

# Ingeniería de Procesos

CAPITULO 5

PARTE II



## 5.5 P&ID

Un diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) (en inglés: Piping and Instrumentation Diagram, P&ID) es un diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos instalados y el instrumental.

Estos diagramas están compuestos por una serie de símbolos que permiten identificar todos los componentes que conforman un proceso, como tuberías, número de líneas de tubería y sus dimensiones, válvulas, controles, alarmas, equipos, niveles, purgas, bombas, etc.

El instrumento de símbolos standard utilizados en estos diagramas se basa generalmente en la Norma ISA S5.1. Sistemas de Instrumentación y Automatización de la sociedad.

El P&ID se encuentra adjunto al proyecto y está dividido en las distintas áreas, debido a la gran cantidad de equipos correspondientes al proceso, con sus respectivos controladores y líneas de servicio.

En cuanto a los controles en cada equipo, será explicado en el capítulo siguiente.

## 5.6 Controladores por equipos

### 5.6.1 Área 100: Almacenamiento y mezclado de materias primas

*Tanques de butadieno fresco y reciclado (TK-101 y TK-103) - Bombas de dosificación (P-101 y P-103)*

Al ser tanques de almacenamiento de un componente gaseoso a temperatura ambiente que debe mantenerse líquido, los tanques se ven provistos de sistemas de control que regulan la presión. Además, poseen indicadores/transmisores de temperatura que la indican y notifican en sala de control y en campo. En relación con los niveles, cada tanque se ve provisto de un indicador/transmisor que indica y notifica el nivel en sala de control, y alarmas de bajo y alto nivel. La primera cumple la función de activarse al 5% y detener la bomba de dosificación. Mientras que la segunda detiene la bomba de descarga (no figura en el gráfico) al activarse (95%). Para poder controlar la dosificación del butadieno, se utiliza un caudalímetro y una válvula junto con un lazo de control que los vincula.

Desde el punto de vista de seguridad, los tanques tienen una entrada de TBC que se relaciona con el oxígeno y detienen la polimerización del butadieno en caso de ser necesario.

- *Control de Presión*

Además del lazo que se mencionara a continuación, los tanques poseen válvulas de alivio que funcionan como segunda barrera de seguridad. Para poder controlar la presión, hay dos sistemas: uno de nitrógeno y otro de alivio. En caso de elevarse la presión, se abrirá una válvula que permitirá la evacuación de los gases hasta llegar a la presión seteada. En el caso de que la presión sea inferior a la deseada, se dosificará un gas inerte (en nuestro caso se utilizara nitrógeno) para alcanzar el set-point deseado y que el butadieno no evapore.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado:

Ítem		Control de Presión
Variable controlada		Presión del tanque TK-101 y TK-103
Baja presión	Variable manipulada	Apertura de la válvula de nitrógeno
	Set point apertura	2,6 bar
	Set point de cierre	3,2 bar
	Tipo de control	ON/OFF
	Elemento final	VL-101/01 (Fresco) VL-103/01 (reciclado)
Posición segura ante falla		Normal cerrada

Alta presión	Variable manipulada	Apertura de válvula de venteo
	Set point apertura	3,8 bar
	Set point de cierre	3 bar
	Tipo de control	ON/OFF
	Elemento final	VL-101/02 (Fresco) VL-103/02 (reciclado)
	Posición segura ante falla	Normal abierta

- *Control de Caudal*

Para controlar el caudal, se dispone de una válvula que responde al controlador del caudalímetro (el sistema es igual tanto para reciclado como para fresco).

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Presión
Variable controlada	Caudal de butadieno
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	Fresco+Reciclado=3034,5 kg/h
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-101/03 VL-103/03
Posición segura	Normal Cerrada

- *Control de proporción de Caudal*

Para que el proceso de producción de caucho SBR sea efectivo, se debe cumplir una proporcionalidad (estequiometría) entre los reactivos y los aditivos. La lógica comienza en el caudal de butadieno. Primero, en base al nivel del tanque de reciclado, se setea un caudal. Automáticamente, el caudal de butadieno fresco se adecua para llegar al total requerido en el reactor. Por ende, la relación caudal de fresco y reciclado va a ir variando conforme se cumple el caudal total requerido para la reacción:

$$R = \frac{\text{Caudal de fresco}}{\text{Caudal de reciclado}} \rightarrow \text{Debe cumplir: Caudal Fresco} + \text{Caudal de Reciclado} = 3034,5 \text{ kg/h}$$

En base a la suma de estas dos corrientes se van a definir el resto de los caudales de dosificación. Para un caudal total de 3034,5 kg/h, el resto de los componentes deberán tener el siguiente caudal:

<i>Estireno (Total)</i>	1011,5 kg/h
<i>Agua DEMI</i>	3001,3 kg/h
<i>Emulsificante</i>	202,3 kg/h
<i>Activador (Solido)</i>	0,685 kg/h
<i>Agente reductor</i>	0,6945 kg/h
<i>Modificador</i>	8,087 kg/h
<i>Activador (Liquido)</i>	2,436 kg/h
<i>Iniciador</i>	6,869 kg/h

Además, en base al caudal total de butadieno, se va a definir el caudal de dosificación al reactor (FC-113 y FC-112). Primero se definirá el caudal FC113 (en base al de butadieno) y, relacionándolo con este, el FC112. Para un caudal total de butadieno igual a 3034,5 kg/h, estos caudales deberán ser:

FC113	7249,63 kg/h
FC112	18,77 kg/h

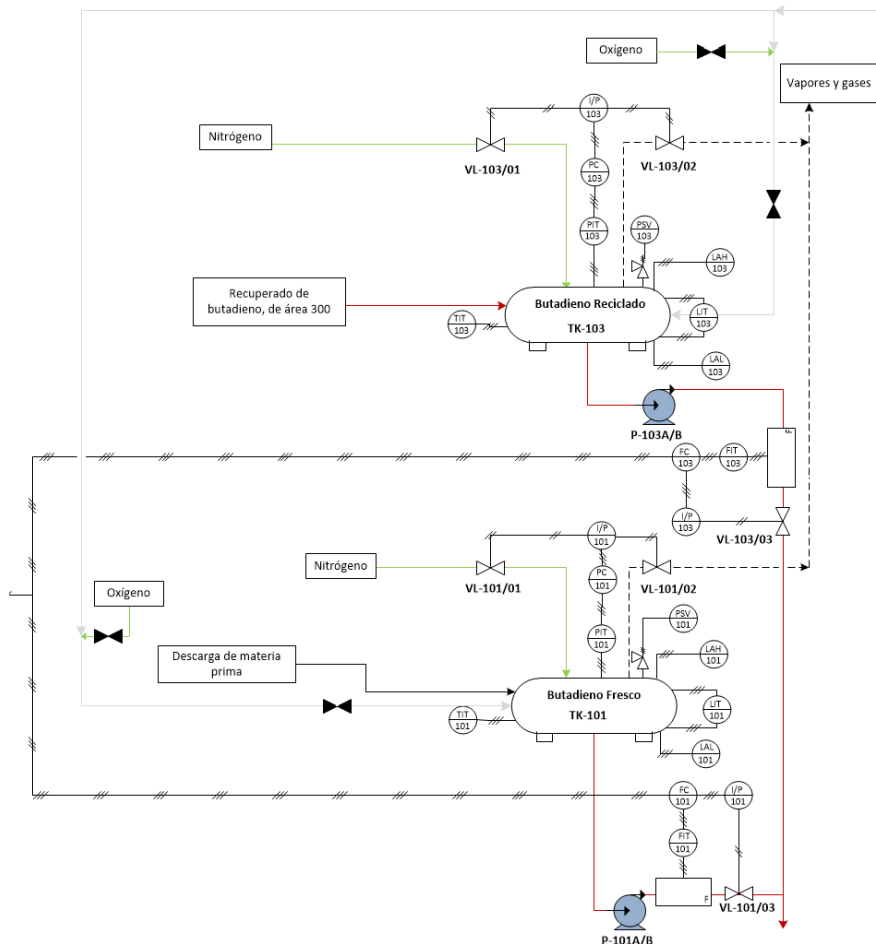


Figura 5.6-1: Diagrama de instrumentación: Tanques de butadieno fresco y reciclado (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

#### Tanques de estireno fresco y reciclado (TK-102 y TK-104) - Bombas de dosificación (P-102 y P-104)

El almacenamiento de estireno es a presión atmosférica, pero se debe mantener una determinada temperatura para evitar la polimerización de este. Es por ello, que los tanques (tanto de reciclado como fresco) se ven provistos de un lazo de control de temperatura que relaciona a la esta con el caudal de refrigerante. Además, al igual que el butadieno, poseen un sistema de control de presión. En relación con los niveles, cada tanque se ve provisto de un indicador/transmisor que indica y notifica el nivel en sala de control, y alarmas de bajo y alto nivel. La primera cumple la función de activar a un 5% de nivel, deteniendo la bomba de dosificación. Mientras que la segunda detiene la bomba de descarga (no figura en el gráfico) al activarse (95% de nivel). Para poder controlar la dosificación del estireno, se utiliza un caudalímetro y una válvula junto con un lazo de control que los vincula.

Desde el punto de vista de seguridad, los tanques tienen una entrada de TBC que se relaciona con el oxígeno y detienen la polimerización del estireno en caso de ser necesario.

- *Control de Presión*

Además del lazo que se mencionara a continuación, los tanques poseen válvulas de alivio que funcionan como segunda barrera de seguridad. Para poder controlar la presión, hay dos sistemas: uno de nitrógeno y otro de alivio. En caso de elevarse la presión, se abrirá una válvula que permitirá la evacuación de los gases hasta llegar a la presión seteada. En el caso de que la presión sea inferior a la deseada, se dosificara un gas inerte (en nuestro caso se utilizara nitrógeno) para alcanzar el set-point deseado.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem		Control de Presión
Variable controlada		Presión del tanque TK-102 y TK-104
Baja presión	Variable manipulada	Apertura de la válvula de nitrógeno
	Set point apertura	0,6 bar
	Set point de cierre	1 bar
	Tipo de control	ON/OFF
	Elemento final	VL-102/01 (Fresco) VL-104/01 (reciclado)
	Posición segura ante falla	Normal cerrada
Alta presión	Variable manipulada	Apertura de válvula de venteo
	Set point apertura	1,5 bar
	Set point de cierre	0,7 bar
	Tipo de control	ON/OFF
	Elemento final	VL-102/02 (Fresco) VL-104/02 (reciclado)
	Posición segura ante falla	Normal abierta

- *Control de Caudal*

Para controlar el caudal, se dispone de una válvula que responde al controlador del caudalímetro (el sistema es igual tanto para reciclado como para fresco)

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal
Variable controlada	Caudal de butadieno
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	Fresco+Reciclado=1011,5 kg/h
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-102/03 VL-104/03
Posición segura	Normal Cerrada

- *Control de Temperatura*

Para poder controlar la temperatura, se la mide en los tanques y en base a los valores, los controladores de temperatura deciden si las válvulas de refrigeración deberían aumentar o disminuir sus porcentajes de apertura.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura del tanque TK-102/TK-104
Variable manipulada	Apertura de válvula de refrigerante
Set point	10°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-102/04 VL-104/04
Posición segura	Normal abierta

- *Control de proporción de Caudal*

Para el caso de la dosificación de estireno, el set-point total viene dado por el total de butadieno dosificado como se explicó con anterioridad. Llega la señal y en función de la cantidad de estireno en cada tanque, se establece una relación entre caudales de reciclado y fresco, siempre y cuando se obtenga el caudal total requerido. Por ende, la relación de reciclado y fresco ira variando acorde lo hace el caudal de butadieno y la disposición de estireno en los tanques.



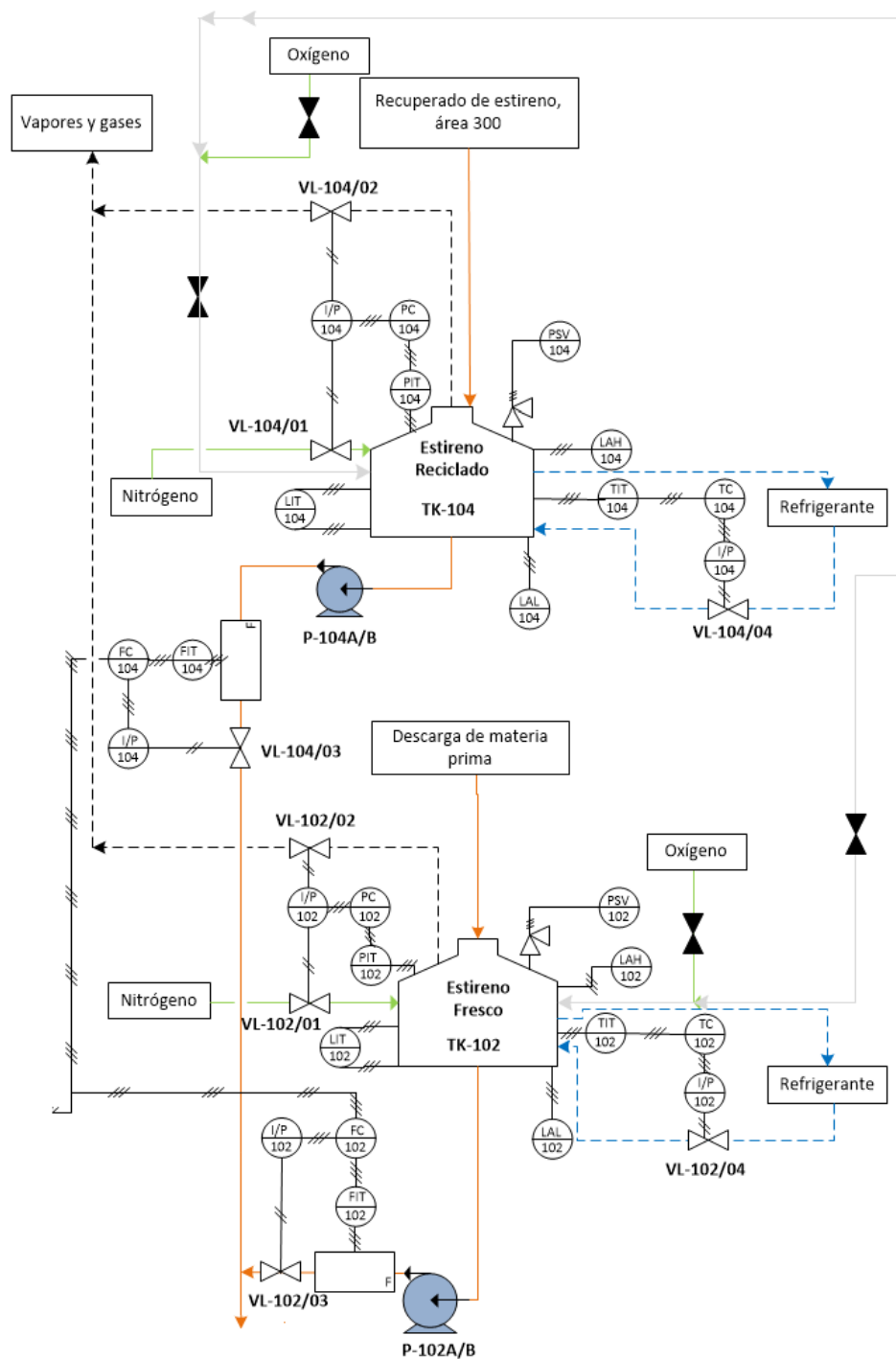


Figura 5.6-2: Diagrama de instrumentación: Tanques de estireno fresco y reciclado (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

### *Torres de adsorción de alúmina (T-101 A y B y T-102 A y B)*

Estas torres de alúmina son torres rellenas que tienen como objetivo eliminar el TBC de los monómeros. Se disponen dos para el butadieno (T-101 A/B) y dos para el estireno (T-102 A/B). Se explicará un sistema de torres (las de butadieno) pero las otras funcionan de manera análoga. Cada torre (la principal y su back up) tiene un medidor de caída de presión que se conecta a la entrada y a la salida midiendo la presión y calculando la diferencia. Cuando llega a cierto valor de riesgo, se activa una alarma que ordena detener las bombas de dosificación de butadieno (1 ppm). Además, poseen un lazo de concentración que establece cuál de las dos torres estará en funcionamiento, si la principal o su back up, ya que el relleno podría llegar a saturarse y no cumplir su función.

- *Control de Concentración*

Además del control de concentración que se explicara a continuación, las torres se ven provistas de una válvula de toma-muestra a la salida. De esta forma, se hará un seguimiento de saturación del relleno de manera manual. El lazo consiste en un instrumento que determine la presencia de TBC en la corriente de salida y que, gracias al transmisor, se envíe la señal al controlador y esta abra la válvula de entrada de la torre no saturada y cierre la de la torre saturada.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Concentración
Variable controlada	Concentración de la alúmina
Variable manipulada	Válvulas de entrada a las torres
Set point máximo	1 ppm
Tipo de control	ON/OFF
Elemento final	VL-101/04 A/B (butadieno) VL-102/05 A/B (estireno)
Posición segura	Normal cerrada

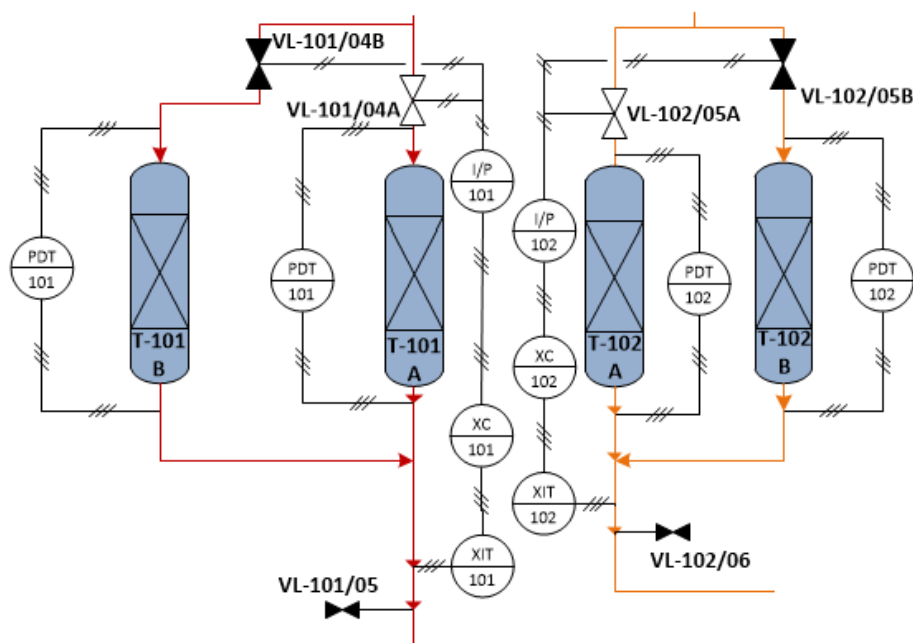


Figura 5.6-3: Diagrama de instrumentación: Torres de alúmina (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

#### Tanque de mezclado (M-113) - Bomba de dosificación (P-113)

Dentro de este tanque se produce la mezcla de los monómeros, el emulsificante y el agua DEMI, y se lo lleva a la temperatura de reacción (5°C). Es por ello, que este se ve provisto de un lazo de control de temperatura que lo relaciona con el refrigerante. En relación con los niveles, el tanque se ve provisto de un indicador/transmisor que indica y notifica el nivel en sala de control, y alarmas de bajo y alto nivel. La primera cumple la función de activarse al 5% de nivel y detiene la bomba de dosificación (P-113). Mientras que la segunda detiene las bombas de descargas al activarse (95%). Estas bombas son las de butadieno (P-101 y P-103), las de estireno (P-102 y P-104), la de agua DEMI (P-105) y la de emulsificador (P-106). Además, posee un indicador/transmisor de presión que la indica y notifica en sala de control y en campo.

El tanque posee una válvula de alivio y una entrada de TBC, por seguridad.

Para la dosificación de la mezcla, se encuentra presente un caudalímetro y una válvula con un determinado lazo de control.

- *Control de Temperatura*

Para poder controlar la temperatura, se la mide y en base al valor obtenido, el controlador de temperatura (TC-113) decide si la válvula de refrigeración deberá aumentar o disminuir su porcentaje de apertura.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura del tanque M-113
Variable manipulada	Apertura de válvula de refrigerante
Set point	5°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-113/02
Posición segura	Normal abierta

- *Control de Caudal*

En base a la información enviada por los controladores de dosificación de butadieno, el controlador de caudal (FC-113) enviara información a la válvula con el fin de aumentar o disminuir su apertura.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal
Variable controlada	Caudal de mezcla
Variable manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set point	7249,63 kg/h
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-113/01
Posición segura	Normal Cerrada

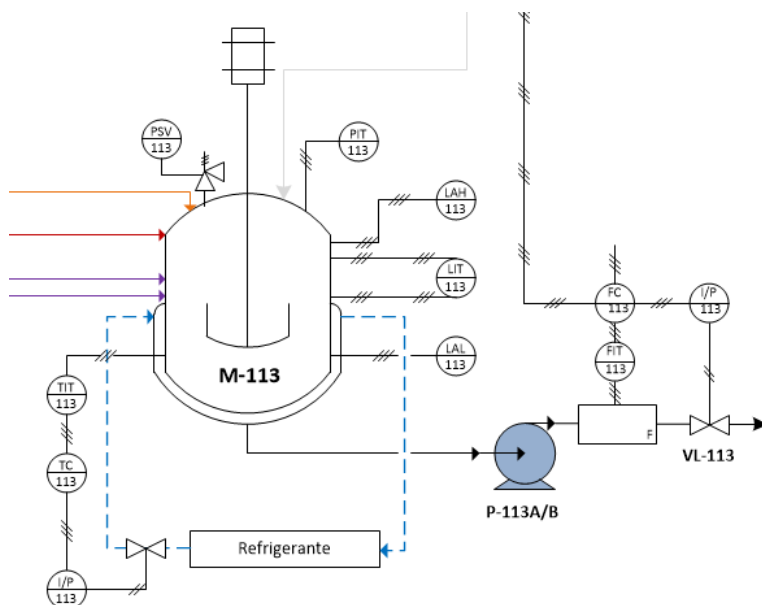


Figura 5.6-4: Diagrama de instrumentación: Tanque de mezclado (M-113) (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

#### Tanque de mezclado (M-112) - Bomba de dosificación (P-112)

El tanque de mezclado M-112 consta solo de instrumentación de nivel. Posee un indicador/transmisor que indica y notifica el nivel en sala de control y en campo. Además, se ve provisto de alarmas de alto y bajo nivel. La primera detiene las bombas de descarga de los aditivos y los tornillos (P-107, P-108, P-109 y SF-110 y SF-111) al activarse. Mientras que la segunda detiene la bomba de dosificación de la mezcla (P-112). En relación con el caudal, posee una válvula y un caudalímetro que lo regulan.

- **Control de Caudal**

En base a la señal enviada por el controlador FC-113, el controlador FC-112 enviara información a la válvula con el objetivo de regular el caudal con la apertura de esta. A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal
Variable controlada	Caudal de mezcla
Variable manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set point	18,77 kg/h
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-112
Posición segura	Normal Cerrada

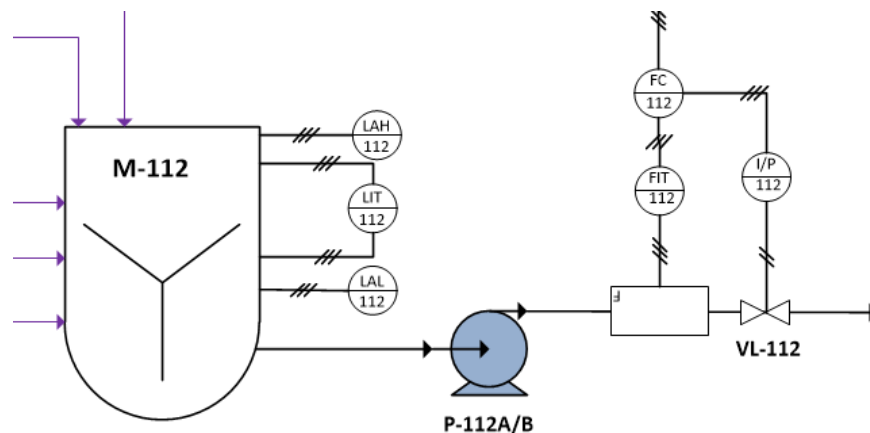


Figura 5.6-5: Diagrama de instrumentación: Tanque de mezclado (M-112) (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

*Taques de aditivos (TK-105 / TK-106 / TK-107 / TK-108 / TK-109) - Bombas de dosificación de aditivos (P-105 / P-106 / P-107 / P-108 / P-109)*

Cada tanque de aditivo líquido se ve provisto de un indicador/transmisor de nivel que lo indica y notifica en sala de control y campo. Además, posee alarmas de alto y bajo nivel. La primera se activa cuando el porcentaje de nivel del tanque es de 95% y detiene la bomba de descarga (no figura en el gráfico). Mientras que la segunda se activa en el 5% y detiene la bomba de dosificación. Cada sistema tanque-bomba posee un lazo de control que regula el caudal de acuerdo con lo enviado por los controladores de dosificación de butadieno.

- *Control de Caudal*

En base a la información enviada por los controladores de butadieno, los controladores de cada aditivo regulan sus válvulas abriéndolas o cerrándolas.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal	
Variable controlada	Caudal de aditivo	
Variable manipulada	Apertura o cierre de válvula	
Set point	Iniciador	6,869 kg/h
	Activador	2,436 kg/h
	Modificador	8,087 kg/h
Tipo de control	Normal-directo	
Elemento final	VL-107 VL-108 VL-109	
Posición segura	Normal Cerrada	

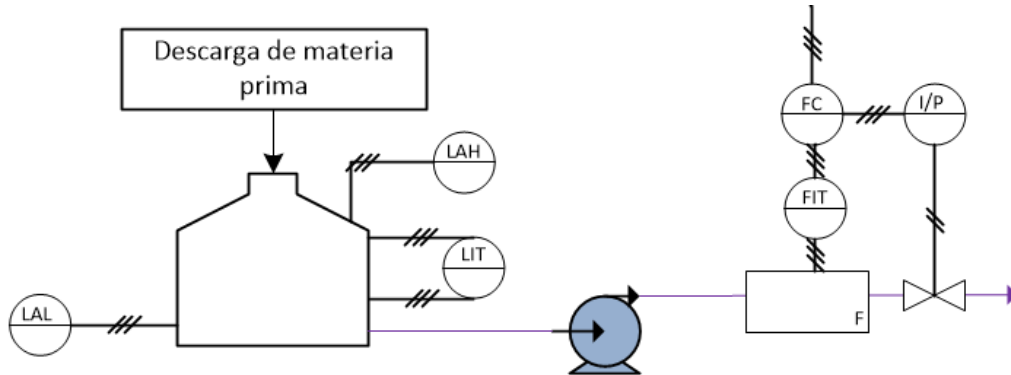
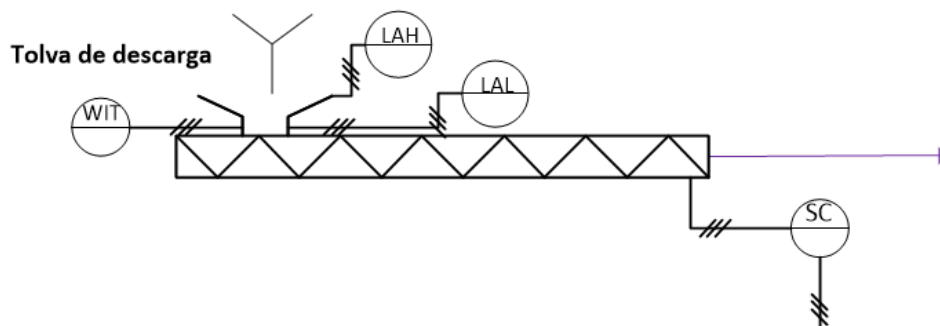


Figura 5.6-6: Diagrama de instrumentación: Taques de aditivos (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

#### Tornillos de aditivos Activador (SF-110) - Agente reductor (SF-111)

Estos dos tornillos dosifican los aditivos sólidos. A continuación, se explicará uno, pero el otro funciona de manera análoga. La tolva de descarga posee un agitador que permite la no formación de puentes y la bajada continua de producto hacia el tornillo. Tiene un indicador/transmisor de peso que lo indica y notifica en sala de control y en campo. Además, posee alarmas de alto y bajo nivel con el fin de detener la descarga manual del producto o el tornillo, según corresponda. En relación con el tornillo, este responde a los controladores de butadieno aumentando o disminuyendo su velocidad de giro según sea necesario.



5.6-7: Diagrama de instrumentación: Tornillos de aditivos (Zona almacenamiento y mezclado de materias primas – Área 100).

## 5.6.2 Área 200: Polimerización

### *Reactores R-201 a R-20n-1*

Debido a las características del proceso que se llevará a cabo dentro de estos equipos será necesario contar con un control riguroso de los mismos a través de la manipulación de diferentes variables.

Se ha decidido controlar temperatura, presión y relación con la corriente de alimentación. Además, se medirá la velocidad de los agitadores.

Para visualizar el nivel de la mezcla en los reactores, se coloca un indicador/transmisor de manera que éste no sobrepase los límites mínimos y máximos establecidos.

Además, cuenta con un indicador/transmisor de velocidad del agitador que lo indica y notifica en la sala de control.

- *Control de Temperatura*

Este lazo permite medir la temperatura de la mezcla en el reactor para asegurar que ésta cumpla con el valor establecido. Este control es importante debido a que al ser la reacción exotérmica, si no se controla la temperatura, se puede afectar la reacción de polimerización.

Los equipos cuentan con una camisa por el cual circula refrigerante que será el encargado de mantener la temperatura en el valor del set point. Para esto se manipulará el caudal de éste fluido a través del porcentaje de apertura de la válvula destinada para dicho fin.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Temperatura
Variable Controlada	Temperatura de la mezcla
Variable Manipulada	Apertura o cierre válvula
Set Point	5 °C
Tipo de Control	Directo
Elemento Final	VL-201/02
Posición Segura	Normal abierta

- *Control de Caudal*

Como se explicó anteriormente, en base al caudal total de butadieno, se va a definir el caudal de dosificación al reactor, el cual es el mismo en cada uno. A cada caudalímetro le llega la señal de la suma de los controladores FC113 y FC112, siendo la misma 7268,4 kg/h.



Para esto, se cuenta con válvulas que manipulan los caudales de entrada y salida del equipo.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal
Variable Controlada	Caudal de salida R-201
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set Point	7268,4 kg/h
Tipo de Control	Directo – Cascada
Elemento Final	VL-201/01
Posición Segura	Normal cerrada

- *Control de Presión*

Este lazo permite controlar la presión de vapores y gases en cada reactor con el fin de mantener las condiciones de producción y seguridad de proceso.

Se cuenta con una válvula que se irá abriendo proporcionalmente cuando supere el valor del set point dentro de los mismos. Un manómetro será el encargado de realizar esta medición.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Presión
Variable Controlada	Presión R-201
Variable Manipulada	Apertura de válvula
Set Point	3,5 bar
Tipo de Control	Directo
Elemento Final	VL-201/03
Posición Segura	Normal abierta

Además, cada reactor cuenta con una válvula de seguridad, como segunda barrera, la cual alivia la presión cuando se supera la presión de trabajo en el mismo.

En la imagen siguiente se puede ver la representación gráfica del reactor R-201 con sus controladores anteriormente explicados. La misma es análoga para los reactores restantes.

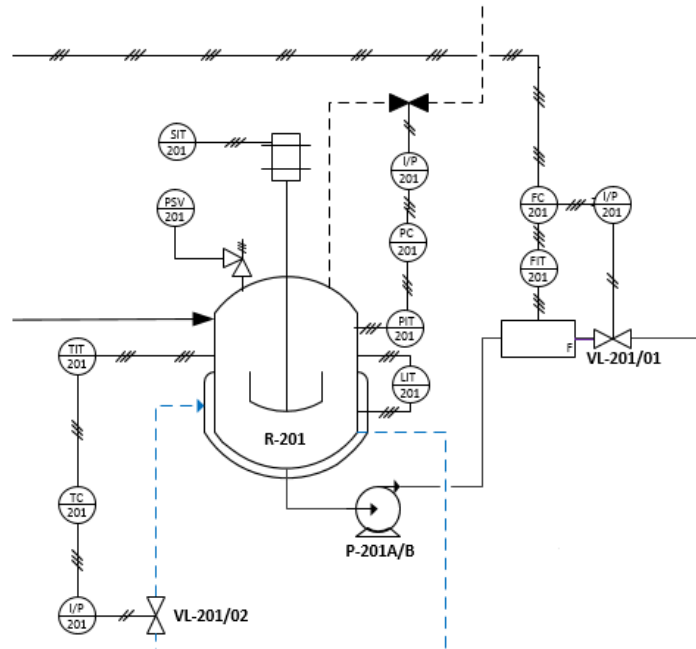


Figura 5.6-8: Diagrama de instrumentación: Reactores R-201 a R-20n-1 (Zona Polimerización – Área 200)

### Reactor R-20n

Al igual que en los reactores anteriores, se decide controlar temperatura, presión, y relación con la corriente de alimentación al último reactor.

Pero además se agrega un control en el caudal del short stop, relacionado con el caudal de entrada en ese último reactor.

- *Control de Temperatura, Nivel y Presión*

Los controles son los mismos que en los reactores R-201 a R-20n-1.

- *Control de Caudal Short Stop*

Para que se corte la polimerización, es necesario cumplir con proporciones de ingreso de caudal al último reactor y TBC. Esta acción se llevará a cabo mediante un control RATIO.

Este lazo permite controlar la proporción de los caudales de ingreso al reactor tomando como base el caudal de entrada al último reactor y manipulando el caudal TBC.

$$R = \frac{\text{Caudal Controlado}}{\text{Caudal Manipulado}} = \frac{\text{Caudal Polímero}}{\text{Caudal TBC}} = 60$$

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal TBC
Variable Controlada	Caudal entrada TBC a R-20n
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set Point	60
Tipo de Control	Directo – Cascada
Elemento Final	VL-20(n-1)/03
Posición Segura	Normal cerrada

- *Control de Caudal de entrada*

El caudal de entrada de la mezcla se define en base la señal de la suma de los controladores FC113 y FC112, siendo la misma 7268,4 kg/h.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal
Variable Controlada	Caudal de entrada a R-20n
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set Point	7268,4 kg/h
Tipo de Control	Directo – Cascada
Elemento Final	VL-20(n-1)/01
Posición Segura	Normal cerrada

- *Control de Caudal de salida*

El caudal de salida del reactor, responde a la señal de la suma de los controladores FCN-1 y FCN-1/1.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Caudal
Variable Controlada	Caudal de salida a R-20n
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set Point	7389,8 kg/h
Tipo de Control	Directo – Cascada
Elemento Final	VL-20n/02
Posición Segura	Normal cerrada



Ítem	Control de Caudal
Variable controlada	Caudal
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	7389,8 kg/h
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-301/01
Posición segura	Normal Cerrada

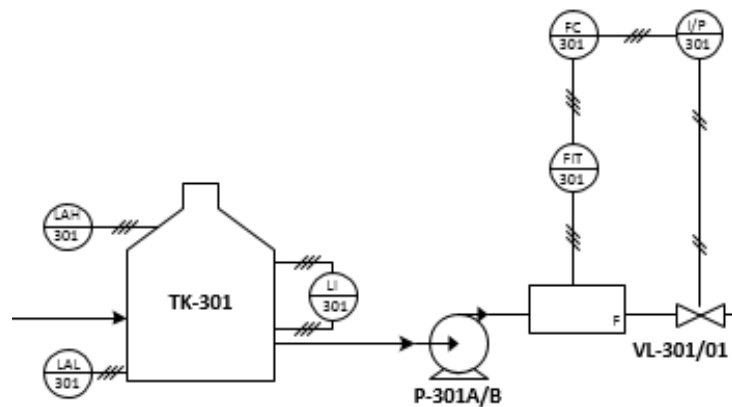


Figura 5.6-10: Diagrama de instrumentación: Tanque de almacenamiento de corriente de proceso (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

#### Intercambiador de calor (E-301, E-302, E-303 y E-304)

Para regular la temperatura en la línea de proceso, el controlador de temperatura envía una señal para regular la apertura en la válvula de la corriente de fluido térmico (sea de calefacción o refrigeración).

- *Control de Temperatura*

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura E-301
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	25°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-301/02
Posición segura	Normal abierta

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura E-302
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	10°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-303/01
Posición segura	Normal abierta

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura E-303
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	70°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-303/03
Posición segura	Normal abierta

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura E-304
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	10°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-304/02
Posición segura	Normal abierta

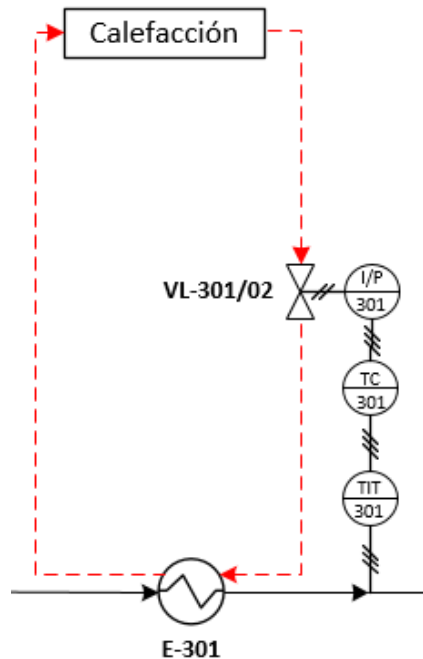


Figura 5.6-11: Diagrama de instrumentación: Intercambiador de calor (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

#### Evaporadores (V-301 y V-302) - Bomba (P-302)

Dentro de las variables controladas en ambos evaporadores, se encuentra la regulación de temperatura, el nivel de dichos equipos y la presión.

- *Control de Temperatura*

La temperatura se regula mediante un controlador de temperatura, que envía una señal para generar un cambio en la apertura de la válvula del fluido calefactor. A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura V-301
Variable manipulada	Apertura de válvula de vapor
Set point	25°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-301/03
Posición segura	Normal abierta

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura V-302
Variable manipulada	Apertura de válvula de vapor
Set point	41°C
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-302/01
Posición segura	Normal abierta

- *Control de Nivel*

El nivel en el primer evaporador es modificado por un controlador de nivel que actúa sobre la apertura de la válvula situada en la corriente que conecta ambos evaporadores. El nivel del segundo está definido por un controlador de nivel que se conecta a un lazo de control de caudal. Este lazo mide y modifica el caudal de salida del último evaporador, variando la apertura de una válvula.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Nivel
Variable controlada	Nivel V-301
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	50%
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-301/04
Posición segura	Normal Cerrada

Ítem	Control de Nivel
Variable controlada	Nivel V-302
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	50%
Tipo de control	Cascada
Elemento final	VL-302/02
Posición segura	Normal Cerrada

- *Control de Presión*

La presión es establecida por un controlador de presión, que genera una señal sobre la apertura de la válvula de salida de vapor. Esto regula el caudal de egreso, para fijar un valor de vacío dentro de los equipos.



Por otro lado, también se cuenta con válvulas de seguridad PSV para aplacar el riesgo a causa de operar con presiones muy diferentes a la atmosférica. A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Presión
Variable controlada	Presión V-301
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	1 bar
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-301/03
Posición segura	Normal abierto

Ítem	Control de Presión
Variable controlada	Presión V-302
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	0,6 Bar
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-302/01
Posición segura	Normal abierto

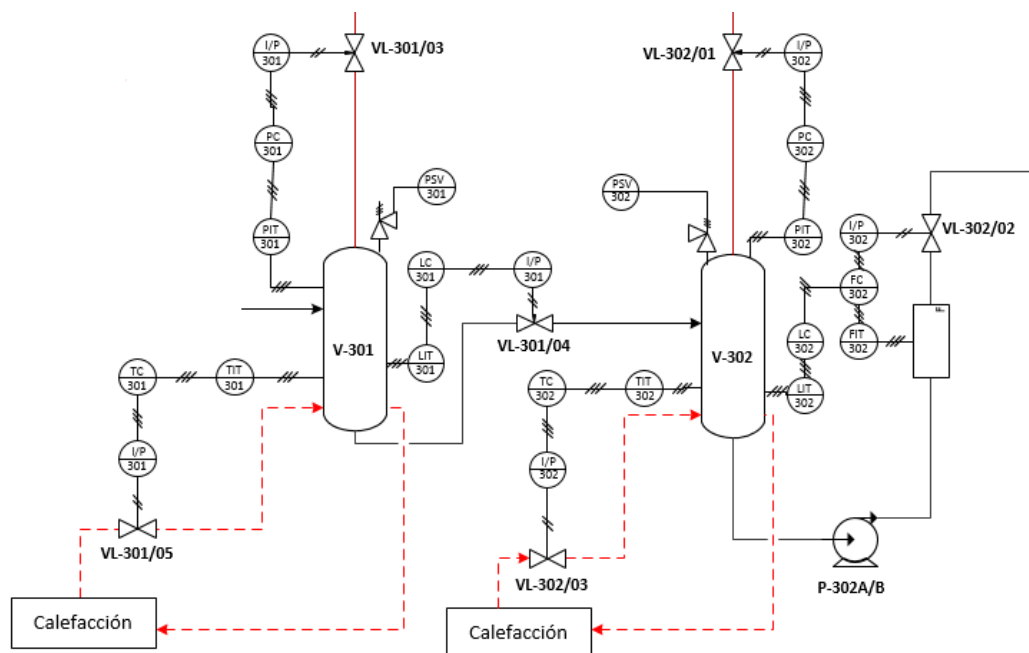


Figura 5.6-12: Diagrama de instrumentación: Evaporadores (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

### Compresores (JB-301 y JB-302)

Ambos compresores, tienen un controlador de presión a la salida envía una señal para regular la velocidad de las aspas con el fin de mantener las presiones a la salida del mismo. Cabe destacar que la principal función de los compresores es poder generar el vacío requerido en cada evaporador.

- *Control de Presión*

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Presión
Variable controlada	Presión JB-301
Variable manipulada	Velocidad del compresor
Set point	0,5Bar
Tipo de control	Cascada
Elemento final	JB-301

Ítem	Control de Presión
Variable controlada	Presión JB-302
Variable manipulada	Velocidad del compresor
Set point	0,5Bar
Tipo de control	Cascada
Elemento final	JB-302

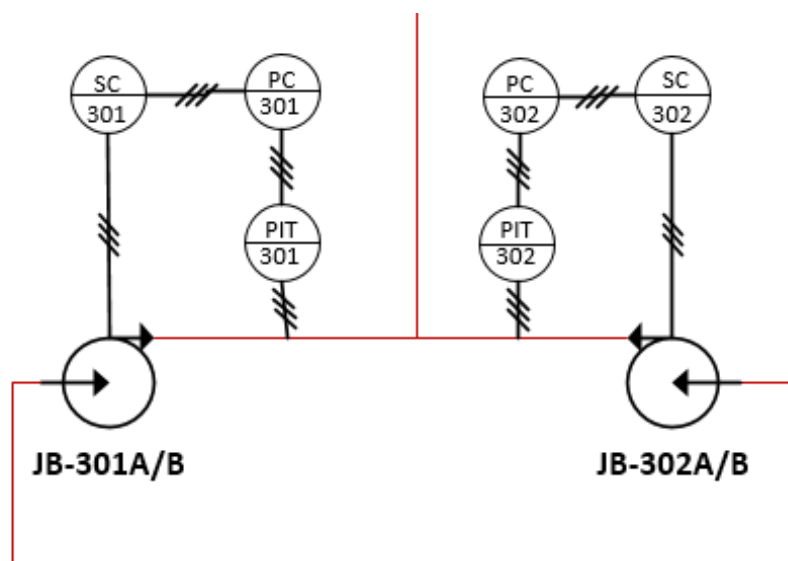


Figura 5.6-13: Diagrama de instrumentación: Compresores (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

### *Stripping (D-301) - Bomba (P-303)*

Dentro de las variables controladas en el stripping, se encuentra la regulación de temperatura y el nivel de fondo. Por otro lado, también se cuenta con válvulas de seguridad PSV para aplacar el riesgo a causa de operar con presiones muy diferentes a la atmosférica.

- *Control de Temperatura*

La temperatura se regula mediante un controlador de temperatura, que se conecta a un lazo de control de caudal (consta de un medidor de caudal conectado a un controlador de apertura de válvula). De este modo se varía la cantidad de vapor caliente que entra en la torre.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Temperatura
Variable controlada	Temperatura D-301
Variable manipulada	Apertura de válvula de vapor
Set point	85,95°C
Tipo de control	Cascada
Elemento final	VL-301/06
Posición segura	Normal cerrado

- *Control de Nivel*

El nivel del fondo es modificado por un controlador de nivel, conectado a un lazo de control de caudal (también cuenta con el medidor de caudal y su control de apertura de válvula).

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Nivel
Variable controlada	Nivel de fondo D-301
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	5%
Tipo de control	Cascada
Elemento final	VL-303/02
Posición segura	Normal cerrado

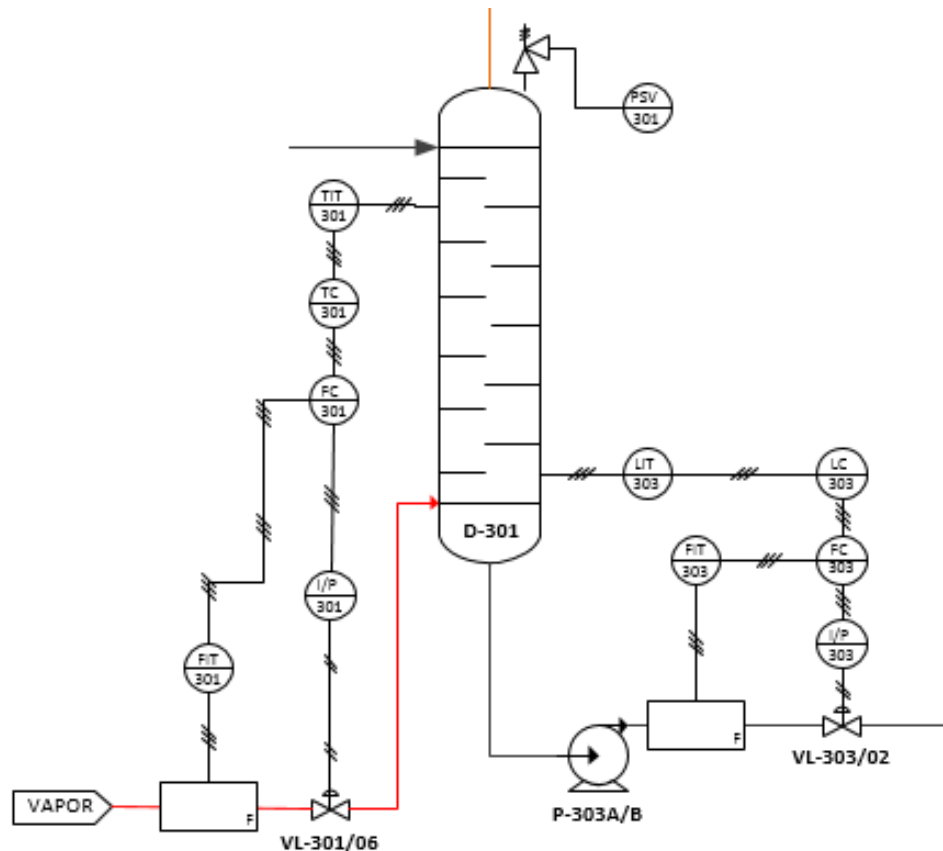


Figura 5.6-14: Diagrama de instrumentación: Stripping (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

#### Tanque Pulmón (S-301 y S-302) - Compresor (JB-303) - Bomba (P-304)

El primer tanque pulmón (S-301) posee un controlador de presión, el cual transfiere la información para que el controlador de velocidad regule la succión de vapor desde el tanque hasta el compresor (JB-303).

- Control de Presión

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Presión de S-301
Variable controlada	Presión S-301
Variable manipulada	Velocidad del compresor
Set point	0,6 Bar
Tipo de control	Cascada
Elemento final	JB-303
Posición segura	Normal cerrada

- *Control de Nivel*

El tanque pulmón (S-301) tiene, además, un controlador de nivel. Este genera un cambio sobre un controlador de caudal que permite una señal de cambio en la apertura de la válvula (VL-304/01). Por otro lado, el segundo tanque pulmón (S-302), si bien tiene un controlador de nivel, este emite una señal que actúa directamente sobre la válvula de la salida (VL-302/04) de dicho tanque.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Ítem	Control de Nivel
Variable controlada	Nivel S-301
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	50%
Tipo de control	Cascada
Elemento final	VL-304/01
Posición segura	Normal cerrado

Ítem	Control de Nivel
Variable controlada	Nivel S-302
Variable manipulada	Apertura de válvula
Set point	75%
Tipo de control	Normal-directo
Elemento final	VL-302/04
Posición segura	Normal cerrado

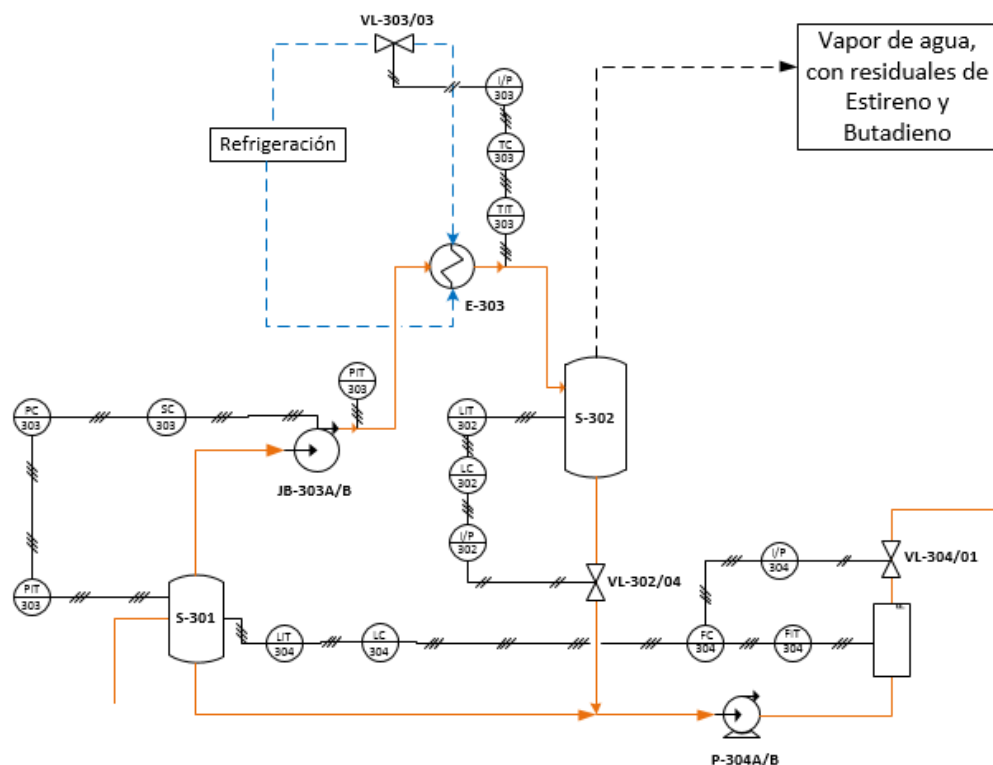


Figura 5.6-14: Diagrama de instrumentación: Tanque pulmon (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

#### 5.6.4 Área 400: Coagulación, secado y packaging

Tanques de Almacenamiento Latex (TK-401) – Tanque de Almacenamiento Ácido Sulfúrico (TK-403) – Tanque de Almacenamiento Cloruro de Sodio (TK-404) – Tanque de Almacenamiento Agua de Lavado (TK-407)

Todos estos tanques cuentan con alarmas de nivel bajo y alto, en caso de que el nivel alcanzado sea de un 5 % se detendrá la bomba de dosificación, mientras que si el nivel supera un 95% de se activara la bomba de dosificación. También disponen de indicadores/transmisores de nivel para mantener una adecuada visualización del mismo en la sala de control.

Para poder controlar la dosificación de cada uno de los componentes se utilizan caudalímetros y válvulas vinculadas con un lazo de control.

- *Control de Caudal*

Este lazo permite controlar el caudal de Látex, en función del set point establecido se dará la orden a la válvula VL-401 de aumentar o disminuir su porcentaje de apertura.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Caudal de látex
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set Point	6074 kg/h
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-401
Posición Segura	Normal cerrado

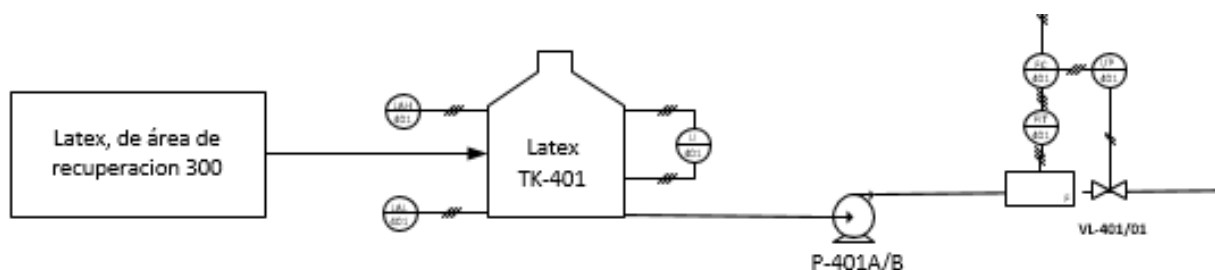


Figura 5.6-14: Diagrama de instrumentación: Tanque de almacenamiento (Zona Recuperación de materias primas – Área 300)

#### Tornillo Sin Fin (SF-401)

Este equipo es el encargado de la dosificación del antioxidante al tanque de mezclado por lo tanto cuenta con un indicador de peso, y alarmas de nivel alto y bajo en la tolva.

Para lograr que el proceso de mezclado del Látex con el Antioxidante sea el adecuado es necesario cumplir con determinadas proporciones en las corrientes de entrada al tanque M-402, por lo tanto se dispuso de un control de proporción de caudal

- Control de Proporción de Caudal

Este lazo permite relacionar la dosificación del antioxidante en función del caudal de látex, para ello se calcula la relación que se tomará como set point, la misma dará la señal al tornillo sin fin SF-401 para que este aumente o disminuya su velocidad de dosificación.

$$R = \frac{\text{Variable Controlada}}{\text{Variable Manipulada}} = \frac{\text{Caudal Látex}}{\text{Caudal Antioxidante}} = 1,6$$

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Caudal de entrada Tanque Mezclador
Variable Manipulada	Velocidad del tornillo
Set Point	R=1.6
Tipo de control	Cascada
Elemento Final	VL-401
Posición Segura	Normal cerrado

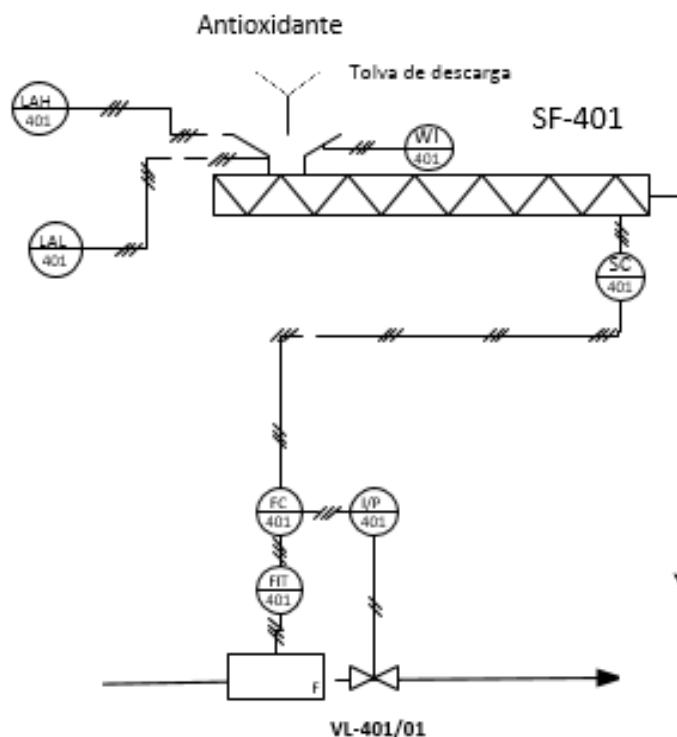


Figura 5.6-15: Diagrama de instrumentación: Tornillo Sin Fin (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)

### Tanque de Mezclado (M-402)

Este tanque es el encargado del proceso de mezclado previamente mencionado. El mismo cuenta con un controlador de nivel en conjunto con un controlador de proporciones de caudal.

- *Control de Nivel*

Este lazo permite controlar el nivel del tanque mezclador para evitar que sobrepase los límites mínimos y máximos establecidos.

Se dispone de un lazo que actuara en conjunto con el controlador de proporciones de caudales de entrada al Tanque de Coagulado CG-405.



En caso de que el nivel del tanque Mezclador M-402 supere el máximo permitido, se enviara la orden de abrir la válvula VL-402 para aumentar el caudal de salida. Caso contrario se enviara la señal a la válvula para reducir el caudal de salida.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Nivel del tanque Mezclador
Variable Manipulada	Apertura o cierre de la válvula
Set Point	75%
Tipo de control	Casada
Elemento Final	VL-402
Posición Segura	Normal cerrado

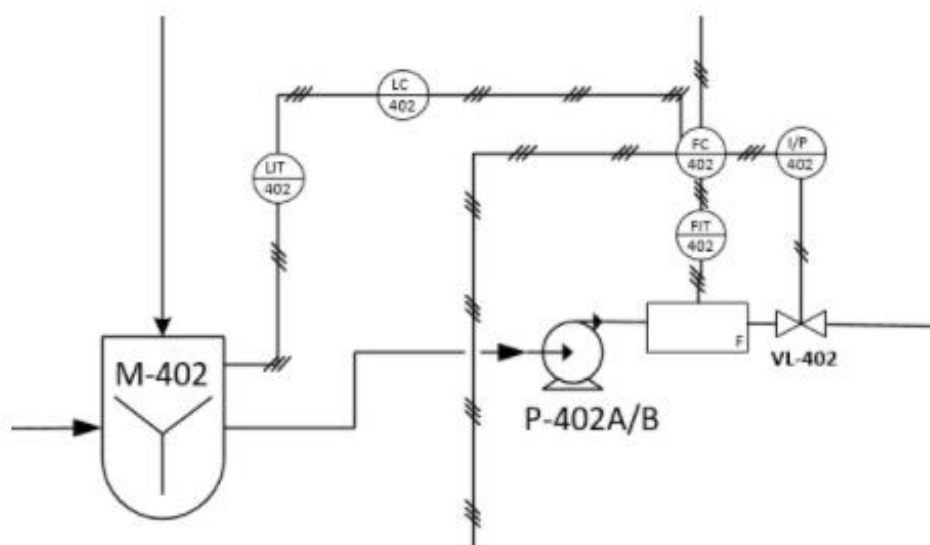


Figura 5.6-16: Diagrama de instrumentación: Tanque de Mezclado (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)

### Tanque de Coagulado (CG-405)

El proceso de coagulación del Látex con las soluciones de Ácido Sulfúrico y Cloruro de Sodio requiere que se cumplan determinadas proporciones de cada uno de los compuestos. Por lo tanto, se ha decidido colocar un lazo de control de proporciones de las corrientes de entradas al tanque de coagulado con el fin de tener un eficiente control.

Además, para lograr una adecuada coagulación del Látex es necesario contar con un lazo que controle la temperatura con la cual se desarrolla el proceso. Se ha decidido maximizar el proceso agregando una corriente de recirculación de la solución licor madre proveniente del filtro rotativo.

El tanque cuenta con un indicador/transmisor de nivel para tener una correcta visualización del proceso.

- *Control de proporción de Caudal*

Este lazo permite controlar la proporción de los caudales que ingresan al tanque de Coagulado tomando como base el caudal de látex que sale del tanque de Mezclado M-402.

De esta manera, se calculan las relaciones que se tomarán como set point y que darán la señal a las válvulas correspondientes.

$$R_{Latex-Ac.Sulf} = \frac{\text{Variable Controlada}}{\text{Variable Manipulada}} = \frac{\text{Caudal Látex}}{\text{Caudal Ac. Sulfúrico}} = 5,7$$

$$R_{Latex-NaCl} = \frac{\text{Variable Controlada}}{\text{Variable Manipulada}} = \frac{\text{Caudal Látex}}{\text{Caudal Cloruro de Sodio}} = 4$$

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Caudal de entrada de Látex al tanque de Coagulado
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvulas
Set Point 1	R1=5.7
Set Point 2	R2=4
Tipo de control	Ratio- directo
Elemento Final	VL-403 / VL-404
Posición Segura	Normal cerrado

- *Control de Temperatura*

Este lazo permite controlar la temperatura del proceso de coagulación en el tanque CG-405 con el objetivo de que la misma cumpla con el valor establecido.

El equipo contará con una chaqueta a través de la cual circulará el refrigerante, quien será el encargado de mantener la temperatura en el valor del set point. Se manipulará el caudal de este fluido en función del valor de temperatura deseada, mediante el porcentaje de apertura de la válvula VL 405/02.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

<b>Variable Controlada</b>	<b>Temperatura del tanque de Coagulado</b>
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula refrigerante
Set Point	70
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-405/03
Posición Segura	Normal cerrado

- *Control de Caudal de Reciclo*

Este lazo permite controlar el caudal de la solución de licor madre. En función del set point establecido se dará la orden a la válvula VL-405/02 de aumentar o disminuir el porcentaje de apertura.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

<b>Variable Controlada</b>	<b>Caudal de solución reciclada que ingresa al tanque CG-405</b>
Variable Manipulada	Apertura o cierre de la válvula
Set Point	38743 kg/h
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-405/02
Posición Segura	Normal Cerrada

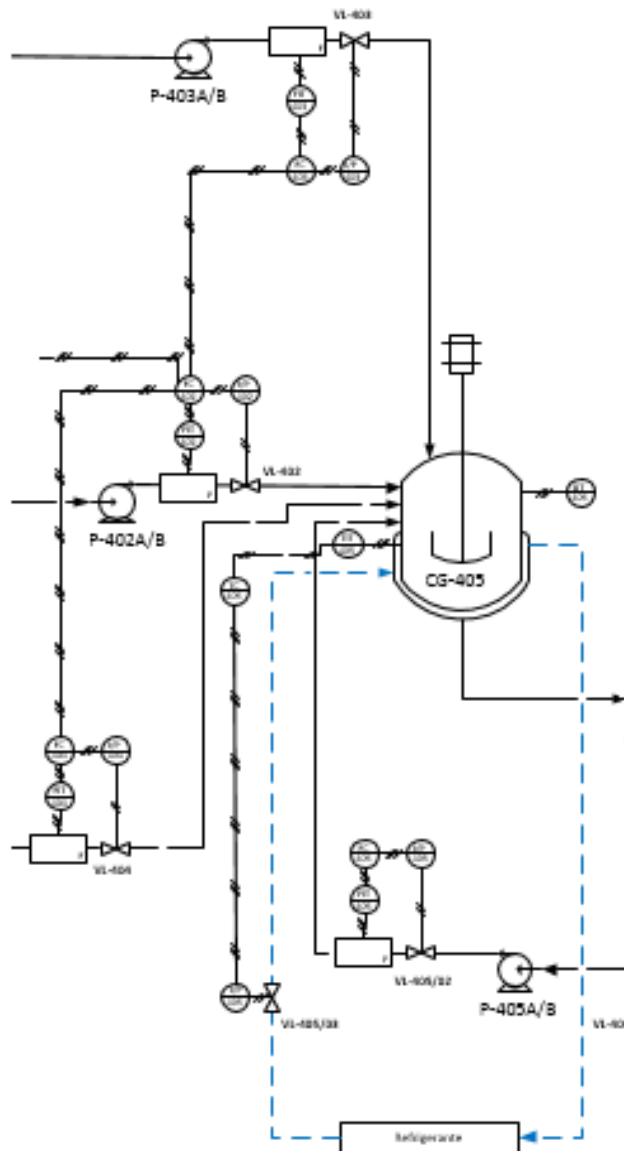


Figura 5.6-17: Diagrama de instrumentación: Tanque de Coagulado (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)

#### Tanque de lavado (W-406)

El látex se lava con agua para eliminar impurezas en el tanque W-406, el mismo cuenta con un controlador de caudal de la corriente de entrada de agua y un controlador de caudal de la corriente de agua recirculada. Además, de un transmisor/indicador de nivel.

- *Control de Caudal*

Este lazo es el encargado de controlar el caudal de agua de lavado que ingresa al tanque. Para ello, se establece un set point y en base a la desviación registrada mediante el caudalímetro, se dará la orden de apertura o cierre de la válvula VL-407.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

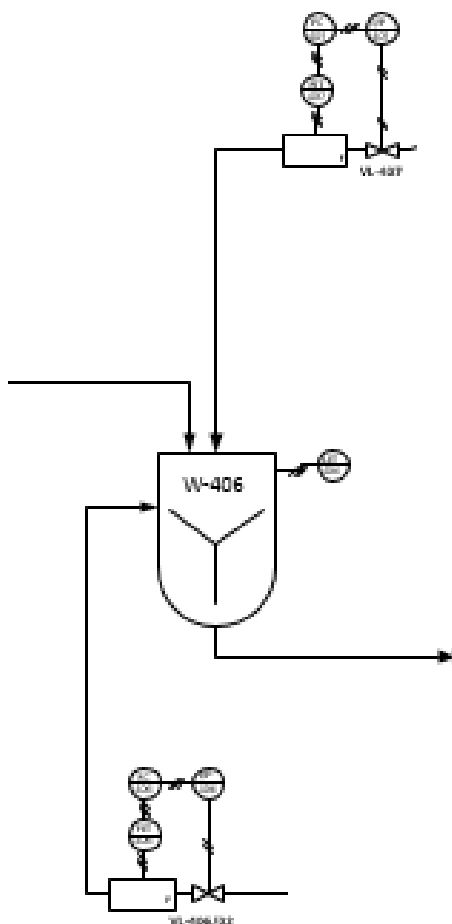
<b>Variable Controlada</b>	<b>Caudal de agua que ingresa al tanque de lavado</b>
Variable Manipulada	Apertura o cierre de la válvula
Set Point	13108,06 kg/h
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-407
Posición Segura	Normal Cerrado

- *Control de Caudal de Reciclo*

Este lazo permite controlar el caudal de agua recirculada al tanque de lavado. En función del set point establecido se dará la orden a la válvula VL-406/02 de mayor apertura o cierre.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

<b>Variable Controlada</b>	<b>Caudal de agua reciclada que ingresa al tanque W-406</b>
Variable Manipulada	Apertura o cierre de la válvula
Set Point	38596 kg/h
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-406/02
Posición Segura	Normal Cerrada



*Figura 5.6-18: Diagrama de instrumentación: Tanque de lavado (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)*

#### *Tanques pulmón (S-405 y S-406)*

Para optimizar el proceso se decidió que parte de la solución coagulante de licor madre filtrada en el filtro rotativo FR-405 sea recirculada al tanque de Coagulado mientras que la restante es purgada, para ello se utiliza un tanque pulmón que recibe la solución filtrada.

Se dispuso utilizar el mismo sistema de reciclo para el agua de lavado que es filtrada en el FR-406. Para la cual se utiliza el tanque pulmón S-406.

Por lo tanto ambos sistemas cuentan con su controlador de nivel correspondiente que tiene como fin evitar el desborde o vaciado por purga de los tanques.

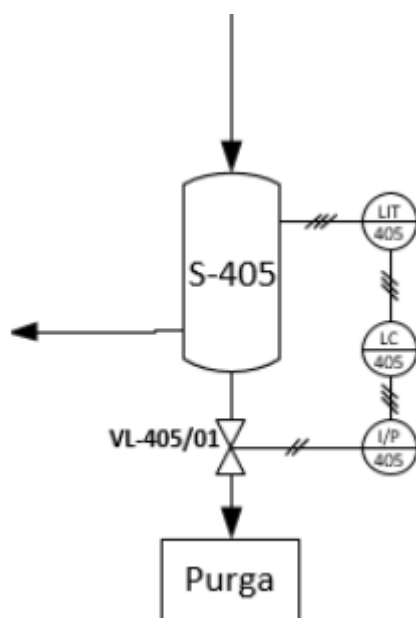
- *Control de Nivel S-405*

Este lazo de control está diseñado para actuar cuando el tanque S-405 se encuentre en sus límites máximos y mínimos de capacidad. En el caso de que el nivel

sobrepase el set point máximo establecido, se dará la orden de apertura a la válvula VL-405/01 correspondiente a la corriente de purga de solución coagulante, hasta alcanzar el nivel ideal. Caso contrario, en que el nivel sea el mínimo, se dará la orden de cierre de la misma válvula con el objetivo de evitar el vaciado del tanque por purga.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Nivel del tanque S-405
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula de purga
Set Point	75%
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-405/01
Posición Segura	Normal Abierta



*Figura 5.6-19: Diagrama de instrumentación: Tanque pulmón S-405 (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)*

- *Control de Nivel (S-406)*

Al igual que en el tanque S-405, este lazo de control de nivel actuara cuando el tanque S-406 sobrepase sus límites máximos y mínimo de capacidad. En el caso de que el nivel sobrepase el set point máximo establecido, se dará la orden de apertura a la válvula VL-406/01 correspondiente a la corriente de purga del agua de lavado, hasta alcanzar el nivel ideal. Caso contrario, en que el nivel sea el mínimo, se dará la orden de cierre de la misma válvula con el objetivo de evitar el vaciado del tanque por purga.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Nivel del tanque S-405
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula de purga
Set Point Max	75%
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-406/01
Posición Segura	Normal Abierta

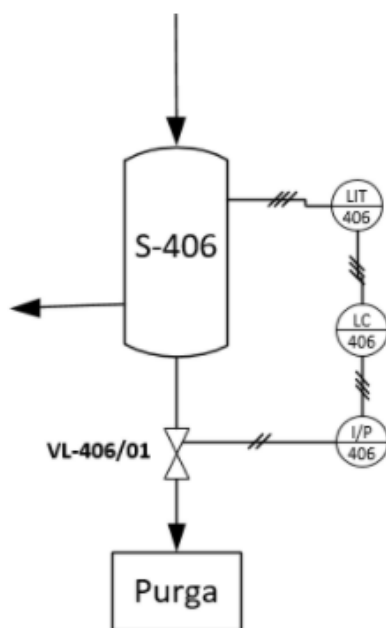


Figura 5.6-20: Diagrama de instrumentación: Tanque pulmón S-406 (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)



### Extrusor (EX – 408)

Este equipo tiene como fin lograr que el caucho sea peletizado y transportado hacia el secador. Se dispuso contar con un indicador/transmisor de velocidad para asegurar que el transporte del caucho al secador está siendo efectivo.

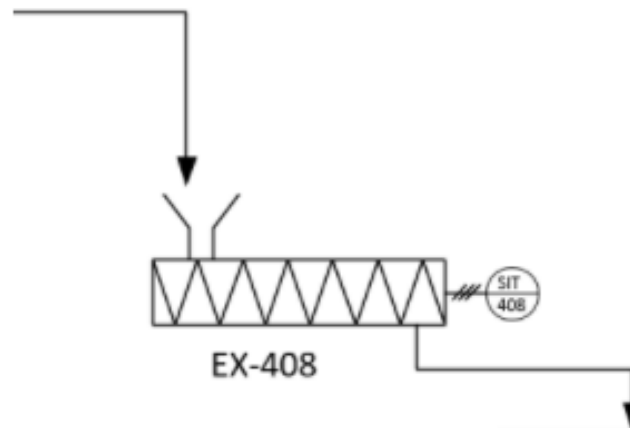


Figura 5.6-21: Diagrama de instrumentación: Extrusor (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)

### Secador (SC-409)

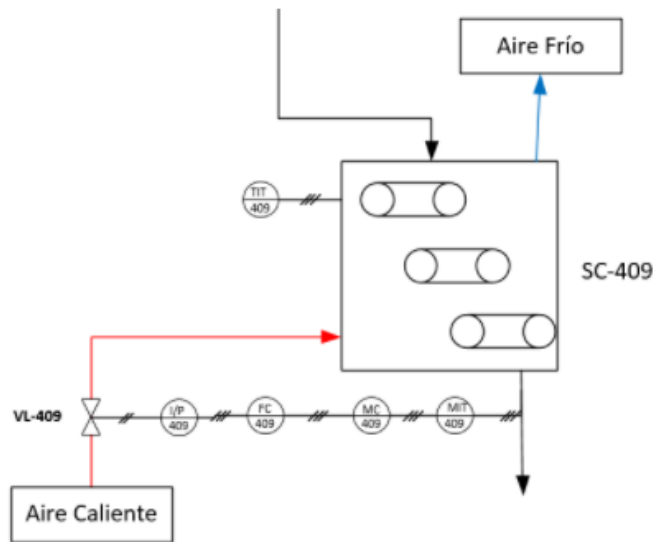
El objetivo que tiene este equipo es secar el caucho proveniente del extrusor, para ello necesita contar con un caudal de aire caliente constante. Se ha dispuesto utilizar un lazo de control de humedad con el fin de asegurar el adecuado secado del caucho.

- *Control de Humedad*

Este lazo es el encargado de proporcionar el caudal de aire caliente correcto para evitar exceso o falta de humedad en el caucho de salida. En función del set point establecido se dará la orden a la válvula VL-409 de mayor apertura o cierre de la corriente de entrada de aire caliente.

A continuación, se muestran las características del lazo mencionado.

Variable Controlada	Humedad del Caucho
Variable Manipulada	Apertura o cierre de válvula
Set Point	1.28%
Tipo de control	Directo
Elemento Final	VL-409
Posición Segura	Normal Cerrada



*Figura 5.6-22: Diagrama de instrumentación: Secador (Zona Coagulación, secado y packaging – Área 400)*

## 5.7 Diseño de equipos

En la presente sección del capítulo, sobre diseño y dimensionamiento de equipos, se abordarán cuestiones tales como: descripción del equipo, propósito en el proceso y por qué se eligió, el marco teórico y bibliografía elegidos para la realización de los cálculos, la verificación de los resultados obtenidos, y conclusiones

### 5.7.1 Reactor R-201

En la presente sección se describirá las características de un reactor agitado, su funcionamiento, elección del refrigerante, tipo de sistema de refrigeración, y luego se detallará la memoria descriptiva del cálculo y dimensionamiento del mismo. Además de los procedimientos de cálculo numérico, se detallarán todas aquellas suposiciones y simplificaciones que se hayan tenido en cuenta para el correcto desarrollo de estos.

#### Funcionamiento del reactor

El reactor de tanque agitado continuo R-201 es el primer reactor dentro del tren de reactores continuos en los cuales se llevan a cabo las reacciones. Hay un flujo continuo de masa reaccionante con el fin de obtener el producto final deseado, el SBR.

El propósito de tener agitación es lograr que en el interior del tanque se produzca una buena mezcla de los materiales, con el fin de asegurar la homogenización de los componentes y de la temperatura en todo el volumen de masa reaccionante.

#### Reacciones involucradas

El objetivo principal de reactor es brindar el espacio y las condiciones operativas adecuadas para la reacción de copolimerización. La misma ocurre cuando un radical libre difunde a través del agua hacia la micela con los monómeros. Tanto el butadieno como el estireno, a medida que avanza la reacción, también difunden desde las gotas a través del agua hasta llegar a la micela. La micela se hincha al punto de considerarla una partícula de polímero látex.

La reacción general entre el estireno y el butadieno es la siguiente:

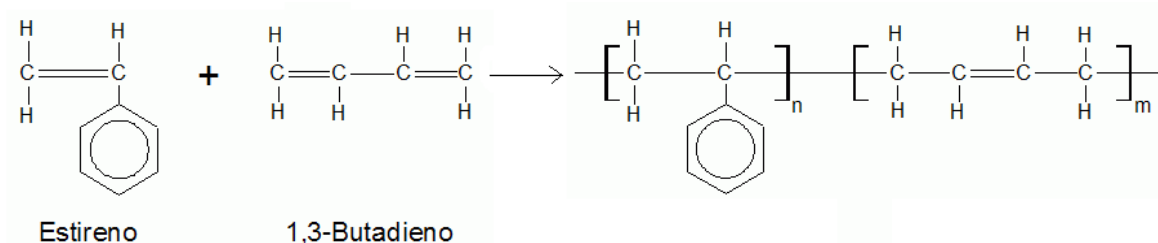


Figura 5.7-1: Ecuación química entre butadieno y estireno

### Condiciones operativas

Para que la formación del polímero sea correcta, se optó por una presión operativa de 3,5 bar y una temperatura de 5°C, debido a que a esa presión el butadieno se mantiene en estado líquido y se necesita una baja temperatura para que el proceso de emulsión en frío sea factible.

En cuanto a los caudales de entrada de los componentes principales, se pueden destacar:

Masa de Entrada al reactor	
Butadieno, kg/h	3034,53
Estireno, kg/h	1011,50
Agua, kg/h	3001,28
Jabón de potasio, kg/h	202,30

### Dimensionamiento del reactor

A continuación, se exponen los distintos procedimientos de cálculo llevados a cabo para el diseño del reactor agitado encamisado.

#### *Cálculo del volumen del reactor*

En la siguiente sección, se tratará sobre el diseño del reactor, más puntualmente su volumen y el tiempo de residencia de los componentes. Para efectuar los cálculos se utilizó la bibliografía citada.

Primeramente, se determinó la conversión alcanzada en este primer reactor del tren. En el documento “Styrene–butadiene rubber (SBR) production by emulsion polymerization: Dynamic modeling and intensification of the process” by Alexandr Zubov, Jiri Pokorny, Juraj Kosek se muestra una relación lineal entre la cantidad de reactores y la conversión. Estas conclusiones y datos fueron obtenidos analíticamente gracias al modelo y comprobados experimentalmente con datos de planta. El siguiente gráfico es presentado por el documento previamente mencionado:

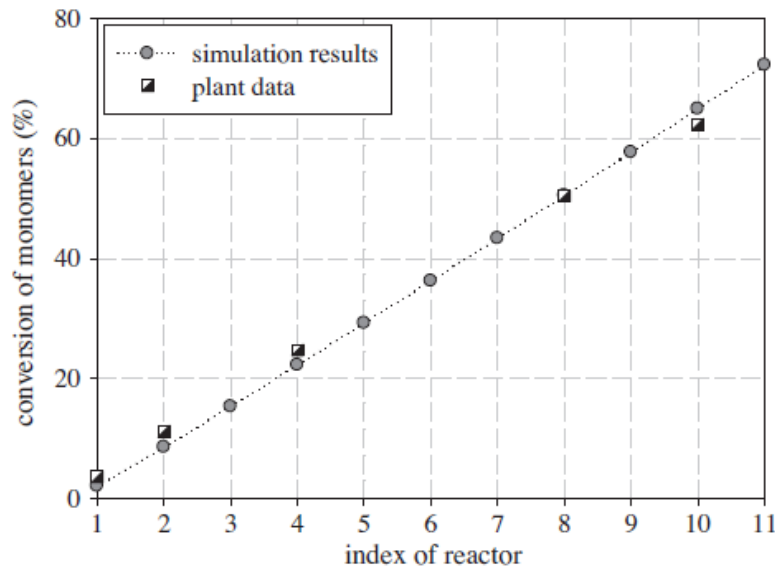


Figura 5.7-2: Perfil de conversión de monómeros a lo largo de reactores en serie para una producción de SBR.

Se tomaron los datos del gráfico y con ayuda de Excel se elaboró una línea de tendencia y se determinaron el número de reactores en base a la conversión deseada:

$$\text{Conversión} = 0,068 * N^{\circ} \text{ de reactores} - 0,0395$$

Siendo la conversión deseada igual al 60% de los monómeros de entrada, el número total de reactores es igual a 9,3, aproximado 9. La conversión alcanzada en el primer reactor es de 0,0285.

Una vez hallada la conversión, se procede con el cálculo del tiempo de residencia. Según “Steady-state modelling of a látex reactor train for the production of styrene-butadiene rubber” by J. Kanetakis, F.Y.C. Wong, S.E. Hamielec, J.F. Macgregor, el cálculo del tiempo de residencia proviene de la relación entre el diámetro de partícula. Se utilizará la siguiente fórmula de caudal volumétrico:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(M_S * R_{PS} + M_B * R_{PB})}{\rho_{cop}}$$

Donde:

- $V \rightarrow$  Volumen del polímero en la partícula
- $M_S$  y  $M_B \rightarrow$  Masas molares de estireno y butadieno
- $R_{PS}$  y  $R_{PB} \rightarrow$  Velocidad específica de polimerización del estireno y del butadieno. En otras palabras, es la velocidad de incorporación del estireno o

butadieno en forma de monómero al copolímero. Estas velocidades se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

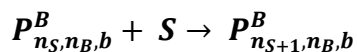
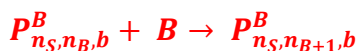
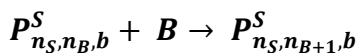
$$R_{PS} = \frac{k_{PSS} * k_{PBB} * (r_1 * [S]_p^2 + [S]_p * [B]_p)}{(k_{PBB} * r_1 * [S]_p + k_{PSS} * r_2 * [B]_p)} * \frac{1}{2 * N_A}$$

$$R_{PB} = \frac{k_{PSS} * k_{PBB} * (r_2 * [B]_p^2 + [S]_p * [B]_p)}{(k_{PBB} * r_1 * [S]_p + k_{PSS} * r_2 * [B]_p)} * \frac{1}{2 * N_A}$$

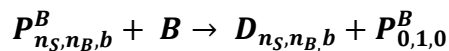
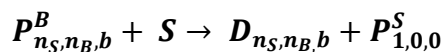
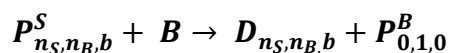
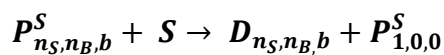
Donde:

- $[S]_p$  y  $[B]_p \rightarrow$  Concentraciones de estireno y butadieno en la fase polímero.
- $r_1$  y  $r_2 \rightarrow$  Parámetros de reactividad (1 para el estireno y 2 para el butadieno).
- $N_A \rightarrow$  número de Avogadro
- $k_{PSS}$  y  $k_{PBB} \rightarrow$  Constantes de la reacción de propagación. Estas constantes pertenecen a dos de las reacciones de propagación pertenecientes al sistema de reacciones que ocurren posterior a las reacciones de iniciación (a la primera reacción coloreada de rojo le pertenece el  $k_{PSS}$  y a la segunda coloreada el  $k_{PBB}$ ). En la bibliografía citada, se menciona que las reacciones de propagación son las dominantes de la velocidad de reacción:

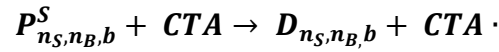
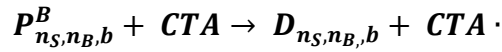
#### ➤ Propagación



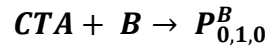
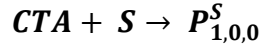
#### ➤ Transferencia de cadena a un monómero



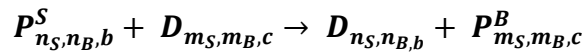
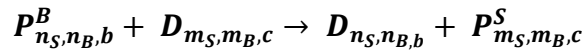
➤ *Transferencia de cadena a modificador*



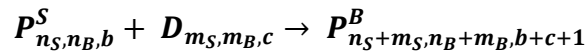
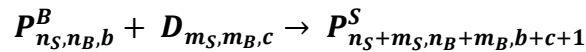
➤ *Reiniciación*



➤ *Transferencia de cadena a polímero*



➤ *Polimerización de doble enlace interno o terminal*



Considerando a cada partícula como una esfera, reemplazo la variable  $V$  por el volumen de una esfera en función del diámetro  $V = \frac{\pi \cdot D^3}{6}$ . Se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{K}{2 \cdot D^2}$$

En donde  $K$  es una constante igual a  $\frac{4}{\pi} \cdot \left( \frac{M_S \cdot R_{PS} + M_B \cdot R_{PB}}{\rho_{cop}} \right)$ . Se integra la ecuación obteniendo el siguiente resultado:

$$t = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{K} \cdot (D^3 - D_0^3)$$

Donde  $D_0$  es el diámetro de la micela cuando aún no ha ocurrido la reacción en su interior.

A continuación, se enlistará los valores de las variables previamente mencionada y en algunos casos, su procedimiento de cálculo.

### Diámetros de partículas

Para el cálculo de los diámetros de partícula, tanto el inicial como el de salida del reactor, se tomó como base un gráfico de la documentación “Steady-state modelling of a látex reactor train for the production of styrene-butadiene rubber” by J. Kanetakis, F.Y.C. Wong, S.E. Hamielec, J.F. Macgregor en donde se representan los diámetros de partícula en función de la conversión.

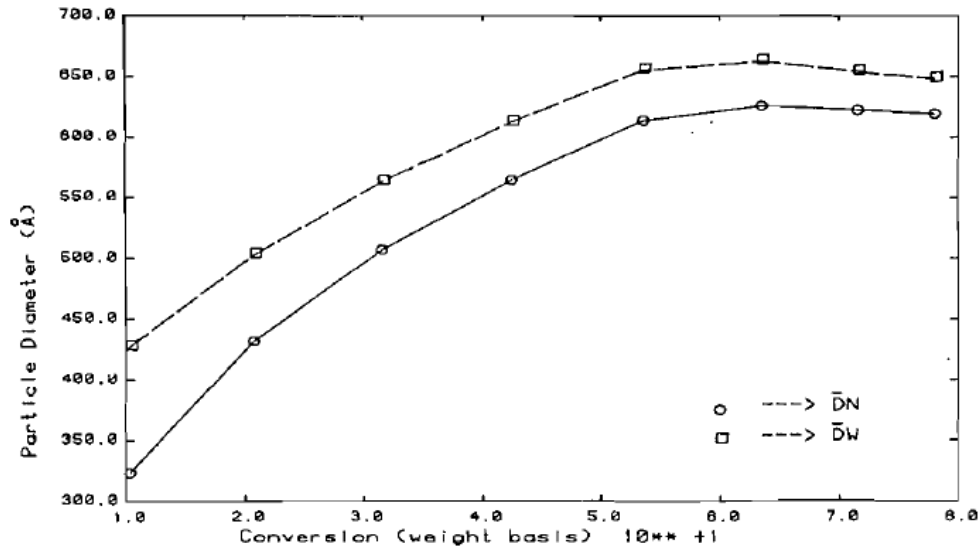


Figura 5.7-3: Diámetro de partícula promedio en comparación con el número de reactor.

Con ayuda de excel, se obtuvo la curva de aproximación para poder obtener el valor desesado a nuestra conversión y a conversión 0.

La fórmula obtenida fue:

$$D \text{ (metros)} = -9E^{-08} * Conv.^2 + 1E^{-07} * Conv. + 2E^{-08}$$

Con esta curva se obtuvieron los siguientes valores:

$$D \text{ (Conv.=0,0285)} = 2,2777E^{-08}$$

$$D_0 \text{ (Conv.=0)} = 2E^{-08}$$

### Densidades y Masa molar

Los valores de las masas molares para el estireno y el butadieno son los siguientes:

$$M_s = 0,10415 \text{ kg/mol}$$



$$M_B = 0,0541 \text{ kg/mol}$$

Para el cálculo de la densidad del copolímero, se consideró las densidades de ambos monómeros en las condiciones de proceso y las proporciones de estos (1 de estireno cada 3 de butadieno).

$$\rho_S = 918,4 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_B = 639,25 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{cop}} = 918,4 * 0,25 + 639,25 * 0,75 = 709,04 \text{ kg/m}^3$$

*Constantes de propagación y parámetro de reactividad*

Los valores de  $k_{PS}$ ,  $k_{PB}$ ,  $r_1$  y  $r_2$  fueron obtenidos del documento “Dynamic Modelling of the Emulsion Copolymerization of Styrene/Butadiene” by Taras Oscar Broadhead, B.Eng. (McMaster University). Los valores de estos parámetros son:

$$k_{PS} \rightarrow 5,05E^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$k_{PB} \rightarrow 7,07E^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$r_1 \rightarrow 0,44$$

$$r_2 \rightarrow 1,4$$

*Concentraciones en la fase polímero*

Para calcular las concentraciones de estireno y butadieno en el polímero, se utilizó la conversión de estos y sus corrientes de entrada junto con la de jabón de potasio ya que este componente forma parte de la fase polímero.

$$[i]_p = \frac{\text{Moles de } i \text{ en el copolímero}}{\text{Volumen de la fase polímero}}$$

Siendo “i” igual a S o B.

En las siguientes tablas se enlistan la entrada y salida de los principales componentes (en relación con el volumen de dosificación).

### Masa de Entrada al reactor

Butadieno	3034,53125	kg/h
Estireno	1011,50407	kg/h
Agua	3001,28951	kg/h
SBR	0	kg/h
Jabón de potasio	202,30462	kg/h

### Masa de Salida al reactor

Butadieno	2948,04711	kg/h
Estireno	982,676207	kg/h
Agua	3001,28951	kg/h
SBR	115,312007	kg/h
Jabón de potasio	202,30462	kg/h

Para el cálculo de la concentración de estireno en el polímero, se realizó la diferencia entre la entrada y la salida (lo que reacciona y comenzó a formar parte de la cadena de copolímero). Con ayuda de la masa molar de este, se lo paso a mol. De esta forma obtengo el numerador de la fórmula de concentración. Para el denominador, se tomó la cantidad de SBR producido y la cantidad de jabón de potasio en kilogramos y con ayuda de sus densidades se las convirtió a unidades volumétricas. De misma forma se procedió con el butadieno. Los valores de concentraciones obtenidos son:

$$[S]_p \rightarrow 787 \text{ mol.m}^{-3}$$

$$[B]_p \rightarrow 4545,3 \text{ mol.m}^{-3}$$

A continuación, se procederá a reemplazar los valores obtenidos en las ecuaciones previamente mencionadas y obtener el tiempo de residencia:

$$R_{PS} = \frac{5,05E^{-03} * 7,07E^{-03} * [0,44 * 787^2 + 787 * 4545,3]}{7,07E^{-03} * 0,44 * 787 + 5,05E^{-03} * 1,4 * 4545,3} * \frac{1}{2 * 6,022E^{23}}$$

$$R_{PS} = 3,3E^{-24} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$R_{PB} = \frac{5,05E^{-03} * 7,07E^{-03} * [1,4 * 4545,3^2 + 787 * 4545,3]}{7,07E^{-03} * 0,44 * 787 + 5,05E^{-03} * 1,4 * 4545,3} * \frac{1}{2 * 6,022E^{23}}$$

$$R_{PB} = 2,79E^{-23} \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

$$K = \frac{4}{\pi} * \left( \frac{0,10415 * 3,3E^{-24} + 0,0541 * 2,79E^{-23}}{709} \right)$$

$$K = 3,33E^{-27} \frac{m^3}{s}$$

$$t = \frac{2}{3} * \frac{1}{3,33E^{-27}} * (2,777E^{-83} - 2E^{-83})$$

$$t = 7,65E^2 s = 0,21 h$$

A continuación, se procederá a calcular el volumen requerido del tanque. Este volumen es igual para todos los tanques pertenecientes al tren de reactores ya que no existe una expansión en la masa total, sino todo lo contrario, una pequeña contracción. Esta contracción se debe a que el monómero al pasar de la fase monómero a la fase polímero y copolimerizar, genera una pequeña disminución del volumen total de la masa. Es otras palabras, los monómeros sin polimerizar ocupan un mayor lugar que los polimerizados.

Para calcular el volumen se utilizó la formula presentada por el documento documento “Styrene–butadiene rubber (SBR) production by emulsion polymerization: Dynamic modeling and intensification of the process” by Alexandr Zubov, Jiri Pokorny, Juraj Kosek. Esa fórmula es la siguiente:

$$V_M + V_W + V_P = V$$

Donde:

- $V_M \rightarrow$  volumen de la fase monómero
- $V_W \rightarrow$  volumen de la fase acuosa
- $V_P \rightarrow$  volumen de la fase polímero

Para los cálculos se tomaron los valores de salida del reactor de los componentes con volúmenes significativos (agua, monómero, copolímero y jabón de potasio), ya que, al considerarse perfectamente agitado, al entrar, la reacción ocurre espontáneamente.

### Masa de Salida al reactor

Butadieno	2948,04711	kg/h
Estireno	982,676207	kg/h
Agua	3001,28951	kg/h
SBR	115,312007	kg/h
Jabón de potasio	202,30462	kg/h

Con ayuda de las densidades de los componentes, se convierte la masa en volumen y se efectúa la suma:

$$\rho_s = 918,4 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_B = 639,25 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{cop}} = 709 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{jabón}} = 1070 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$V_M = \frac{2948,07}{639,25} + \frac{982,68}{918,4} = 5,68 \text{ m}^3$$

$$V_W = \frac{3001,3}{1000} = 3 \text{ m}^3$$

$$V_P = \frac{115,31}{709} + \frac{202,3}{1070} = 0,35 \text{ m}^3$$

$$V = 5,68 + 3 + 0,35 = 9,05 \text{ m}^3$$

Se considera un factor de seguridad igual al 20% del volumen hallado. Por lo tanto, el volumen final del reactor es:

$$V = 9,05 * 1,2 = \mathbf{10,84 \text{ m}^3}$$

Se optó por utilizar 9 reactores en serie en lugar de uno por cuestiones de tiempos y operativas:

*Tiempo de residencia en 1 reactor (163 minutos) → aproximadamente 3 horas sin tener producto final a tratar en el downstream. Esto significa un apagado y encendido de los equipos cada 3 horas, lo cual no es recomendable.*

*Tamaño de 1 reactor* ( $96,7 \text{ m}^3$ )  $\rightarrow$  con 9 reactores de  $10,84 \text{ m}^3$  se obtiene, en 163 minutos, la misma cantidad de producto que si tuviese un solo reactor con un volumen total de  $96,7 \text{ m}^3$ . Desde el punto de vista operativo, de refrigeración y de diseño, este último reactor es inviable.

### Sistema de refrigeración del reactor

#### *Selección del sistema de refrigeración*

Siendo la reacción de polimerización exotérmica y para que la formación del látex sea eficiente, se debe mantener la temperatura del reactor en un determinado valor, por lo que se procede a la determinación del sistema de mantenimiento de la temperatura de éste.

Para tanques agitados, este sistema de refrigeración suele ser principalmente una camisa externa o una conducción en espiral, serpentines, dentro del tanque.

El sistema de serpentines permite una mejor transferencia de calor gracias a una pequeña resistencia de pared. Además, permite una superficie de transferencia relativamente grande respecto al volumen del reactor.

Por otro lado, la camisa de calor facilita el proceso de productos corrosivos puesto que no está en contacto con el contenido del tanque. Igualmente, permite una rápida limpieza del recipiente y no existe el riesgo de contacto entre el líquido refrigerante y el producto procesado. Asimismo, el uso de camisas no limita ni el tipo de reactor ni el material a procesar. El caudal, la temperatura y la velocidad de transmisión de calor pueden ser controlados adecuadamente.

El proceso de polimerización del SBR dificulta el uso de serpentines debido a que tanto el agitador como el serpentín irían internamente, entonces se dificultaría tanto la agitación como la refrigeración. Es por ello que se selecciona como dispositivo principal de refrigeración la camisa de transferencia de calor.



*Figura 5.7-4: Reactor tanque agitado encamisado.*

### *Diseño de la camisa de refrigeración*

En principio, se va a calcular el caudal de refrigerante requerido. Para calcular el mismo, se tienen en cuenta los datos sacados del informe “Dynamic Modelling of the Emulsion Copolymerization Of Styrene-Butadiene” y las condiciones operativas obtenidas.

### *Calor de Reacción*

Para calcular el calor de reacción, se realiza el siguiente cálculo teniendo en cuenta los siguientes datos:

Calor de polimerización ( $\Delta H_p$ )	72,56 kJ/monomer unit
Conversión en reactor	0,0285
Butadieno	3034,5 kg/h
Estireno	1011,5 kg/h
Masa molar mezcla (25% E – 75% B)	0,0667 kg/mol

$$q_p = \Delta H_p \text{ Conv. } \frac{\dot{m}_B + \dot{m}_E}{M_m}$$

$$q_p = 72,56 \frac{\text{kJ}}{\text{mon unit}} \times 0,0285 \times \frac{(3034,5 + 1011,5) \text{ kg/h}}{0,0667 \text{ kg/mol}} = 125608,87 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

### *Caudal de Refrigeración*

Para saber que refrigerante es el adecuado, se tienen en cuenta los siguientes datos:

Temperatura salida reactor ( $T_s$ )	278 K
Temperatura entrada reactor ( $T_e$ )	278 K
Volumen reactor (V)	10,84 m <sup>3</sup>
Diámetro reactor (D)	2 m
Altura reactor (H)	3,1 m
Coeficiente de transferencia global (U)	1020 kJ/(h m <sup>2</sup> K)
Capacidad calorífica masa reaccionante ( $C_p$ )	2,95 kJ/kg °C

Además, se consideran válidas las siguientes suposiciones:

- El coeficiente global de transferencia de calor  $U$  es constante en todo el proceso y en toda la superficie
- El flujo de refrigerante es constante
- Los calores específicos permanecen invariables
- La agitación es ideal, asegurando una temperatura uniforme en la mezcla
- No hay cambios de fase
- Las pérdidas de calor son despreciables.

Planteando los balances de energía, el calor de reacción de la camisa se calcula como:

$$q_{camisa} = m_R C_{pR} \Delta T = m_R C_{pR} (t_s - t_e)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de transferencia de calor del reactor dado por la siguiente ecuación:

$$q = U A_t \Delta T_{ML}$$

Siendo:

- Área de Transferencia

$$A_t = \pi D H + \frac{1}{4} \pi (D)^2 = \pi \times 2 \text{ m} \times 3,1 \text{ m} + \frac{1}{4} \pi (2 \text{ m})^2 = 22,6 \text{ m}^2$$

- Diferencia de Temperatura Media Logarítmica

$$\Delta T_{ML} = \frac{(T_e - t_e) - (T_s - t_s)}{LN \left( \frac{(T_e - t_e)}{(T_s - t_s)} \right)}$$

Como se observa en la ecuación, se tienen 3 incógnitas que son la temperatura de entrada y la temperatura de salida de la camisa y el caudal de refrigerante.

Por lo tanto, se tienen tres incógnitas y 2 ecuaciones:

- *Temperatura salida camisa ( $t_s$ )*
- *Temperatura entrada camisa ( $t_e$ )*
- *Caudal de refrigerante ( $m_R$ )*

a)  $q = U A_t \Delta T_{ML}$

b)  $q_{camisa} = C_{pR} (t_s - t_e)$

Para calcular las mismas, se supuso la temperatura de salida de la chaqueta y se utiliza la herramienta Solver para determinar la temperatura de entrada a la chaqueta y el caudal de refrigerante necesario, utilizando las siguientes funciones objetivo:

$$1) \quad q = U A_t \Delta T_{ML} = q_R$$

$$2) \quad q_{camisa} = C p_R (t_s - t_e) = q_R$$

Por lo que se obtienen los siguientes valores:

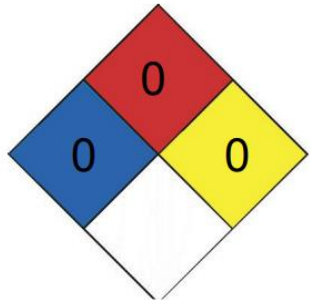
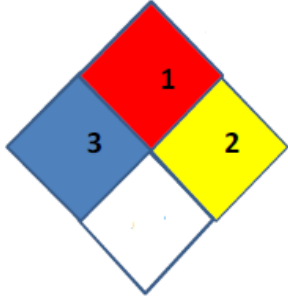
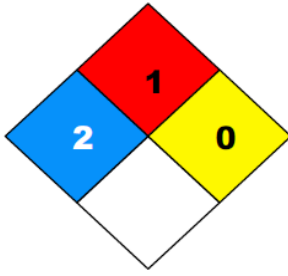
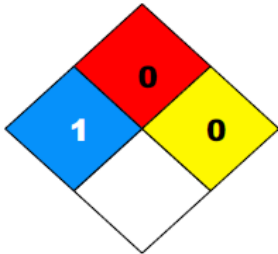
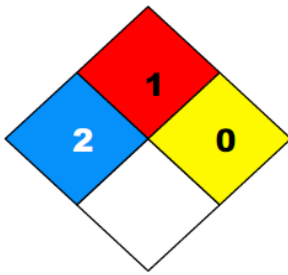
Temperatura entrada fluido refrigerante (Te)	261,8 K
Temperatura salida fluido refrigerante (Ts)	277 K

En cuanto a los caudales, se tomaron en cuenta distintos tipos de refrigerantes a tener en cuenta:

Refrigerante	Caudal
Agua	1981,5 kg/h
Amoniaco	1749,4 kg/h
Etilenglicol	4396,2 kg/h
R-12	9315,1 kg/h
R-134 <sup>a</sup>	6741,9 kg/h

Para determinar cuál de los anteriores es el más adecuado, se realizó el siguiente cuadro comparativo:



Refrigerante	Precio x Caudal (\$)	Seguridad	Punto de congelamiento
Agua	-		0°C
Amoniaco	3,15E+06		-78°C
Etilenglicol al 35%	2,11E+06		-20°C
R-12	1,60E+07		-158 °C
R-134a	7,42E+06		-103 °C

Además de los NFPA, se observó el criterio de clasificación de refrigerantes de la UL (Laboratories, Inc.) y NFBU (National Board of Fire Underwriter's):

GRUPO	DEFINICION	EJEMPLOS
<b>1</b>	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 0.5% a 1% con duración de exposición de 5 minutos son letales o producen daños serios.	Bióxido de Azufre (R-764).
<b>2</b>	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 0.5% a 1% con duración de exposición de 30 minutos son letales o producen daños serios.	Amoníaco, Bromuro de Metilo.
<b>3</b>	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 2% a 2.5% con duración de exposición de 1 hora son letales o producen daños serios.	Tetracloruro de Carbono, Cloroformo y Formato de Metilo.
<b>4</b>	Gases o vapores los cuales en concentraciones de 2% a 2.5% con duración de exposición de 2 hora son letales o producen daños serios.	Dicloroetileno, Cloruro de Metilo y Bromuro de Etilo.
<b>Entre 4 y 5</b>	Clasificados como algo menos tóxico que el grupo 4.	Cloruro de Metileno, Cloruro de Etilo y R-113.
<b>5a</b>	Mucho menos tóxico que el grupo 4 pero algo más tóxico que el grupo 6.	R-11, R-22 y Bióxido de Carbono.
<b>5b</b>	Gases o vapores cuyos datos disponibles los clasificarían ya sea en el grupo 5a o grupo 6.	Etano, Propano y Butano.
	Gases o vapores los cuales en concentraciones de por lo menos	R-12, R-500, R-114.

*Figura 5.7-5: Clasificación de refrigerantes por su toxicidad de acuerdo a UL y a la NBFU.*

Analizando el costo, se evalúa que el refrigerante óptimo es el etilenglicol. Sin embargo, desde el punto de vista de seguridad, el refrigerante con menor toxicidad, además del agua, es el R-12 (el de mayor costo). Considerando los puntos de congelamiento de cada uno, se descartó el agua como posible refrigerante. Considerando que el etilenglicol 35% tiene un bajo punto de congelamiento, que a nivel económico es el más rentable y que su toxicidad es baja, se optó por la utilización de este.

### Temperatura y presión de diseño

La temperatura de diseño es la temperatura que se requiere en el proceso del que forma parte el recipiente, a la cual trabaja normalmente. Como medida de seguridad y tal y como se plasma en el "Código ASME, esta temperatura de diseño debe ser siempre superior a la temperatura máxima de servicio.

Según "Eugene F. Megyesy, Manual de recipientes a presión 1992", este requisito se suple utilizando una temperatura de diseño 20°C superior a la temperatura de trabajo.

$$T_{Diseño} = T_{Operativa} + T_{Ambiental} = 5^{\circ}C + 20^{\circ}C = 25^{\circ}C$$

La presión de diseño es la presión utilizada para el diseño del equipo. Esta presión siempre será superior a la presión de operación para que el equipo pueda resistir presiones levemente superiores a la de operación. Es decir, la presión de diseño se aplica para sobredimensionar el equipo y no tener problemas cuando se opera. Viene dada por la siguiente ecuación:

$$P_{Diseño} = P_{Operativa} + \Delta P + 206842,71Pa$$

Donde  $\Delta P$  es la presión hidrostática que viene dada por el peso del fluido en reposo.

$$\Delta P = \rho * g * h$$

Reemplazando en la ecuación, obtengo la siguiente presión de diseño:

$$P_{Diseño} = 3,5 + \frac{839,67 * 9,8 * 2,88}{100000} + \frac{206842,71}{100000} = 6bar$$

### Espesor de la pared del reactor

Para calcular el espesor de pared, se utilizó la bibliografía de la Universidad Nacional de Barcelona. Los datos requeridos para efectuar los cálculos son los siguientes:

Material	Acero inoxidable 316
Presión de diseño	6 kg/cm2
Tolerancia a la corrosión	3 mm
Radio interno	1000 mm
Tensión admisible	2499,26 kg/cm2
Ef. De soldadura	0,6

Se reemplazaron los valores en la siguiente ecuación y se obtuvo el espesor del cilindro, es decir, el espesor de pared del reactor:

$$t_{cilindro} = \frac{P_{Diseño} * r_{Interno}}{S * E_{soldadura} - 0,6 * P_{Diseño}} + C$$

$$t_{Diseño} = \frac{6 * 1000}{2499,26 * 0,6 - 0,6 * 3,7} + 3 = 7,01mm$$

Comercialmente se vende de un espesor de 7,93 mm, teniendo un valor de 63,19 peso por m<sup>2</sup>.

### Espesor de la camisa

Para el cálculo preliminar del radio interno del reactor, se supuso una relación de radio y altura 1:1. Una vez obtenida un área de transferencia adecuada, con valores de caudales y temperatura razonables, se llevó los valores a una relación de radio/altura de 1:1,5 obteniendo así un radio interno de reactor igual a 2m y una altura de 3,1m.

Para definir un espesor de camisa, se supuso un diámetro interno de camisa y se calculó la pérdida de carga. Se comparó esa pérdida de carga con la admisible y se definió ese diámetro:

Diámetro interno de camisa	2,1	m
Diámetro externo de reactor	2,007010813	m
Divisiones de camisa	33,29988679	
Altura de reactor	3,096529395	m
Diámetro de división	0,092989187	m
Longitud de camisa	9,728033999	m
Densidad EG	1050	kg/m3
Área flujo	0,006791329	m2
Caudal EG	1,22116792	kg/s
Velocidad	0,171250286	m/s
Viscosidad EG	8,00E-03	Pa.s
Flujo	179,8128007	kg/(s.m2)
Re	2090,080765	
f	0,410537734	

Para calcular las divisiones de camisa, se buscó igualar el espacio entre la camisa (Di supuesto) y el reactor a la altura de la división (o diámetro de división)

Luego, se calculó el área de flujo (un área circular con una longitud de 9,7m):

$$A_F = \frac{\pi}{4} * (D_i^2 - d_o^2) = \frac{\pi}{4} * (altura de division)^2$$

Con estos valores se pudo calcular la velocidad y el flujo:

$$v = \frac{m}{A_F * \rho}$$

$$G = \frac{m}{A_F}$$

Se calculó Reynolds y Fanning para poder reemplazar finalmente en la ecuación de pérdida de carga:

$$Re = \frac{G * D_{eq}}{\mu}$$

$$f = 1,728 * Re^{-0,188}$$

$$\Delta P = 4 * f * \frac{L}{D} * \rho * \frac{v^2}{2} * \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^a$$

El cociente de viscosidades se simplifica. De esta forma se obtiene un valor de pérdida de carga igual a **2645Pa**. Si se compara con la pérdida de carga admisible, este valor respeta los límites recomendados.

#### Selección del tipo agitador

En los reactores de polimerización del SBR se usan agitadores para conseguir una composición adecuada y evitar los depósitos, además de facilitar la transferencia de calor entre la mezcla homogénea y la camisa.

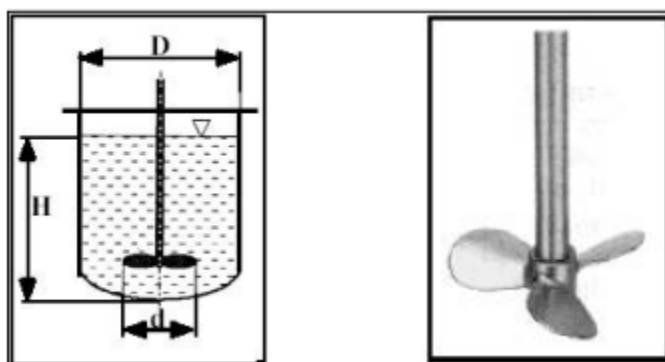
Los tres principales tipos son:

- *Hélice*

El flujo de un impulsor de hélice es axial, trabaja a altas velocidades y se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Las hélices pequeñas pueden girar utilizando transmisión directa a una velocidad que varía entre 1150 y 1750 rpm; las hélices grandes pueden girar entre 400 y 800 rpm. Las corrientes de flujo que salen del impulsor continúan a través del líquido en una dirección determinada hasta que chocan con el fondo o las paredes del estanque.

La columna de fluido axial que produce es altamente turbulenta, generando remolinos de líquido que abandonan el impulsor, arrastrando el líquido estancado. Las placas de este impulsor cortan el líquido, debido a la persistencia de las corrientes de flujo, siendo muy eficaces en estanques de gran tamaño.

Se utilizan para homogenizar, suspender fluidos y favorecer el intercambio de calor.



*Figura 5.7-6: Agitador de tipo hélice.*

- *Turbina*

El impulsor se compone generalmente de numerosas palas cortas, las que giran medias y altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el reactor. Se consideran velocidades medias de 100 a 300 rpm y elevadas de 300 a 1000 rpm. Las placas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales. El impulsor puede ser abierto, semi-cerrado o cerrado. El diámetro puede variar entre un 30 y un 50 % del diámetro del estanque.

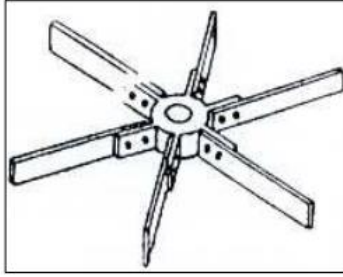
Los impulsores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad, generan fuertes corrientes que se distribuyen por todo el reactor, destruyendo bolsas de fluido estancado.

Cerca del impulsor se produce una zona de corrientes rápidas, una elevada turbulencia y un intenso esfuerzo de corte. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Los componentes tangenciales inducen la formación de vórtices y remolinos, los que se evitan utilizando placas deflectoras o mediante un anillo difusor para lograr que la agitación sea más eficaz.

➤ *Turbina tipo hojas planas:*

Esta variante de impulsor de turbina produce un flujo radial que se desplaza hacia las paredes del reactor. Su diseño es versátil y simple y se utiliza para fluidos cuya viscosidad alcanza hasta los 0.11 Pa·s.

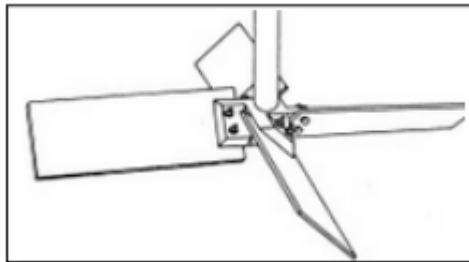
El comportamiento del fluido que mueve es el más predecible de los agitadores.



*Figura 5.7-7: Agitador de tipo turbina hojas planas.*

➤ Turbina de hojas inclinadas:

Este tipo de impulsor combina flujo radial con flujo axial, se utiliza especialmente para homogeneizar y mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines dispuestos en el interior del reactor.



*Figura 5.7-8: Agitador de tipo turbina hojas inclinadas.*

➤ Turbina tipo hojas curvas:

Son especialmente útiles para dispersar materiales fibrosos y poseen un torque inicial menor que las hojas rectas.



*Figura 5.7-9: Agitador de tipo turbina hojas curvas*

➤ Turbina tipo hojas planas y disco:

Este tipo de impulsor produce corrientes radiales y axiales. El disco que posee produce un efecto estabilizante. Se encuentra también con hojas curvas y su diámetro cubre entre un 30 y un 50 % del diámetro del estanque.



*Figura 5.7-10: Agitador de tipo turbina hojas platos y disco*

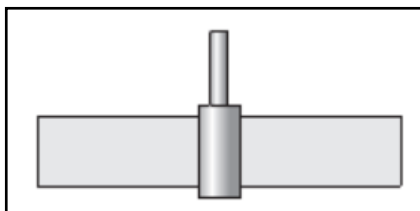
- *Palas*

Por lo general son agitadores de palas planas que giran sobre un eje vertical y cumplen eficazmente problemas sencillos de agitación. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas.

A veces las palas tienen un cierto grado de inclinación, pero lo más frecuente es que su posición sea vertical. Las palas giran a bajas o moderadas velocidades en el centro del estanque, impulsando el líquido radial y tangencialmente, sin que haya prácticamente movimiento vertical a excepción de que las placas se encuentren inclinadas. Las corrientes que generan se desplazan hacia fuera hasta la pared del reactor y después hacia arriba o hacia abajo.

En tanques de gran altura se instalan varias palas, unas sobre otras, en un mismo eje. Los agitadores de palas giran a velocidades comprendidas entre 20 y 150 rpm aproximadamente. La longitud total de un rodete de palas comprende entre el 50 y el 80 % del diámetro interior del estanque y la anchura de la pala es de 1/6 a 1/10 de su longitud.

A velocidades muy bajas los agitadores de palas generan una agitación muy suave en reactores sin placas deflectoras. Para velocidades más elevadas, estas que son necesarias ya que de lo contrario el líquido se desplaza en bloque alrededor del estanque con alta velocidad, pero con poca mezcla.



*Figura 5.7-11: Agitador de tipo palas*

Se considera como componentes principales para el cálculo de la viscosidad de la masa al estireno, el butadieno y el agua, ya que estos 3 se encuentran en mayor cantidad.



Componentes	Caudal (kg/h)	Fracción	Viscosidad (cp)
Butadieno	2948,04711	0,4252801	0,147
Estireno	982,676207	0,14175914	0,696
Agua	3001,28951	0,43296076	1
Total	6932,01283		0,59

Si se considera un promedio según las cantidades y las viscosidades de cada componente, se estima una viscosidad de mezcla igual a 0,59 cp, es decir,  $5,9\text{E-}04$  Pa.s.

Considerando que obedece el tope de viscosidad reglamentario (según la información citada) y que en la mayoría de la bibliografía menciona su uso, se optó por el agitador tipo turbina con hojas planas con 6 paletas, como el de la siguiente imagen:

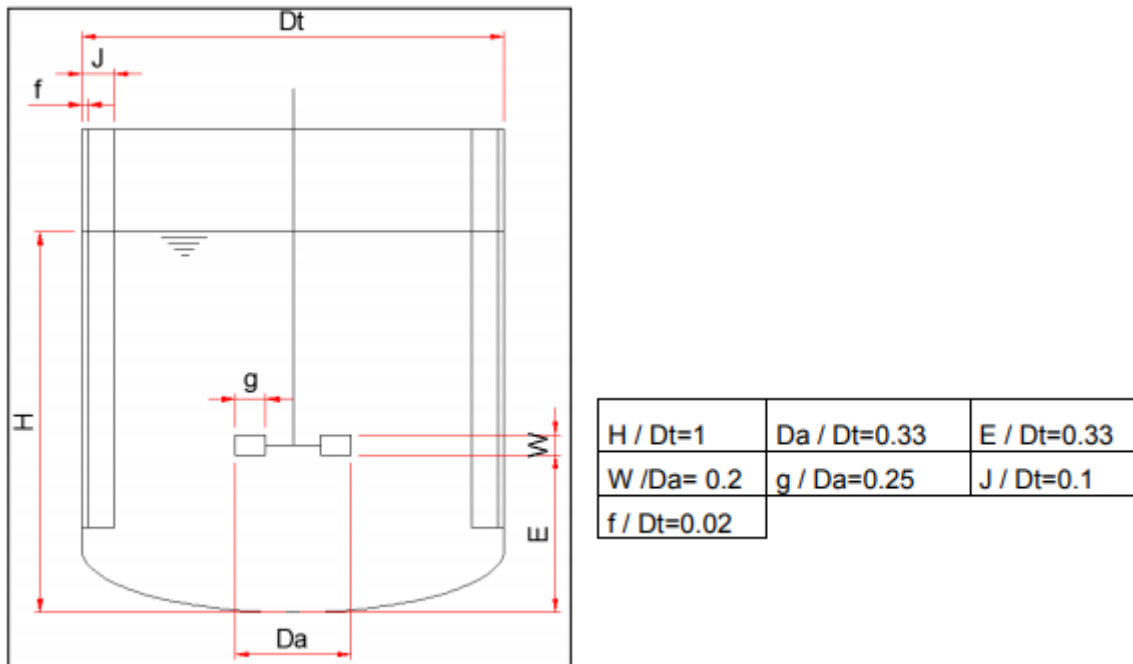


Figura 5.7-12: Diagrama y semejanzas de un agitador tipo turbina

### Dimensionamiento de agitador

Utilizando las semejanzas, se obtienen los siguientes resultados:

Variable	Valor (m)
Diámetro de reactor (Dt)	2
Diámetro de agitador (Da)	0,66
Largo de paleta (g)	0,165
Ancho de paleta (W)	0,132
Altura del fluido (H)	2,876
Separación de la base del reactor (E)	0,66

Además, se utilizarán para el diseño 4 placas deflectoras para evitar los vórtices alrededor del eje y reducir de esta manera los esfuerzos que actúen sobre este. Las dimensiones de las mismas son:

Variable	Valor (m)
Ancho de la placa (J)	0,2
Espacio entre la placa y el reactor (f)	0,04

#### *Cálculo de la potencia en el agitador*

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del fluido agitado debe ser capaz de llegar hasta las partes más lejanas del estanque, donde la velocidad de circulación y la turbulencia del fluido son factores importantes para la eficacia de la operación. Por lo tanto, es importante conocer la potencia consumida con el fin de cumplir con el objetivo deseado.

Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia. Estos gráficos van a depender de las características geométricas del agitador y de la presencia de placas deflectoras.

A continuación, se realizan los siguientes cálculos:

- Numero de Reynolds:

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido. Su ecuación es:

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu}$$

Donde se define como N a la velocidad de rotación. Para esto, se define como velocidad media para una turbina las velocidades pueden ser del orden de las 100 a las 300 rpm. Por lo que para la realización de los cálculos posteriores se define una velocidad de 115 rpm.

Teniendo en cuenta además los datos calculados anteriormente, se procede a reemplazar en la ecuación:

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu} = \frac{1,917 \text{ rps} \times (0,66)^2 \text{ m}^2 \times 709,04 \text{ kg/m}^3}{0,00059 \text{ Pa.s}} = 1,003 \times 10^6$$

Con este valor de  $Re > 10000$ , se define que el flujo es turbulento.

- Numero de Potencia:

El número de Potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia.

Su ecuación es:

$$Np = \frac{P}{N^3 d^3 \rho}$$

Al tener deflectores y ser el flujo turbulento, el  $Np$  es independiente del  $Re$  y la viscosidad no influye. Por lo tanto, la potencia puede estimarse a partir del producto del flujo generado por el impulsor y la energía cinética por unidad de volumen del fluido.

El siguiente grafico de  $Np$  v/s  $Re$ , se utiliza para estimar la potencia de un impulsor de turbina de 6 placas planas y un reactor con 4 placas deflectoras:

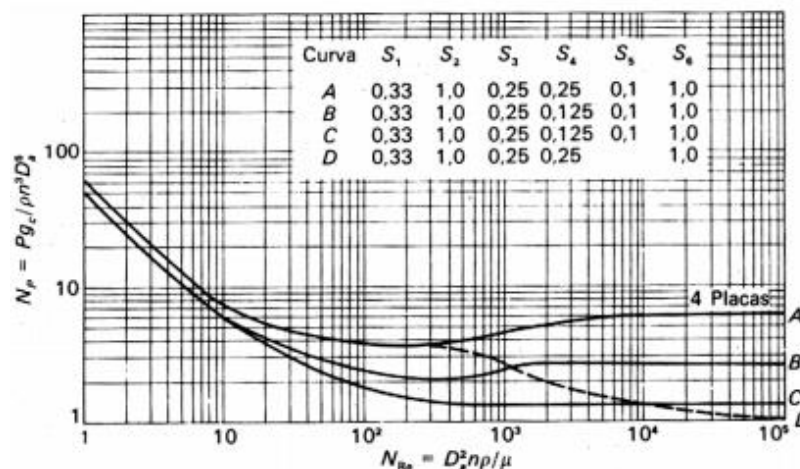


Figura 5.7-13: Grafico de correlaciones de potencia para un reactor con una turbina de 6 placas planas y 4 placas deflectoras.

Como se ve en el grafico llega hasta  $Re = 10^5$ , pero considerando que el mismo se mantiene constante, supongo que para el Reynolds calculado anteriormente,  $Np = 7$ .

- Potencia:

Despejando la ecuación de  $N_p$ , obtengo la potencia:

$$P = N_p (N^3 \times d^5 \times \rho) = 7 \times ((1,917 rps)^3 \times (0,66m)^2 \times 709,04 \frac{kg}{m^3}) = 15231 W$$
$$= \mathbf{20,5 HP}$$

### 5.7.2 Columna de Stripping

Las torres de stripping son muy usadas en la industria a lo largo y ancho de los diferentes rubros, como hidrocarburos, alimentos, industria química, entre otros. La operación stripping puede hacer referencia a una operación de destilación de agotamiento, una desorción, o ambas, dependiendo de las características del proceso y lo que se desee hacer. En el presente proyecto, se tomará como una operación de desorción para cumplir con los objetivos requeridos.

Esta operación se trata de bombear una corriente líquida dentro de una torre/columna, en la cual se inyecta un caudal de vapor o gas, con la intención de desorber cierto soluto volátil presente en el líquido, siguiendo el principio de diferencia de concentraciones en ambas fases de acuerdo con el equilibrio Líquido-Gas.

Dicha torre puede contener un relleno empacado o platos perforados que aumenten el contacto entre los fluidos, y por consiguiente, la efectividad de separación del equipo.

#### Utilidad dentro del proceso en cuestión

En el proceso de producción de e-SBR, llegado a la etapa de recuperación de una de las materias primas (el estireno), se busca extraer la mayor cantidad posible de la misma, no solo para “limpiar” la línea principal del producto, sino para disponer del monómero sin reaccionar. Si a la torre se la alimenta con vapor de agua, y como el estireno es una sustancia con un punto de ebullición menor que el agua, la operación consiste solo en una desorción (sin destilación) con un buen margen de separación del monómero alimentado (mayor al 95%).

#### Diseño y verificación (número de etapas, balance y rendimiento)

##### *Consideraciones y objetivos*

Para calcular el número de etapas y los caudales correspondientes, se utilizó el procedimiento descrito en “Operaciones de transferencia de masa - Treybal” para el caso de una desorción multietapa para sistema bicomponente.

Cabe aclarar, que si bien el sistema no solo contiene agua y estireno, se lo considero de este modo para facilitar los cálculos, considerando que este modelo no genera un gran cambio con respecto a la realidad por los siguientes motivos: la corriente real de proceso contiene estireno, agua, SBR emulsionado, y trazas de butadieno y demás aditivos en pequeñas cantidades (menores al 1% m/m). En el caso de las trazas, se las desprecia por la baja concentración y volatilidad con respecto a los demás componentes (el butadieno es más volátil que el estireno, pero volviendo a la cantidad, no afecta el resultado de % de desorción). Y por el lado del SBR, si bien

se encuentra en una cantidad considerable, se lo puedo comparar al agua ya que tiene una baja volatilidad y una densidad muy similar ( $950\text{Kg/m}^3$ ). En conclusión, el sistema teórico para los cálculos queda Estireno-agua, suponiendo la cantidad de SBR como si fuese agua, y sin considerar el butadieno ni los aditivos. Como primer objetivo se estableció poder separar el 99% del estireno.

### Desarrollo

Para obtener el número de platos, primero se estimó la curva de equilibrio Líquido-Vapor como una aproximación lineal (por la baja concentración de estireno) a la obtenida con el programa Aspen HYSYS.

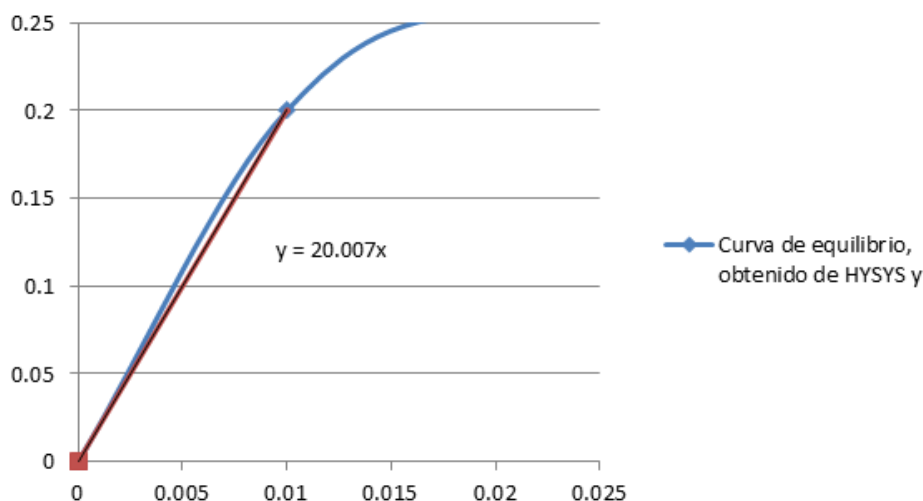


Figura 5.7-14: Aproximación lineal de la curva de equilibrio XY Líquido-Vapor (Estireno-Agua).

Para obtener la curva de operación, se utiliza un modelo lineal donde la pendiente se calcule como el cociente de L y G, siendo L y G los caudales molares de las corrientes de entrada de líquido y vapor respectivamente, y pase por el punto correspondiente a la fracción molar del 99% de desorción para el líquido de salida y 0 para la fracción de entrada de vapor de agua.

Utilizando un proceso de iteración, variando el número de platos para alcanzar el porcentaje de desorción fijada, se obtiene el gráfico a continuación, dando finalmente 22 etapas y 325 Kg/h de caudal de vapor para la separación del 99% de estireno.

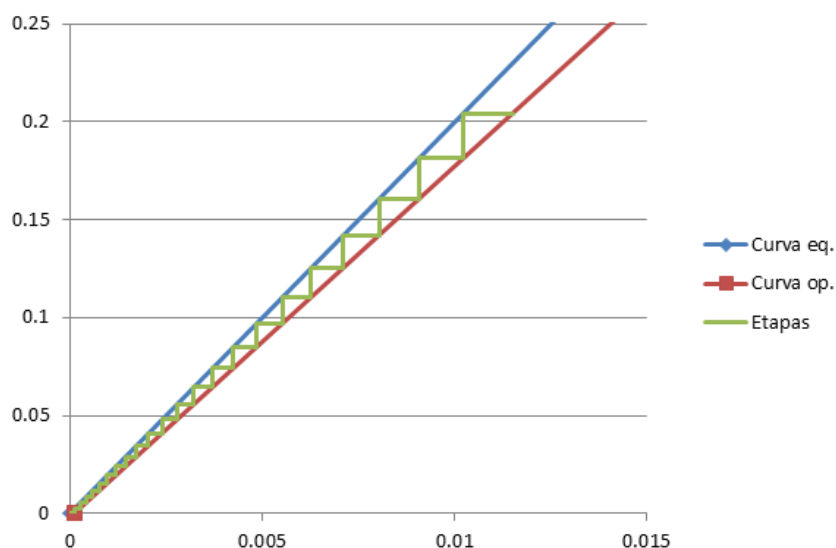


Figura 5.7-15: Número de etapas graficadas entre la curva de equilibrio y la operativa.

Para verificar el número de platos se utilizó la siguiente formula, extraída del Treybal, para modelo de desorción.

$$N_p = \frac{\log \left( \frac{x_0 - y_{N_p+1}/m}{x_{N_p} - y_{N_p+1}/m} \left( 1 - \frac{1}{S} \right) + \frac{1}{S} \right)}{\log(S)}$$

Por último, el balance de masa queda de la siguiente manera:

	Salida		Entrada	
	L	G	L	G
Caudal másico [kg/h]	5781	710,1	6166	325,6
Caudal molar [kmol/h]	320,9	21,82	324,7	18,09
X e Y de Estireno	0,014%	20,43%	1,150%	0,000%

## Diseño mecánico y dimensionamiento

### *Consideraciones y objetivos*

Para la elección del tipo de superficie de contacto, se resolvió utilizar platos perforados debido a que, si bien la corriente de proceso contiene emulsionante y resultaría mejor hacer uso de relleno empacado para una mayor eficiencia del

volumen necesario del equipo, también es cierto que al contener látex resulta una corriente “sucia” que lleva a precisar de limpieza de equipos con mayor frecuencia. Por esta razón, se lo considera un factor determinante en comparación a la existencia de emulsionante, llevando así a descartar el relleno empacado por la ardua tarea y tiempo requerido para limpiarlo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se escogió el modelo de dimensionamiento de columnas con platos perforados del Treybal.

Continuando con el diseño mecánico, se utilizaron los modelos de acuerdo a “COMPENDIO de Cálculo Estructural para ingeniería mecánica y aeronáutica – Massa”, donde se explican los tipos de materiales indicados, espesores, entre otras cuestiones estructurales.

### *Desarrollo del dimensionamiento*

Para el dimensionamiento del diámetro interno de la columna, primero se realizan algunas suposiciones, como la utilización de arreglo triangular de orificios de los platos, con una separación de centro a centro de 10 mm y un diámetro de orificios de 3 mm (como dato adicional, según las tablas de Treybal, dan 2 mm de espesor de platos). Además, se establece como base 50 cm de separación entre platos.

Primero se calcula el factor de  $A_0/A_a$ , que es el cociente del área de orificio con el área activa calculada con el paso entre orificios. Dicho factor da 0,1275; y como es mayor que 0,1; se continua con la fórmula del factor de inundación, según el modelo del Treybal, para el cálculo de Alpha y Beta.

$$C_F = \left( \alpha \cdot \log \left( \frac{1}{(L'/G')(\rho_G/\rho_L)^{0,5}} \right) + \beta \right) \left( \frac{\sigma}{0,020} \right)^{0,2}$$



1. Constantes de inundación $C_F$ [Eqs. (6.29) and (6.30)], $d_p < 6 \text{ mm}$ ( $\frac{1}{4}$ in)					
Rango de $\frac{A_o}{A_a}$	Rango de $\frac{L'}{G'} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.5}$	Unidades de $t$	Unidades de $o$	Unidades de $V_F$	$\alpha, \beta$
> 0.1	0.01–0.1, utilizar valores en 0.1				
		m	N/m	m/s	$\alpha = 0.0744t + 0.01173$ $\beta = 0.0304t + 0.015$
		en	dinas/cm X $10^{-3}$	ft/s	$\alpha = 0.0062t + 0.0385$ $\beta = 0.00253t + 0.050$
< 0.1 Multiplicar $\alpha$ y $\beta$ por $5A_o/A_a + 0.5$					

Figura 5.7-16: Tabla para el cálculo del factor de inundación ( $C_f$ ) para torres de platos perforados.

De este modo, utilizando como dato una tensión superficial estimada de 0,03 N/m para el líquido espumoso, y comprobando que el denominador de la expresión logarítmica de la ecuación anterior se encuentra entre 0,1 y 1; de la tabla de la figura 5.8-16 se calculan los factores Alpha y Beta.

Finalmente, se puede obtener el factor de inundación ( $C_f$ ) según la fórmula anterior, dando como resultado 0,0802.

Teniendo el factor de inundación, se puede calcular la velocidad de flujo ideal ( $v_f$ ) con la siguiente formula:

$$V_F = C_F \left( \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_G} \right)^{0.5}$$

Reemplazando con los datos vistos anteriormente, se obtiene un resultado de 3,84 m/s. Debido a la existencia de un aditivo emulsionante en el líquido, y por lo tanto considerando dicho liquido como espumoso, a  $v_f$  se lo multiplica por un factor de 0,75 para obtener la velocidad real ( $v$ ), dando un valor de 2,88 m/s.

Una vez calculada la velocidad de flujo real y comprobando el caudal volumétrico de vapor (0,219 m<sup>3</sup>/s), se procede a estimar el área de flujo de vapor, quedando así en 0.76m<sup>2</sup>.

En base a la tabla de longitud de derramamiento, se supone una relación de 0,8 entre la distancia de derrame y el diámetro de la columna para optimizar el área de

Longitud del derramadero $W$	Distancia desde centro de la torre	Porcentaje del brea de la torre utilizada por un vertedero %
0.55 $T$	0.4181 $T$	3.877
0.60 $T$	0.3993 $T$	5.257
0.65 $T$	0.25167	<b>6.899</b>
0.70 $T$	0.3562 $T$	8.808
0.75 $T$	0.32% $T$	11.255
0.80 $T$	0.1991 $T$	14.145

flujo del líquido, y establecer un 14,14% de vertedero.

Figura 5.7-17: Tabla de longitud de derramamiento para platos de flujo transversal

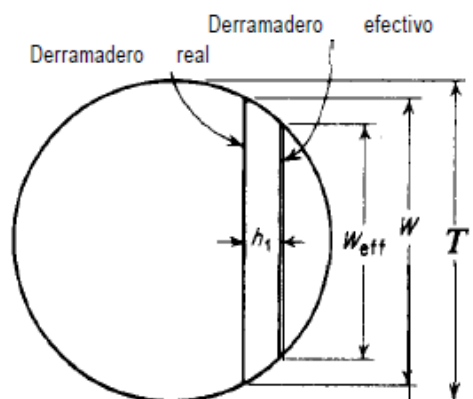


Figura 5.7-18: Corte trasversal de la columna.

Para calcular el área total del plato, se utiliza la siguiente formula:

$$A = \frac{A_0}{1 - \%w}$$

Dando como resultado 0,95 m<sup>2</sup>. El área efectiva multiplicando el área total por la fracción de área de plato, obteniéndose 0,82 m<sup>2</sup>, y por último el diámetro interno de la torre que resulta ser de 1 m.

#### Verificación del dimensionamiento

Para corroborar que los valores calculados del dimensionamiento llevan a un desempeño óptimo de la torre, se debe verificar que no caiga fuera de la zona satisfactoria de operación, para evitar que se produzcan fenómenos indeseados como lloriqueo, arrastre o inundación.

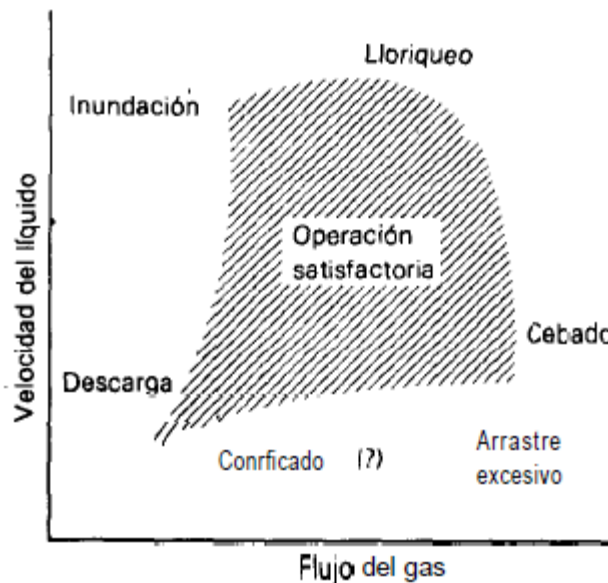


Figura 5.7-19: Zona óptima de desempeño de torres con platos/relleno.

Para verificar la torre y garantizar una separación óptima, se debe calcular la pérdida de carga y comprobar que cumple con la siguiente condición de operación:

$$h_W + h_1 + h_3 < \frac{t}{2}$$

Primero, se estima el  $h_W$  en 15 mm (por heurístico). Luego se procede a calcular el  $h_1$  según la siguiente fórmula:

$$h_1 = 0,666 \left( \frac{q}{W} \right)^{2/3} \left( \frac{W}{W_{eff}} \right)^{2/3}$$

Utilizando una relación de  $W/W_{eff}$  de 0,938; el  $h_1$  da como resultado 14 mm.

Para calcular el valor de  $h_3$ , hay que estimar el de  $h_2$  y  $h_G$ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$h_3 = h_G + h_2$$

Donde  $h_2$  se calcula con la siguiente ecuación, dando como resultado 3 mm.

$$h_2 = \frac{3}{2g} \left( \frac{A}{A_{da}} \right)^2$$

Y  $h_G$  se obtiene según la siguiente ecuación:

$$h_G = h_D + h_L + h_R$$

Para este último, primero se calcula el término de  $h_D$  (caída de presión en el plato seco):

$$\frac{2h_D \cdot g \cdot \rho_L}{V_0^2 \cdot \rho_G} = C_d \left( 0,40 \left( 1,15 - \frac{A_0}{A_n} \right) + \frac{4l \cdot f}{d_0} + \left( 1 - \frac{A_0}{A_n} \right)^2 \right)$$

Siendo,  $C_d$ :

$$C_d = 1,09 \left( \frac{d_0}{l} \right)^{0,25} = 1,2$$

Por lo que, calculando el  $h_D$ , da como resultado en 7,8 mm.

Para el  $h_L$  (caída de presión por profundidad del líquido en el plato), se aplica la fórmula siguiente, y se obtiene 0,3 mm.

$$h_L = 0,24 + 0,725h_W - 0,29h_W V_a \rho_G^{0,5} + 4,48 \frac{q}{z}$$

Y, en el caso de  $h_R$  (caída de presión residual), se utiliza la fórmula correspondiente, y se obtiene 6,6 mm.

$$h_R = \frac{\Delta P_R g_{L'}}{\rho_L g} = \frac{6a \cdot g_{L'}}{\rho_L d_0 g}$$

Con todos estos valores, ya se puede sumar  $h_W$ ,  $h_1$  y  $h_3$  y realizar la comparación con el paso entre platos ( $t$ ), que es de 500 mm.

$$h_W + h_1 + h_3 = 217 \text{ mm}$$

$$\frac{t}{2} = \frac{500 \text{ mm}}{2} = 250 \text{ mm}$$

$$217 \text{ mm} < 250 \text{ mm}$$

Por lo tanto, el dimensionamiento cumple con las condiciones óptimas que el diseño debe tener.

### *Diseño mecánico y verificación*

El primer paso para el diseño mecánico es elegir el modelo de diseño para presión externa sobre secciones cilíndricas, y posteriormente estimar el espesor y la

separación entre los anillos externos, de unión entre los segmentos. Para eso, se supone un espesor de 5 mm, y una separación de anillos de 5,5 m. Con estos datos, se calcula las relaciones de  $L/D_0$  y  $D_0/t$  (donde  $t$  es el espesor), resultando en 5,44 y 202 respectivamente.

Teniendo estas relaciones, se busca el valor de la relación geométrica ( $A$ ) en la siguiente tabla, dando en este caso 0,00024.

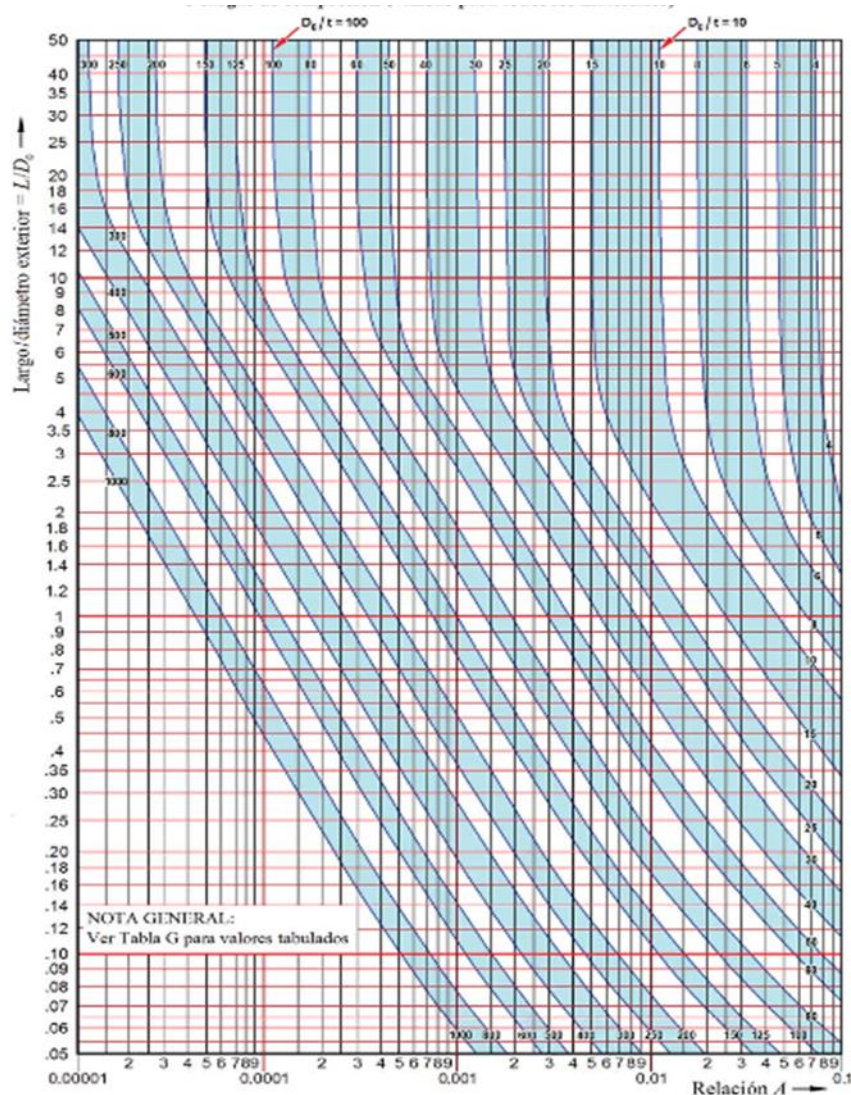


Figura 5.7-20: Relaciones geométricas para componentes sometidos a presión exterior o cargas de compresión.

Se selecciona un material resistente a la oxidación, en este caso el acero Austenítico 18Cr-8Ni (tipo 304). Del gráfico relación de geometría y tensión, se fija la temperatura (en este caso, 100°C aproximadamente) y la relación geométrica anteriormente obtenida, y se ubica el valor de la tensión admisible ( $B$ ) y el módulo

de elasticidad (E), arrojando los valores de 22.32 Mpa y 186000 Mpa respectivamente.

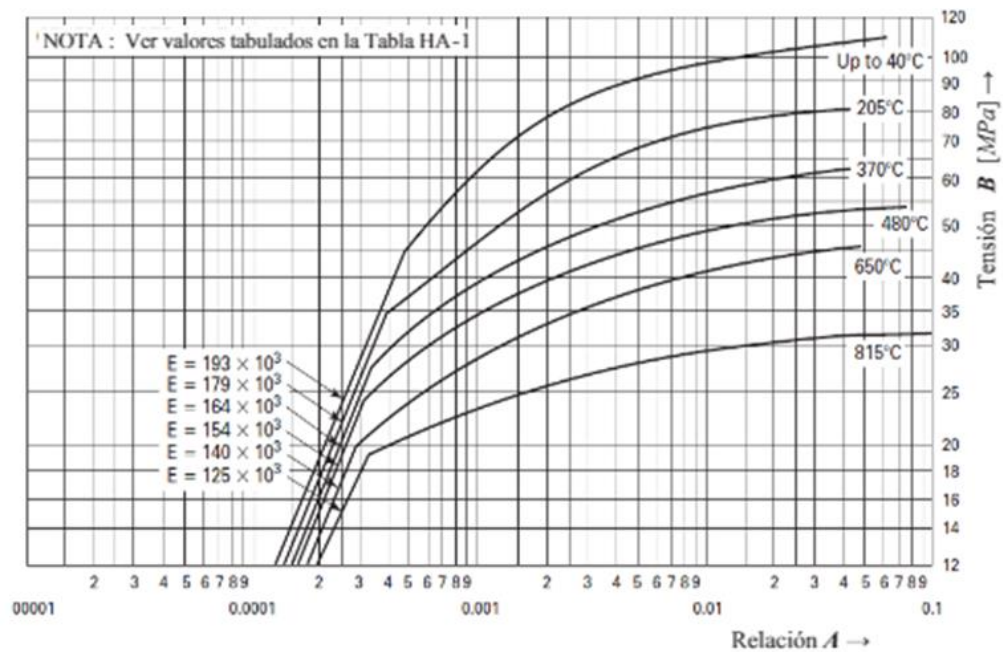


Figura 5.7-21: Grafico de relación geométrica en función de la tensión admisible para acero tipo 304.

Finalmente, se calcula la presión máxima admisible de acuerdo a la siguiente fórmula, que debe ser superior a la atmosférica más un margen de seguridad del 20%, dando en nuestro caso 0,14 MPa, mayor que 1,2 Atm.

$$P_a = \frac{4B}{3(D_0/t)}$$

En el siguiente cuadro se muestran los resultados para el diseño mecánico de la sección cilíndrica, para una temperatura aproximada de 85°C y una presión externa de 1 atm.

Columna cilíndrica	
Espesor de pared, t [mm]	5
Espaciado entre anillos, L [m]	5,75
Diámetro interno, D [m]	1,000
Diámetro externo, D0 [m]	1,010
L/D0	5,7
D0/t	202
Relación geométrica, A	0,00024
Material	Acero Austenítico 18Cr-8Ni (Tipo 304)
Módulo de elasticidad, E [Mpa]	186000
Tensión, B [Mpa]	22,32
Presión máxima admisible, P0 [atm]	1,47

Ahora bien, para el diseño mecánico de los cabezales, se optó por elegir los del tipo torisférico, debido a su bajo costo. Y a continuación, se supuso un espesor de 4 mm, para luego seguir el mismo esquema de pasos que en el dimensionamiento del cilindro, con la diferencia que para calcular la tensión admisible (B), se usa la relación  $R_0=D$ . donde D era el diámetro de la torre.

$$B = \frac{A \cdot E}{2}$$

Teniendo esto en cuenta, se obtiene una presión admisible de 0,15 MPa; mayor a 1,2 Atm.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados obtenidos para el cabezal, verificando las condiciones de funcionamiento requeridas.

Cabezal Torisférico	
Espesor de pared, t [mm]	4
Radio máximo externo, R0 [m]	1,004
R0/t	251
Relación geométrica, A	0,00050
Material	Acero Austenítico 18Cr-8Ni (Tipo 304)
Módulo de elasticidad, E [Mpa]	186000
Tensión admisible, B [Mpa]	38
Presión máxima admisible, P0 [atm]	1,51



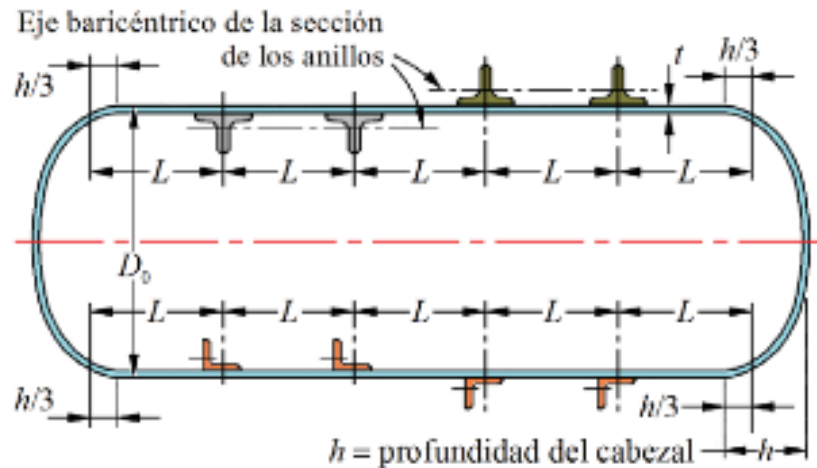
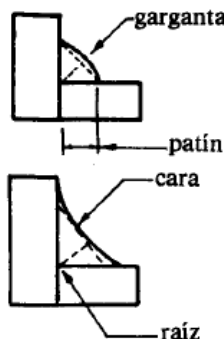


Figura 5.7-22: Esquema de una columna con cabezales torisféricos.

Respecto a las uniones de los cabezales, conexiones y segmentos del taque, se proponen soldaduras sin costura. Por el refuerzo de las conexiones de más de 3" (7,62 cm), se requieren de juntas soldadas de filete tipo garganta, con tamaño mínimo de 3/16" (5 mm aproximadamente), de acuerdo con los datos obtenidos del "Manual de Recipientes" de Megyesy.

#### Dimensión de la soldadura



El tamaño de una soldadura de filete de lados iguales es la dimensión del cateto del triángulo rectángulo más grande de 45° que pueda inscribirse en la sección transversal de la soldadura.

El tamaño de una soldadura de filete de patines desiguales es la distancia más corta de la raíz a la cara de la soldadura.

$$\text{Dimensión de la garganta} = 0.707 \times \text{dimensión del patín.}$$

#### Tamaño mínimo de soldadura\*

Espesor de la placa más gruesa, pulg.	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	Más de 1 1/2
Tamaño mínimo de la soldadura de filete, pulg.	3/16	1/4	5/16	3/8	1/2	5/8

\* El tamaño de la soldadura no necesita ser mayor que el espesor de la parte más delgada que una.

Figura 5.7-22: Tabla y esquema de juntas soldadas.

Para concluir la etapa de diseño y dimensionamiento, se realizaron estimaciones sobre el tamaño de aperturas de conexiones y paso de hombre (para llevar a cabo limpieza del equipo). En el caso de las conexiones, se varió el diámetro de la apertura para situarlo en un valor donde cumpla con el rango de velocidades



usuales para ese fluido. Por otro lado, el paso de hombre tiene un mínimo recomendado de 50 cm de diámetro, y como la columna posee un 1 m de diámetro, se eligió este valor mínimo de 50 cm en nuestro caso para las dos aperturas/pasos establecidos (se eligieron dos para un mejor acceso a la limpieza, reparaciones internas y mantenimiento). En cuanto al espesor de los accesorios se estableció 5 mm, sabiendo que es el mismo espesor de la parte cilíndrica y en el caso de estos accesorios redondeados, por su forma soportan una mayor presión. Es importante señalar que la velocidad para el fluido líquido en las conexiones, verifica el rango de 1-3 m/s al igual que la velocidad para el fluido vapor, que verifica el rango de 9-15 m/s.

A manera de datos extra obtenidos, que pueden resultar de interés, se calcularon características finales del equipo como la altura total con los cabezales y el peso total incluyendo los platos,

En las siguientes tablas, se vuelven al mostrar los resultados de interés obtenidos:

<b>Especificaciones de accesorios</b>	
Espesor de conexiones [mm]	5
Altura de conexión [mm]	45
Refuerzos	juntas filete tipo garganta
Tamaño de refuerzo [mm]	5
Unión	Soldada sin costura
<b>Conexiones: entrada y salida de líquido</b>	
Diámetro interno [cm]	3
Velocidad [m/s]	2,44
<b>Conexión: entrada de vapor</b>	
Diámetro interno [cm]	10
Velocidad [m/s]	11,5
<b>Conexión: salida de vapor</b>	
Diámetro interno [cm]	14
Velocidad [m/s]	12,6
<b>Paso de hombre</b>	
Diámetro interno [cm]	50
Cantidad	2
Separación de centro a centro [m]	6

*Tabla 5.7-1: Resultados del diseño de aperturas y conexiones.*

Especificaciones del equipo	
Material	Acero Austenítico 18Cr-8Ni (Tipo 304)
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	7930
Altura de la sección cilíndrica [m]	11,5
Altura con los cabezales [m]	12,508
Diámetro Externo [m]	1,010
Espesor de cilindro [mm]	5
Espesor de cabezal [mm]	4
Numero de platos	22
Espesor de plato [mm]	3
Área de plato/Área transversal	75%
Masa del equipo incluyendo platos [kg]	1785
Numero de anillos	3
Conexiones (entrada/salida)	4
Paso de hombre	2
Tipo de Unión	Soldada sin costura
Tipo de refuerzos	juntas filete tipo garganta
Presión externa máxima admisible [atm]	1,5
Masa aproximada de la estructura externa (vigas, soportes, escaleras y descanso) [kg]	2500

*Figura 5.7-2: Tabla de resultados generales de la columna.*

Por último, se calculó el peso de la plataforma estructural de soporte y circulación del personal, con un valor aproximado de 2500kg. Tal estructura comprende los soportes, descanso y escaleras que rodean y dan acceso al recipiente a la hora de realizar reparaciones, limpieza y mantenimiento.

## 5.8 Layout

En este capítulo se desarrolla la distribución de presente planta productiva, la cual consiste en el ordenamiento físico de los elementos industriales, incluyendo, los espacios necesarios para el movimiento de los materiales, la disposición de los equipos, los sectores de trabajo, las zonas de almacenamiento, servicios auxiliares y espacios comunes dentro de la instalación productiva

Se abarca la integración de las diferentes áreas funcionales dentro de nuestra planta, con el fin de organizar cada elemento para asegurar, tanto, la fluidez del flujo de trabajo y la optimización en el traslado de materias primas y producto terminado, como también, garantizar una adecuada interacción entre personas e información.

### *Objetivos de la distribución de Planta*

El objetivo primordial es hallar una distribución que sea la más económica para el trabajo y su vez, la más segura y satisfactoria para los empleados. Además, de los siguientes objetivos.

- ✓ Integración global de todos los factores que afectan a la distribución.
- ✓ Mínimas distancias en el movimiento de materiales.
- ✓ Circulación fluida del trabajo en la Planta, eliminando todos los movimientos inútiles o redundantes
- ✓ Utilización eficiente de todo el espacio.
- ✓ Seguridad para trabajadores, producto y medio ambiente.
- ✓ Facilitar la comunicación y la interacción entre el personal, tanto de forma interna como externa.
- ✓ Disposición flexible que pueda ser fácilmente reajustada a otras condiciones
- ✓ Cumplimiento de leyes vigentes

### *Criterios relevantes para el diseño layout*

Se tienen en cuenta los siguientes criterios para lograr una adecuada distribución de planta:

- ✓ Topografía del terreno y dirección de los vientos.
- ✓ División en unidades de operación.
- ✓ Calderas y bombas de agua que funcionen como servicios auxiliares serán alejadas de las zonas de producción.

- ✓ Tanques de almacenamiento de productos inflamables como el butadieno y el estireno se ubicarán lejos del edificio central, también se alejará la Zona de Tratamiento de efluentes.
- ✓ Contar con Línea de incendio y reserva de agua.
- ✓ Circulación de camiones: ancho de calles (función tipo vehículos, maniobras de carga y descarga) y curvas
- ✓ Depósitos y almacenes.
- ✓ Facilidades para el montaje

#### 5.8.1 Método simplificado de Richard Muther

##### *Análisis de las relaciones entre actividades*

Se plantea el tipo y la intensidad de las interacciones existentes entre las diferentes actividades productivas, los medios auxiliares, los sistemas de manipulación y los diferentes servicios de la planta.

Estas relaciones no se limitan a la circulación de materiales, pudiendo ser ésta irrelevante o incluso inexistente entre determinadas actividades. La no existencia de flujo de materiales entre dos actividades no implica que no puedan existir otro tipo de relaciones que determinen, por ejemplo, la necesidad de proximidad entre ellas; o que las características de determinado proceso requieran una determinada posición en relación a determinado servicio auxiliar. El flujo de materiales es solamente una de las razones para la proximidad de ciertas operaciones unas con otras.

Entre otros aspectos, también se considera en esta etapa, las exigencias constructivas, ambientales, de Higiene y Seguridad en el Trabajo, los sistemas de manipulación necesarios, el abastecimiento de energía, el almacenaje transitorio de residuos y desperdicios, etc.

##### *Diagrama de Relaciones Interdepartamentales*

Para poder representar las relaciones existentes de una manera lógica y que permita clasificar la intensidad de dichas relaciones, se emplea la tabla relacional de actividades (Tabla 5.9-1), consiste en un diagrama de doble entrada, en el que quedan plasmadas las necesidades de proximidad entre cada actividad y las restantes según los factores de proximidad definidos a tal efecto.

Es habitual expresar estas necesidades mediante un código de letras, siguiendo una escala que decrece con el orden de las cinco vocales: A (absolutamente necesaria), E (especialmente importante), I (importante), O (importancia ordinaria) y U (no importante); la indeseabilidad se representa generalmente por la letra X.

Valor	Cercanía
A	Absolutamente necesaria
E	De especial importancia
I	Importante
O	Poco importante
U	No importante
X	Indeseable

Tabla 5.8-1: Código de letras

	Edificio de brigada	Seguridad, Higiene y MA	Zona de efluentes	Zona de servicios auxiliares	Zona de almacenamiento de MP	Zona de producción	Zona de almacenamiento producto final	Sala de control	Logística	Edificio administrativo	Comedor	Estacionamiento de camiones	Estacionamiento del personal	Laboratorio	Mantenimiento e Ingeniería	Vestuarios	Sanitarios	Servicio médico	Vigilancia/ Recepcion	Pañol/ Almacen
Pañol/ Almacen	E	I	X	X	O	O	O	U	U	O	I	X	X	I	I	I	I	O	U	
Vigilancia/ Recepcion	I	I	X	X	X	X	X	X	A	E	O	A	I	X	X	U	E	U		
Servicio médico	A	I	X	U	I	I	I	I	I	I	I	O	I	E	E	U	A			
Sanitarios	U	I	X	X	U	X	U	E	E	E	E	X	O	E	E	E				
Vestuarios	U	O	X	X	X	X	X	O	U	O	O	X	X	X	I					
Mantenimiento e Ingeniería	I	E	X	E	O	A	O	I	U	O	I	X	X	I						
Laboratorio	I	E	I	I	E	I	E	U	O	U	I	E	X							
Estacionamiento del personal	O	U	X	O	X	X	X	U	U	E	U	X								
Estacionamiento de camiones	O	I	X	X	A	O	A	X	A	X	X									
Comedor	X	O	X	X	X	X	X	I	O	A										
Edificio administrativo	O	I	X	X	X	X	X	O	U											
Logística	I	I	X	U	A	I	A	X												
Sala de control	I	O	I	E	U	A	U													
Zona de almacenamiento producto final	I	I	X	X	U	E														
Zona de producción	I	I	U	I	E															
Zona de almacenamiento de MP	I	I	X	X																
Zona de servicios auxiliares	X	U	U																	
Zona de efluentes	X	X																		
Seguridad, Higiene y MA	I																			
Edificio de brigada																				

Tabla 5.8-2: Tabla relacional de actividades

Se define cada relación en función del flujo de materiales, el flujo de personas, la facilidad de supervisión, fácil acceso, el grado de contacto comunicativo el control y la convivencia.

El siguiente rango numérico indica la cantidad de movimientos aproximados para cada letra:

Valor	Movimientos
A	50-89
E	30-49
I	10-29
O	5-9
U	1-4
X	0

Tabla 5.8-3: Código de movimientos

### 5.8.2 Distribución tentativa de áreas

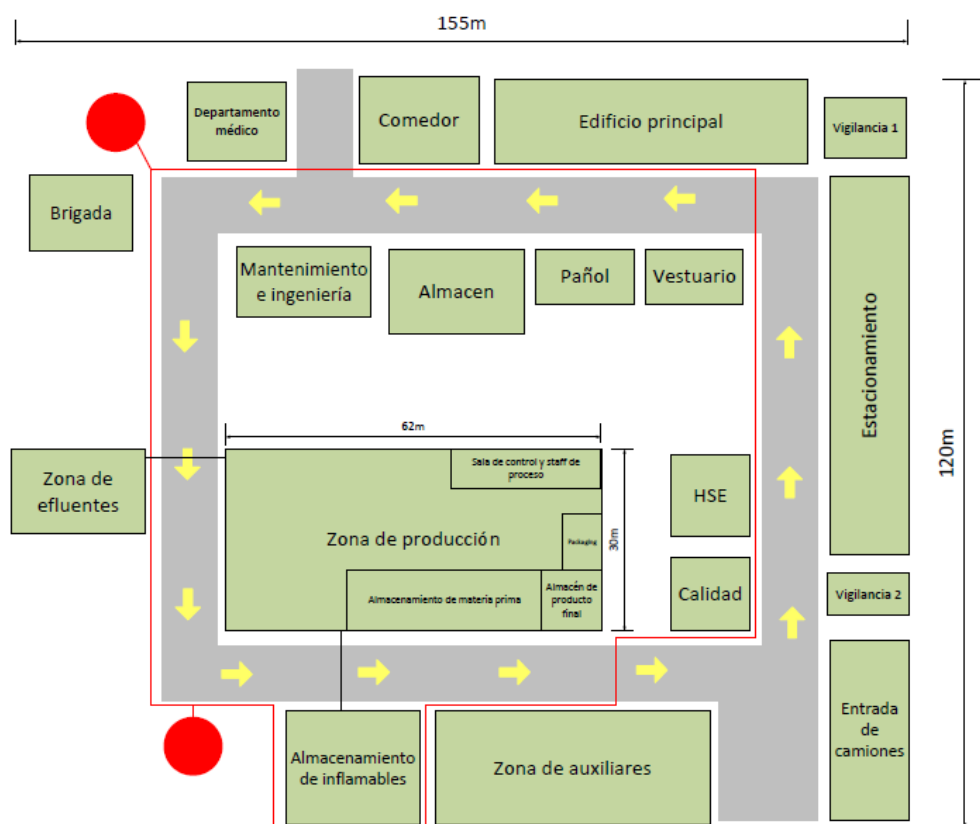


Figura 5.8-1: Representación gráfica de la distribución de áreas de la planta productiva.

### 5.8.3 Distribución tentativa de equipos en la zona de producción

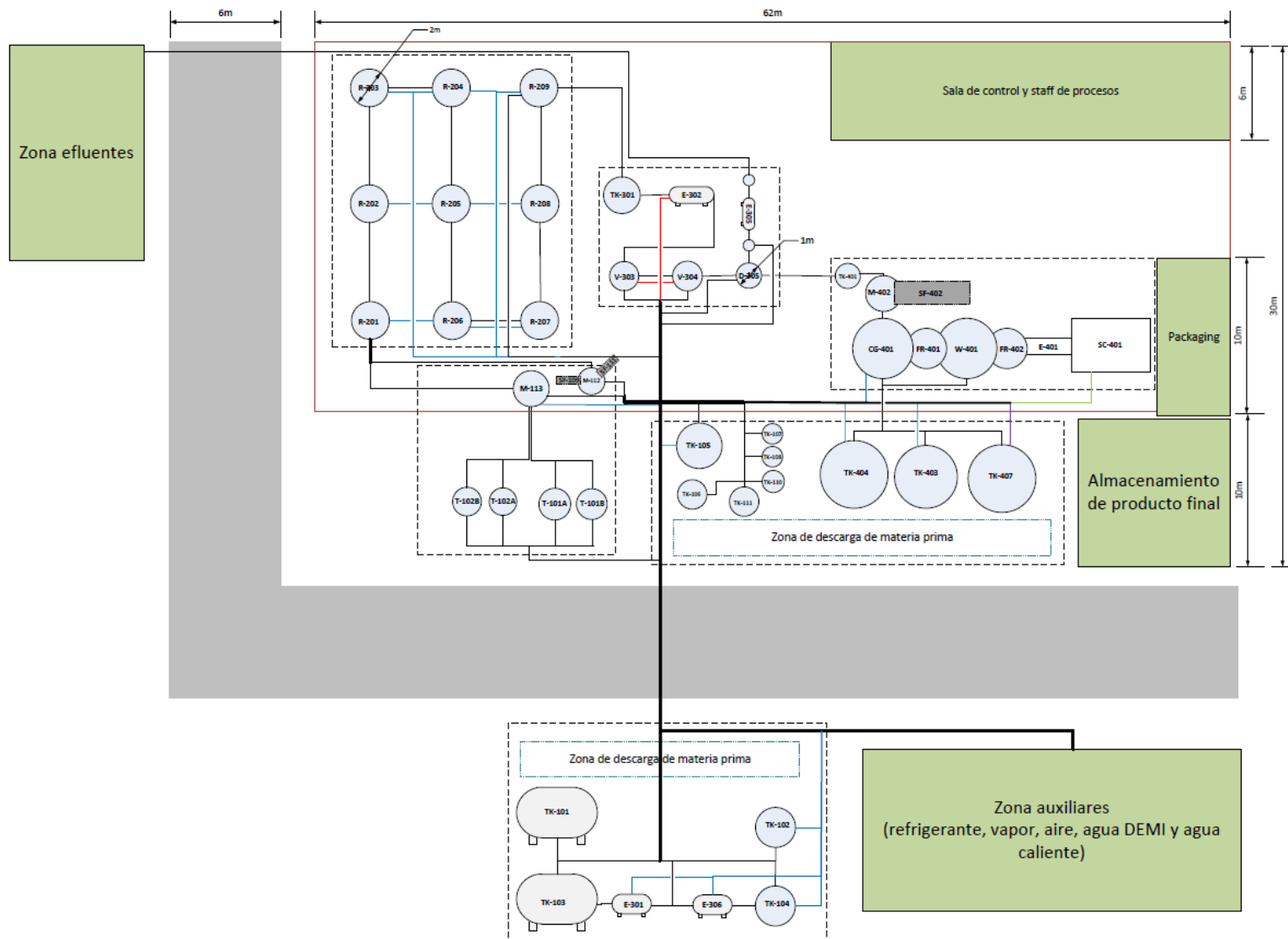


Figura 5.8-2: Representación gráfica de la distribución de equipos en la zona de producción.

#### 5.8.4 Consideraciones generales

La decisión de distribución de la planta puede afectar significativamente la eficiencia del personal, las relaciones funcionales, el flujo de los materiales, la dificultad de automatizar el sistema y la capacidad de respuesta del sistema productivo ante cambios.

Se busca encontrar posibles sinergias de utilización entre diferentes áreas que nos permitan reducir superficies. Los edificios más importantes deberán ser lo más simétricos posibles e intentar mantener un perímetro rectangular. Esto facilita la visualización de la instalación tanto para la gestión como para su operación. En cada caso se analizará la conveniencia de acceso a las mismas. Coordinar la estructura del edificio y sus instalaciones con las áreas funcionales, de modo que unas sean múltiplos de otras, facilitando la flexibilidad de interconexión.

##### *Dirección de vientos*

La dirección de los vientos es un factor importante que se debe tener en cuenta en la disposición de los equipos, ya que esto nos permite conocer hacia donde se dirigirán los vapores propios del proceso, como también posibles fugas o simplemente venteos. Además, tiene suma importancia en la decisión de la colocación de los edificios.

Nuestra planta productiva se ubica en la localidad de San Lorenzo, zona sur de la provincia de Santa Fe, y cuenta con vientos frecuentes provenientes del este durante 6,5 meses, de septiembre a marzo, por lo tanto, se ha decidido colocar todos los edificios de control, laboratorio, mantenimiento y administración de manera tal, que se minimice el alcance de los vapores provenientes del proceso productivo

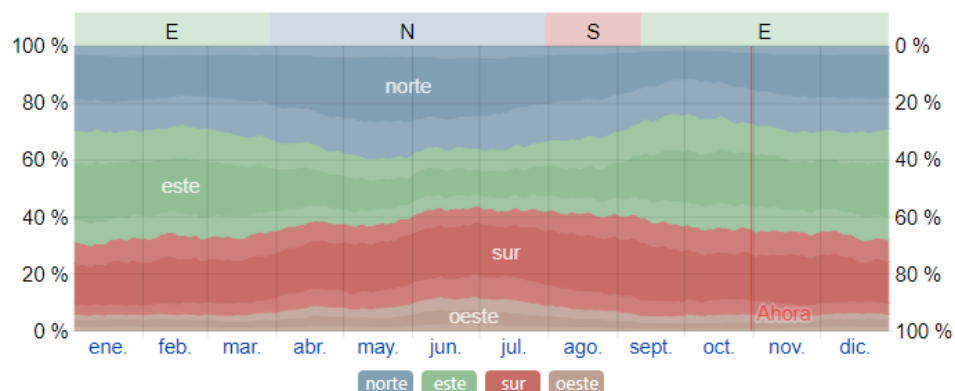


Figura 5.8-3: Gráfica de la dirección del viento.



El porcentaje de horas en las que la dirección media del viento viene de cada uno de los cuatro puntos cardinales, excluidas las horas en que la velocidad media del viento es menos de 1,6 km/h. Las áreas de colores claros en los límites son el porcentaje de horas que pasa en las direcciones intermedias implícitas (noreste, sureste, suroeste y noroeste)

### *Movilidad vial*

Se planifican las calles internas y los sentidos de circulación entre áreas evitando cuellos de botella o cruces conflictivos allí donde se prevean flujos elevados o muy frecuentes. Se considera el efecto de un posible cambio de turno, la posible circulación vehículos y personas, previendo la señalización y separación clara entre ellos, definiendo los espacios para prevenir accidentes.

Lo más importante es poder controlar el ingreso y egreso de personal y lograrlo a través de puntos cruciales en la instalación, así como al pasar de un área a otra. Esto aplica también para el flujo de ingreso de personal desde el exterior hasta las oficinas, y separando cuando sea posible el flujo de quienes trabajan en la instalación y quienes visitan la misma, tanto de las personas como de sus vehículos. En general, se prioriza el espacio de circulación frente al de almacenamiento, ya que muchas veces lo que se gana en almacenamiento se pierde por la lentitud de la operación, daños a los equipos, estanterías y accidentes.

### *Calles*

Las calles tienen un carril con un solo sentido. Tienen un ancho mínimo de 6 metros. Para las operaciones de carga y descarga de camiones, a ambos lados de la calle, su ancho mínimo será de 9 metros para permitir las maniobras de incorporación de los vehículos.

Los radios de giro mínimos a considerar dependen del tipo de vehículo circulante, se tendrán en cuenta tres tipos de vehículos posibles de transporte: el rígido de 11 m de longitud y los articulados de 13 y 15 m. En la siguiente figura se muestran para los tres tipos de vehículos mencionados las trayectorias de giro.

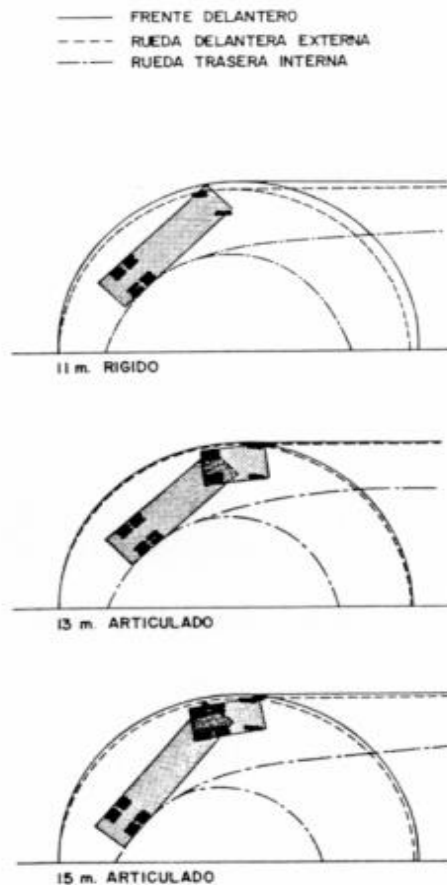


Figura 5.8-4: Trayectoria de giro de vehículos grandes en un diámetro de 25 m.

#### *Muelles carga/descarga y estacionamiento*

El movimiento de mercancías entre los vehículos de carga y los almacenes se realiza mediante los muelles de carga y descarga. En estas operaciones, los operarios de los muelles y los conductores de los vehículos de carga y de transporte pueden verse sometidos a riesgos de diverso origen y gravedad, por lo tanto, de debe asegurar el correcto diseño del muelle, la existencia de rampas nivelables, la superficie uniforme de la zona de aproximación, el control de puertas y la existencia de equipamientos de seguridad.

Los muelles de carga y descarga son unos equipamientos industriales diseñados para facilitar el trasiego de materiales entre naves industriales y vehículos de transporte de mercancías.



*Figura 5.8-5: Muelle de carga y descarga.*

En el proyecto y planificación de la estación de carga y descarga se requiere tener en cuenta una serie de aspectos importantes:

*Vehículos de transporte y mercancías* → Las medidas, la diversidad y el tipo de la mercancía tienen un papel importante a la hora de elegir el equipamiento. Se deben definir el número de estaciones de carga y descarga necesarias en función del número de vehículos que llegan al mismo tiempo, así como la duración de los procesos de carga y descarga, para determinar el espacio de maniobra necesario.

*Conductores* → Los conductores encuentran más fácil y tienen una mejor visibilidad, si realizan las maniobras marcha atrás en el sentido horario. Para garantizar el acoplamiento del vehículo en el muelle sin dificultad, el ángulo de inclinación del muelle respecto al eje del camión  $\alpha$ , debe ser aproximadamente igual al ángulo de visión del conductor  $\beta$ .

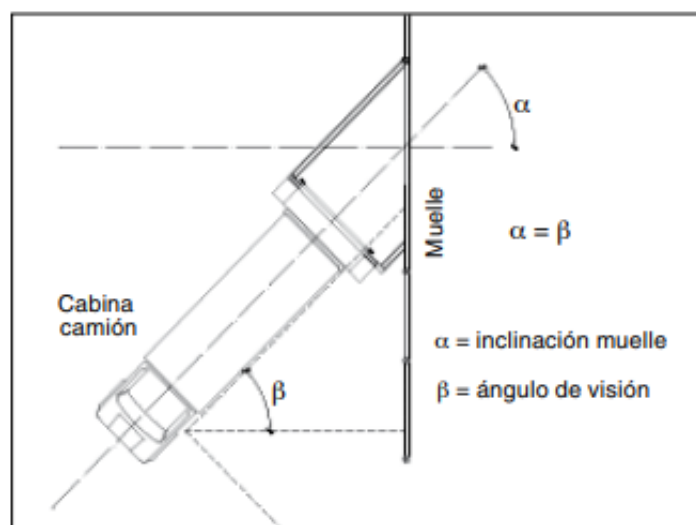


Figura 5.8-6: Acoplamiento del vehículo sin dificultad

Con el fin de facilitar las maniobras de los semirremolques, se colocarán los vehículos en ángulo, entre 40 y 60° con calzadas de entrada y salida. De esta manera se logra reducir el espacio frente al punto de entrada.

El ancho para el estacionamiento será en función del ancho de los pasillos de entrada y salida. Los valores extremos de estas dos dimensiones para los vehículos considerados: rígido de 11 m y articulados de 13 y 15 m de longitud son:

	Rígido		Articulado 13 m		Articulado 15 m	
Ancho de entrada (m)	4	7,5	5	8	5	10
Ancho de estacionamiento (m)	6,2	3,3	4,9	3,3	5,8	3,3

El ancho mínimo para el estacionamiento que permite abrir las puertas de los vehículos es de 3,30 m. Se recomienda que la longitud sea la del vehículo, más 3 metros para permitir operaciones ligeras de mantenimiento del vehículo.

### Alumbrado y luminaria

**Iluminación Interior** → Las lámparas empleadas en la iluminación de interiores abarcan casi toda la tipología existente en el mercado (incandescentes, halógenas, fluorescentes, etc.). Las lámparas escogidas, por lo tanto, serán aquellas cuyas características (fotométricas, cromáticas, consumo energético, economía de instalación y mantenimiento, etc.) mejor se adapten a las necesidades de nuestra

instalación (nivel de iluminación, dimensiones, ámbito de uso, potencia de la instalación etc.).

*Métodos de alumbrado* → Los métodos de alumbrado hacen referencia a la distribución de la luz en las zonas iluminadas.

*Alumbrado general* → Éste método proporciona una iluminación uniforme sobre toda el área iluminada, es un método de iluminación muy extendido.

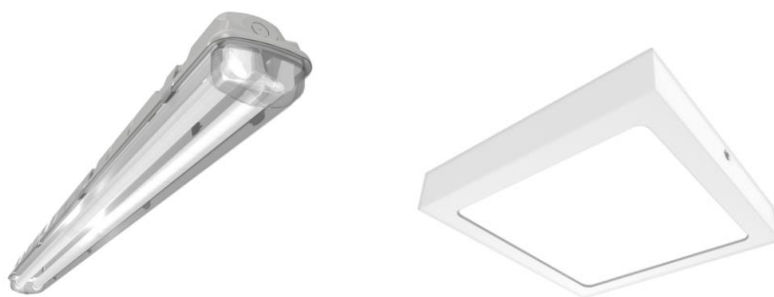
En nuestra planta se utilizará en las oficinas, el comedor, el almacén y los galpones. Para ello, se distribuirán las luminarias de forma regular por todo el techo de las áreas mencionadas.

Se utilizarán tubos LED ya que son aproximadamente un 40% más eficientes que las lámparas fluorescentes, además producen luz en una variedad de temperaturas de color sin ningún problema de parpadeo. Con respecto a su vida útil, en promedio duran unas 50,000 horas, frente a solo 30,000 horas de una lámpara fluorescente. Si bien los costos de adquisición son más elevados debido a la larga vida útil y la alta eficiencia energética, es posible una rápida amortización de la inversión.

*Alumbrado general localizado* → Este método proporciona una distribución no uniforme de la luz de manera que ésta se concentra sobre las áreas de trabajo, se ilumina con una luz más tenue.

Se decidió utilizar este tipo de alumbrado para los pasillos, escaleras y áreas de paso, de esta forma se lograrán importantes ahorros energéticos ya que la luz se concentra donde hace falta.

A continuación, se presentan los distintos tipos de luminaria adoptadas pertenecientes a la empresa Lumenac, Argentina



*Figura 5.8-7: Diferentes tipos de luminaria interior.*

*Iluminación exterior* → Es importante el análisis de la iluminación exterior de la planta, ya que la misma opera también en horarios nocturnos. Los lugares que se tendrán en cuenta son las vías de circulación, accesos, estacionamiento, zona de producción y almacenamiento de materia prima/producto final.

La iluminación exterior debe presentar unas características adicionales diferentes a las de interiores, ya que éstas se encuentran expuestas a las radiaciones solares, vientos, lluvias, etc., por lo tanto, necesitan de cierto grado de robustez y hermeticidad para soportarlo.



*Figura 5.8-8: Luminaria Exterior.*

### *Distancias*

Se ha decidido utilizar como referencias, la Ley 13.660 Decreto N° 10.887 relativa a la seguridad de las instalaciones de elaboración, transformación y almacenamiento de combustibles sólidos, minerales, líquidos y gaseosos, también la Resolución 1296/2008 relativa a las condiciones mínimas que deben cumplir las plantas de elaboración, almacenamiento y mezcla de biocombustibles. Ambas pertenecientes a la Secretaría de Energía y Combustibles de la República Argentina. Con respecto a la distancia mínima entre instalaciones donde se manipulen o almacenen hidrocarburos y edificios donde no existan fuegos, será de 10 metros.

Para el resto de las instalaciones, se fijarán distancias con miras a asegurar el fácil acceso del personal y los equipos en caso de incendio.

En todo parque de almacenamiento, además de las distancias mínimas que los tanques deben tener entre sí, cualquier tanque estará distanciado:

- Del límite de concesión:  $\frac{1}{2}$  diámetro, con un mínimo de 15 metros.
- De los caminos públicos: 1 diámetro, con un mínimo de 15 metros.
- De las vías férreas generales: 1 diámetro y  $\frac{1}{2}$ , con un mínimo de 45 metros.
- De las casas habitación e instalaciones industriales vecinas: 2 diámetros del tanque mayor.

- De los bosques circunvecinos: en una extensión de 150 metros.

A continuación, se listan las distancias mínimas que serán tenidas en cuenta entre unidades y equipos:

Desde	Hasta	Distancia (m)
Zona de operación	Tanques inflamables (Los tanques de almacenamiento de líquidos inflamables se instalarán en espacios a cielo abierto)	15
Edificios de envasados y almacenamiento de productos envasados	Cualquier unidad de elaboración	15
Casa de bombas principales	Cualquier unidad de elaboración	15
Tanques de almacenamiento de gas licuado	Cualquier unidad de elaboración, sin fuego	En recuadros separados por calles, 20 metros
Cargadero de camiones	Cualquier unidad de elaboración	10
Cargadero de camiones	Zona de almacenamiento	7.5

## 5.9 Isométrico

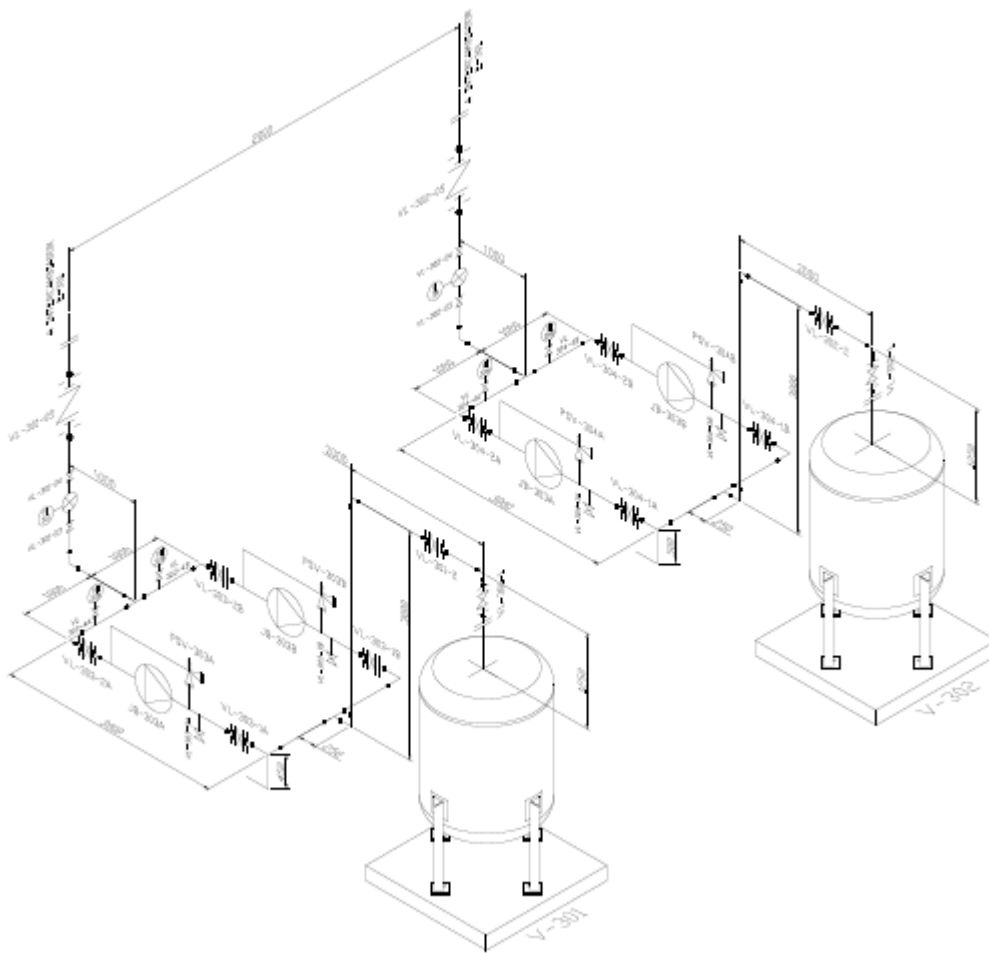
En esta sección se elaborará el isométrico de la línea de retorno de butadieno. El látex con butadieno y estireno atraviesa, en primera instancia, dos evaporadores flash con el objetivo de disminuir la presión abruptamente y evaporar el butadieno. Dos compresores y dos válvulas reguladoras son los encargados de asegurar la correcta presión de operación en ambos (1 bar y 0,6 bar, respectivamente). Las líneas salientes de ambos compresores se juntan para luego atravesar un condensador y llevarlas a las condiciones correctas de almacenamiento. El tramo a analizar y esbozar es desde la salida de los evaporadores flash hasta la entrada del intercambiador de calor.

### *Descripción del tramo de cañería seleccionado*

En el siguiente gráfico, se observa el tendido de línea total:







El tendido de cañería se va a dividir en 3 secciones para su análisis:

- 1) *Línea del evaporador V-301* → En esta línea el gas de butadieno abandona el evaporador V-301 por la parte superior atravesando la válvula reguladora (VL-301-01) y la válvula manual de bloqueo (VL-301-02). Esta línea cuenta con 2 compresores (JB303A/B): el principal y otro de back up para casos de mantenimiento o daños. Al tratarse de compresores de desplazamiento positivo, cuentan con una recirculación con una válvula de alivio (PSV303A/B) para asegurarse que la línea trabaje dentro de rangos de presión establecidos. Cuenta con un medidor, transmisor y controlador de presión (PIT303A/B) que es el encargado de determinar las revoluciones del compresor. Además, cada compresor cuenta con dos válvulas de bloqueo manuales, una aguas abajo (VL-303-3A/B) y otra aguas arriba (VL-303-4A/B). El gas es comprimido y enviado a través de una línea vertical hasta alcanzar la intersección con la línea del otro evaporador. Esta cañería vertical presenta una válvula de retención (VL-301-

05) para impedir el retorno del gas y un indicador de caudal (FI-303) con sus válvulas de bloqueo (VL-301-03/04). En el Flow Sheet, esta línea tiene el siguiente código: Área 300/Líneas: 8-9-10.

2) *Línea del evaporador V-302* → Esta línea es similar a la anterior pero las condiciones operativas y los parámetros del proceso son diferentes. Los tags de los equipos son los siguientes: evaporador V-302; válvula reguladora VL-302-01; válvulas de bloqueo VL-304-02/03A y B/04A y B; compresores JB-304A/B; PSV304A/B. En el Flow Sheet, esta línea tiene el siguiente código: Área 300/Líneas: 11-12-13.

3) *Línea de unión de evaporadores* → Esta línea es el resultado de la unión de las dos líneas anteriores. El gas viaja a altura y se dirige a la zona de almacenamiento en donde es condensado en un intercambiador de calor. Esta línea cuenta con una válvula de bloqueo del intercambiador, VL-301-01. En el Flow Sheet, esta línea tiene el siguiente código: Área 300/Línea: 14.

Tanto los evaporadores como el intercambiador y los compresores se encuentran dentro de diques de contención. Los evaporadores comparten el dique con los compresores. Mientras que el intercambiador de calor comparte el dique con los tanques de almacenamiento de butadieno y estireno y sus respectivas bombas.

#### *Dimensionamiento de cañerías y compresores*

Para el análisis se considera al butadieno como el único componente de las corrientes ya que sus fracciones másicas son muy próximas a 1. Los posteriores cálculos se basan en la siguiente tabla de datos de cada línea:

Corriente		8		9		10		11	
Variable	Unidad								
Fracción de Vapor	-	1		1		1		1	
Temperatura	°C	20		19,591		81,184		42	
Presión	Bar	1		0,8		3,5		0,6	
Caudal Másico	Kg/h	1107,19		1107,19		1107,19		117,06	
Componente	Función	Masa (kg)	Frac. másico	Masa (kg)	Frac. másico	Masa (kg)	Frac. másico	Masa (kg)	Frac. másico
Butadieno	Reactivo	57,22	0,98	57,22	0,98	57,22	0,98	5,41	0,88

Corriente		12		13		14	
Variable	Unidad						
Fracción de Vapor	-	1		1		1	
Temperatura	°C	41,83		94,28		82,44	
Presión	Bar	0,5		3,5		3,5	
Caudal Másico	Kg/h	117,06		117,06		1224,25	
Componente	Función	Masa (kg)	Frac. másico	Masa (kg)	Frac. másico	Masa (kg)	Frac. másico
Butadieno	Reactivo	5,41	0,88	5,41	0,88	62,63	0,97

Para calcular las potencias de ambos compresores (cuatro con sus respectivos compresores back up), se realizó el siguiente procedimiento de cálculo:

1) *Determinación del tipo de gas: compresible o incompresible*

Para la determinación del tipo de gas que es el butadieno a las condiciones operativas, se calculó y utilizó el número de Mach. Este número es una medida de la velocidad relativa que se define como el cociente entre la velocidad de un objeto y la velocidad del sonido en el medio que se mueve dicho objeto. Para poder definir la compresibilidad del gas, se calcula el número de Mach y si es mayor a 0,3, el gas considerado compresible. Mientras que, si da menor, el gas puede ser utilizado como incompresible. La fórmula a utilizar es la siguiente:

$$Ma = \frac{v}{v_{sonido}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{k \cdot R \cdot T}{M}}}$$

En la siguiente tabla, se detallan las variables en cuestión, sus valores y sus unidades. En lo que respecta a la velocidad del gas, se tomó 11 m/s ya que es un heurístico para la velocidad de los gases en cañerías:

Número de March del butadieno			
<b>v</b>	Velocidad	11	m/s
<b>k</b>	Constante adiabática	1,117	-
<b>R</b>	Constante de los gases	8,314	J/(mol.K)
<b>T</b>	Temperatura	273	K
<b>M</b>	Masa molar	0,054	kg/mol
<b>v sonido</b>	Velocidad del sonido en el butadieno	216,67861	m/s
<b>Ma</b>	Numero de Mach	0,05	-

Con un valor del número de Mach de **0,05**, podemos afirmar que el gas es incompresible. Con esta primicia, se puede afirmar que la densidad y la viscosidad del gas son constante en toda la línea. A continuación, se detallan los valores de las densidades y viscosidades en las distintas condiciones de la línea:

Densidad del butadieno (kg/m3)							
<b>N° de línea</b>	8	9	10	11	12	13	14
<b>Temperatura</b>	20	19,6	81,2	42	41,8	94,3	82,4
<b>Presión</b>	1	0,8	3,5	0,6	0,5	3,5	3,5
<b>Densidad</b>	2,27	1,8	6,8	1,3	1,04	6,5	6,8

Viscosidad del butadieno (Pa.s)							
<b>N° de línea</b>	8	9	10	11	12	13	14
<b>Temperatura</b>	20	19,6	81,2	42	41,8	94,3	82,4
<b>Presión</b>	1	0,8	3,5	0,6	0,5	3,5	3,5
<b>Viscosidad</b>	7,5E-06	7,5E-06	9,3E-06	8,06E-06	8,06E-06	9,3E-06	9,3E-06

Considerando que las líneas 10,13 y 14 son las más largas, se realizará un promedio de ellas y de esta forma, se obtendrá la densidad y viscosidad utilizada para los cálculos:

<b>Densidad</b>	6,7	kg/m3
<b>Viscosidad</b>	9,30E-06	Pa.s

## 2) Velocidad y diámetro de cañerías

Se partió del heurístico que la velocidad del gas en cañerías se encuentra entre 9 y 15 m/s. A partir de este rango de velocidades, se fueron estimados diámetros internos y nominales con el fin de obtener una velocidad razonable a partir del

caudal y el área de flujo. Una vez obtenida la velocidad en la línea 3 (la de caudal total), se obtuvo la velocidad estacionaria de todas las líneas. A partir de esta velocidad estacionaria en todo el sistema, se calcularon los diámetros en las líneas de los evaporares. Las fórmulas utilizadas y los resultados obtenidos se plasmarán a continuación:

$$A_F = \frac{\pi}{4} * D^2$$

$$\dot{V} = v * A_F$$

Sección 8-9-10		
Velocidad	11,12993193	m/s
Caudal volumétrico	0,045903484	m3/s
Área de flujo	0,004124327	m2
Diámetro interno	0,072465556	M
	7,24655562	Cm
	2,852968948	In
Diámetro nominal	3	In

Sección 14		
Velocidad	11,1299319	m/s
Caudal volumétrico	0,05075678	m3/s
Área de flujo	0,00456039	m2
Diámetro interno	0,07620015	m
	7,62001524	cm
	3	in
Diámetro nominal	3	in

Sección 11-12-13		
Velocidad	11,1299319	m/s
Caudal volumétrico	0,0048533	m3/s
Área de flujo	0,00043606	m2
Diámetro interno	0,02356282	m
	2,3562818	cm
	0,92766814	in
Diámetro nominal	1	in

Con los diámetros nominales, se busca en las tablas de tuberías de acero los diámetros internos específicos. Estos diámetros se mencionarán en los siguientes pasos del análisis.

### 3) Análisis de pérdida de carga en la línea de unión de evaporadores

En esta sección se calculó la pérdida de carga a lo largo de la cañería, es decir, se buscó la presión antes de entrar al condensador. La posición número 1 es en la unión de las corrientes provenientes de los evaporadores. Mientras que la posición 2, es en la entrada del condensador. Se utilizó la ecuación de Bernoulli siguiente:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + h_2 - h_1 + \frac{v_2^2}{2 * g} - \frac{v_1^2}{2 * g} + f * \frac{v^2}{2 * g} * \sum \frac{L_{eq}}{D} = 0$$

Para el cálculo del factor de fricción se calculó Reynolds y, junto con la rugosidad del acero comercial (sacada de tabla), se calculó f:

$$Re = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 * \log \left[ \frac{6,9}{Re} + \left( \frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} \right)^{1,11} \right]$$

Los valores de longitud equivalente de los distintos accesorios se sacaron de tabla y gráficos.

Los valores puntuales de cada variable y el desglose del término de pérdida de carga se detallarán a continuación en la siguiente tabla:

<b>P<sub>1</sub></b>	350000	Pa	
<b>ρ</b>	6,7	kg/m3	
<b>μ</b>	0,0000093	Pa.s	
<b>g</b>	9,8	m/s2	
<b>h<sub>1</sub></b>	12	m	
<b>h<sub>2</sub></b>	0	m	
<b>v<sub>1</sub></b>	11,12993193	m/s	
<b>v<sub>2</sub></b>	11,12993193	m/s	
<b>D<sub>nominal</sub></b>	3	in	
<b>Schedule</b>	40		
<b>D<sub>int</sub></b>	3,068	in	
<b>D<sub>int</sub></b>	0,077927356	m	
<b>L<sub>eq</sub></b>	Codós 90°	4	-
		5,9	m

	Válvula esclusa	1	-
		0,6	m
	Long cañería	47,5	m
<b>Sum L/D</b>	920,0876793	-	
<b>Re</b>	624847,8833	-	
<b>Rugosidad</b>	0,00015	ft	Acero
<b>Rugosidad</b>	0,00004572	m	Comercial
<b>e/D</b>	0,0005867	-	
<b>f</b>	0,01796389	-	

Remplazando los valores en la ecuación de Bernoulli y despejando la presión 2, se obtiene el valor de **343928,9 Pa o 3,4 bar**.

Para el caso más desfavorable (la línea sin butadieno), se analiza la pérdida de carga duplicando la pérdida de carga generada. El valor de presión 2 obtenido es de 339911,13 Pa o 3,399 bar. A pesar de tener una pérdida de carga mayor, es suficiente para poder atravesar el condensador y almacenarse a las condiciones requeridas.

#### 4) *Análisis de pérdida de carga en la línea del evaporador V-301*

En esta sección, se calculó el trabajo realizado por el compresor JB-303A/B. El procedimiento es similar al ítem anterior pero la ecuación de Bernoulli se verá modificada por el trabajo del compresor. Para el análisis de esta sección, el punto 1 corresponde a la salida del evaporador V-301 y el punto 2 a la unión con la corriente proveniente del evaporador V-302.

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + h_2 - h_1 + \frac{v_2^2}{2 * g} - \frac{v_1^2}{2 * g} + f * \frac{v^2}{2 * g} * \sum \frac{L_{eq}}{D} = W_{JB-303}$$

En la siguiente tabla se detallarán los accesorios y las variables involucradas en el sistema:

<b>P<sub>1</sub></b>	100000	Pa	
<b>P<sub>2</sub></b>	350000	Pa	
<b>P</b>	6,7	kg/m3	
<b>μ</b>	0,0000093	Pa.s	
<b>G</b>	9,8	m/s2	



<b>h<sub>1</sub></b>	1,75	m	
<b>h<sub>2</sub></b>	12	m	
<b>v<sub>1</sub></b>	11,1299319	m/s	
<b>v<sub>2</sub></b>	11,1299319	m/s	
<b>D<sub>nominal</sub></b>	3	in	
<b>Schedule</b>	40		
<b>D<sub>int</sub></b>	3,068	in	
<b>D<sub>int</sub></b>	0,07792736	m	
<b>Leq</b>	Codos 90°	9	-
		1,59	m
	Val esclusa	5	-
		0,52	m
	Long cañería	26,5	m
	Válvula de retención	1	-
		9,76	
	Válvula reguladora 60%	1	
		2	m
	Caudalímetro	1	
		1	m
<b>Sum L/D</b>	707,967047	-	
<b>Re</b>	624847,883	-	
<b>Rugosidad</b>	0,00015	ft	Acero
<b>Rugosidad</b>	0,00004572	m	Comercial
<b>e/D</b>	0,0005867	-	
<b>F</b>	0,01796389	-	

Con los valores de tabla y la ecuación de Bernoulli, se obtiene una altura de compresor de 3898,1 m. Normalmente se trabaja en W, kW o hp. Es por ello que se utiliza el caudal volumétrico, la aceleración de la gravedad y la densidad, para poder expresar el trabajo en estas unidades:

$$W(kW) = g * \rho * \dot{V} * W(m) = \mathbf{11,75kW}$$

##### 5) *Análisis de perdida de carga en la línea del evaporador V-302*

En esta sección se procede de manera similar que la sección del ítem anterior solo que cambian las condiciones de las corrientes, entonces así, los valores de las distintas variables:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + h_2 - h_1 + \frac{v_2^2}{2 * g} - \frac{v_1^2}{2 * g} + f * \frac{v^2}{2 * g} * \sum \frac{L_{eq}}{D} = W_{JB-304}$$

<b>P<sub>1</sub></b>	60000	Pa	
<b>P<sub>2</sub></b>	350000	Pa	
<b>ρ</b>	6,7	kg/m3	
<b>μ</b>	0,0000093	Pa.s	
<b>g</b>	9,8	m/s2	
<b>h<sub>1</sub></b>	1,75	m	
<b>h<sub>2</sub></b>	12	m	
<b>v<sub>1</sub></b>	11,12993193	m/s	
<b>v<sub>2</sub></b>	11,12993193	m/s	
<b>D<sub>nominal</sub></b>	1	in	
<b>Schedule</b>	40		
<b>D<sub>int</sub></b>	1,049	in	
<b>D<sub>i</sub>nt</b>	0,026644653	m	
<b>L<sub>eq</sub></b>	Codos	9	-
		0,52	m
	Val esc.	5	-
		0,18	m
	Long cañ	26,5	m
	Val ret	1	-
		2,44	
	Exp 1"-3"	0,52	
	Val reg 60%	1	
		2	m
	caudalímetro	1	
		1	m
<b>Sum L/D</b>	1390,147569	-	
<b>Re</b>	213645,8376	-	
<b>Rugosidad</b>	0,00015	ft	Acero
<b>Rugosidad</b>	0,00004572	m	Comercial
<b>e/D</b>	0,001715916	-	
<b>f</b>	0,023355999	-	

Reemplazando en la ecuación y buscando el valor en kW, se obtiene que el trabajo del compresor es igual a **1,48 kW**.

### *Selección de compresor*

Para la selección de los compresores, se analizarán los tipos generales de compresores y sus características. Luego, una vez seleccionada la categoría, se analizará el tipo de compresor según el caudal, presión necesaria, rpm y finalidad. Por su aplicación principal se podrían dividir en cinco grupos:

- *Compresores* → Máquinas diseñadas para comprimir gases a cualquier presión, por encima de la presión atmosférica. En general, se habla de compresor cuando se trabaja con presiones superiores a los 3 bar.
- *Ventiladores* → Máquinas diseñadas para comprimir gases a presiones muy bajas, cercanas a la presión atmosférica. De hecho, los ventiladores apenas incrementan la presión unos gramos sobre la atmosférica.
- *Soplantes* → Compresores que trabajan a baja presión. Son similares a los compresores. Las presiones de estos equipos son superiores a las de los ventiladores, pero se considera que están por debajo de los 3 bar.
- *Bombas de vacío* → Son también compresores, pero su trabajo no está pensado para comprimir el aire, sino para aspirarlo de un recipiente o sistema, bajando la presión a valores por debajo de 1 atmósfera. Las bombas de vacío también se pueden usar como un compresor, pero en aplicaciones muy específicas y con valores de presión muy bajos.
- *Compresores booster* → Son un tipo de compresores que trabajan con una presión en la aspiración, superior a la atmosférica. Suelen instalarse en combinación con un compresor tradicional, para elevar la presión final de éste.

La principal clasificación de los diferentes tipos de compresores se realiza por su principio de funcionamiento básico:

- *Compresores de desplazamiento positivo* → El principio de funcionamiento de estos compresores se basa en la disminución del volumen del gas en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el

incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño previsto, momento en el cual el gas es liberado al sistema.

- *Compresores dinámicos* → El principio de funcionamiento de estos compresores se basa en la aceleración molecular. El gas es aspirado por el rodete a través de su campana de entrada y acelerado a gran velocidad. Después es descargado directamente a unos difusores situados junto al rodete, donde toda la energía cinética del gas se transforma en presión estática. A partir de este punto es liberado al sistema.

En la línea a analizar, la finalidad principal es generar vacío en los evaporadores flash, es decir, desplazar un volumen de gas determinado. Es por ello, que se optó por compresores de desplazamiento positivo ya que el principio de funcionamiento se asemeja al requerido por el sistema. En relación con la aplicación principal, las bombas de vacío son aquellas que cumplen con la función deseada.

Existen cinco tipos principales de bombas de vacío:

*Bombas de vacío de paletas* → Es una bomba con un alto nivel de rendimiento y bajo costo. Son pequeñas, compactas y permiten alcanzar niveles de vacío primario. Las bombas rotativas de paletas requieren aceite para funcionar. La presencia de aceite asegura un sellado perfecto, una lubricación constante y eficiente de las partes móviles y una excelente disipación de calor para enfriar la bomba de vacío. Sin embargo, para asegurar un funcionamiento eficiente de la bomba, se debe prever un mantenimiento regular. Una de las desventajas es, por tanto, la sustitución regular del aceite para reducir el riesgo de desgaste. Se recomienda hacerlo tras 3.000 horas de uso aproximadamente. Puede alcanzar un alto nivel de vacío (1.000 mbar). Además, puede trabajar a un caudal elevado: hasta 1.600 m<sup>3</sup>/h.



*Figura 5.9-1: Bomba de vacío de paletas*

*Bombas de vacío de membrana* → Son extremadamente resistentes a la corrosión y a los productos químicos. Por esta razón, pueden utilizarse para tratar cualquier tipo de producto viscoso, ácido o corrosivo. Se adaptan perfectamente a un funcionamiento continuo. Además, presentan también otra ventaja: son bombas secas. Como resultado, no será necesario lubricarlas con aceite y los costes de mantenimiento serán mucho más bajos que con una bomba de paletas. Si bien, el precio de compra de estas bombas es bastante elevado. Otro punto importante reside en que el nivel de vacío de las bombas de membrana es inferior al de las bombas rotativas y, por lo tanto, no es apto para la liofilización.

*Bomba de vacío de tornillo* → Su funcionamiento es en seco, dos rotores en forma de tornillo giran en direcciones opuestas. El medio bombeado queda atrapado entre las cámaras del cilindro y los tornillos. Allí, se comprime y se transporta hacia la salida. Durante este proceso, los rotores no entran en contacto entre sí ni con el cilindro.

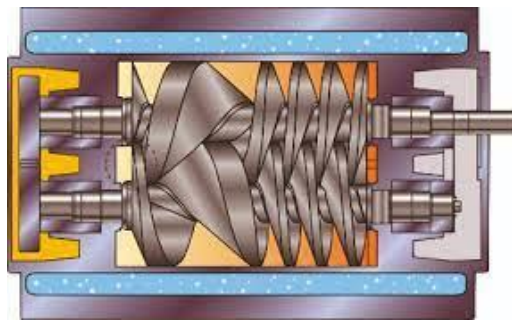
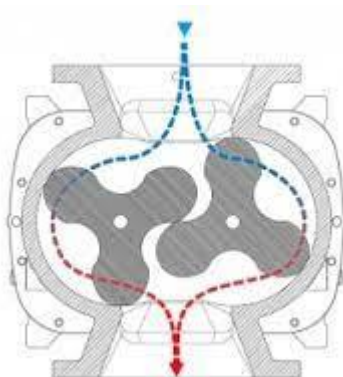


Figura 5.9-2: Bomba de tornillo

*Bomba de vacío de lóbulos* → Están caracterizadas por la ausencia de aceite en la cámara de compresión. El cuerpo de la bomba se compone de rotores que giran sin contacto en el interior de un estator. Los rotores están sincronizados por un juego de engranajes.

Estas bombas se han creado para aquellos sectores industriales donde se requiere un nivel de vacío bajo y, al mismo tiempo, una descarga de aire libre de aceites.

Se trata de bombas robustas, fiables y adaptables a una gran variedad de aplicaciones.



*Figura 5.9-3: Bomba de vacío lóbulos*

**Bombas de vacío de anillo líquido** → Funcionan gracias al aporte de un líquido que se centrifuga en las paredes de la bomba. El resultado es un anillo líquido que permite mantener la estanqueidad de la bomba. Son muy poco sensibles al paso de líquidos, pequeñas partículas sólidas o vapores. Además, su compresión isotérmica es ideal para productos explosivos y sensibles al calor, lo que garantiza una alta seguridad.

Con un caudal máximo de 30.000 m<sup>3</sup>/h, estas bombas de alto rendimiento permiten a su vez reducir y aumentar la presión. No obstante, se recomienda prestar atención a la presión de vapor saturada del anillo líquido. La presión mínima de la bomba no debe ser inferior a la presión de saturación del anillo líquido; de lo contrario, el anillo líquido podría vaporizarse. Esto comprometería la estanqueidad de su bomba.



*Figura 5.9-4: Bomba de vacío de anillo líquido.*

**Bombas de vacío scroll** → Se utilizan para el bombeo de vacío limpio y seco. Utilizan dos espirales para bombear y comprimir fluidos líquidos o gaseosos. Una de las

espirales está fija y la otra orbita alrededor de ella excéntricamente. Es este movimiento excéntrico el que permite que el gas se comprima. Las bombas de vacío scroll son compactas y silenciosas y no requieren aceite. Una junta en espiral garantiza la estanqueidad de la bomba. Será necesario un mantenimiento regular, ya que el sello deberá sustituirse con frecuencia para asegurar un sellado óptimo. Así pues, la principal desventaja de estas bombas es su vulnerabilidad a los residuos y partículas entrantes que tienden a erosionar el sello en espiral.

*Bombas de vacío turbomoleculares*→ Pueden alcanzar presiones de hasta 10-12 mbar. Los caudales obtenidos varían de 50 l/s a 5.000 l/s. Funcionan con el mismo principio que los compresores. Las palas de las diferentes etapas de la bomba giran a gran velocidad gracias a un motor eléctrico para evacuar el aire correspondiente al volumen que se desea extraer. Estas bombas se montan a menudo en cojinetes magnéticos para alcanzar altas velocidades de rotación. Requieren una bomba primaria con un vacío de al menos 10<sup>-2</sup> mbar. Las bombas turbomoleculares tienen la ventaja de no utilizar aceite. Son, por lo tanto, bombas limpias. Por su compleja tecnología, estas bombas son caras de adquirir y pueden requerir un mantenimiento más profundo que las bombas de vacío tradicionales.

La elección de la bomba de vacío dependerá del tipo de vacío necesario, pero también del precio y de la robustez de la tecnología requerida. En la siguiente tabla se detallarán y resumirán algunas características de las bombas de vacío previamente mencionadas:

Compresor	Uso de aceite	Caudales (m3/h)	Vacío	Mantenimiento	Costo	Característica
<b>Tornillo</b>	No	1000	Medio/Alto	Regular	Bajo	
<b>Paletas</b>	Si	1600	Medio/Alto	Regular	Bajo	
<b>Lóbulos</b>	No	6000	Medio	Bajo		
<b>Membrana</b>	No	20	Bajo	Bajo	Alto	Resistencia a productos químicos
<b>Anillo líquido</b>	No	30000	Alto	Bajo		No es útil para elevar las presiones a la salida. Solo genera vacío. Consumo alto de energía.
<b>Scroll</b>	No	42	Medio	Regular		Silenciosas y compactas
<b>Turbomoleculares</b>	No	5	Alto	Alto	Alto	

En base a las opciones anteriores se optó por la utilización de bombas tipo lobulares. Se investigaron diferentes proveedores (Repicky, Keaser y Vacuumatteis) y se seleccionó a la marca Repicky con una bomba de vacío de serie RVM, ya que en su catálogo se encontraban las bombas de vacío que más se asemejaba y adaptaban a nuestro proceso.

A continuación, se dará una breve descripción de la bomba y sus diferentes modelos:





*Figura 5.9-5: Bomba de vacío medio REPICKY serie RVM.*

Las bombas de vacío medio REPICKY serie RVM son especiales para trabajar en condiciones más exigentes que las bombas de vacío convencionales. Además, pueden utilizarse como compresores, por ejemplo, para acelerar las descargas de tanques. Las bombas de vacío de lóbulos, al girar, atrapan y trasladan el volumen de gas encerrado entre la media silueta de cada lóbulo y la carcasa, enviándolo hacia la boca de salida. En esta etapa se traslada aire o gas desde un recinto cerrado hacia el exterior y como consecuencia del alto vacío generado se produce un incremento de temperatura importante en el gas, que se transmite por conducción al equipo. El diseño exclusivo de las bombas RVM Repicky a diferencia de otras convencionales, permite lograr niveles de vacío superiores gracias al ingreso de aire fresco a través de lumbreras estratégicamente colocadas y dimensionadas que refrigeran el equipo, impidiendo que sobrepasen los límites de temperatura máximos admisibles. Los lóbulos no tienen contacto entre sí, trabajan secos y por consiguiente no contaminan el aire o gas que transportan. Éste no es un detalle menor, ya que es un producto pensado y desarrollado por Repicky para el cuidado del Medio ambiente. Las RVM permiten alcanzar valores de vacío relativos a la atmósfera estándar superiores a los 900 milibares (100 milibares absolutos). En resumen, comparando las RVM con otros equipos, es posible obtener gran velocidad de bombeo y altos niveles de vacío sin apelar a la necesidad de lubricantes y refrigerantes. Por todo lo anterior, resulta ser la máquina ideal para aquellas aplicaciones donde se necesita un equipamiento confiable y de bajo mantenimiento.

Sus dimensiones y los distintos modelos se muestran en la siguiente tabla:

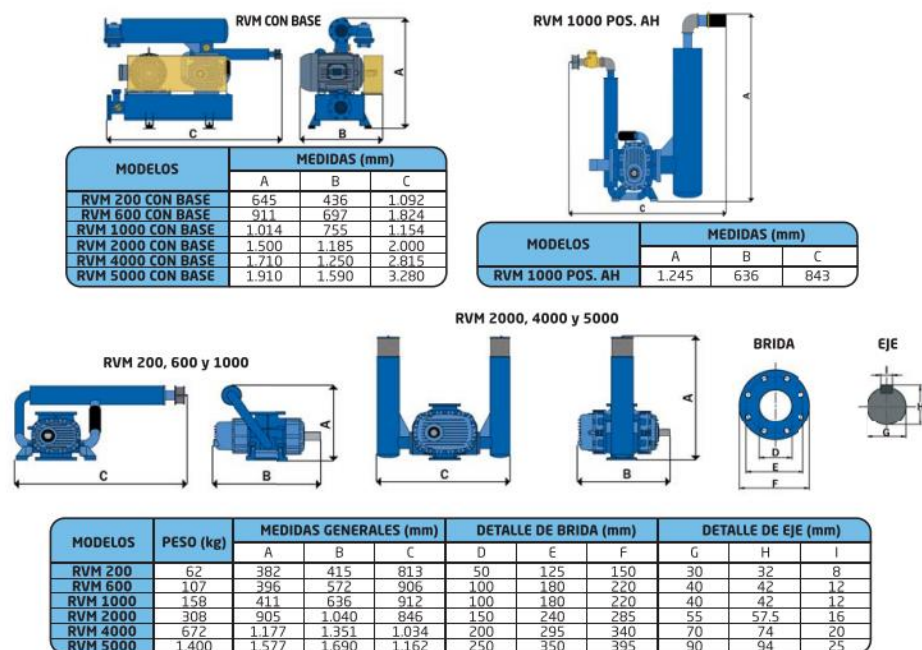


Figura 5.9-6: Dimensiones y modelos de bombas de vacío RVM.

Mod.	$\Delta P$ Rpm	- 400 mbar		- 500 mbar		- 600 mbar		- 700 mbar		- 800 mbar		- 900 mbar	
		Q m <sup>3</sup> /h	Pot HP	Q m <sup>3</sup> /h	Pot HP	Q m <sup>3</sup> /h	Pot HP	Q m <sup>3</sup> /h	Pot HP	Q m <sup>3</sup> /h	Pot HP	Q m <sup>3</sup> /h	Pot HP
<b>RVM 200</b>	1.450	36	1,6	29	1,9	23	2,4						
	2.250	85	2,4	78	2,9	72	3,7	67	4				
	2.900	124	3,1	118	3,8	111	4,8	106	5,1	101	5,8	96	6,4
	3.400	155	3,7	148	4,4	142	5,6	137	6	132	6,8	127	7,5
<b>RVM 600</b>	1.450	120	4	105	5,0	90	6,2	77	6,6	65	7,6	54	8,5
	2.250	255	6,3	239	7,7	225	9,6	212	10,6	200	11,7	188	13,1
	2.900	364	8,1	349	10	335	12,4	322	13,7	309	15,1	297	16,9
	3.600	482	10	466	12,4	452	15,4	439	17	427	18,8	416	21
<b>RVM 1000</b>	1.450	244	5,9	232	7,1	220	9,1	210	9,7	200	11	190	12,3
	2.250	435	9,1	422	12,1	411	14,1	400	15,1	390	17	380	19
	2.900	590	11,7	576	14,3	565	18,2	566	19,7	545	22	536	24,5
	3.400	708	13,7	695	16,7	684	21,3	673	22,8	664	25,8	654	28,8
<b>RVM 2000</b>	1.450	788	16,2	763	19,8	740	25,4	719	27,2	699	30,9	680	34,6
	2.250	1.333	25,1	1.308	30,8	1.285	39,5	1.264	42,2	1.244	47,9	1.225	53,6
	2.900	1.776	32,3	1.751	39,7	1.728	50,9	1.707	54,4	1.687	61,8	1.669	69,1
	3.200	1.981	35,7	1.955	43,8	1.933	56,2	1.911	60	1.892	68,2	1.873	76,3
<b>RVM 4000</b>	1.000	1.488	30,1	1.442	36,9	1.400	47,4	1.363	50,7	1.326	57,6	1.293	64,5
	1.450	2.320	43,6	2.274	53,5	2.233	68,7	2.196	73,6	2.160	83,5	2.126	93,5
	1.750	2.876	52,6	1.750	64,6	2.788	83	2.750	88,7	2.714	100,8	2.681	113
	2.150	3.616	64,5	3.570	79,4	3.530	102	3.490	109	3.454	123,8	3.421	139
<b>RVM 5000</b>	900	2.752	56,6	2.675	69,2	2.977	98,2	2.537	94,4	2.475	107	2.418	119,5
	1.150	3.692	72,3	3.612	88,3	3.540	112,9	3.475	120,5	3.414	136,6	3.356	152,7
	1.450	4.820	91,2	4.740	111,5	4.668	142,4	4.603	152	4.540	172	4.482	192,5
	1.700	5.757	107	5.680	130,7	5.610	167	5.543	178,3	5.480	202	5.420	225,7

Figura 5.9-7: Características generales de bombas de vacío RVM

Los caudales de trabajo y las potencias de los compresores para el sistema se detallarán a continuación en la siguiente tabla. A partir de la tabla anterior y de los datos del sistema, se determinará el moldeo de bomba a utilizar:

Línea	Bomba	Caudales (m3/h)	Potencia (kW)	Presión de vacío (bar)
Bifurcación 1	JB-303A/B	165,3	11,75	1
Bifurcación 2	JB-304A/B	17,5	1,48	0,6

Si consideramos una eficiencia de compresor del 75% para ambos casos, la potencia real para cada compresor sería:

JB-303A/B →  $W_{teórica} = 11,75 \text{ kW} \rightarrow W_{real} = 15,7 \text{ kW (21,1 hp)}$

JB-304A/B →  $W_{teórica} = 1,48 \text{ kW} \rightarrow W_{real} = 1,97 \text{ kW (2,6 hp)}$

Para la selección de la bomba de vacío JB-303, se optó por el modelo RVM 600 de 2900 rpm y para la bomba de vacío JB-304, el modelo RVM 200 de 1450 rpm.

## Características Técnicas

Los valores indicados con una tolerancia de +/- 5%, tanto de caudal de succión como de potencia del cabezal sin accesorios, corresponden a descarga a presión atmosférica normal  $P = 1013 \text{ mbar}$ , y temperatura de admisión del aire  $T = 20^\circ \text{ C}$ . Para otros gases y / o condiciones operativas, consultar.

$\Delta P$		- 400 mbar		- 500 mbar		- 600 mbar		- 700 mbar		- 800 mbar		- 900 mbar	
Mod.	Rpm	Q m3/h	Pot HP	Q m3/h	Pot HP	Q m3/h	Pot HP	Q m3/h	Pot HP	Q m3/h	Pot HP	Q m3/h	Pot HP
<b>RVM 200</b>	1.450	36	1,6	29	1,9	23	2,4						
	2.250	85	2,4	78	2,9	72	3,7	67	4				
	2.900	124	3,1	118	3,8	111	4,8	106	5,1	101	5,8	96	6,4
	3.400	155	3,7	148	4,4	142	5,6	137	6	132	6,8	127	7,5
<b>RVM 600</b>	1.450	120	4	105	5,0	90	6,2	77	6,6	65	7,6	54	8,5
	2.250	255	6,3	239	7,7	225	9,6	212	10,6	200	11,7	188	13,1
	2.900	364	8,1	349	10	335	12,4	322	13,7	309	15,1	297	16,9
	3.600	482	10	466	12,4	452	15,4	439	17	427	18,8	416	21
<b>RVM 1000</b>	1.450	244	5,9	232	7,1	220	9,1	210	9,7	200	11	190	12,3
	2.250	435	9,1	422	12,1	411	14,1	400	15,1	390	17	380	19
	2.900	590	11,7	576	14,3	565	18,2	566	19,7	545	22	536	24,5
	3.400	708	13,7	695	16,7	684	21,3	673	22,8	664	25,8	654	28,8
<b>RVM 2000</b>	1.450	788	16,2	763	19,8	740	25,4	719	27,2	699	30,9	680	34,6
	2.250	1.333	25,1	1.308	30,8	1.285	39,5	1.264	42,2	1.244	47,9	1.225	53,6
	2.900	1.776	32,3	1.751	39,7	1.728	50,9	1.707	54,4	1.687	61,8	1.669	69,1
	3.200	1.981	35,7	1.955	43,8	1.933	56,2	1.911	60	1.892	68,2	1.873	76,3
<b>RVM 4000</b>	1.000	1.488	30,1	1.442	36,9	1.400	47,4	1.363	50,7	1.326	57,6	1.293	64,5
	1.450	2.320	43,6	2.274	53,5	2.233	68,7	2.196	73,6	2.160	83,5	2.126	93,5
	1.750	2.876	52,6	1.750	64,6	2.788	83	2.750	88,7	2.714	100,8	2.681	113
	2.150	3.616	64,5	3.570	79,4	3.530	102	3.490	109	3.454	123,8	3.421	139
<b>RVM 5000</b>	900	2.752	56,6	2.675	69,2	2.977	98,2	2.537	94,4	2.475	107	2.418	119,5
	1.150	3.692	72,3	3.612	88,3	3.540	112,9	3.475	120,5	3.414	136,6	3.356	152,7
	1.450	4.820	91,2	4.740	111,5	4.668	142,4	4.603	152	4.540	172	4.482	192,5
	1.700	5.757	107	5.680	130,7	5.610	167	5.543	178,3	5.480	202	5.420	225,7