



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL  
DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE DOSIFICACIÓN DE  
FLOCULANTE Y DISEÑO DEL SISTEMA DE LAVADO PARA  
REACTOR DE MEZCLA EN LA EMPRESA WASCORP S.A.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**LENIN RAMIRO PASACA GUERRERO**

**DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS PARRA MENA MSC.**

**D. M. Quito,**

**2019**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Declaración.....	i
Certificación.....	ii
1. Tema.....	iii
2. Objetivos.....	iii
2.1. Objetivo general .....	iii
2.2. Objetivos específicos .....	iii
3. Problema .....	iv
4. Hipótesis.....	iv
5. Estado inicial del proyecto .....	2
6. Estudio teórico de sistemas de dosificación y lavado de un reactor químico.....	3
6.1. Reactor para mezclas químicas .....	3
6.2. Sistema homogéneo .....	4
6.3. Flocculante aniónico .....	4
7. Dimensionamiento del sistema automático de dosificación y lavado del reactor de mezcla.....	9
7.1. Dimensionamiento mecánico .....	10
7.1.1. Dimensionamiento de tolva dosificadora .....	10
7.1.2. Cálculo de dosificación por tornillo sin fin .....	12
7.1.3. Dimensionamiento y selección de motor para la dosificación.....	14
7.1.4. Verificación y cálculos de la estructura.....	16
7.1.4.1. Diseño y cálculo de viga principal de la estructura.....	17
7.1.4.2. Diseño y cálculo de viga secundaria de la estructura.....	23
7.1.5. Selección de bomba para el llenado del reactor .....	28
7.2. Diseño electrónico.....	34
7.2.1. Módulo de control .....	35
7.2.2. Control PLC .....	35

7.2.3.	HMI .....	37
7.2.4.	Elementos complementarios .....	37
7.2.4.1.	Guardamotor .....	39
7.2.4.2.	Contactador .....	40
7.2.4.3.	Relé térmico .....	40
7.2.4.4.	Disyuntor .....	41
7.2.4.5.	Portafusible .....	42
7.2.4.6.	Selector .....	42
7.2.4.7.	Luz piloto .....	43
7.3.	Programación .....	43
7.3.2.	Algoritmo de selección de volumen de producción.....	44
7.3.3.	Algoritmo del proceso de llenado del reactor.....	45
7.3.4.	Algoritmo del proceso de dosificación .....	46
7.3.5.	Algoritmo del proceso de lavado.....	47
	Referencias .....	49

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Situación inicial del proyecto .....	2
<b>Figura 2.</b> Esquema de reactor discontinuo [1] .....	4
<b>Figura 3.</b> Tipos de succión en bombas centrífugas [2] .....	6
<b>Figura 4.</b> Dosificador volumétrico de tipo tornillo giratorio [3] .....	7
<b>Figura 5.</b> Rango de diámetro del tanque [4] .....	8
<b>Figura 6.</b> Sistema de dosificación.....	10
<b>Figura 7.</b> Tronco de pirámide.....	11
<b>Figura 8.</b> Molino de maíz .....	13
<b>Figura 9.</b> Peso dosificado en una vuelta.....	14
<b>Figura 10.</b> Volumen sobre el tornillo dosificador.....	15
<b>Figura 11.</b> Gráfica de torque/velocidad en el Nema 17 [6] .....	16
<b>Figura 12.</b> Estructura general .....	17
<b>Figura 13.</b> Diagrama de cuerpo libre de la viga principal.....	18
<b>Figura 14.</b> Diagrama de cuerpo libre con valores de reacciones y momentos	20
<b>Figura 15.</b> Diagrama de cortantes en el plano YZ .....	21
<b>Figura 16.</b> Diagrama de momentos en el plano YZ .....	21
<b>Figura 17.</b> Extracto del catálogo de tubería estructural cuadrada de DIPAC ..	22
<b>Figura 18.</b> Diagrama de cuerpo libre de la viga secundaria .....	23
<b>Figura 19.</b> Diagrama de cuerpo libre con las reacciones y momentos .....	23
<b>Figura 20.</b> Diagrama de cortantes en la viga secundaria .....	24
<b>Figura 21.</b> Diagrama de momentos en la viga secundaria .....	24
<b>Figura 22.</b> Viga principal.....	26
<b>Figura 23.</b> Deflexión máxima .....	26
<b>Figura 24.</b> Factor de seguridad.....	26
<b>Figura 25.</b> Viga secundaria.....	26
<b>Figura 26.</b> Deflexión máxima .....	26
<b>Figura 27.</b> Factor de seguridad.....	26
<b>Figura 28.</b> Pórtico sin cartelas .....	27
<b>Figura 29.</b> Deflexión máxima .....	27
<b>Figura 30.</b> Factor de seguridad.....	27
<b>Figura 31.</b> Pórtico con cartelas .....	27
<b>Figura 32.</b> Deflexión máxima .....	27

<b>Figura 33.</b> Factor de seguridad.....	27
<b>Figura 34.</b> Simulación de deflexión en la estructura .....	28
<b>Figura 35</b> Rugosidad absoluta de materiales [9] .....	32
<b>Figura 36.</b> Curva de rendimiento de bombas EVANS. [11] .....	34
<b>Figura 37.</b> Diagrama de bloques del sistema automatizado .....	35
<b>Figura 38.</b> Módulo PLC LOGO! Basic.....	36
<b>Figura 39.</b> Módulo DM16 230R [13].....	36
<b>Figura 40.</b> LOGO! TDE de SIEMENS.....	37
<b>Figura 41.</b> Caja de control con sus componentes.....	38
<b>Figura 42.</b> Guardamotor Schneider GV3ME63.....	40
<b>Figura 43.</b> Contactor ABB AF09 .....	40
<b>Figura 44.</b> Relé térmico ABB TF42.....	41
<b>Figura 45</b> Disyuntor trifásico ABB S203 .....	41
<b>Figura 46.</b> Portafusible E91HN .....	42
<b>Figura 47.</b> Selector CAMSCO BD21 [17].....	42
<b>Figura 48.</b> Luz piloto CAMSCO 110/220 V [18] .....	43
<b>Figura 49.</b> Algoritmo general .....	44
<b>Figura 50.</b> Algoritmo selección de volumen de producción .....	45
<b>Figura 51.</b> Algoritmo del proceso de llenado del reactor .....	46
<b>Figura 52.</b> Algoritmo del proceso de dosificación .....	47
<b>Figura 53.</b> Algoritmo del proceso de lavado .....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Características Floculante Aniónico.....	5
<b>Tabla 2.</b> Propiedades físicas y químicas de la Poliacrilamida.....	5
<b>Tabla 3.</b> Alternativas de sistemas de lavado de Spraying Systems .....	8
<b>Tabla 4.</b> Características del Nema 17 y la caja reductora.....	16
<b>Tabla 5.</b> Propiedades de los elementos sobre la estructura .....	17
<b>Tabla 6.</b> Tabla comparativa de la estructura.....	26
<b>Tabla 7.</b> Accesorios con constantes por pérdidas en tuberías.....	32
<b>Tabla 8.</b> Entradas y salidas del sistema de dosificación y lavado.....	35
<b>Tabla 9.</b> Características del módulo DM16 230R [13].....	37
<b>Tabla 10.</b> Características de los elementos complementarios .....	39

## DECLARACIÓN

Yo, Lenin Ramiro Pasaca Guerrero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.

.....

Lenin Ramiro Pasaca Guerrero

C.C: 1722417662

## **CERTIFICACIÓN**

El docente de la Facultad de Ciencias Técnicas, escuela de Ingeniería Mecatrónica Ingeniero Juan Carlos Parra Mena encargado de la revisión del documento final,

### **CERTIFICA QUE:**

El proyecto de investigación denominado “Automatización de un sistema de dosificación de floculante y diseño del sistema de lavado para reactor de mezcla en la empresa Wascorp S.A.”, fue desarrollado por el Sr. Lenin Ramiro Pasaca Guerrero y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la carrera de Ingeniería Mecatrónica, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

---

**Ing. Juan Carlos Parra Mena MSC.  
DIRECTOR DE PROYECTO**

## DOSIFICACIÓN Y LAVADO DEL REACTOR DE MEZCLA

### 1. TEMA

“Automatización de un sistema de dosificación de floculante y diseño del sistema de lavado para reactor de mezcla en la empresa Wascorp S.A.”

### 2. OBJETIVOS

#### 2.1. Objetivo general

Automatizar un sistema de dosificación de floculante y diseñar un sistema de lavado del reactor de mezcla para la empresa Wascorp S.A.

#### 2.2. Objetivos específicos

- Investigar y documentar los sistemas de dosificación de productos sólidos.
- Investigar las técnicas de control para actuadores mecánicos y eléctricos; y la instrumentación industrial requerida para aplicaciones de dosificación.
- Automatizar el sistema de dosificación de sólidos que ingresan desde una tolva hacia el reactor para diferentes volúmenes de mezcla.
- Diseñar un sistema de carga de líquido en el reactor para la mezcla y un sistema de lavado del reactor que optimice los recursos.
- Diseñar una interfaz Humano-Máquina para el control y operación de sistema semiautomático de dosificación y seleccionar sensores y actuadores adecuados para el proceso.
- Generar los reportes con los parámetros de producción según la dosificación en la mezcla y el tiempo del proceso.



- Desarrollar y simular un protocolo de pruebas del funcionamiento del sistema automatizado.

### **3. PROBLEMA**

La empresa de Wascorp S.A realiza servicios de diseño, implementación y mantenimiento de plantas de agua potable y residuales, utilizando productos químicos propiamente elaborados para sus tratamientos, uno de sus productos es el polímero floculante aniónico denominado WCA-301. Para la elaboración se utiliza un reactor mezclador de capacidad de 1000 litros y una fórmula de agua con acrilamida a relación de 1 a 1.

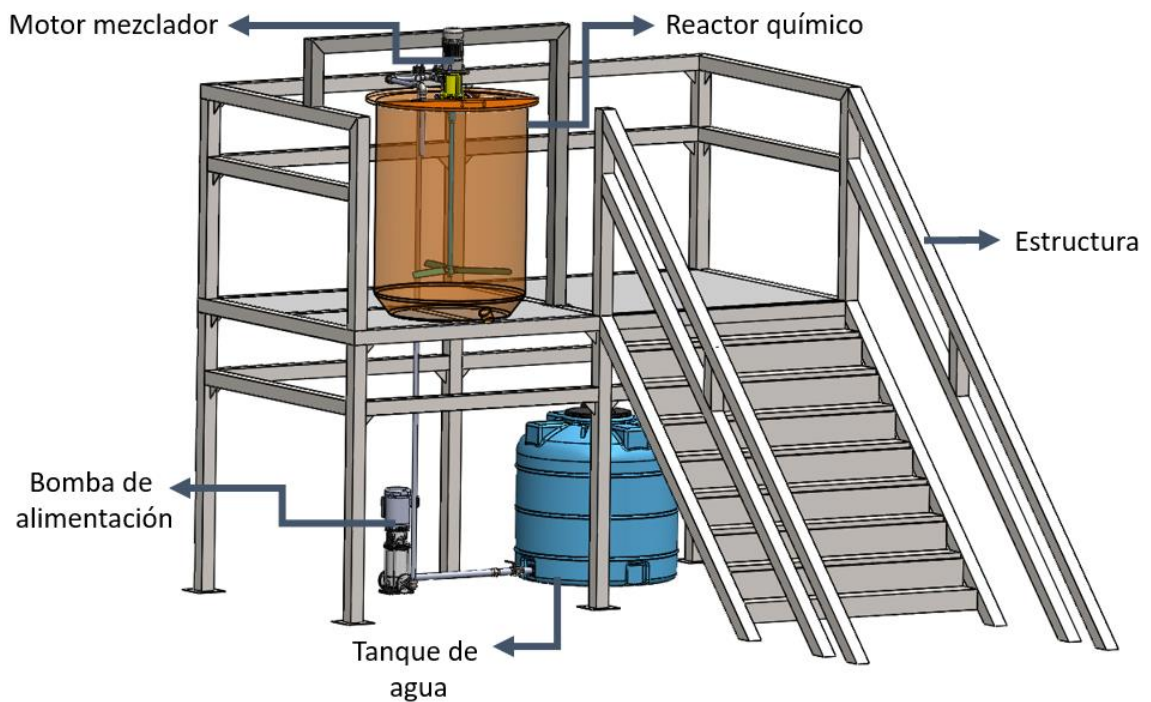
Actualmente un operario realiza una dosificación manual de la acrilamida, verificando las cantidades ingresadas de materia prima en el reactor para la elaboración del producto mencionado. Este proceso ocasiona la aparición de grumos en mezcla final del producto químico, por lo que la experiencia de la empresa ha determinado realizar una dosificación continua en el transcurso de una hora. Para realizar otra dotación del producto es necesaria la purga y limpieza del reactor. Se busca una solución mediante la automatización que permitirá la optimización de todo el proceso tanto en tiempo, calidad y recursos; conjuntamente que el proceso aporte con la reducción de recursos en el proceso de lavado.

### **4. HIPÓTESIS**

La automatización de un dosificador de floculante y sistema de lavado del reactor con capacidad de 1000 litros para la elaboración del producto WCA-301 reducirá en un 30% el recurso de agua y en un 10% la aparición de grumos en la mezcla.

## 5. ESTADO INICIAL DEL PROYECTO

La empresa Wascorp S.A. obtiene su producto mediante la planta de elaboración mostrada en la Figura 1, cuenta con un reactor químico en donde se obtiene la mezcla del agua con la acrilamida utilizando un motor mezclador que gira las aspas. El llenado del reactor se realiza por medio de una bomba de agua que alimenta desde un tanque de agua, todo el sistema se encuentra implementado en la estructura.



**Figura 1.** Situación inicial del proyecto

Para la automatización del proceso se incluye el sistema de dosificación, el sistema de lavado y el sistema de control.

El motor mezclador es un Siemens SIMOTICS GP con las siguientes características:

- Trifásico 50 Hz 230 VD/400 VY
- Potencia de 2.2 kW (3 Hp)
- 4 polos
- 1500 rpm

## 6. ESTUDIO TEÓRICO DE SISTEMAS DE DOSIFICACIÓN Y LAVADO DE UN REACTOR QUÍMICO

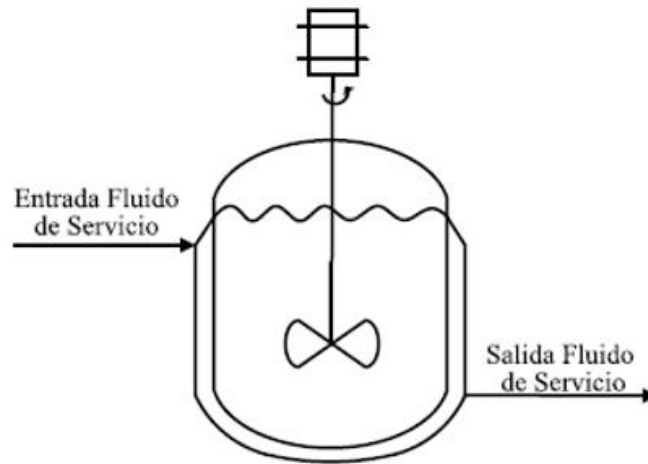
En este capítulo se analiza los aspectos relacionados con el proceso de elaboración del producto previamente mencionado, se utilizan los siguientes componentes: reactor de mezcla, bomba centrífuga, agitador, motor monofásico y poliacrilamida aniónica.

### 6.1. Reactor para mezclas químicas

Es un dispositivo en donde se genera un cambio en a la composición de sustancias o sólidos debido a la reacción química. Por lo general son recipientes con gran volumen lo que proporciona un tiempo de residencia largo. Los tipos de reactores químicos utilizados en diversos procesos industriales existen en una gran variedad de diseños que no siempre tienen ninguna relación específica con la clase de reacción o el tipo de operación [1].

#### 6.1.1. Reactor discontinuo

Este tipo de reactor admite los reactivos al principio y los procesa según un curso predeterminado de reacción durante el cual no se alimenta o se extrae ningún material. Por lo general el reactor tiene forma de tanque cónico o cilíndrico, en la Figura 2 se observa el esquema de un reactor.



**Figura 2.** Esquema de reactor discontinuo [1]

## 6.2. Sistema homogéneo

Es aquel que presenta una sola fase y por tanto su composición es idéntica a cualquier parte del sistema, es decir, una mezcla de fluidos solubles, cuyos objetivos principales son lograr el equilibrio de gradiente de temperatura y de gradiente de concentración. Se utiliza para la neutralización de ácidos/base, diluir disoluciones de alta concentración, mezcla de fluidos con temperaturas distintas y distribución de polímeros en suspensión para floculación.

## 6.3. Floculante aniónico

El producto WCA-301 es un floculante elaborado con polímeros sólidos que tienen un elevado peso molecular, estos actúan como aceleradores de sedimentación después de realizar un tratamiento previo de coagulación, o como agentes clarificantes. El principal producto utilizado para su elaboración es la poliacrilamida aniónica.

Este floculante puede presentarse en estado sólido y líquido dependiendo de su aplicación; en sólidos, el producto se aplica lentamente y en agitación en agua para realizar la disolución, mientras que en líquidos el producto debe

aplicarse gradualmente sobre el agua en agitación. El producto tiene las características observadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Características Floculante Aniónico

Color	Blanco transparente
Aspecto	Sólido
Olor	Inodoro
Gravedad específica	1.01
Porcentaje de volátiles por peso	10-15 (agua)
pH	6.0-8.0 (solución acuosa)

#### 6.4. Polímero poliacrilamida aniónica

La poliacrilamida es el producto químico más importante en el grupo acrilamida según la EPA (Environmental Protection Agency) se produce a un ritmo de 6311 libras por año. El principal uso es la elaboración de polímeros solubles en agua, llamados polielectrolitos, floculantes, coagulantes, agentes espesantes, auxiliares de retención y auxiliares de drenaje. El proveedor del producto da las especificaciones observadas a continuación en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Propiedades físicas y químicas de la Poliacrilamida

Color	Blanco transparente
Aspecto	Sólido
Olor	inodoro
Gravedad específica	0.85
Porcentaje de volátiles por peso	10-15 (agua)
pH	6.0-8.0 (solución acuosa)

## 6.5. Bomba de agua vertical

Las bombas más utilizadas para abastecer de agua a un contenedor son las bombas centrífugas verticales. Son equipos que tienen el eje de transmisión de la bomba en forma vertical. Tienen la ventaja de poder ser instaladas en un lugar distinto de la fuente de abastecimiento, lo cual permite ubicarlas en lugares secos o sumergidos. Se pueden clasificar, de acuerdo a la posición del eje de la bomba con respecto al nivel del agua en la cisterna de bombeo, en bombas de succión positiva y bombas de succión negativa. Si la posición del eje está sobre la superficie del agua, la succión es positiva y en la situación inversa la succión es negativa. Si la posición del eje de la bomba esta sobre la superficie del agua, la succión es positiva y en el contrario la succión es negativa como se observa en la Figura 3.

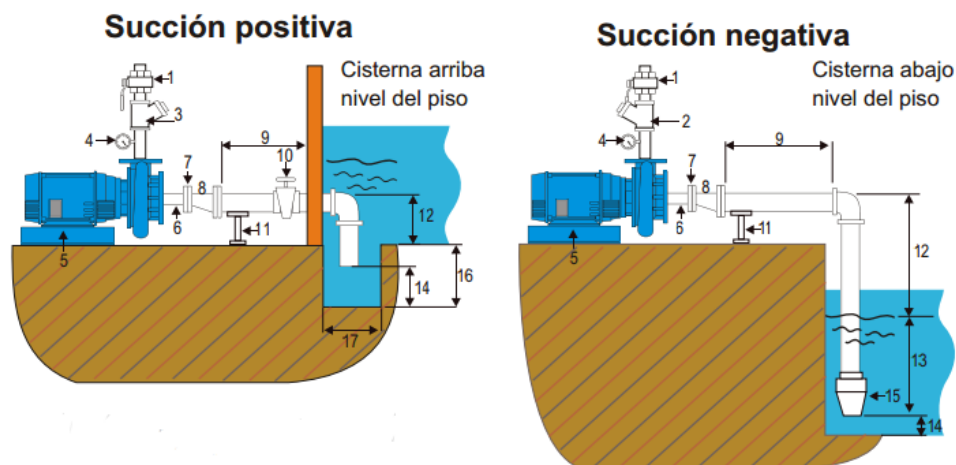


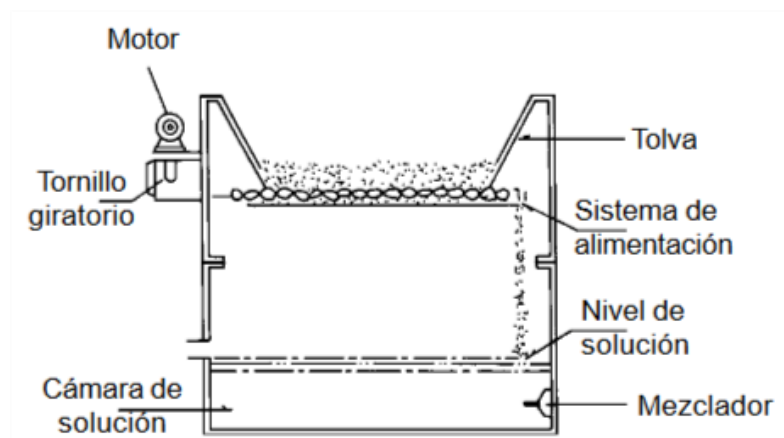
Figura 3. Tipos de succión en bombas centrífugas [2]

## 6.6. Sistemas de dosificación en seco

Las industrias químicas utilizan sistemas para la dosificación de sus productos por medio de varias alternativas, que dependerán de la cantidad y el estado del producto (sólidos o líquidos).

### 6.6.1. Dosificador en seco volumétrico de tipo tornillo giratorio

El dosificador transporta el material químico por medio de un tornillo sin fin sumergido en la masa del producto que va a ser dosificado, el cual es arrastrado por el movimiento del dosificador en sentido del eje de rotación accionado por un motor. En la parte superior del tornillo se ubica la tolva de almacenamiento, y en la parte inferior el reactor en donde se realiza la mezcla como se observa en la Figura 4.



**Figura 4.** Dosificador volumétrico de tipo tornillo giratorio [3]

### 6.7. Sistemas aspersores

Son sistemas o dispositivos que transforman un flujo de un líquido en un rocío o chorro por medio de una presión determinada. Una de las aplicaciones más comunes son el sistema de riego y sistemas de lavado.

### 6.8. Sistema de aspersión TankJet

El TankJet es un sistema para lavado de tanques con el objetivo de limpiar a fondo en el menor tiempo posible y utilizando la menor cantidad de agua y productos químicos. Las boquillas de flujo rotan a 360° para proporcionar una cobertura completa de todo el tanque cada 45 revoluciones. En la Tabla 3 se observan las principales características de varios modelos presentados por el catálogo de Spraying Systems CO.

**Tabla 3.** Alternativas de sistemas de lavado de Spraying Systems

Modelo	Min diámetro de tanque (m)	Max diámetro de tanque (m)	Flujo (lpm)	Presión de operación (psi)
TANKJET® 360	6.1	30	114-1136	40-350
TANKJET® AA290	6.1	7.3	91-1075	50-250
TANKJET® YMD3	1.8	9.1	32.6-142	50-300
TANKJET® 75	0.9	9.1	57-125	75-300

El reactor de mezcla utilizado para la elaboración del producto es de un metro de diámetro. A continuación, en la Figura 5 se observa un extracto del catálogo de Spraying Systems Co. para el rango máximo y mínimo del diámetro del tanque a lavar. [4]

		Tank Diameter Range																								
Foot		0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Meters		0.2	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.7	4.3	4.9	5.5	6.1	9.1	12	15	18	21	24	27	30	
TankJet® 360																									100	
TankJet AA290																										100
TankJet 180																										80
TankJet 80																										50
TankJet 78 & 78D																										45
TankJet 65 & 65HT																										40
TankJet AA190																										40
TankJet YMD3																										30
TankJet 75																										30

**Figura 5.** Rango de diámetro del tanque [4]

Para el lavado del reactor se utiliza el modelo TankJet 75 ideal para el lavado de contenedores y tanques químicos.

### 6.9. Pérdida de carga y caída de presión en válvulas y accesorios

La pérdida de carga en válvulas y accesorios se da generalmente en función del coeficiente de resistencia  $K$  que indica la pérdida de altura de presión estática en una válvula, en función de la altura de velocidad en longitud



equivalente, en diámetros de tubería  $L/D$ , que cause la misma pérdida de presión que la válvula. [5]

La pérdida de presión de una tubería está dada por (1).

$$h_f = F \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g_n} \quad (1)$$

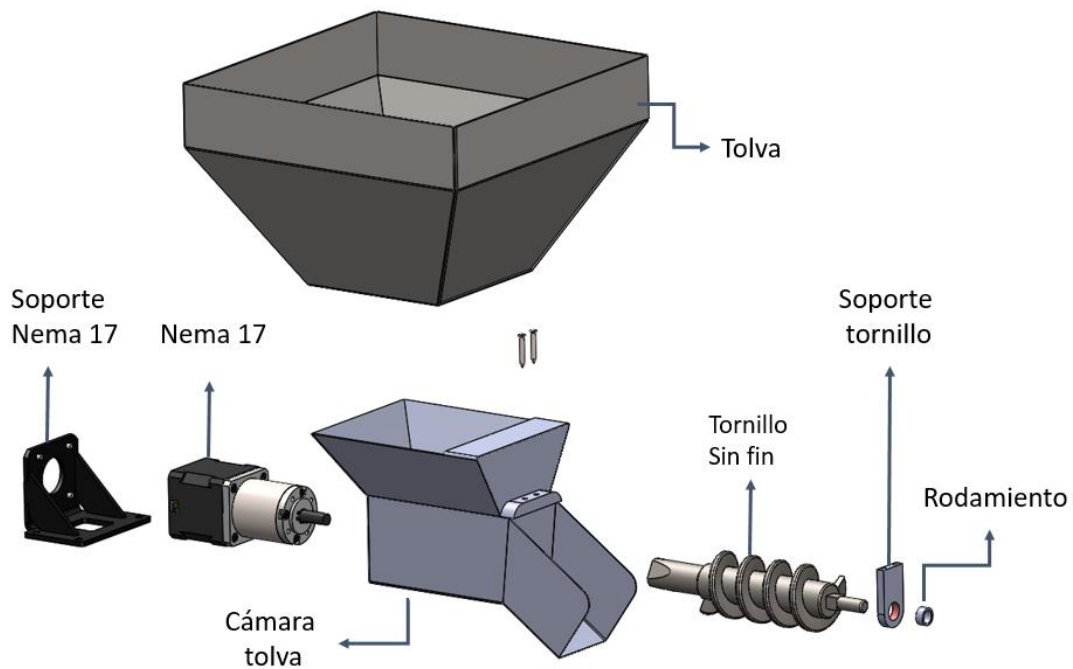
Donde:

$h_f$ :	Perdidas por fricción en la tubería [m]
$F$ :	Fricción [m]
$L$ :	Longitud [m]
$v$ :	Velocidad en la sección transversal del conducto [m/s]
$D$ :	Diámetro del tubo [m]
$g$ :	Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]

## 7. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE DOSIFICACIÓN Y LAVADO DEL REACTOR DE MEZCLA

A continuación, se presenta el diseño y selección de los componentes que intervienen en el proceso de dosificación de la acrilamida aniónica, sistema de alimentación y para el proceso de lavado empezando por el diseño mecánico.

En la Figura 6 se observa el sistema de dosificación del cual se dimensiona y selecciona sus componentes.



**Figura 6.** Sistema de dosificación

## 7.1. Dimensionamiento mecánico

En esta sección se dimensiona la tolva y motor para la dosificación, se comprueba la resistencia del perfil utilizado actualmente en la estructura con las adecuaciones necesarias para implementar la tolva dosificadora y el sistema de lavado, además se selecciona una nueva bomba que acapare la alimentación y lavado del reactor.

### 7.1.1. Dimensionamiento de tolva dosificadora

La empresa Wascorp S.A. adquiere el producto (poliacrilamida aniónica) en paquetes de 25 kg, basados en las propiedades mostradas en la sección 5.4, se obtiene el valor de la densidad relativa o gravedad específica. Se obtiene la densidad de la poliacrilamida en (2).

$$\rho_r = \frac{\rho_m}{\rho_{agua}} \quad (2)$$

Donde:

$\rho_r$  Densidad relativa

$\rho_m$  Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_{agua}$  Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$$0.85 \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 = \rho_m$$

$$\rho_m = 850 \text{ kg/m}^3$$

Partiendo de la densidad obtenida se encuentra el volumen que ocupa 25 kg de poliacrilamida en (3).

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (3)$$

Donde:

$v$  Volumen [m<sup>3</sup>]

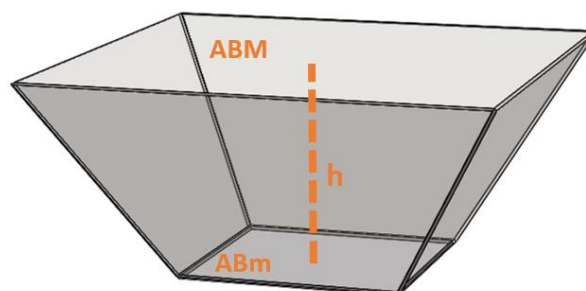
$m$  Masa [kg]

$\rho_m$  Densidad del material [kg/m<sup>3</sup>]

$$v = \frac{25 \text{ kg}}{850 \text{ kg/m}^3}$$

$$v = 0.0294 \text{ m}^3$$

En la Figura 7 se observa el tronco de pirámide la cuál será utilizada para el dimensionamiento de la tolva, se analiza una sección en la parte superior e inferior.



**Figura 7.** Tronco de pirámide

En (4) se observa la fórmula para calcular el volumen del tronco de la tolva.

$$V_t = \frac{h}{3} (A_{BM} + A_{Bm} + \sqrt{A_{BM} \cdot A_{Bm}}) \quad (4)$$

Donde:

$V_t$	Volumen del tronco [mm <sup>3</sup> ]
$h$	Altura del tronco [mm]
$A_{BM}$	Área de la sección mayor [mm <sup>2</sup> ]
$A_{Bm}$	Área de la sección menor [mm <sup>2</sup> ]

Para la sección mayor se utiliza el doble de la longitud de la sección menor por lo que se encuentra (5) y (6).

$$A_{BM} = x_1 \cdot x_1 \quad (5)$$

$$A_{Bm} = 2x_1 \cdot 2x_1 \quad (6)$$

Donde:

$x_1$	Longitud del cuadrado de sección
-------	----------------------------------

Se da valores para el lado rectangular superior e inferior.

$$x_1 = 100 \text{ mm}$$

$$h = 350 \text{ mm}$$

Reemplazando (4) y (5) en (3) se obtiene el volumen del tronco.

$$V_{tronco} = \frac{350}{3} \cdot ((100 \text{ mm} \cdot 100 \text{ mm}) + (200 \text{ mm} \cdot 200 \text{ mm}) + \sqrt{100 \cdot 100 \cdot 200 \cdot 200})$$

$$V_{tronco} = 0.0516 \text{ m}^3$$

Con este volumen se cubre el espacio de 25 kg y un 40% de espacio vacío en la tolva.

### 7.1.2. Cálculo de dosificación por tornillo sin fin

Para la dosificación de 1kg de acrilamida se utiliza un molino de granos de maíz que posee un tornillo dosificador como se observa en la Figura 8.



**Figura 8.** Molino de maíz

Para obtener un resultado válido, se utiliza el diseño de experimentos para encontrar el número de muestras necesarias para encontrar que cantidad de producto se dosifica en una vuelta. Se parte por encontrar el número de muestras a realizar, dada por (7).

$$n = \frac{Z^2 Pq}{\varepsilon^2} \quad (7)$$

Donde:

$n$	Número de muestras
$Z$	Nivel de confianza
$P$	Probabilidad de acertar
$q$	Probabilidad de fallar
$\varepsilon$	Error

Reemplazando los datos se obtiene el número de muestras a realizar.

$$n = \frac{1.65^2 \cdot 0.5 \cdot 0.5}{0.1^2} = 68$$

Las muestras realizadas se encuentran en el Anexo D.

Mediante una balanza se pesó un promedio de 8.55 gramos de producto dosificado en una vuelta como se observa en la Figura 9.

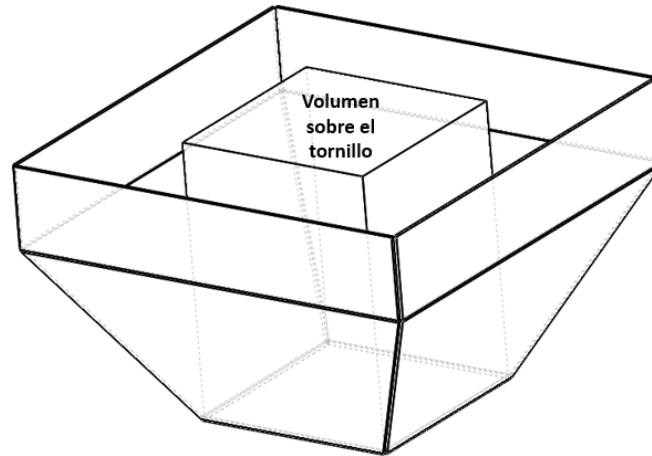


**Figura 9.** Peso dosificado en una vuelta

Se requiere dosificar 1000 kg del producto, por lo cual se necesita de 1 rpm del motor para dosificar en una hora intermitentemente cada 5 minutos, para dosificar a 500 g se encenderá el motor intermitentemente cada 10 minutos.

### 7.1.3. Dimensionamiento y selección de motor para la dosificación

Como se observa en la sección 7.1.1 se necesita un motor que gire a bajas velocidades, a continuación, se calcula el torque necesario para elegir el tipo de motor. Se empieza calculando la masa sobre el tornillo dosificador y luego la fuerza de fricción que debe vencer el motor para transportar el producto al reactor mezclador. En la Figura 10 se observa el volumen ocupado por el floculante.



**Figura 10.** Volumen sobre el tornillo dosificador

En la sección 6.1.2 se tienen las dimensiones del tronco de la pirámide, se reemplaza y se obtiene la masa.

$$v = 0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} \times 0.35 \text{ m} = 0.0035 \text{ m}^3$$

$$m = 0.0035 \text{ m}^3 \times 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2.97 \text{ kg}$$

El motor debe vencer la fuerza de fricción entre el tornillo y el producto por lo cual se tiene (8) y (9).

$$\tau = Fr \times d \quad (8)$$

$$Fr = N \times \mu \quad (9)$$

Donde:

$\tau$ : Torque del motor [Nm]

$Fr$ : Fuerza de fricción [N]

$d$ : Distancia de recorrido del tornillo [Nm]

$N$ : Fuerza normal [N]

$\mu$ : Coeficiente de fricción

Se reemplaza y se tiene el torque.

$$N = 2.97 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2 = 29.10 \text{ N}$$

$$\tau = (29.10 \text{ N} \times 0.25) \times 0.15 \text{ m}$$

$$\tau = 1.09 \text{ Nm}$$

Se considera un 50% de factor de seguridad en el torque del motor y se tiene lo siguiente.

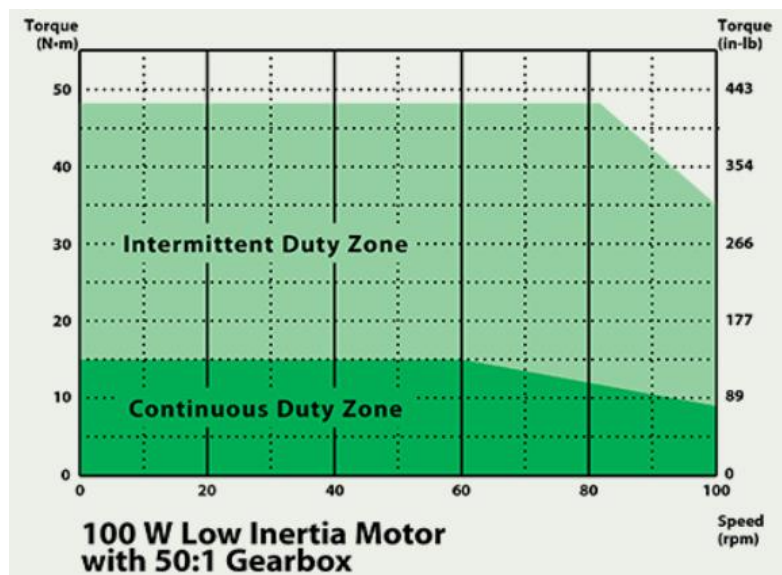
$$\tau = 2.18 \text{ Nm}$$

Se selecciona un motor a pasos Nema 17 con una caja reductora 50:1. En la Tabla 4 se observa sus características.

**Tabla 4.** Características del Nema 17 y la caja reductora

	Torque Nominal	Velocidad nominal	Potencia
Nema 17	0.95 Nm	-	100 Watts
Caja reductora	27 Nm	3000 rpm	-
Motor con reducción	14.40 Nm	60 rpm	100 Watts

En la Figura 11, se observa la zona en la que el motor trabaja con un ciclo de trabajo continuo. [6]



**Figura 11.** Gráfica de torque/velocidad en el Nema 17 [6]

#### 7.1.4. Verificación y cálculos de la estructura

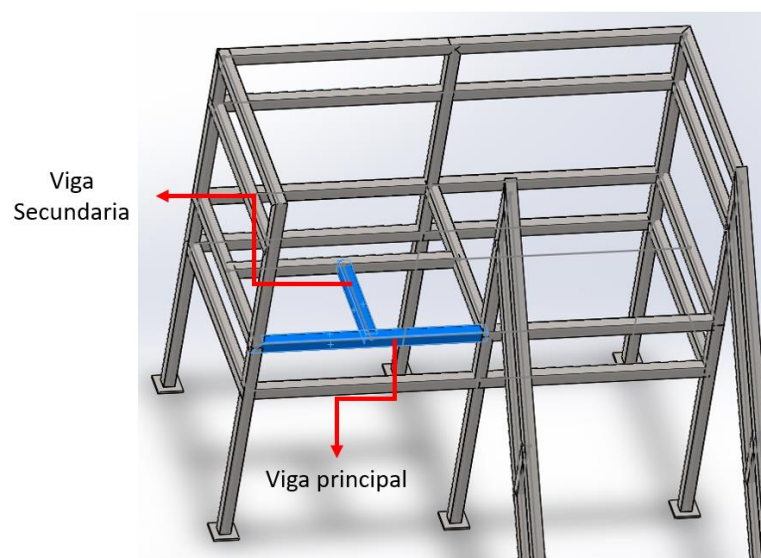


La estructura es la parte encargada de soportar el peso del reactor, tolva dosificadora, motor mezclador y el resto de componentes del sistema. En la Tabla 5 se detallan los elementos, su masa y la fuerza que ejercen.

**Tabla 5.** Propiedades de los elementos sobre la estructura

Peso de los elementos		
Elemento	Masa (kg)	Peso (N)
Reactor vacío	306	3001.86
Agua	1000	9810
Viga Motor	41.29	405.05
Tolva	1.13	11.10
Cámara tolva	0.37	3.59
Tornillo sin fin	0.49	4.77
Persona	70	687
Motor dosificador	43.5	427
Motor agitador	50	490.5
<b>Total</b>	<b>1512.77</b>	<b>14840.31</b>

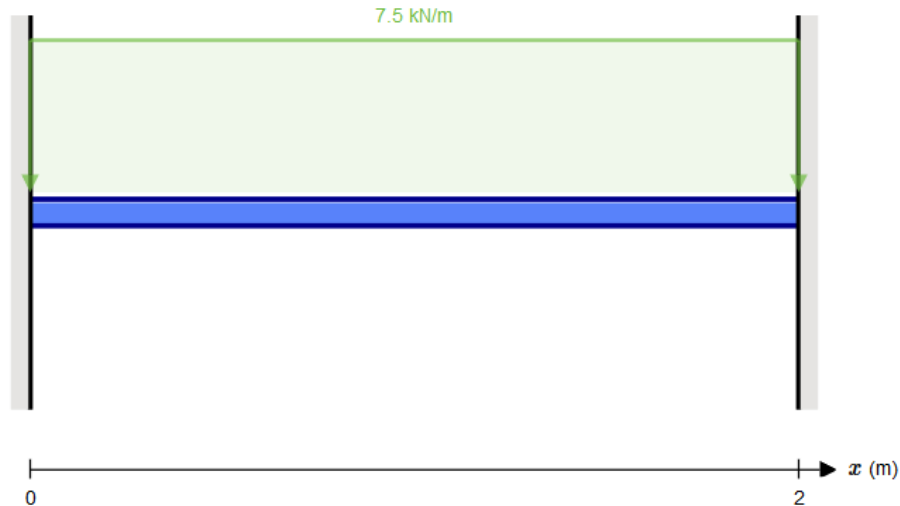
La mayor carga en la estructura se encuentra soportada por la viga principal y la viga secundaria como se observa en la Figura 12, en las cuales se estableció el cálculo para verificar que la estructura resiste el peso de los componentes.



**Figura 12.** Estructura general

#### 7.1.4.1. Diseño y cálculo de viga principal de la estructura

Se aproxima una carga distribuida en los 2 metros de la viga principal lo que se obtiene una  $W=7500$  N/m, en la Figura 13 se observa el diagrama de cuerpo libre de la viga.



**Figura 13.** Diagrama de cuerpo libre de la viga principal

Se requiere comparar la inercia del fabricante de la viga con la calculada en el sistema para conocer si es viable usar el perfil con sus respectivas dimensiones. Se utiliza el método de la doble integración que se observa en (8).

$$E \cdot I \cdot Y = \iint M(x) \quad (8)$$

Donde:

$E$ :	Módulo de elasticidad [GPa]
$I$ :	Inercia del perfil [ $\text{cm}^4$ ]
$Y$ :	Deflexión Máxima [Nm]
$M(x)$ :	Sumatoria de momentos [N/m]

Se realiza la sumatoria de momentos en la viga principal con respecto a la Figura 8 en (9).

$$M(x) = R_a(x) - \frac{W(x^2)}{2} - M_a(x^0) \quad (9)$$

Se obtiene la primera integración, se observa en (10).

$$E \cdot I \cdot \theta = \int M(x) \quad (10)$$

$$E \cdot I \cdot \theta = R_a \left( \frac{x^2}{2} \right) - \frac{W(x^3)}{3} - M_a(x) + C_1$$

Donde:

$R_a, R_b$ : Reacción en a y en b [N]

$W$ : Carga distribuida total [N/m]

$M_a$ : Momento en el punto a [Nm]

$x$ : Distancia [m]

$C_1, C_2$ : Constantes

Se realiza la segunda integración en (11)

$$E \cdot I \cdot Y = \iint M(X) \quad (11)$$

$$E \cdot I \cdot Y = \frac{R_a x^3}{6} - \frac{W(x^4)}{24} - \frac{M_a(x^2)}{2} + C_1 x + C_2$$

Para resolver el siguiente sistema y encontrar las constantes se reemplaza con las condiciones de frontera siguientes:  $x=0, \theta=0, Y=0$ , en las ecuaciones (10) y (11) y se obtiene:

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = 0$$

Para obtener  $R_a$  se aplica la segunda condición de frontera  $x=l$  y  $\theta=0$  en (12).

$$0 = R_a \left( \frac{l^2}{2} \right) - \frac{W(l^3)}{3} - M_a(l) + C_1$$

$$R_a = \frac{ql^2 + 6 Ma}{3l} \quad (12)$$

Se aplica la condición de frontera  $x=l$  y  $Y=0$  en la ecuación (13) y se despeja  $R_a$ .

$$0 = \frac{R_a l^3}{6} - \frac{W(l^4)}{24} - \frac{M_a(l^2)}{2} + C_1 l + C_2$$

$$R_a = \frac{ql^2 + 12 Ma}{4l} \quad (13)$$

Igualando la ecuación (12) y (13) se obtiene  $Ma$ .

$$M_a = \frac{ql^2}{12} \quad (14)$$

Reemplazando (14) en (13) se obtiene  $R_a$ .

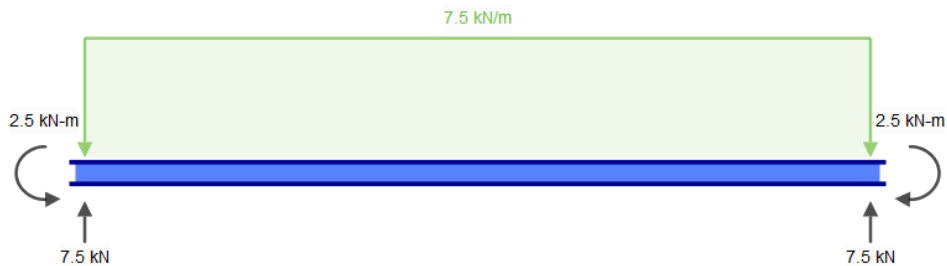
$$R_a = \frac{ql}{2} \quad (15)$$

Se obtienen los valores siguientes:

$$R_a = 7500 \text{ N}$$

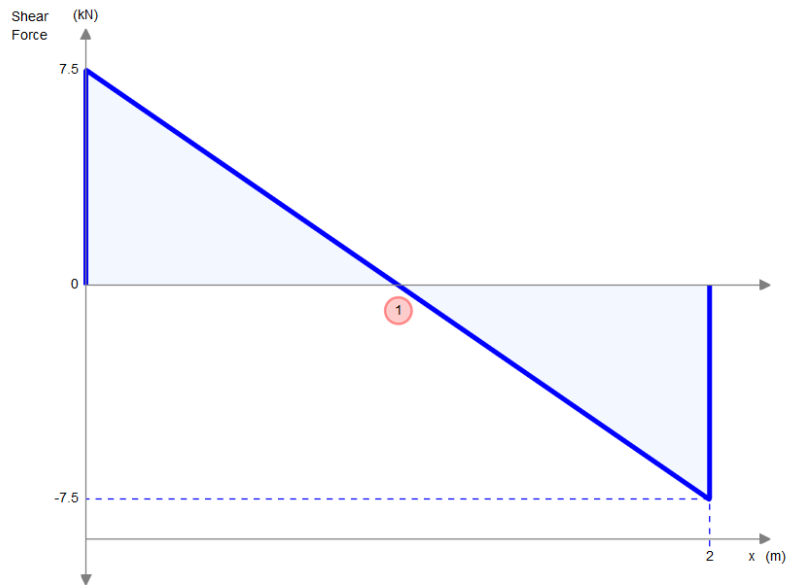
$$M_a = -2500 \text{ N/m}$$

En la Figura 14 se observa el diagrama de cuerpo libre con las reacciones y momentos.

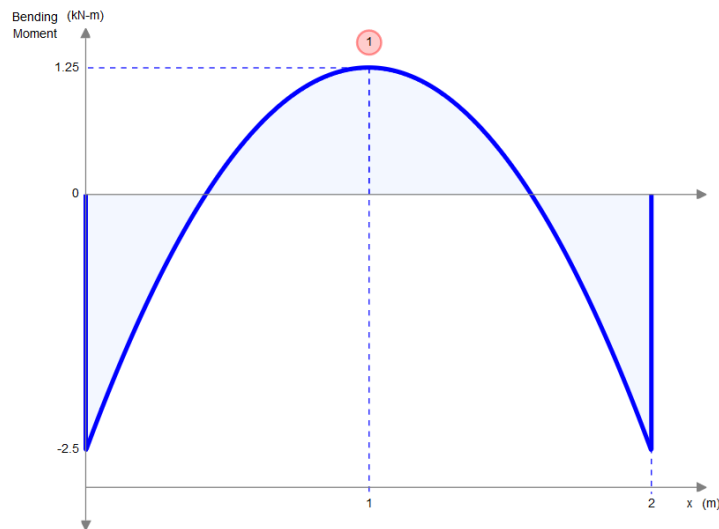


**Figura 14.** Diagrama de cuerpo libre con valores de reacciones y momentos

Se obtiene el diagrama de cortantes en la Figura 15 y en la Figura 16 el diagrama de momentos.



**Figura 15.** Diagrama de cortantes en el plano YZ



**Figura 16.** Diagrama de momentos en el plano YZ

Para obtener la inercia se reemplaza  $R_a$  y  $M_a$  en la ecuación (11)

$$E \cdot I \cdot Y = \frac{7500 \text{ N} \cdot (1 \text{ m})^3}{6} - \frac{7500 \text{ N/m} \cdot (1 \text{ m})^4}{24} - \frac{2500 \text{ N/m} \cdot (1 \text{ m})^2}{2}$$

$$I = \frac{-312.5 \text{ Nm}^3}{E \cdot Y} \quad (16)$$

La deflexión máxima se obtiene de los valores numéricos recomendados para máquinas dados por (17). [7]

$$\frac{L}{300} > Y > \frac{L}{2000} \quad (17)$$

Se reemplaza para el límite superior y se obtiene la deflexión.

$$Y_{adm} = \frac{L}{2000} = \frac{2 \text{ m}}{2000} = -0.001 \text{ m}$$

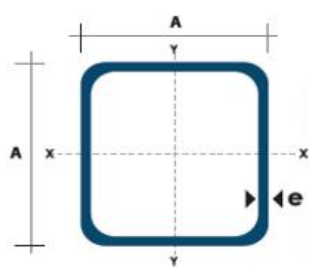
Se reemplaza en (16) la deflexión máxima y el módulo de elasticidad para acero inoxidable 304 (190 GPa), se obtiene el siguiente resultado.

$$I = \frac{-312.5 \text{ Nm}^3}{E \cdot Y} = \frac{-312.5 \text{ Nm}^3}{190 \text{ GPa} \cdot -0.001 \text{ m}}$$

$$I = 164.47 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I = 164.47 \text{ cm}^4$$

De acuerdo a la Figura 17 se observa la inercia del fabricante y se compara con la previamente calculada se encuentra en el Anexo D.



Dimensiones			Área		Ejes X-Xe Y-Y	
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm <sup>2</sup>	I cm <sup>4</sup>	W cm <sup>3</sup>	I cm <sup>3</sup>
20	1.2	0.72	0.90	0.53	0.53	0.77
20	1.5	0.88	1.05	0.58	0.58	0.74
20	2.0	1.15	1.34	0.69	0.69	0.72
25	1.2	0.90	1.14	1.08	0.87	0.97
25	1.5	1.12	1.35	1.21	0.97	0.95
25	2.0	1.47	1.74	1.48	1.18	0.92
30	1.2	1.09	1.38	1.91	1.28	1.18
30	1.5	1.35	1.65	2.19	1.46	1.15
30	2.0	1.78	2.14	2.71	1.81	1.13
40	1.2	1.47	1.80	4.38	2.19	1.25
40	1.5	1.82	2.25	5.48	2.74	1.56
40	2.0	2.41	2.94	6.93	3.46	1.54
40	3.0	3.54	4.44	10.20	5.10	1.52
50	1.5	2.29	2.85	11.06	4.42	1.97
50	2.0	3.03	3.74	14.13	5.65	1.94
50	3.0	4.48	5.61	21.20	4.48	1.91
60	2.0	3.66	3.74	21.26	7.09	2.39
60	3.0	5.42	6.61	35.06	11.69	2.34
75	2.0	4.52	5.74	50.47	13.46	2.97
75	3.0	6.71	8.41	71.54	19.08	2.92
75	4.0	8.59	10.95	89.98	24.00	2.87
100	2.0	6.17	7.74	122.99	24.60	3.99
100	3.0	9.17	11.41	176.95	35.39	3.94
100	4.0	12.13	14.95	226.09	45.22	3.89
100	5.0	14.40	18.36	270.57	54.11	3.84

**Figura 17.** Extracto del catálogo de tubería estructural cuadrada de DIPAC

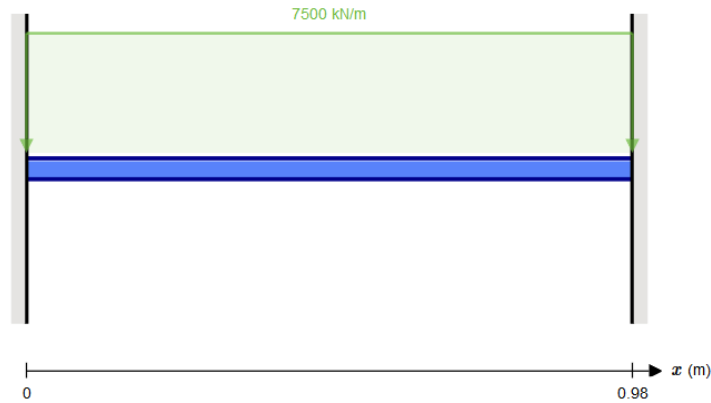
$$I_{Fabricante} = 176.95 \text{ cm}^4$$

$$I_{Fabricante} > I_{Calculada}$$

La inercia del fabricante es mayor a la calculada por lo que se asegura un diseño resistente en la viga principal de la estructura.

### 7.1.4.2. Diseño y cálculo de viga secundaria de la estructura

De igual manera que en la viga principal se obtiene la carga distribuida pero esta vez a lo largo de la viga secundaria de 0.98 m como se observa en la Figura 16.



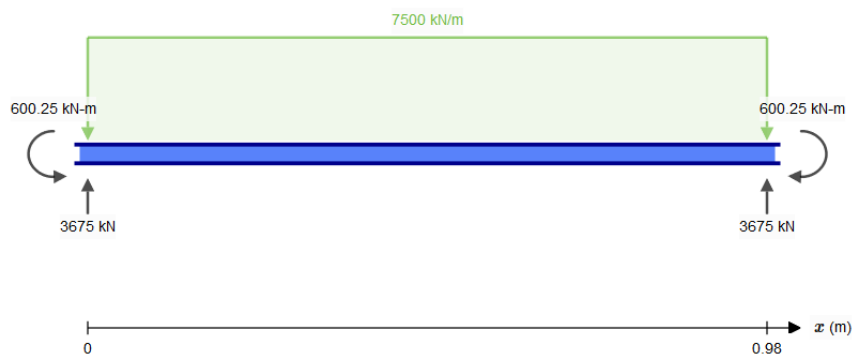
**Figura 18.** Diagrama de cuerpo libre de la viga secundaria

Utilizando el método de la doble integral se reemplaza los valores obtenidos en (14) y (15) para obtener los valores de momentos y reacciones.

$$M_a = \frac{ql^2}{12} = \frac{7500 \text{ N/m} \cdot (0.98 \text{ m})^2}{12} = 600.25 \text{ Nm}$$

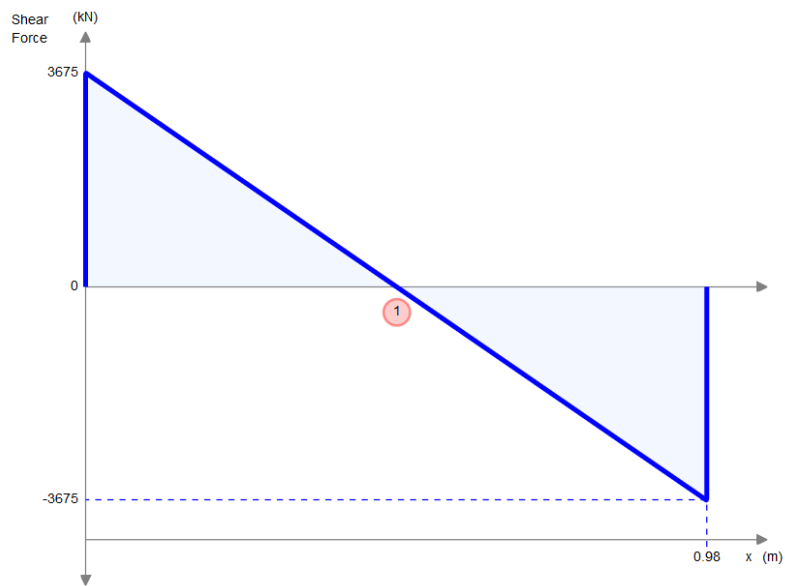
$$R_a = \frac{ql}{2} = \frac{7500 \text{ N/m} \cdot 0.98 \text{ m}}{2} = 3675 \text{ N}$$

En la Figura 19 se observa el diagrama de cuerpo libre con las reacciones y momentos.

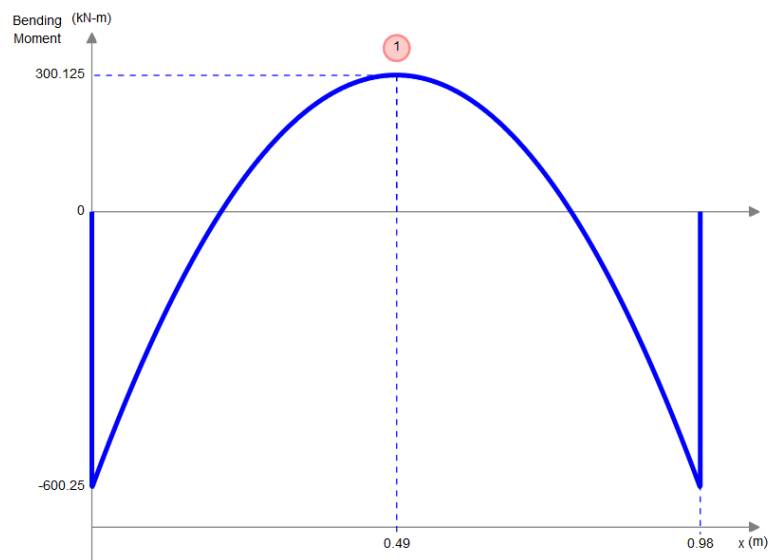


**Figura 19.** Diagrama de cuerpo libre con las reacciones y momentos

Se obtiene el diagrama de cortantes en la Figura 20 y en la Figura 21 el diagrama de momentos.



**Figura 20.** Diagrama de cortantes en la viga secundaria



**Figura 21.** Diagrama de momentos en la viga secundaria

Para obtener la inercia se reemplaza  $R_a$  y  $M_a$  en la ecuación (11)

$$E \cdot I \cdot Y = \frac{7500 \text{ N} \cdot (0.49 \text{ m})^3}{6} - \frac{7500 \text{ N/m} \cdot (0.49 \text{ m})^4}{24} - \frac{2500 \text{ N/m} \cdot (0.49 \text{ m})^2}{2}$$

$$I = \frac{-54.76 \text{ Nm}^3}{E \cdot Y}$$



La deflexión máxima se obtiene de los valores numéricos recomendados para máquinas dados por (17). Se reemplaza para el límite superior y se obtiene la deflexión.

$$Y_{adm} = \frac{L}{2000} = \frac{0.98 \text{ m}}{2000} = -0.0005 \text{ m}$$

Reemplazando en (11) la deflexión máxima y el módulo de elasticidad para acero inoxidable 316 (190 GPa), se obtiene el siguiente resultado.

$$I = \frac{-54.76 \text{ Nm}^3}{E \cdot Y} = \frac{-54.76 \text{ Nm}^3}{190 \text{ GPa} \cdot -0.0005 \text{ m}}$$

$$I = 28.8 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I = 28.82 \text{ cm}^4$$

La inercia del fabricante es mayor a la calculada por lo que se asegura un diseño resistente en la viga de la estructura.

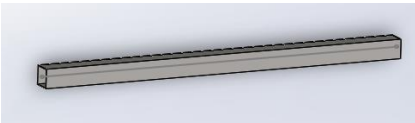
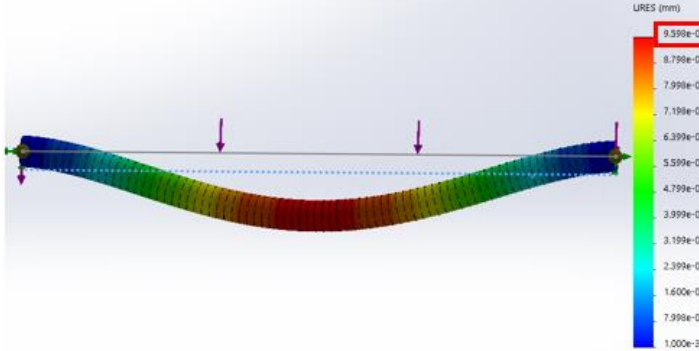
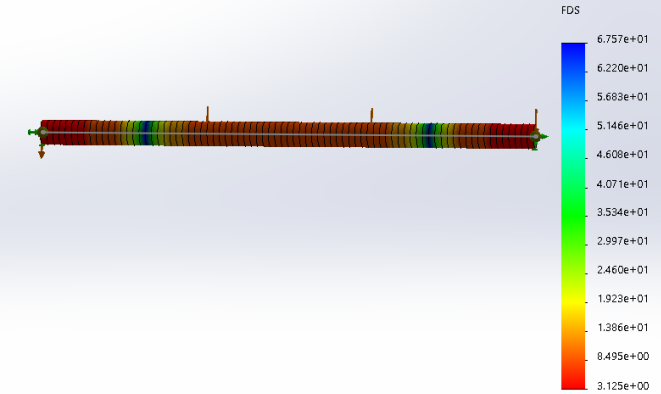
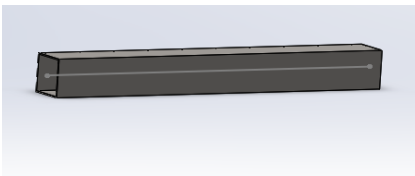
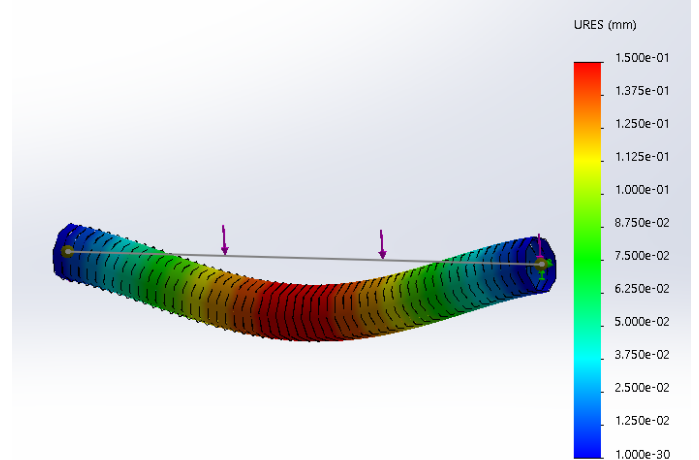
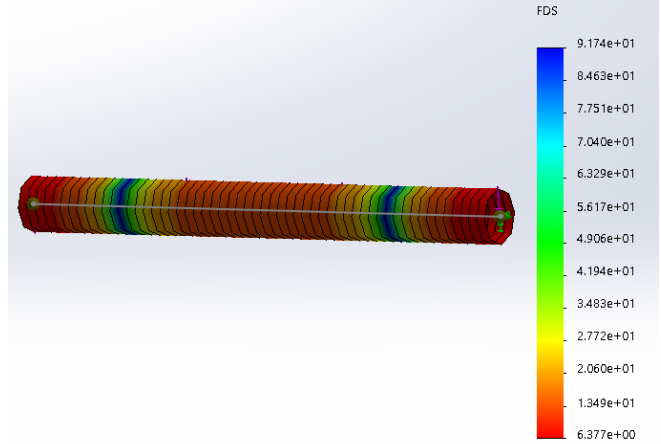
$$I_{Fabricante} = 176.95 \text{ cm}^4$$

$$I_{Fabricante} > I_{Calculada}$$

Basados en los cálculos realizados se concluye que la estructura inicial soporta las cargas agregadas por los nuevos sistemas de dosificación, lavado y control.

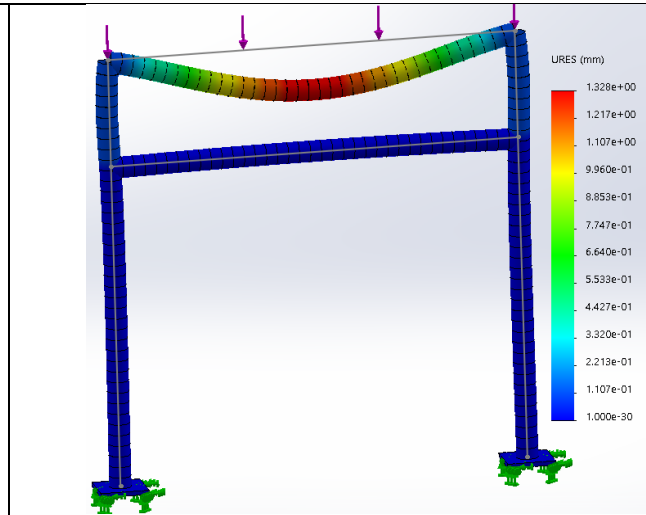
A continuación en la Tabla 6 se compara los resultados obtenidos con la simulación realizada en la plataforma de SolidWorks, se analiza las vigas previamente calculadas y se agrega cartelas en el pórtico para verificar cuál de las opciones es la mejor opción.

**Tabla 6.** Tabla comparativa de la estructura

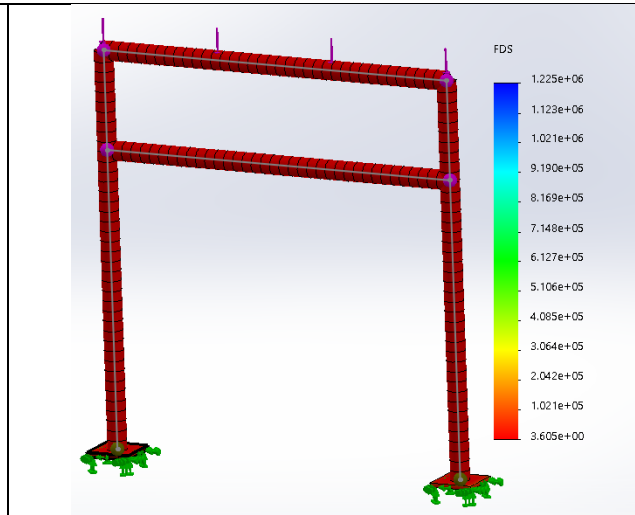
Viga	Simulado	n
 <p><b>Figura 22.</b> Viga principal</p>	 <p><b>Figura 23.</b> Deflexión máxima</p>	 <p><b>Figura 24.</b> Factor de seguridad</p>
 <p><b>Figura 25.</b> Viga secundaria</p>	 <p><b>Figura 26.</b> Deflexión máxima</p>	 <p><b>Figura 27.</b> Factor de seguridad</p>



**Figura 28.** Pórtico sin cartelas



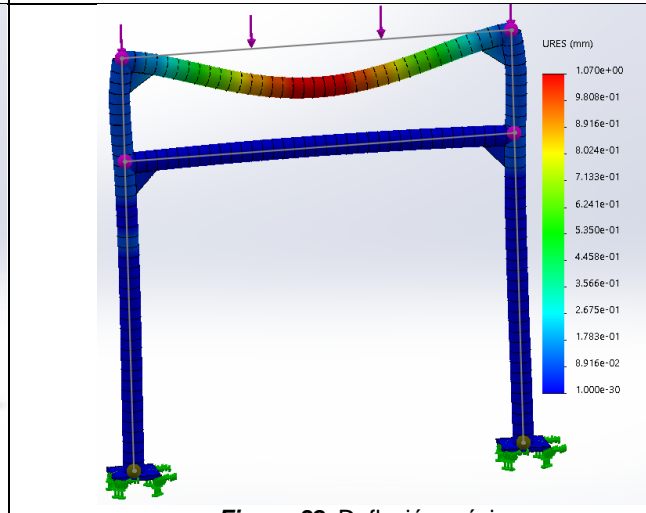
**Figura 29.** Deflexión máxima



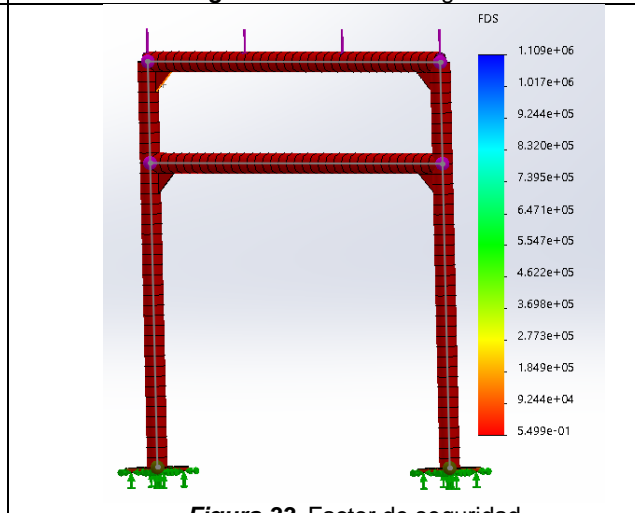
**Figura 30.** Factor de seguridad



**Figura 31.** Pórtico con cartelas

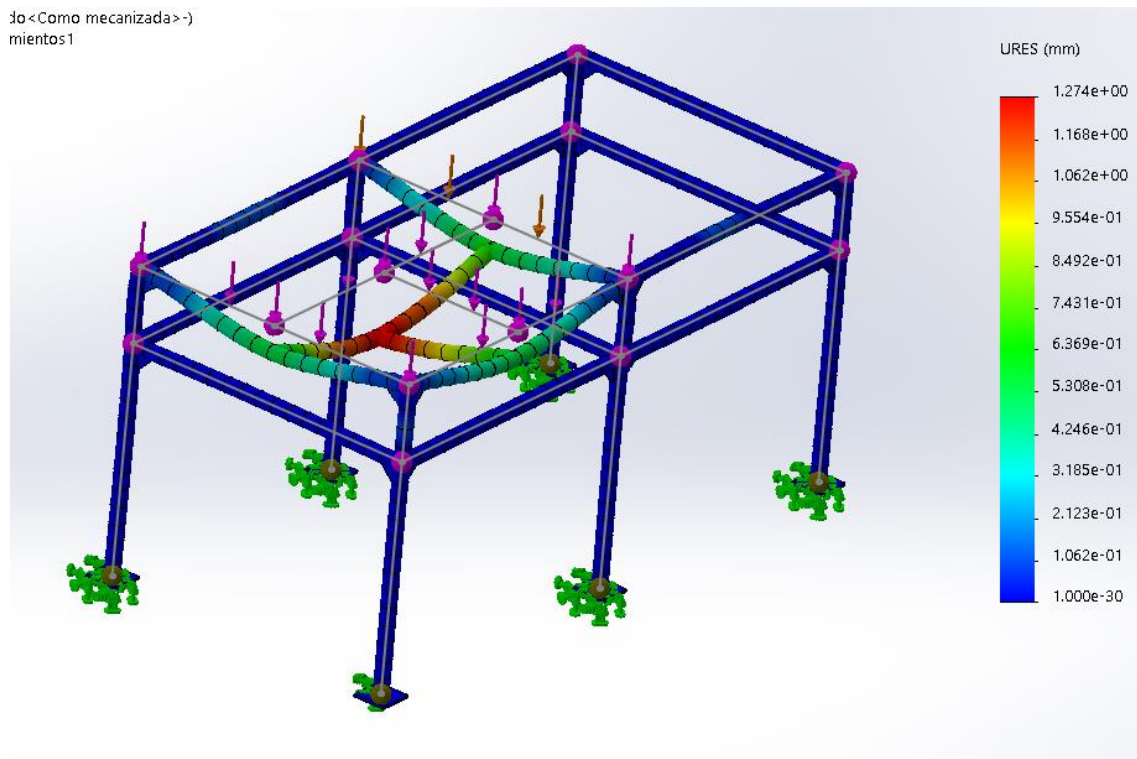


**Figura 32.** Deflexión máxima



**Figura 33.** Factor de seguridad

Analizando las opciones se concluye que al aplicar cartelas en el pórtico se tiene una estructura mas rígida propensa a una menor deflexión como se observa en la Figura 34.



**Figura 34.** Simulación de deflexión en la estructura

#### 7.1.5. Selección de bomba para el llenado del reactor

Por las características que posee la bomba existente en el sistema de alimentación, se la descarta y se procede al dimensionamiento de una en función de los nuevos requerimientos.

Se debe bombear agua durante 8 minutos para llenar el reactor de capacidad de 1000 L. Se obtiene el caudal necesario para seleccionar la bomba en (18).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (18)$$

Donde:

$Q$ : Caudal [l/min]

$v$ : Volumen [l]

$t$ : Tiempo [min]

$$Q = \frac{1000 \text{ l}}{8 \text{ min}}$$

$$Q = 125 \text{ l/min}$$

Otro parámetro necesario para la selección de la bomba es la altura de succión, la bomba se encuentra a 3.145 metros del reactor químico sin contemplar pérdidas de tubería. Para lo siguiente se utilizará la teoría de altura equivalente para las pérdidas de fricción y por accesorios [8]. Para el sistema de lavado, que será acoplado al sistema de bombeo de agua, se requiere del sistema de aspersor TankJet, que consta con una entrada de 1 ¼ " la bomba seleccionada debe cumplir con las presiones necesarias para este sistema. La presión del aspersor es de 75-300 psi, como se observa en la sección 5.8.

Se aplica la ecuación de Bernoulli [5], observada en (19)

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + h_B = h_3 + \frac{v_3^2}{2g} + \frac{P_{jet}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{jet}}{2g} + h_t \quad (19)$$

Donde:

$h_1$ :	Altura del tanque de agua hasta la bomba [m]
$v_1$ :	Velocidad en el tanque de agua [m/s <sup>2</sup> ]
$P_1$ :	Presión en el en el tanque de agua [Pa]
$h_B$ :	Altura o cabeza neta de la bomba [m]
$h_3$ :	Altura del reactor químico hasta la bomba [m]
$v_3$ :	Velocidad en la descarga [m/s <sup>2</sup> ]
$P_{jet}$ :	Presión necesaria para el Tank Jet Cleaner [Pa]
$v_{jet}$ :	Velocidad de salida en el Tank Jet Cleaner [m/s <sup>2</sup> ]
$h_t$ :	Pérdidas totales en la tubería [m]

Tomando como referencia la bomba se tienen los siguientes valores.

$$h_1 = 0 \qquad \frac{P_1}{\rho \cdot g} = 0$$

$$\frac{v_1^2}{2g} = 0$$

Despejando la altura se obtiene la ecuación (20)

$$h_B = h_3 - h_a + \frac{v_3^2}{2g} + \frac{P_{jet}}{\rho \cdot g} + \frac{v_{jet}}{2g} + h_{ft} \quad (20)$$

Se obtiene la velocidad en la tubería utilizando (21)

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{4Q}{\pi \cdot D^2} \quad (21)$$

Reemplazando los valores se obtiene la velocidad en la tubería de succión y descarga antes de reducirla para la entrada del TankJet.

$$v_3 = \frac{4 \cdot (2.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi \cdot (0.04368 \text{ m})^2}$$

$$v_3 = 1.39 \text{ m/s}$$

La velocidad en la tubería para el TankJet es la siguiente.

$$v_4 = \frac{4 \cdot (2.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s})}{\pi \cdot (0.03814 \text{ m})^2}$$

$$v_4 = 1.824 \text{ m/s}$$

El caudal en la salida del TankJet va a ser igual al caudal obtenido antes dividido para 4, y se procede a calcular la velocidad con la que sale el chorro para lavar el reactor.

$$Q_{jet} = \frac{2.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{4} = 0.00052 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{jet} = \frac{4 \cdot (0.00052 \text{ m}^3/\text{s})}{\pi \cdot (0.01448 \text{ m})^2} = 3.158 \text{ m/s}$$

Las pérdidas totales se calculan sumando la pérdida por fricción con la sumatoria de pérdidas de accesorios, ecuación dada en (22).

$$h_t = h_f + \sum h_a \quad (22)$$

Donde:

$h_t$ : Pérdida total en la tubería [m]

$h_f$ : Pérdida por Fricción [m]

$h_a$ : Pérdida por accesorios [m]

La pérdida por fricción en la tubería está dada por (23)

$$h_f = \frac{F \cdot l \cdot (v_3)^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad (23)$$

Donde:

$h_f$ : Pérdidas por fricción en la tubería [m]

F: Fricción [m]

l: Longitud [m]

D: Diámetro del tubo [m]

g: Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

La fricción está dada por (24)

$$F = \frac{1.325}{\left[ -\ln\left( \frac{\varepsilon}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (24)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Rugosidad relativa [mm]

Re: Número de Reynolds

Se utiliza la ecuación (25) para encontrar el número de Reynolds

$$Re = \frac{v \cdot D}{\mu} \quad (25)$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

v: Velocidad [m/s]

D: Diámetro del tubo [m]

$\mu$ : Viscosidad del agua [m<sup>2</sup>/s]

Reemplazando los valores se obtiene Re.

$$Re = \frac{1.39 \text{ m/s} \cdot 0.04368 \text{ m}}{1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 60114.06$$

$$Re > 4000$$

Cuando el número de Reynolds es mayor a 4000 se considera al fluido turbulento. Se reemplaza el valor de la rugosidad relativa de la Figura 35.

Material	$\epsilon$ (mm)
Acero comercial	0.0460
Fundición asfaltada	0.1220
Hierro forjado	0.0500
Hierro fundido	0.2500
Hierro galvanizado	0.1500
Madera ensamblada	0.3050
PVC, plástico, cobre, latón, vidrio	0.0015

**Figura 35.** Rugosidad absoluta de materiales [9]

Reemplazando los valores en (24) se tiene lo siguiente.

$$F = \frac{1.325}{\left[ -\ln \left( \frac{0.0015 \text{ mm}}{3.7 \cdot 43.68 \text{ mm}} + \frac{5.74}{60114.06^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.02007$$

Los accesorios utilizados en el sistema de tubería se muestran en la Tabla 7. [10]

**Tabla 7.** Accesorios con constantes por pérdidas en tuberías

Accesorio	Cantidad	Símbolo	Constante
Válvula manual	2	$K_{vm}$	4.05
Unión universal	2	$K_u$	1
Válvula check	1	$K_{vc}$	1.1
Válvula selenoide	2	$K_{vs}$	3-5
Acople tipo "T"	1	$K_t$	2
Codo	8	$K_c$	0.9

Reemplazando los valores obtenidos en (22) se encuentra  $h_t$ .

$$h_t = \frac{v_3^2}{2g} \left[ \frac{FL}{D} + 2K_{vm} + 2K_u + K_{vc} + 2K_{vs} + K_t + 8K_c \right] + \frac{4v_{jet}}{2g}$$



$$h_t = \frac{\left(\frac{1.39\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2} \left[ \frac{0.02007 \cdot 6.223 \text{ m}}{0.04368 \text{ m}} + 2 \cdot 4.05 + 2 \cdot 1 + 1.1 + 2 \cdot 5 + 2 + 8 \cdot 0.9 \right] + \frac{4 \cdot \left(3.158 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2g}$$

$$h_t = 5.31 \text{ m}$$

Reemplazando en (20) se obtiene la altura necesaria de la bomba.

$$h_B = 43.245 \text{ m} - 0.69 + \frac{\left(1.39 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{2068427.19 \text{ Pa}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + \frac{\left(3.158 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 5.31 \text{ m}$$

$$h_B = 218.8 \text{ m}$$

Con la altura necesaria para calcular la potencia de la bomba con la ecuación (24).

$$P_B = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot h_B}{746 \cdot e} \quad (24)$$

Reemplazando los valores se obtiene la presión que necesita la bomba en hp.

$$P_B = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot h_B}{746 \cdot e}$$

Donde:

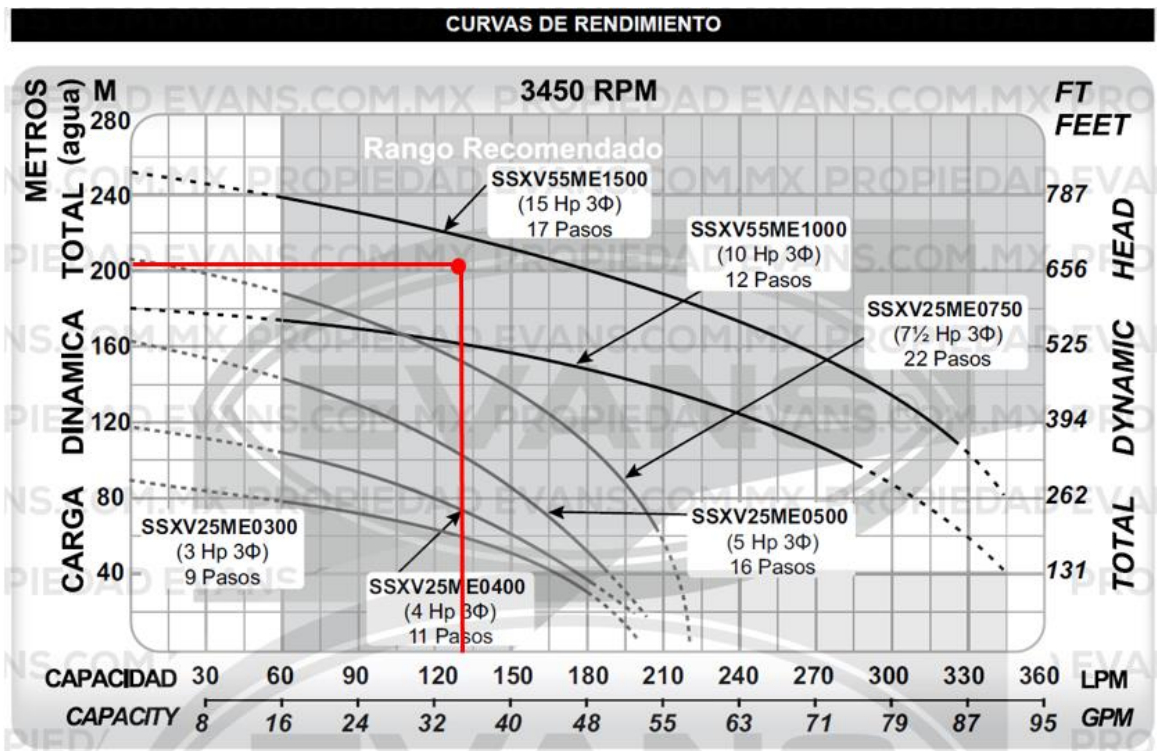
$P_B$ :	Presión de la bomba [hp]
$\rho$ :	Densidad del agua [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ :	Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]
$h_B$ :	Altura de la bomba [m]
$e$ :	Eficiencia de la bomba

$$P_B = \frac{2.08 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 \cdot 218.8 \text{ m}}{746 \cdot 0.75}$$

$$P_B = 7.97 \text{ hp} \approx 8 \text{ hp}$$

La bomba necesita de una potencia mínimo de 8 hp con una salida de presión entre los 75 y 300 psi, con un caudal de 125 l/min y 218 m de altura. En la Figura

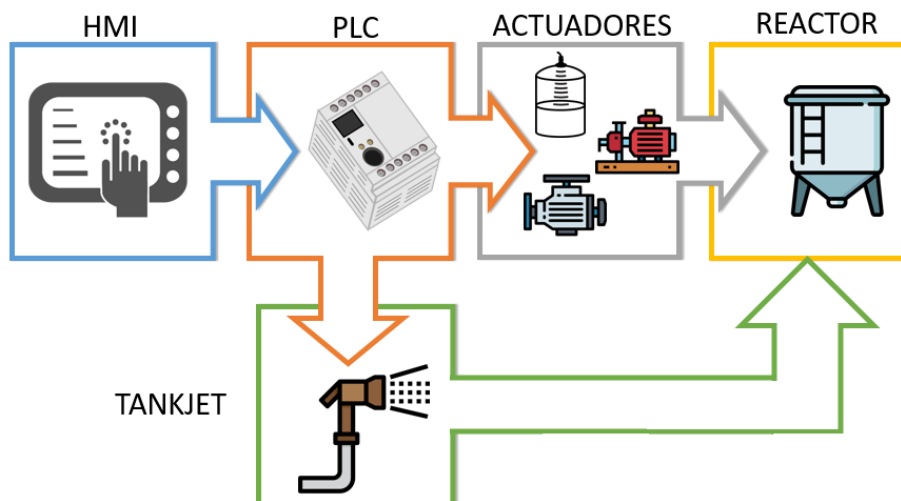
36 se observa la curva de rendimiento para seleccionar la bomba, se escoge una bomba vertical de 15 Hp trifásica de la empresa EVANS.



**Figura 36.** Curva de rendimiento de bombas EVANS. [11]

## 7.2. Diseño electrónico

El diseño electrónico del sistema de dosificación y lavado se compone de: HMI y PLC como componentes principales del sistema de control, actuadores para el sistema de alimentación y dosificación y el TankJet 75 para el sistema de lavado, estos sistemas se resumen en la Figura 37.



**Figura 37.** Diagrama de bloques del sistema automatizado

Se observan las entradas y salidas del sistema en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Entradas y salidas del sistema de dosificación y lavado

Entradas		Salidas	
1	Interruptor ON/OFF	1	Luz piloto verde
2	Selector 500 g/1000 g	2	Luz piloto roja
4	Sensor flotador 500 L	3	Bomba
5	Sensor flotador 1000 L	4	Motor dosificador
		5	Motor mezclador
		6	Electroválvula lavado
		7	Electroválvula alimentación

### 7.2.1. Módulo de control

En esta sección se analiza los componentes y el software en donde se realiza el control de todo el sistema, además del interfaz humano máquina para el manejo con el operario.

### 7.2.2. Control PLC

Como se observó en la sección 6.2 el PLC se selecciona a partir de las entradas y salidas necesarias. Para controlar las funciones se utiliza un PLC LOGO! 8 Basic como se observa en la Figura 38, el que consta con 8 entradas de 12 a 24 V DC, 4 salidas y comunicación por medio de cable Ethernet.



**Figura 38.** Módulo PLC LOGO! Basic

**Fuente:** Siemens [12]

El PLC cuenta con las siguientes funciones:

- Funciones básicas habituales pre programadas para conexión retardada, desconexión retardada, relés de corriente, e interruptor de software
- Interpretación y procesamiento de datos
- Resolver tareas de instalación y ámbito domestico
- Controles especiales de invernaderos o jardines de invierno
- Procesamiento de señales en controles

Se requiere un módulo de ampliación de entradas y salidas para el PLC LOGO! 8, ya que este cuenta con 4 salidas digitales y se necesitan agregar 3 salidas más. El modelo utilizado es el DM16 230R que se muestra en la Figura 39. [12]



**Figura 39.** Módulo DM16 230R [13]

Las características del módulo se enlistan en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Características del módulo DM16 230R [13]

Fuente de voltaje	115 V
Corriente	0.37 mA
Entradas digitales	8
Salidas digitales	8

### 7.2.3. HMI

Para la visualización de las operaciones y la interacción humano máquina se utilizará una HMI LOGO! TDE de Siemens, observada en la Figura 40, es un visualizador de texto que permite al operador interactuar con la aplicación. La pantalla es de 128.2 x 80 mm con 3 colores de fondo (blanco, naranja y rojo), cuenta con comunicación ethernet. Tiene también 4 teclas de función (F1-F4) y 6 teclas estándar.



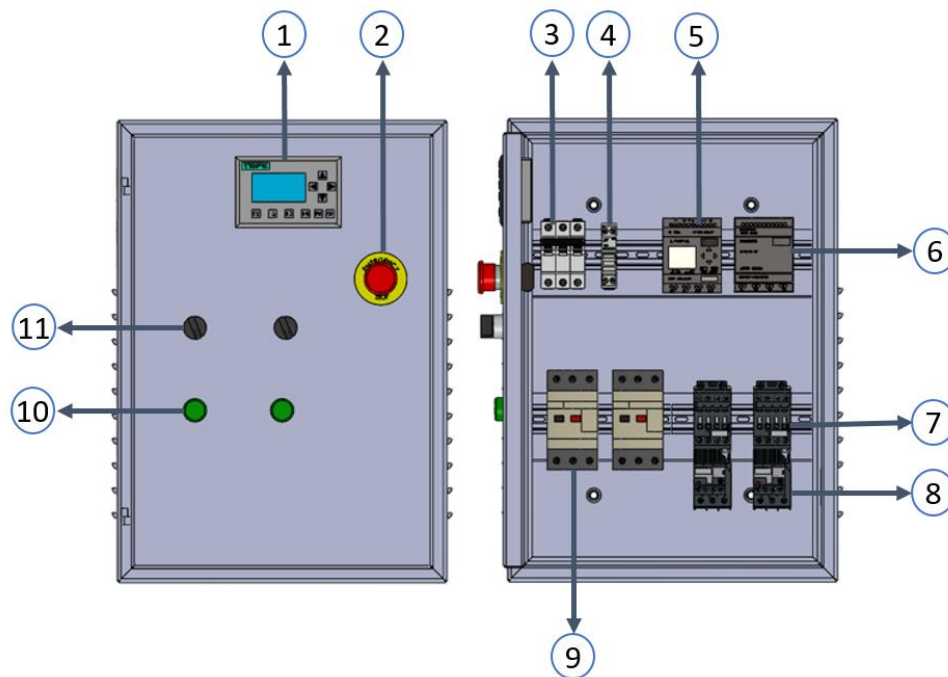
**Figura 40.** LOGO! TDE de SIEMENS

**Fuente:** Siemens [12]

### 7.2.4. Elementos complementarios

En esta sección se selecciona elementos de protección, conductores y componentes necesarios para el control del sistema de dosificación y lavado, la conexión de estos componentes se observa en el ANEXO C, el plano D02-001.

En la Figura 41 se observan enumerados los componentes utilizados en el sistema de control.



**Figura 41.** Caja de control con sus componentes

En la tabla 10 se observa las características generales de los componentes, el resto de información se detalla en el ANEXOS D.

**Tabla 10.** Características de los elementos complementarios

N°	Componente	Código electrónico	Marca/ serie	Características
1	HMI LOGO! TDE	-	Siemens	12/24 V DC, 24V AC
2	Botón de emergencia	-	Camsco/LMB-BS5	110/240 V
3	Disyuntor trifásico	-	ABB/S253	(1400 -2440) V AC – 63 A
4	Portafusible	F1	ABB/E91HN/32	-
5	PLC LOGO! 8	-	Siemens	115/230VAC DC/DC
6	Módulo de expansión	-	Siemens/DM812/24R	12/24 V DC
7	Contactador	KM1/KM2	ABB/AF09	600 V AC – 25 A
8	Relé térmico	R1/R2	ABB/TF42	600 V AC – (7.6-10) A
9	Guardamotor	Q1/Q2	Schneider/GV3ME80	600 V AC – (40-63) A
10	Luz Piloto	H4/H5	Camsco	110/240 V
11	Selector	S4/S3	Camsco/SKOS-D21	110/240 V

#### 7.2.4.1. Guardamotor

El guardamotor es un tipo de disyuntor que sirve de protección de motores y bombas monofásicos o trifásicos. Es un componente de prevención de daños en motores eléctricos por sobrecarga térmica, cortocircuitos y fallo en las fases de línea [14].

En la Figura 42 se observa el modelo seleccionado por su protección térmica de 40-60 A para motores trifásicos.



**Figura 42.** Guardamotor Schneider GV3ME63

**Fuente:** Schneider [14]

#### 7.2.4.2. Contactor

El contactor es utilizado para controlar y accionar motores o bombas trifásicas, tienen protección contra sobretensiones. El contactor ABB AF09 cumple con la norma IEC 60947-5-1 y se observa en la Figura 43.



**Figura 43.** Contactor ABB AF09

**Fuente:** ABB [15]

#### 7.2.4.3. Relé térmico



Los relés térmicos de sobrecarga son componentes electromecánicos que sirven para proteger motores en caso de ocurrir una sobretensión o un fallo de fase y se utiliza junto a contactores para la solución de arranque en motores y bombas, se observa en la Figura 44 [15].



**Figura 44.** Relé térmico ABB TF42

Fuente: ABB [15]

#### 7.2.4.4. Disyuntor

Los disyuntores o breakers, como se los conoce típicamente, son elementos diseñados para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos, se selecciona un disyuntor trifásico por los actuadores que funcionen en 3 fases [15]. En la Figura 45 se observa el disyuntor ABB S203.



**Figura 45** Disyuntor trifásico ABB S203

Fuente: ABB [15]

#### 7.2.4.5. Portafusible

La función del portafusible es almacenar el fusible que se encarga de proteger al circuito general de un cortocircuito o una sobretensión y siguen la norma IEC 60947-3 [16]. En la Figura 46 se observa el portafusible E91HN.



**Figura 46.** Portafusible E91HN

Fuente: ABB [16]

#### 7.2.4.6. Selector

El selector es un componente de control común en módulos de control para la selección de producción se utiliza un selector de 2 posiciones para 500 g y 1000 g. Se observa en la Figura 47.



**Figura 47.** Selector CAMSCO BD21 [17]

#### 7.2.4.7. Luz piloto

Es un componente de señalización típico de sistemas de control y se encuentran en colores como: verde, rojo, amarillo y azul. Se observa en la Figura 48.



*Figura 48.* Luz piloto CAMSCO 110/220 V [18]

La información mostrada por las luces piloto es la siguiente:

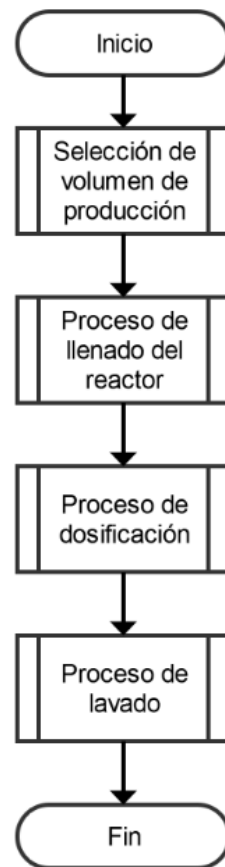
- Luz verde 1: Motor mezclador y dosificador encendidos
- Luz verde 2: Bomba encendida
- Luz roja: Sistema apagado

### 7.3. PROGRAMACIÓN

La automatización del proceso se basa en un algoritmo general en donde interviene varios procesos predefinidos mostrados en las siguientes secciones.

#### 7.3.1. Algoritmo General

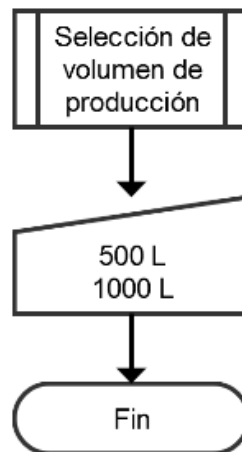
Antes de empezar con el proceso, el operario a cargo rellena la tolva dosificadora con su máxima capacidad (25 Kg), y luego enciende la máquina. Al momento de encender se deberá seleccionar el volumen de producción (500g o 1000g) para luego cumplir con un proceso de llenado del reactor, consiguiente a esto un proceso de dosificación del producto para luego concluir con el proceso de lavado del reactor como se observa en la Figura 49.



**Figura 49.** Algoritmo general

### 7.3.2. Algoritmo de selección de volumen de producción

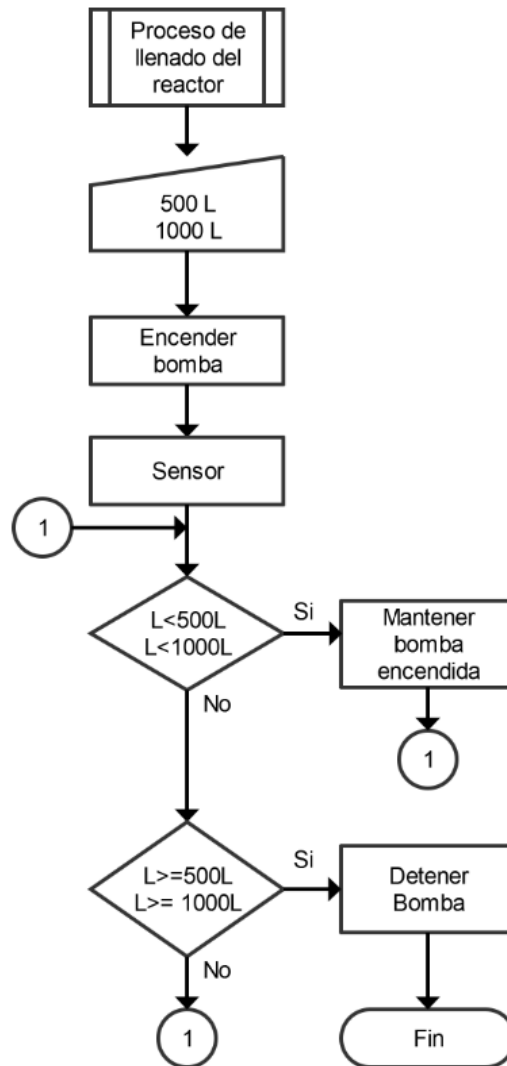
En la selección de volumen se tiene la opción de producir 500 g o 1000 g de floculante, esta selección depende de cuánta agua se utilizará en el reactor para el proceso de llenado como se observa en la Figura 50.



**Figura 50.** Algoritmo selección de volumen de producción

### 7.3.3. Algoritmo del proceso de llenado del reactor

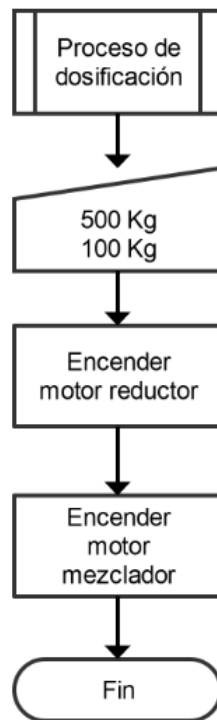
Para el proceso de llenado se utiliza un sensor flotador que medirá el nivel de agua hasta el valor previamente seleccionado con anterioridad, el llenado se lo realiza por medio de la bomba circulando el agua hasta depositarlo en el reactor. En la Figura 51 se observa el proceso para una cantidad de 500 L.



**Figura 51.** Algoritmo del proceso de llenado del reactor

#### 7.3.4. Algoritmo del proceso de dosificación

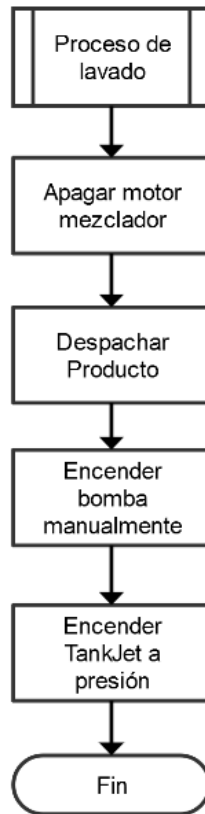
Para el proceso de dosificación se utiliza el sistema de tornillo sin fin para evacuar aproximadamente 9.5 gramos cada 5 minutos, y luego se procede a mezclar conforme se vaya dosificando la cantidad de producto seleccionado como se observa en la Figura 52.



**Figura 52.** Algoritmo del proceso de dosificación

#### 7.3.5. Algoritmo del proceso de lavado

El proceso de lavado se realiza después de haber completado el despacho de toda la producción y de que se halla apagado el motor mezclador. Se encenderá la bomba manualmente y se accionará la electroválvula para que el agua fluya por el sistema de lavado conformado el TankJet 75. En la Figura 53 se observa el algoritmo.



**Figura 53.** Algoritmo del proceso de lavado



## REFERENCIAS

- [1] R. Cuevas, «Introducción a los reactores químicos,» Universidad Nacional autónoma de México, México DF, 2006.
- [2] W. Camones y P. Yanac, ANÁLISIS TÉCNICO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ELEVACIÓN DE AGUA PARA EDIFICIOS VERTICALES EVALUANDO LOS SISTEMAS DE BOMBEO EN SUCCIÓN POSITIVA Y NEGATIVA EN LA CIUDAD DE HUARAZ, Lima: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018.
- [3] C. d. Vargas, «Estudios e ilustraciones de archivos personales,» Programa Regional HPE/CEPIS/OPS, Lima, Perú, 2005.
- [4] S. S. CO., «Catalog 75TJ,» 2018. [En línea]. Available: [https://www.tankjet.com/products/pdf/Tank-Cleaning\\_Catalog-75.pdf](https://www.tankjet.com/products/pdf/Tank-Cleaning_Catalog-75.pdf). [Último acceso: 16 Octubre 2019].
- [5] C. Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, Madrid: Ediciones del Castillo S.A., 2015.
- [6] Sure Servo, «Gearbox selector,» Automation Direct, [En línea]. Available: <https://www.automationdirect.com/adc/contactus/contactus>. [Último acceso: 28 October 2019].
- [7] M. R, «Resistencia de materiales,» de *Resistencia de materiales*, Mexico DF, Pearson, 2009, p. 459.
- [8] M. K, Bombas selección, uso y mantenimiento, México: McGraw-Hill, 1996.
- [9] S. Á. G., «Rugosidad de materiales,» de *Hidraulica general*, Mexico DF, Editorial Limusa, 1994.
- [10] M. H. M., «Coeficientes en aditamentos,» de *Applied Hydraulics in Engineering*, New York, Jhon Wiley and Sons, 1992.
- [11] EVANS, «Bombas multietapas verticales,» Consorcio Valsi, Guadalajara, 2005.
- [12] Siemens, «Siemens,» Siemens, 2019. [En línea]. Available: <https://new.siemens.com/global/en.html>. [Último acceso: 31 Mayo 2019].
- [13] Siemens AG, «Siemens,» LOGO!, 23 April 2015. [En línea]. Available: <https://docs-emea.rs-online.com/webdocs/131e/0900766b8131ece7.pdf>. [Último acceso: 29 October 2019].
- [14] S. Electric, «Life is On Schneider Electric,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.se.com/au/en/all-products>. [Último acceso: 17 December 2019].
- [15] ABB, «ABB,» 2019. [En línea]. Available: <https://new.abb.com/es>. [Último acceso: 17 December 2019].

- [16] ABB, «ABB,» 2019. [En línea]. Available:  
<https://www.electricalautomationnetwork.com/es/abb/base-portafusible-e91hn-32-32a-1pn-abb-e91hn-32-2csm200913r1801>. [Último acceso: 17 December 2019].
- [17] CAMSCO, «CAMSCO,» 2000. [En línea]. Available:  
<http://www.camscointernational.com/productos/selectores.html>. [Último acceso: 18 December 2019].
- [18] CAMSCO, «CAMSCO Electronic CO,» 2018. [En línea]. Available:  
<https://www.camsco.com.tw/spa/control-components/control-components-pilot-light-ad16-22ds-led-type.html>. [Último acceso: 18 December 2019].