricción más estricto que será el que se emplee en el cálculo de las pérdidas por fricción.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2,0 \cdot \log \left(\frac{0,000045/0,08}{3,7} + \frac{2,51}{419212 \cdot \sqrt{0,0183}} \right) = 7,414 \quad (C.8)$$

$$f = \left(\frac{1}{7,414} \right)^2 = 0,01819 \quad (C.9)$$

Finalmente, se obtiene un factor de fricción de 0,01819. Este valor se introduce en la ecuación de Darcy-Weisbach para calcular la pérdida de altura por fricción a lo largo de la línea.

$$h_f = \frac{\Delta p}{\rho g} = 0,01819 \cdot \frac{15}{0,08} \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,85 \text{ m} \quad (C.10)$$

Las pérdidas mayores por fricción a lo largo de la línea serán de 0,85 m. El siguiente paso es determinar las pérdidas menores asociadas al paso por codos, válvulas y otros elementos restrictivos en la línea.

La ecuación para calcular estas pérdidas menores, tal y como se menciona en el libro *Fundamentos de Mecánica de Fluidos* [38], es la siguiente:

$$h_L = K_L \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (C.11)$$

Donde:

- h_L = Pérdidas de altura menores, en m.
- K_L = Coeficientes de pérdida de altura para diferentes componentes de tuberías
- V = Velocidad del fluido, en m/s.
- g = Aceleración de la gravedad, 9,81 m/s².

El coeficiente K_L para cada tipo de componente también se obtiene de la tabla 8.2 del mismo libro. A continuación, se recogen los diferentes factores K_L para cada componente relevante en la instalación, así como el número de elementos de cada tipo.

Tabla C.2. Factores pérdida y cantidades de los diferentes componentes.

Tipo de componente	Factor de pérdida K_L	Número de unidades
Codo	0,3	3
Unión en forma T	0,2	1
Válvula de compuerta	0,15	6
Válvula antirretorno	2	1
Válvulas de asiento	10	2

Se considera que las válvulas automáticas serán válvulas de asiento (también llamadas válvulas de globo), puesto que son el modelo más común a la hora de automatizar válvulas, a pesar de que su elevado factor de pérdida pueda suponer una desventaja a la hora de calcular las pérdidas del sistema.

Seguidamente, se realiza el cálculo de las pérdidas menores para cada tipo de elemento. Los cálculos se adjuntan a continuación:

$$h_{L,codo} = 3 \cdot 0,3 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,23 \text{ m} \quad (C.12)$$

$$h_{L,te} = 1 \cdot 0,2 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,05 \text{ m} \quad (C.13)$$

$$h_{L,valorva\ compuerta} = 6 \cdot 0,15 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,22 \text{ m} \quad (C.14)$$

$$h_{L,valorva\ antirret.} = 1 \cdot 2 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,50 \text{ m} \quad (C.15)$$

$$h_{L,valorva\ asiento} = 2 \cdot 10 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 4,97 \text{ m} \quad (C.16)$$

$$h_{L,total} = 0,23 + 0,05 + 0,22 + 0,50 + 4,97 = 5,98 \text{ m} \quad (\text{C.17})$$

Finalmente, se obtiene que las pérdidas menores totales debido a los elementos que forman parte de la línea son un total de 5,98 m. Por lo tanto, ya se puede determinar la altura total que deberá ser capaz de aportar la bomba escogida.

Para realizar este cálculo, se parte de la ecuación de Bernoulli que permite calcular el trabajo que necesita hacer una bomba para llevar el fluido de un punto a otro. La ecuación es la siguiente:

$$\left(P_1 + \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 \right) + \Delta P_{bomba} = \left(P_2 + \frac{\rho \cdot V_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_2 \right) + \Delta P_{turbina} + \Delta P_{fricción} \quad (\text{C.18})$$

Donde:

- P_1 = Presión en el depósito del cual aspira la bomba, en Pa.
- P_2 = Presión en el que descarga la bomba, en Pa.
- V_1 = Velocidad del fluido en el depósito del cual aspira la bomba, en m/s.
- V_2 = Velocidad del fluido en el depósito en el que descarga la bomba, en m/s.
- ρ = Densidad del fluido, en kg/m^3 .
- g = Aceleración de la gravedad, $9,81 \text{ m/s}^2$.
- z_1 = Altura del punto en el que aspira la bomba, en m.
- z_2 = Altura a la cual la bomba envía el fluido que impulsa, en m.
- ΔP_{bomba} = Presión que aporta la bomba, en Pa.
- $\Delta P_{turbina}$ = Presión que elimina la turbina, en Pa.
- $\Delta P_{fricción}$ = Presión que se pierde por fricción, en Pa.

Dividiendo esta expresión por la densidad del fluido y la constante de aceleración de la gravedad, se puede expresar en términos de altura aportada y perdida en el sistema. De esta forma, la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\left(\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + z_1 \right) + h_{bomba} = \left(\frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + z_2 \right) + h_{turbina} + h_{fricción} \quad (\text{C.19})$$

Además, se sabe que no hay ninguna turbina que forme parte del proceso, y las velocidades en el interior de la cisterna y del tanque son iguales a 0, por lo que la ecuación se puede simplificar aún más eliminando estos factores. De esta manera, finalmente la ecuación quedaría como:

$$h_{bomba} = \frac{P_2 - P_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + h_{fricción} \quad (\text{C.20})$$

Por lo tanto, y sabiendo que la diferencia de alturas será igual a la altura del tanque, solo queda determinar las presiones en ambos puntos del proceso. Ninguno de los dos recipientes se encuentra abierto a la atmósfera, por lo que no se podrá considerar que ambos están sometidos a presión atmosférica y de esta manera considerar como negligible el efecto de la presión. Será necesario evaluar cada uno de los puntos de forma independiente.

En el caso de la cisterna, tal y como se menciona en la descripción del proceso, se conecta a una línea de compensación que aporte una determinada cantidad de nitrógeno que impida que se produzca un efecto de vacío en el interior de la cisterna al descargar, pudiendo comprometer la integridad del depósito. La presión de nitrógeno a la entrada a la cisterna se

regula a 0,5 barg, que equivale a una presión manométrica de 50000 Pa, o una presión absoluta de 151325 Pa.

En el caso del tanque B-63, se realiza una cobertura de nitrógeno para evitar la formación de vapores en el interior del tanque. Esta cobertura de nitrógeno se regula a 10 mbarg, que equivale a una presión manométrica de 1000 Pa y una presión absoluta de 102325 Pa.

Una vez determinados todos los factores que intervienen en la ecuación, se procede a calcular la altura requerida por la bomba.

$$h_{bomba} = \frac{102325 - 151325}{806 \cdot 9,81} + 10 + 0,85 + 5,98 = 10,63 \text{ m} \quad (\text{C.21})$$

La bomba deberá ser capaz de aportar 10,63 m de altura al fluido impulsado. Una vez determinados la altura y el caudal requeridos por la bomba, queda calcular el NPSH disponible para poder seleccionar el modelo más adecuado para este caso.

El NPSH (*Net Positive Suction Head*, o Altura Neta Positiva de Aspiración) de una bomba indica la presión absoluta mínima que deberá haber en la aspiración de la bomba para evitar que se produzca cavitación. El NPSH disponible depende de la presión a la entrada, la altura de la aspiración, la pérdida de presión en la aspiración, y la presión de vapor del fluido.

La ecuación para determinar el NPSH disponible es la siguiente [36]:

$$NPSH_A = \left(\frac{P_1}{\rho \cdot g} + z_1 - h_{f,aspiración} \right) - \frac{P_v}{\rho \cdot g} \quad (\text{C.22})$$

Donde:

- P_1 = Presión en el depósito del cual aspira la bomba, en Pa.
- ρ = Densidad del fluido, en kg/m^3 .
- g = Aceleración de la gravedad, en m/s^2 .
- z_1 = Altura del punto de aspiración, en m.
- $h_{f,aspiración}$ = Pérdidas de altura por fricción en la aspiración, en m.
- P_v = Presión de vapor del fluido, en m.

La presión P_1 será la presión a la que se encuentra el acrilonitrilo en el interior de la cisterna, que equivale a 0,5 barg o 151325 Pa absolutos. La altura de aspiración serán 0 m, debido a que la bomba se encuentra a la altura de la cisterna, y las pérdidas por fricción se calculan de la misma manera que en el caso anterior.

En primer lugar, para las pérdidas mayores, se supone una longitud de línea de 5 m, que es la distancia añadida a los 10 m de altura del tanque para calcular la altura total requerida por la bomba en el paso anterior. Se vuelve a aplicar la ecuación de Darcy-Weisbach para determinar las pérdidas mayores en la aspiración:

$$h_f = 0,01819 \cdot \frac{5}{0,08} \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,28 \text{ m} \quad (\text{C.23})$$

De esta manera se determina que las pérdidas mayores en la aspiración son de 28 m. Para las pérdidas menores, se determina que a lo largo de la línea de aspiración se encuentran 2 válvulas de compuerta y 1 válvula de asiento, con lo que estos serán los elementos considerados para el cálculo. Empleando la ecuación de las pérdidas menores y los factores de pérdida K_L mencionados anteriormente:

$$h_{L, \text{valvula compuerta}} = 2 \cdot 0,15 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 0,07 \text{ m} \quad (\text{C.24})$$

$$h_{L, \text{valvula asiento}} = 1 \cdot 10 \cdot \frac{2,21^2}{2 \cdot 9,81} = 2,49 \text{ m} \quad (\text{C.25})$$

$$h_{L, \text{total}} = 0,07 + 2,49 = 2,56 \text{ m} \quad (\text{C.26})$$

Se obtienen unas pérdidas menores totales de 2,56 m. Sumadas a las pérdidas mayores calculadas anteriormente, se obtienen las pérdidas totales en la aspiración:

$$h_{f, \text{aspiracion}} = 0,28 + 2,56 = 2,84 \text{ m} \quad (\text{C.27})$$

Las pérdidas totales en la aspiración son 2,84 m de altura. Una vez calculado este valor, es posible calcular el NPSH disponible para la bomba, teniendo en cuenta que el acrilonitrilo tiene una presión de vapor a 20°C de 12000 Pa:

$$NPSH_A = \left(\frac{151325}{806 \cdot 9,81} + 0 - 2,84 \right) - \frac{12000}{806 \cdot 9,81} = 14,77 \text{ m} \quad (\text{C.28})$$

El NPSH disponible por la bomba para llevar el acrilonitrilo hasta el tanque es de 14,77 m. Para elegir el modelo de bomba adecuado, este valor de NPSH disponible deberá ser igual o superior al valor de NPSH requerido especificado por el fabricante para cada modelo.

En el caso de la bomba P-6320, los cálculos llevados a cabo son idénticos, sumando a las pérdidas totales la altura perdida en el intercambiador W-6410.

Por último, se calcula el diámetro de la línea de aspiración de las bombas para poder dimensionar la tubería. Como criterio, se considera que la velocidad adecuada en el fluido en la aspiración puede considerarse aproximadamente la mitad de la velocidad en la impulsión. Esto se debe a que una menor velocidad en la aspiración sirve para evitar vibraciones, ruidos y puede ayudar a alargar la vida de la bomba.

En el caso de la bomba P-6310, debido a que la velocidad en la impulsión es de 2,21 m/s, se considera adecuado limitar la velocidad en la aspiración a 1 m/s. De esta manera, y partiendo de la ecuación que relaciona la velocidad y el área de paso para obtener el caudal:

$$Q = V \cdot A \quad (\text{C.29})$$

Y de la ecuación que relaciona la sección de la tubería con el diámetro de la misma:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (\text{C.30})$$

Se obtiene la siguiente expresión:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot V}} \quad (\text{C.31})$$

Donde:

- D_s = Diámetro de línea, en m.
- Q = Caudal que pasa por la línea, en m^3/s .
- V = Velocidad del fluido que pasa por la línea, en m/s.

Para la bomba P-6310:

$$D_s = \sqrt{\frac{4 \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{90 \text{ s}}}{\pi \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}}} = 0,12 \text{ m} \quad (\text{C.32})$$

Se obtiene un diámetro aproximado de 0,12 m. Debido a que un diámetro de línea estándar DM150 se considera excesivo, se decide emplear una línea de DN100 para la aspiración de la bomba P-6310.

En el caso de la bomba P-6320 se realiza la misma estimación. Debido a que la velocidad en la impulsión es de 1,77 m/s, se escoge un valor de velocidad en la aspiración de 0,8 m/s. De esta manera, se obtiene un diámetro de 0,08 m, que se aproximará a un modelo estándar DN80.

D. Ficha de seguridad del Acrilonitrilo

La ficha de seguridad del Acrilonitrilo (CAS 107-13-1) se obtiene de Merck Millpore [39] y se muestra a continuación:

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

Versión 8.9

Fecha de revisión 03.07.2023

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Fecha de impresión 23.07.2023

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa**1.1 Identificadores del producto**

Nombre del producto : ACRILONITRILO (ESTABILIZADO CON ETER
MONOMETILICO DE LA HIDROQUINONA)
PARA SINTESIS

Referencia : 8.00834
Artículo número : 800834
Marca : Millipore
No. Índice : 608-003-00-4
REACH No. : 01-2119474195-34-XXXX
No. CAS : 107-13-1

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Producto químico para síntesis

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Merck Life Science S.L.
Calle Maria de Molina 40
E-28006 MADRID

Teléfono : +34 916 619 977
Fax : +34 916 619 642
E-mail de contacto : serviciotecnico@merckgroup.com

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 900-868538 (CHEMTREC España)
+(34)-931768545 (CHEMTREC
internacional)

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros**2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla****Clasificación de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008**

Líquidos inflamables (Categoría 2), H225
Toxicidad aguda, Oral (Categoría 3), H301
Toxicidad aguda, Inhalación (Categoría 3), H331
Toxicidad aguda, Cutáneo (Categoría 3), H311
Irritación cutáneas (Categoría 2), H315

Lesiones oculares graves (Categoría 1), H318
 Sensibilización cutánea (Sub-categoría 1B), H317
 Carcinogenicidad (Categoría 1B), H350
 Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única (Categoría 3), Sistema respiratorio, H335
 Peligro a largo plazo (crónico) para el medio ambiente acuático (Categoría 2), H411
 Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

2.2 Elementos de la etiqueta

Etiquetado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008

Pictograma



Palabra de advertencia Peligro

Indicación(es) de peligro

H225 Líquido y vapores muy inflamables.
 H301 + H311 + H331 Tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación.
 H315 Provoca irritación cutánea.
 H317 Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
 H318 Provoca lesiones oculares graves.
 H335 Puede irritar las vías respiratorias.
 H350 Puede provocar cáncer.
 H411 Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Declaración(es) de prudencia

P210 Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.
 P273 Evitar su liberación al medio ambiente.
 P280 Llevar guantes/ ropa de protección/ equipo de protección para los ojos/ la cara.
 P301 + P310 EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/ médico.
 P303 + P361 + P353 EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL (o el pelo): Quitar inmediatamente toda la ropa contaminada. Enjuagar la piel con agua.
 P305 + P351 + P338 EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.

Declaración Suplementaria del Peligro ninguno(a)

Reservado exclusivamente a usuarios profesionales.

Etiquetado reducido (<= 125 ml)

Pictograma



Palabra de advertencia Peligro

Indicación(es) de peligro	
H317	Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
H350	Puede provocar cáncer.
H318	Provoca lesiones oculares graves.
H301 + H311 + H331	Tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación.
Declaración(es) de prudencia	
P280	Llevar guantes/ ropa de protección/ equipo de protección para los ojos/ la cara.
P301 + P310	EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE TOXICOLOGÍA/ médico.
P305 + P351 + P338	EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.
Declaración Suplementaria del Peligro	ninguno(a)

2.3 Otros Peligros

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (mPmB) a niveles del 0,1% o superiores.

Información ecológica:

La sustancia/la mezcla no contienen componentes que tengan propiedades alteradoras endocrinas de acuerdo con el artículo 57(f) de REACH o el Reglamento delegado de la Comisión (UE) 2017/2100 o el Reglamento de la Comisión (UE) 2018/605 en niveles del 0,1 % o superiores.

Información toxicológica:

La sustancia/la mezcla no contienen componentes que tengan propiedades alteradoras endocrinas de acuerdo con el artículo 57(f) de REACH o el Reglamento delegado de la Comisión (UE) 2017/2100 o el Reglamento de la Comisión (UE) 2018/605 en niveles del 0,1 % o superiores.

SECCIÓN 3. Composición/información sobre los componentes

3.1 Sustancias

Formula	: C3H3N
Peso molecular	: 53,06 g/mol
No. CAS	: 107-13-1
No. CE	: 203-466-5
No. Indice	: 608-003-00-4

Componente	Clasificación	Concentración
Acrilonitrilo		
No. CAS	107-13-1	≤ 100 %
No. CE	203-466-5	
No. Indice	608-003-00-4	
		Flam. Liq. 2; Acute Tox. 3; Skin Irrit. 2; Eye Dam. 1; Skin Sens. 1B; Carc. 1B; STOT SE 3; Aquatic Chronic 2; H225, H301,

	H331, H311, H315, H318, H317, H350, H335, H411	
--	--	--

Para el texto integro de las Declaraciones-H mencionadas en esta sección, véase la Sección 16.

SECCIÓN 4. Primeros auxilios

4.1 Descripción de los primeros auxilios

Recomendaciones generales

El socorrista necesita protegerse a si mismo. Mostrar esta ficha de seguridad al doctor que esté de servicio.

Si es inhalado

Tras inhalación: aire fresco. Llamar inmediatamente al médico. Tras parada respiratoria: inmediatamente respiración instrumental. Aplicar oxígeno en caso necesario.

En caso de contacto con la piel

En caso de contacto con la piel: Quitar inmediatamente todas las prendas contaminadas. Aclararse la piel con agua/ ducharse. Llame inmediatamente al médico.

En caso de contacto con los ojos

Tras contacto con los ojos: aclarar con abundante agua. Llamar inmediatamente al oftalmólogo. Retirar las lentillas.

Por ingestión

Tras ingestión: hacer beber agua (máximo 2 vasos). Consultar inmediatamente al médico. Solamente en casos excepcionales, si no es posible la asistencia médica dentro de una hora, provocar el vómito (solamente en personas plenamente despiertas y conscientes), administrar carbón activo (20 - 40 g en suspensión al 10%) y consultar al médico lo más rápidamente posible.

4.2 Principales síntomas y efectos, agudos y retardados

Los síntomas y efectos más importantes conocidos se describen en la etiqueta (ver sección 2.2) y / o en la sección 11

4.3 Indicación de toda atención médica y de los tratamientos especiales que deban dispensarse inmediatamente

Sin datos disponibles

SECCIÓN 5. Medidas de lucha contra incendios

5.1 Medios de extinción

Medios de extinción apropiados

Dióxido de carbono (CO₂) Espuma Polvo seco

Medios de extinción no apropiados

No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.

5.2 Peligros específicos derivados de la sustancia o la mezcla

Óxidos de carbono

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Inflamable.

El fuego puede provocar emanaciones de:

óxidos de nitrógeno, Ácido cianhídrico (cianuro de hidrógeno)
Prestar atención al retorno de la llama.

Los vapores son más pesados que el aire y pueden expandirse a lo largo del suelo.
En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos.
Son posibles mezclas explosivas con el aire a temperaturas normales.

5.3 Recomendaciones para el personal de lucha contra incendios

Permanencia en el área de riesgo sólo con sistemas de respiración artificiales e independientes del ambiente. Protección de la piel mediante observación de una distancia de seguridad y uso de ropa protectora adecuada .

5.4 Otros datos

Separar el recipiente de la zona de peligro y refrigerarlo con agua. Reprimir los gases/vapores/neblinas con agua pulverizada. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.

SECCIÓN 6. Medidas en caso de vertido accidental

6.1 Precauciones personales, equipo de protección y procedimientos de emergencia

Indicaciones para el personal que no forma parte de los servicios de emergencia: No respirar los vapores, aerosoles. Evitar el contacto con la sustancia. Asegúrese una ventilación apropiada. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición. Evacúe el área de peligro, respete los procedimientos de emergencia, consulte con expertos. Equipo de protección individual, ver sección 8.

6.2 Precauciones relativas al medio ambiente

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

6.3 Métodos y material de contención y de limpieza

Cubra las alcantarillas. Recoja, una y aspire los derrames. Observe posibles restricciones de materiales (véanse indicaciones en las secciones 7 o 10). Recoger cuidadosamente con agentes absorbentes de líquidos, p.ej. Chemisorb®. Añadir a residuos a tratar. Aclarar.

6.4 Referencia a otras secciones

Para eliminación de desechos ver sección 13.

SECCIÓN 7. Manipulación y almacenamiento

7.1 Precauciones para una manipulación segura

Consejos para una manipulación segura

Trabajar bajo campana extractora. No inhalar la sustancia/la mezcla. Evítese la generación de vapores/aerosoles.

Indicaciones para la protección contra incendio y explosión

Mantener apartado de las llamas abiertas, de las superficies calientes y de los focos de ignición. Tomar medidas de precaución contra descargas electrostáticas.

Medidas de higiene

Sustituir inmediatamente la ropa contaminada. Protección preventiva de la piel. Lavar cara y manos al término del trabajo.

Ver precauciones en la sección 2.2

7.2 Condiciones de almacenamiento seguro, incluidas posibles incompatibilidades

Condiciones de almacenamiento

Protejido de la luz. Conservar el envase herméticamente cerrado en un lugar seco y bien ventilado. Manténgase alejado del calor y de las fuentes de ignición. Mantenerlo encerrado en una zona unicamente accesible por las personas autorizadas o calificadas.

Temperatura de almacenaje recomendada indicada en la etiqueta del producto.

Clase de almacenamiento

Clase de almacenamiento (TRGS 510): 3: Líquidos inflamables

7.3 Usos específicos finales

Aparte de los usos mencionados en la sección 1.2 no se estipulan otros usos específicos

SECCIÓN 8. Controles de exposición/protección individual

8.1 Parámetros de control

Componentes con valores límite ambientales de exposición profesional.

Componente	No. CAS	Parámetros de control	Valor	Base
Acrilonitrilo	107-13-1	TWA	0,45 ppm 1 mg/m ³	Directiva 2004/37/CE relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos durante el trabajo
	Observaciones	Sensibilización cutánea Piel Carcinógenos o mutágenos		
		STEL	1,8 ppm 4 mg/m ³	Directiva 2004/37/CE relativa a la protección de los trabajadores contra los riesgos relacionados con la exposición a agentes carcinógenos o mutágenos durante el trabajo
		Sensibilización cutánea Piel Carcinógenos o mutágenos		
		VLA-ED	2 ppm 4,4 mg/m ³	Límites de Exposición Profesional para Agentes Químicos - Tabla 1: Límites Ambientales de exposición profesional
		Supuestos carcinógenos para el hombre, en base a la existencia de pruebas en animales. Vía dérmica Sensibilizante		

8.2 Controles de la exposición

Protección personal

Protección de los ojos/ la cara

Use equipo de protección para los ojos probado y aprobado según las normas gubernamentales correspondientes, tales como NIOSH (EE.UU.) o EN 166 (UE). Gafas de seguridad ajustadas al contorno del rostro

Protección de la piel

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN374, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Sumerción

Material: goma butílica

espesura minima de capa: 0,7 mm

Tiempo de penetración: 480 min

Material probado: Butoject® (KCL 898)

Esta recomendación solo es válida para el producto mencionado en la ficha de datos de seguridad, suministrado por nosotros y para el fin indicado. Al disolver o mezclar en otras sustancias y cuando las condiciones difieran de las indicadas en EN374, debe dirigirse al suministrador de guantes con distintivo CE (por ejem. KCL GmbH, D-36124 Eichenzell, Internet: www.kcl.de)

Salpicaduras

Material: Chloropreno

espesura minima de capa: 0,65 mm

Tiempo de penetración: 30 min

Material probado: KCL 720 Camapren®

Protección Corporal

Vestimenta protectora antiestática retardante de la flama.

Protección respiratoria

Tipo de Filtro recomendado: Filtro A-(P3)

El empresario debe garantizar que el mantenimiento, la limpieza y la prueba técnica de los protectores respiratorios se hagan según las instrucciones del productor de las mismas. Estas medidas deben ser documentadas debidamente.

Control de exposición ambiental

No dejar que el producto entre en el sistema de alcantarillado. Riesgo de explosión.

SECCIÓN 9. Propiedades físicas y químicas

9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

- | | |
|---------------------|---|
| a) Estado físico | líquido |
| b) Color | incoloro |
| c) Olor | acre |
| d) Punto de fusión/ | Punto de fusión: -83,5 °C a aprox.1.013 hPa |

	punto de congelación	
e)	Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	77,3 °C a aprox.1.013 hPa
f)	Inflamabilidad (sólido, gas)	Sin datos disponibles
g)	Inflamabilidad superior/inferior o límites explosivos	Límite superior de explosividad: 28 %(v) Límites inferior de explosividad: 2 %(v)
h)	Punto de inflamación	-5 °C - copa cerrada
i)	Temperatura de auto-inflamación	481 °C a 1.013 hPa
j)	Temperatura de descomposición	Sin datos disponibles
k)	pH	Sin datos disponibles
l)	Viscosidad	Viscosidad, cinemática: Sin datos disponibles Viscosidad, dinámica: 0,34 mPa.s a 25 °C
m)	Solubilidad en agua	soluble
n)	Coefficiente de reparto n-octanol/agua	log Pow: 0,016 a 21 °C - No es de esperar una bioacumulación.
o)	Presión de vapor	133,3 hPa a 23,6 °C
p)	Densidad	0,806 gcm ³
	Densidad relativa	Sin datos disponibles
q)	Densidad relativa del vapor	Sin datos disponibles
r)	Características de las partículas	Sin datos disponibles
s)	Propiedades explosivas	Sin datos disponibles
t)	Propiedades comburentes	ningún

9.2 Otra información de seguridad

Tensión superficial 27,3 mN/m a 24 °C

Densidad relativa del vapor 1,83 - (Aire = 1.0)

SECCIÓN 10. Estabilidad y reactividad

10.1 Reactividad

Los vapores pueden formar una mezcla explosiva con el aire.

10.2 Estabilidad química

El producto es químicamente estable bajo condiciones normales (a temperatura ambiental).

Contiene el estabilizador(es) siguiente(s):

Hidroquinona monometiléter (0,004 %)

10.3 Posibilidad de reacciones peligrosas

Riesgo de explosión con:

Bromo

hidróxido sódico

Esteres

Cloro

Ácido nítrico

Puede producirse una polimerización violenta por:

hidróxidos alcalinos

Bases fuertes

Oxidantes

Cobre

Aleaciones de cobre

Ácido sulfúrico

sal de plata

iniciadores de polimerización

Peróxidos

amida de sodio

con

hidróxido sódico

Reacción exotérmica con:

ácido clorosulfónico

Ácidos fuertes

10.4 Condiciones que deben evitarse

Calor. Puede polimerizarse al exponerse a la luz.

Calentamiento.

10.5 Materiales incompatibles

Sin datos disponibles

10.6 Productos de descomposición peligrosos

En caso de incendio: véase sección 5

SECCIÓN 11. Información toxicológica

11.1 Información sobre los efectos toxicológicos

Toxicidad aguda

Estimación de la toxicidad aguda Oral - 96,06 mg/kg

(Método de cálculo)

DL50 Oral - Rata - hembra - 95,1 mg/kg (Acrilonitrilo)

Observaciones: (ECHA)

Estimación de la toxicidad aguda Inhalación - 4 h - 2,07 mg/l - vapor(Método de cálculo)

CL50 Inhalación - Rata - hembra - 4 h - 2,05 mg/l - vapor
(Acrilonitrilo)

(Directrices de ensayo 403 del OECD)

Síntomas: irritación de las mucosas, Tos, Insuficiencia respiratoria, Consecuencias posibles:, perjudica las vías respiratorias

Estimación de la toxicidad aguda Cutáneo - 252,53 mg/kg
(Método de cálculo)

DL50 Cutáneo - Conejo - 250 mg/kg (Acrilonitrilo)

Observaciones: (IUCLID)

Corrosión o irritación cutáneas

Piel - Conejo (Acrilonitrilo)

Resultado: Irritación de la piel - 24 h

(Directrices de ensayo 404 del OECD)

Observaciones: Clasificado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008, Anexo VI (Tabla 3.1/3.2)

Lesiones o irritación ocular graves

Ojos - Conejo (Acrilonitrilo)

Resultado: Riesgo de lesiones oculares graves.

(Directrices de ensayo 405 del OECD)

Observaciones: Clasificado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008, Anexo VI (Tabla 3.1/3.2)

Sensibilización respiratoria o cutánea

Prueba de Maximización - Conejillo de indias (Acrilonitrilo)

Resultado: positivo

(Directrices de ensayo 406 del OECD)

Mutagenicidad en células germinales

Tipo de Prueba: Prueba de Ames

(Acrilonitrilo)

Sistema experimental: S.typhimurium

Activación metabólica: Activación metabólica

Método: Directrices de ensayo 471 del OECD

Resultado: positivo

Tipo de Prueba: Mutagenicidad (ensayo de células de mamífero): ensayo de aberración cromosómica.

(Acrilonitrilo)

Sistema experimental: células pulmonares del hámster chino

Activación metabólica: con o sin activación metabólica

Resultado: positivo

Observaciones: (ECHA)

Tipo de Prueba: Ensayo de mutación genética de células de mamífero in vitro
(Acrilonitrilo)

Sistema experimental: células de linfoma de ratón

Activación metabólica: sin activación metabólica

Método: Directrices de ensayo 476 del OECD

Resultado: positivo

Carcinogenicidad

Supone tener potencial carcinogénico para los seres humanos (Acrilonitrilo)

Toxicidad para la reproducción

Sin datos disponibles

Toxicidad específica en determinados órganos - exposición única

Puede irritar las vías respiratorias. (Acrilonitrilo)

Observaciones: Clasificado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008, Anexo VI (Tabla 3.1/3.2)

Toxicidad específica en determinados órganos - exposiciones repetidas

Sin datos disponibles

Peligro de aspiración

Sin datos disponibles

11.2 Información Adicional

Propiedades de alteración endocrina

Producto:

Valoración

La sustancia/la mezcla no contienen componentes que tengan propiedades alteradoras endocrinas de acuerdo con el artículo 57(f) de REACH o el Reglamento delegado de la Comisión (UE) 2017/2100 o el Reglamento de la Comisión (UE) 2018/605 en niveles del 0,1 % o superiores.

El producto causa severa destrucción de los tejidos de las membranas mucosas, el tracto respiratorio superior, los ojos y la piel., Tos, Insuficiencia respiratoria, Dolor de cabeza, Náusea (Acrilonitrilo)

Según nuestras informaciones, creemos que no se han investigado adecuadamente las propiedades químicas, físicas y toxicológicas. (Acrilonitrilo)

Tras absorción:

(Acrilonitrilo)

Dolor de cabeza

Náusea

Vómitos

Vértigo

ansiedad

Convulsiones

paro respiratorio

Inconsciencia

(Acrilonitrilo)

Para cianocompuestos y nitrilos en general: ¡Máxima precaución! Posibilidad de desprendimiento de cianhídrico. Bloqueo de la respiración celular. Afecciones cardiovasculares, dificultad respiratoria, pérdida del conocimiento.

(Acrilonitrilo)

Las otras propiedades peligrosas no pueden ser excluidas.

(Acrilonitrilo)

El producto debe manejarse con especial cuidado.

(Acrilonitrilo)

SECCIÓN 12. Información ecológica

12.1 Toxicidad

Millipore- 8.00834

Página 11 de 16

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



Toxicidad para los peces	Ensayo semiestático CL50 - <i>Oryzias latipes</i> - 5,1 mg/l - 96 h (Acrilonitrilo) (Directrices de ensayo 203 del OECD)
Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos	Ensayo estático CE50 - <i>Daphnia magna</i> (Pulga de mar grande) - 2,5 mg/l - 48 h (Acrilonitrilo) (Directrices de ensayo 202 del OECD)
Toxicidad para las algas	Ensayo estático CE50r - <i>Pseudokirchneriella subcapitata</i> - 10 mg/l - 72 h (Acrilonitrilo) (Directrices de ensayo 201 del OECD)
Toxicidad para las bacterias	EC5 - <i>Pseudomonas putida</i> - 53 mg/l - 16 h (Acrilonitrilo) Observaciones: (Literatura) (concentración tóxica límite)
Toxicidad para los peces (Toxicidad crónica)	Ensayo dinámico NOEC - <i>Pimephales promelas</i> (Piscardo de cabeza gorda) - 0,17 mg/l - 30 d (Acrilonitrilo) Observaciones: (ECHA)
Toxicidad para las dafnias y otros invertebrados acuáticos (Toxicidad crónica)	NOEC - <i>Daphnia magna</i> (Pulga de mar grande) - 2 mg/l - 21 d (Acrilonitrilo) Observaciones: (Base de datos ECOTOX)

12.2 Persistencia y degradabilidad

Biodegradabilidad	aeróbico - Tiempo de exposición 14 d (Acrilonitrilo) Resultado: 100 % - Intrínsecamente biodegradable. (Directrices de ensayo 302C del OECD)
Ratio BOD/ThBOD	70 % (Acrilonitrilo) Observaciones: (Literatura)

12.3 Potencial de bioacumulación

Bioacumulación	<i>Lepomis macrochirus</i> - 14 d - 9,94 µg/l (Acrilonitrilo)
----------------	--

Factor de bioconcentración (FBC): 48

12.4 Movilidad en el suelo

Sin datos disponibles

12.5 Resultados de la valoración PBT y mPmB

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (mPmB) a niveles del 0,1% o superiores.

12.6 Propiedades de alteración endocrina

Producto:

Valoración : La sustancia/la mezcla no contienen componentes que tengan propiedades alteradoras endocrinas de acuerdo con el artículo 57(f) de REACH o el Reglamento delegado de la Comisión (UE) 2017/2100 o el Reglamento de la Comisión (UE) 2018/605 en niveles del 0,1 % o superiores.

12.7 Otros efectos adversos

A pesar de la dilución, el compuesto produce mezclas tóxicas con el agua. La descarga en el ambiente debe ser evitada.

SECCIÓN 13. Consideraciones relativas a la eliminación

13.1 Métodos para el tratamiento de residuos

Producto

Los residuos deben eliminarse de acuerdo con normativas locales y nacion a originales. No los mezcle con otros residuos. Maneje los recipientes sucios como el propio producto. Directiva sobre residuos 2008/98 nota / CE.

SECCIÓN 14. Información relativa al transporte

14.1 Número ONU

ADR/RID: 1093

IMDG: 1093

IATA: 1093

14.2 Designación oficial de transporte de las Naciones Unidas

ADR/RID: ACRILONITRILO ESTABILIZADO

IMDG: ACRYLONITRILE, STABILIZED

IATA: Acrylonitrile, stabilized

Passenger Aircraft: Not permitted for transport

14.3 Clase(s) de peligro para el transporte

ADR/RID: 3 (6.1)

IMDG: 3 (6.1)

IATA: 3 (6.1)

14.4 Grupo de embalaje

ADR/RID: I

IMDG: I

IATA: I

14.5 Peligros para el medio ambiente

ADR/RID: si

IMDG Contaminante marino:
si

IATA: no

14.6 Precauciones particulares para los usuarios

Código de restricciones : (C/E)
en túneles

Otros datos : Sin datos disponibles

SECCIÓN 15. Información reglamentaria

15.1 Reglamentación y legislación en materia de seguridad, salud y medio ambiente específicas para la sustancia o la mezcla

La hoja técnica de seguridad cumple con los requisitos de la Reglamento (CE) No. 1907/2006.

Autorizaciones y / o restricciones de uso

REACH - Restricciones a la fabricación,
comercialización y uso de determinadas

: Acrilonitrilo

sustancias, preparados y artículos peligrosos
(Anexo XVII)

Legislación nacional

Seveso III: Directiva 2012/18/UE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

H2 TOXICIDAD AGUDA

P5c LÍQUIDOS INFLAMABLES

E2 PELIGROS PARA EL MEDIOAMBIENTE

Otras regulaciones

Obsérvense las restricciones considerando la protección maternal de acuerdo a las más rigurosas nacionales.

Tomar nota de la Directiva 94/33/CEE sobre la protección laboral de los jóvenes.

15.2 Evaluación de la seguridad química

Para este producto no se ha llevado a cabo una evaluación de la seguridad química

SECCIÓN 16. Otra información

Texto íntegro de las Declaraciones-H referidas en las secciones 2 y 3.

H225	Líquido y vapores muy inflamables.
H301	Tóxico en caso de ingestión.
H301 + H311 + H331	Tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación.
H311	Tóxico en contacto con la piel.
H315	Provoca irritación cutánea.
H317	Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
H318	Líquido y vapores muy inflamables.
H331	Tóxico en caso de ingestión, contacto con la piel o inhalación.
H335	Provoca irritación cutánea.
H350	Puede provocar una reacción alérgica en la piel.
H411	Provoca lesiones oculares graves.

Texto completo de otras abreviaturas

ADN - Acuerdo europeo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por vías navegables interiores; ADR - Acuerdo relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera; AIIC - Inventario de productos químicos industriales de Australia; ASTM - Sociedad Estadounidense para la Prueba de Materiales; bw - Peso corporal; CMR - Carcinógeno, mutágeno o tóxico para la reproducción; DIN - Norma del Instituto Alemán para la Normalización; DSL - Lista Nacional de Sustancias (Canadá); ECx - Concentración asociada con respuesta x%; ELx - Tasa de carga asociada con respuesta x%; EmS - Procedimiento de emergencia; ENCS - Sustancias Químicas Existentes y Nuevas (Japón); ErCx - Concentración asociada con respuesta de tasa de crecimiento x%; GHS - Sistema Globalmente Armonizado; GLP - Buena práctica de laboratorio; IARC - Agencia Internacional para la investigación del cáncer; IATA - Asociación Internacional de Transporte Aéreo; IBC - Código internacional para la construcción y equipamiento de Embarcaciones que transportan químicos peligrosos a granel; IC50 - Concentración inhibitoria máxima media; ICAO - Organización Internacional de Aviación Civil; IECSC - Inventario de Sustancias Químicas en China; IMDG - Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas; IMO - Organización Marítima Internacional; ISHL - Ley de Seguridad e Higiene Industrial (Japón); ISO - Organización Internacional para la Normalización; KECI - Inventario de Químicos Existentes de Corea; LC50 - Concentración letal para 50% de una población de prueba; LD50 - Dosis letal para 50% de una población de prueba (Dosis letal mediana); MARPOL - Convenio Internacional para prevenir la Contaminación en el mar por los buques; n.o.s. - N.E.P.: No especificado en otra parte; NO(A)EC - Concentración de efecto (adverso) no observable; NO(A)EL - Nivel de efecto (adverso) no observable; NOELR - Tasa de carga de efecto no observable; NZIoC - Inventario de Químicos de Nueva Zelanda; OECD - Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico; OPPTS - Oficina para la Seguridad Química y Prevención de Contaminación; PBT - Sustancia persistente, bioacumulativa y tóxica; PICCS - Inventario Filipino de Químicos y Sustancias Químicas; (Q)SAR - Relación estructura-actividad (cuantitativa); REACH - Reglamento (EC) No 1907/2006 del Parlamento y Consejo Europeos con respecto al registro, evaluación autorización y restricción de químicos; RID - reglamento relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por ferrocarril; SADT - Temperatura de descomposición autoacelerada; SDS - Ficha de datos de seguridad; TCSI - Inventario de Sustancias Químicas de Taiwán; TECI - Inventario de productos químicos existentes de Tailandia; TSCA - Ley para el Control de Sustancias Tóxicas (Estados Unidos); UN - Naciones Unidas; UNRTDG - Recomendaciones para el Transporte de Mercancías Peligrosas de las Naciones Unidas; vPvB - Muy persistente y muy bioacumulativo

Otros datos

La información indicada arriba se considera correcta pero no pretende ser exhaustiva y deberá utilizarse únicamente como orientación. La información contenida en este documento esta basada en el presente estado de nuestro conocimiento y es aplicable a las precauciones de seguridad apropiadas para el producto. No representa ninguna garantía de las propiedades del producto. La Corporación Sigma-Aldrich y sus Compañías Afiliadas, no responderán por ningún daño resultante de la manipulación o contacto con el producto indicado arriba. Dirijase a www.sigma-aldrich.com y/o a los términos y condiciones de venta en el reverso de la factura o de la nota de entrega. Copyright 2020 Sigma-Aldrich Co. LLC. Se autoriza la reproducción en número ilimitado de copias para uso exclusivamente interno.

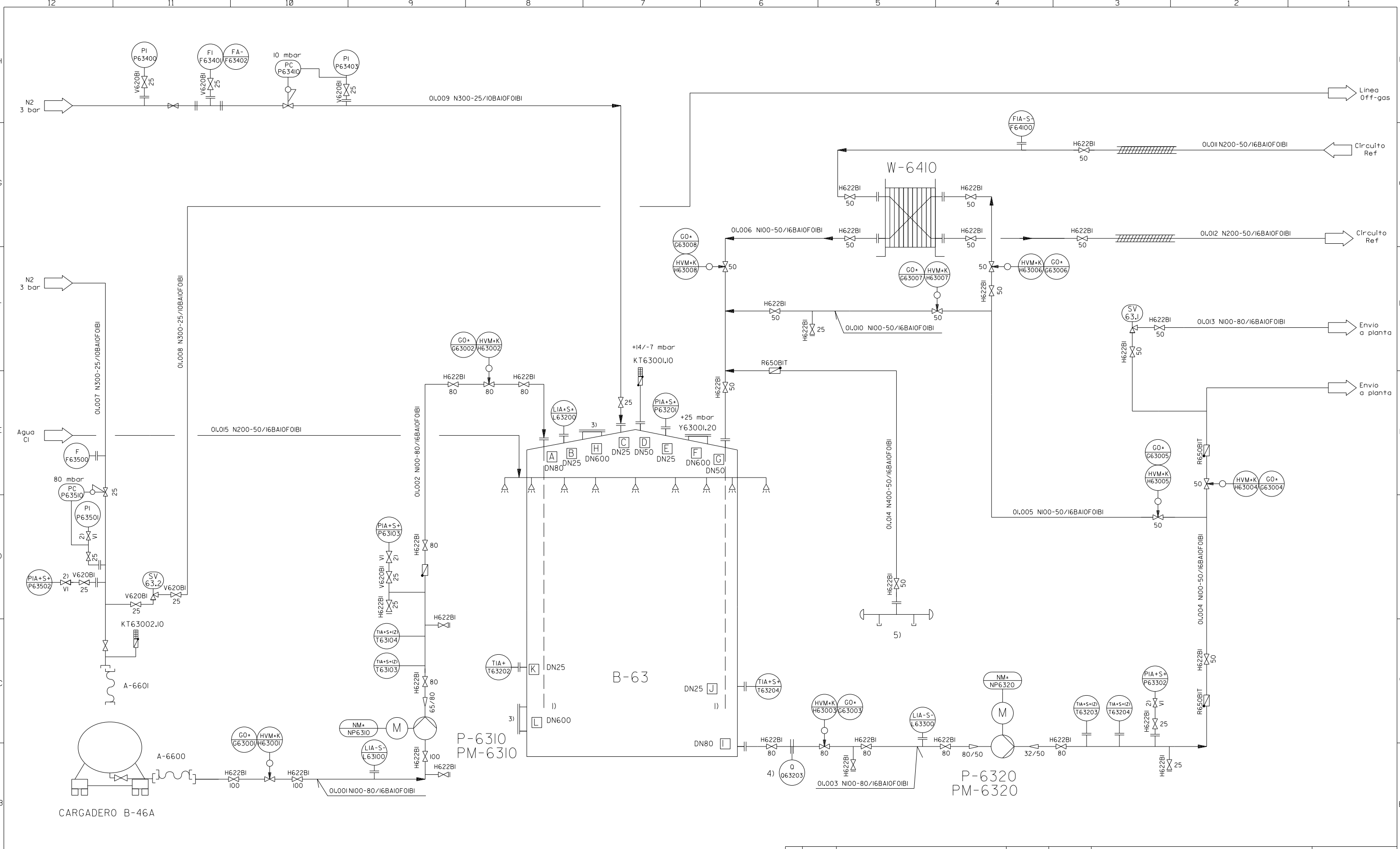
La marca que aparece en el encabezado y/o el pie de página de este documento puede no coincidir visualmente con el producto adquirido mientras hacemos la transición de nuestra marca. Sin embargo, toda la información del documento relativa al producto

permanece sin cambios y coincide con el producto solicitado. Para más información, póngase en contacto con mlsbranding@sial.com

PLANOS

Índice

1. P&ID de la instalación D-184
2. Plano de implantación de PTI N-354



EQUIPOS				
ITEM	B-63	P-6310	P-6320	W-6410
MATERIAL	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero al carbono	Acero inoxidable
CAPACIDAD	100 m3	40 m3/h	15 m3/h	45 m3/h
P. DISEÑO	0,17 bar	16 bar	16 bar	30 bar
T. DISEÑO	260°C	120°C	120°C	225°C
REVOLUCIONES		1460	2900	

- NOTAS:
- 1) TUBO BUZO
 - 2) VALVULA DEL PROPIO INSTRUMENTO
 - 3) BOCA DE HOMBRE DN 600
 - 4) VALVULA TOMAMUESTRAS
 - 5) CONEXION A PROCESO DEL SISTEMA RESTAB

Rev.	Fecha	Descripción de la revisión	Dibujado	Aprobado

BASF
The Chemical Company

BASF Española S.L.
Tlf. +34 977 256 200
43006 TARRAGONA

Proyecto N./Año

TANQUE B-63

Blatt 28

BASF Española S.L. se reserva la propiedad de autor de este documento (Ver DIN 34). Sustituido por

0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Medida en mm.

