

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de una dosificadora de líquidos automática con caudalímetros para
el cálculo de volumen de envasado, controlado por un PLC y HMI

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros en Mecatrónica

Presentado por:

Elvia Daniela De La Cruz Intriago

Johnny Adrián García Betancourt

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Johnny García Betancourt y Elvia De La Cruz Intriago damos nuestro consentimiento para que la ESPOI realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Elvia De La Cruz



Johnny García

EVALUADORES

.....
Efraín Terán Calle, M.Sc

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Francisco Yumbra, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La dosificación de líquidos es un proceso presente en muchas industrias. En la actualidad, son limitadas las opciones de máquinas dosificadoras de líquidos automatizadas en el mercado ecuatoriano, y estas son de calibración de volumen manual.

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar una dosificadora de líquidos automática de tres boquillas que permita variar el volumen dosificado mediante una interfaz HMI utilizando caudalímetros para el cálculo de volumen. El diseño, se realiza para una empresa de productos detergentes líquidos ubicada en Guayaquil.

El desarrollo partió de la selección de un caudalímetro, para proceder a realizar el diseño mecánico en base a sus condiciones de trabajo brindadas por el fabricante. Se diseñó un sistema de succión e inyección para dosificar el producto que ingresa desde la tolva; y un sistema de desplazamiento vertical, tramo donde se encuentra el sensor de caudal, que guía el líquido hasta la boquilla final. Todo esto se modeló en Inventor y se utilizó TIA Portal para la automatización mediante un PLC conectado y HMI.

Al final, se obtuvo el diseño de una máquina de tres boquillas para dosificar de 0.5 a 4L con una precisión de $\pm 5\%$ y un tiempo de dosificación menor a 15 segundos por litro, con pantalla incorporada para la configuración de volumen a dosificar.

La máquina dosificadora diseñada permite optimizar los tiempos de producción al reducir el tiempo de llenado y evita paros en la línea de envasado por descalibración de volumen.

Palabras Clave: Dosificadora de líquidos, paros por calibración, conteo de volumen, calibración automática de volumen.

ABSTRACT

Liquid dosing is a process present in many industries. Currently, there are limited options for automated liquid dispensing machines in Ecuador, and these are manual volume calibration.

The objective of this work is to design an automatic liquid dispenser with three nozzles that allows the dispensed volume to be varied through an HMI interface using flow meters for volume calculation. The design is made for a liquid detergent products company located in Guayaquil.

The development started from the selection of a flowmeter, to proceed to carry out the mechanical design based on its working conditions provided by the manufacturer. A suction and injection system was designed to dose the product that enters from the hopper; and a vertical displacement system, section where the flow sensor is located, that guides the liquid to the final nozzle. All of this was modeled in Inventor and the TIA Portal was used for automation via a connected PLC and HMI.

In the end, the design of a machine with three nozzles was obtained to dispense from 0.5 to 4L with an accuracy of $\pm 5\%$ and a dispensing time of less than 15 seconds per liter, with a built-in screen for setting the volume to be dispensed.

The designed dosing machine allows production times to be optimized by reducing filling time and avoids stoppages in the packaging line due to volume miscalibration.

Keywords: *Liquid dispenser, stoppages due to calibration, volume counting, automatic volume calibration.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	3
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo general.....	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Marco teórico	6
1.4.1 Historia de las dosificadoras	6
1.4.2 Dosificador de líquidos.....	6
1.4.3 Controlador lógico programable (PLC).....	8
1.4.4 Estado del arte.....	8
CAPÍTULO 2	14
2. Metodología.....	14
2.1 Selección de la alternativa de solución.....	14
2.2 Proceso de diseño.....	15
2.3 Requerimientos y restricciones de diseño	15
2.4 Diseño conceptual.....	16

2.5	Diseño mecánico.....	17
2.5.1	Selección del caudalímetro	17
2.5.2	Cálculo del caudal y selección de tuberías	18
2.5.3	Instalación del caudalímetro	20
2.5.4	Diseño del sistema de succión e inyección	22
2.5.5	Selección del pistón dosificador	24
2.5.6	Diseño de tolva de alimentación	25
2.5.7	Diseño del sistema de desplazamiento vertical de boquillas (SDV)	26
2.5.8	Diseño del sistema de transmisión de potencia para los ejes roscados	27
2.5.9	Diseño del circuito neumático	28
2.6	Diseño de control	28
2.6.1	Programación del PLC para el control de la dosificadora.....	28
2.6.2	HMI.....	36
2.7	Estimación de precisión de la dosificadora de líquidos.....	36
CAPÍTULO 3.....		37
3.	Resultados y análisis.....	37
3.1	Diseño mecánico.....	37
3.1.1	Sistema de succión e inyección (SSI)	39
3.1.2	Tolva de alimentación	40
3.1.3	Sistema de desplazamiento vertical de boquillas	41
3.1.4	Circuito neumático	43
3.2	Costos del consumo de aire	46
3.3	Especificaciones de la dosificadora de líquidos.....	47
3.4	Plan de mantenimiento preventivo	47
3.5	Interfaz HMI.....	48
3.6	Planos eléctricos	51
3.7.	Análisis de costos.....	54

CAPÍTULO 4	58
4. Conclusiones Y Recomendaciones	58
4.1. Conclusiones.....	58
4.2. Recomendaciones.....	59
BIBLIOGRAFÍA	61
APÉNDICES	64

ABREVIATURAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos)
DN	Diámetro nominal
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
HMI	Interfaz Hombre – Máquina
PLC	Control Lógico Programable
SDV	Sistema de desplazamiento vertical
SSI	Sistema de succión e inyección

SIMBOLOGÍA

m	Metro
L	Litros
s	Segundos
ms	Milisegundos
Pa	Pascal
kPa	Kilopascal
h	Horas
mm	Milímetros
cm	Centímetros
N	Newton
psi	Pound-force per square inch (libra por pulgada cuadrada)
V	Voltaje
g	Gramos
kg	Kilogramos
cP	Centipoise
W	Watts
kW	Kilowatts
μ S	Microsiemens
rad	Radianes
μ s	Microsegundos

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cilindro neumático dosificador	1
Figura 1.2. Sistema de regulación de volumen de cilindro neumático dosificador	2
Figura 1.3. Máquina dosificadora semi- automática de calibración de volumen manual .	2
Figura 1.4. Sistema de calibración de volumen de máquina dosificadora de cliente.....	3
Figura 1.5. Dosificadora de líquidos DGF 500 a 5000	7
Figura 1.6. Esquema de sistema de dosificación de Vargas Fabian.....	9
Figura 1.7. Esquema de sistema de dosificación de Sani y Toapanta	10
Figura 1.8. Sistema de presión del líquido	11
Figura 1.9. Modelo de dosificadora para líquidos de baja viscosidad de COARA	11
Figura 1.10. Modelo de dosificadora DGF500-5000 ML de FINKTEC S.A.....	12
Figura 1.11. Modelo de dosificadora PPT-250 de ECUAPACK	12
Figura 1.12. Máquina dosificadora y selladora automática	13
Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología.....	15
Figura 2.2. Esquema conceptual del sistema de dosificación (AutoCAD).....	16
Figura 2.3. Precisión del caudalímetro Vs Velocidad del líquido.....	19
Figura 2.4. Longitud de entrada recomendada >10DN	20
Figura 2.5. Instalación delante de una descarga abierta	20
Figura 2.6. Longitud de salida recomendada >2DN.....	21
Figura 2.7. Dimensiones recomendadas de bridas.....	21
Figura 2.8. Válvula de asiento angular tres vías	22
Figura 2.9. Vías y funcionamiento de la válvula.....	23
Figura 2.10. Sistema de succión e inyección seccionado	24
Figura 2.11. Forma de tolva de alimentación.....	25
Figura 2.12. Diseño conceptual del sistema de desplazamiento vertical	26
Figura 2.13. Diagrama de espacio-fase.....	28
Figura 2.14. Esquema de conexión cable de señal y de corriente de campo	29
Figura 2.15. Bloques de programa para automatización de dosificación	31
Figura 2.16. Programación en función FB2 para activación de salidas.....	32
Figura 2.17. Bloques de normalización y escalamiento de señal analógica.....	33
Figura 2.18. Bloques de obtención de volumen instantáneo y totalización	33
Figura 2.19. Bloques de comparación de volumen totalizado con configurado.....	34
Figura 2.20. Imágenes creadas para interfaz HMI	36

Figura 3.1. Diseño 3D de la máquina dosificadora de líquidos.	38
Figura 3.2. Sistema de succión e inyección.....	39
Figura 3.3. Análisis de factor de seguridad en la tolva de alimentación	40
Figura 3.4. Sistema de desplazamiento vertical de boquillas.....	41
Figura 3.5. Análisis estructural de ejes roscados y viga de soporte	43
Figura 3.6. Circuito neumático del sistema de dosificación de líquido	44
Figura 3.7. Circuito neumático del sistema de desplazamiento vertical de boquillas	44
Figura 3.8. Circuito neumático de la máquina dosificadora	45
Figura 3.9. Consumo de aire de los cilindros neumáticos de la dosificadora	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Requerimientos y restricciones.....	16
Tabla 2.2. Propiedades de los productos del cliente	17
Tabla 2.3. Propiedades químicas para la operación del caudalímetro	18
Tabla 2.4. Caudal necesario y velocidad de diseño.....	19
Tabla 2.5. Dimensiones de una tubería 1 1/2" Norma ASME	22
Tabla 2.6. Entradas del PLC	30
Tabla 2.7. Salidas del PLC	35
Tabla 3.1. Especificaciones de catarinas PHS 08B-1A17 SKF.....	42
Tabla 3.2. Especificaciones de cadena PHC 08B-1X10FT SKF	42
Tabla 3.3. Especificaciones de compresor HSC 37 HERTZ	47
Tabla 3.4. Especificaciones de trabajo de la máquina dosificadora	47
Tabla 3.5. Plan de mantenimiento preventivo para la máquina dosificadora	48
Tabla 3.6. Pantallas de HMI	49
Tabla 3.7. Cotización de rubros.....	54
Tabla 3.8. Especificaciones de máquinas dosificadoras de Coara	56

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Las dosificadoras son máquinas que facilitan el llenado de envases en cantidades controladas al dispensar contenidos líquidos o sólidos en dosis específicas por descarga. Estas son utilizadas en la industria de alimentos, cosmética, farmacéutica, de detergentes, entre muchas otras por su gran versatilidad en procesos de envasado. En la actualidad, las opciones de dosificadoras de líquido semiautomáticas disponibles en el mercado ecuatoriano son, en su mayoría, de regulación de volumen mediante cilindros neumáticos dosificadores (Figura 1.1).

En estos sistemas, la calibración de volumen se realiza mediante una perilla que varía la posición de un sensor final de carrera. Así, se determina el recorrido del vástago de un cilindro neumático encargado de empujar el líquido, con lo que se establece el volumen a dosificar por envase en la línea de producción. Es decir, el volumen se ajusta modificando la longitud de carrera del pistón mediante una perilla; al acortar la carrera del pistón se dispensará menos producto.



Figura 1.1. Cilindro neumático dosificador [1]

Este método de calibración manual es tardado y tedioso, principalmente en las máquinas que tienen varias líneas de dosificación, pues cada línea posee su depósito y sistema de calibración de volumen (Figura 1.2); este último está compuesto por el cilindro neumático motor, guía de accionamiento para el final de carrera y perilla reguladora de volumen. Por ello, la calibración se realiza línea a línea.

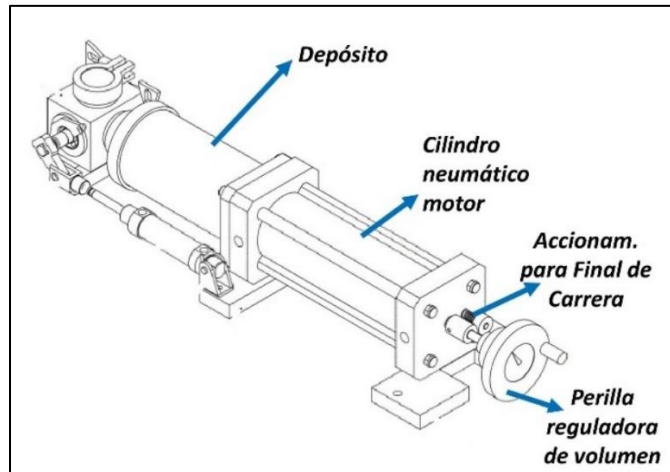


Figura 1.2. Sistema de regulación de volumen de cilindro neumático dosificador.

Modificado de: [1]

Se tiene como cliente una empresa ubicada en la ciudad de Guayaquil, misma que se dedica a la elaboración, envasado y comercio de productos líquidos detergentes y de limpieza. Como parte de su línea de producción llenan sus productos en envases de distintos tamaños mediante una única máquina dosificadora que se muestra en la Figura 1.3. Dicho equipo pese a ser semiautomático, es de calibración de volumen manual. Al contar con una única dosificadora requieren constantemente la calibración de volumen debido a sus diversos tamaños de presentación de producto.



Figura 1.3. Máquina dosificadora semi-automática de calibración de volumen manual

1.1 Descripción del problema

En empresas pequeñas, como la del cliente del presente proyecto, donde no se poseen varias máquinas de dosificación; la calibración de volumen debe ser realizada cada vez que se requiera comenzar con una línea de envasado de producto en un diferente tamaño de presentación, generando altos tiempos de set-up. Por ende, incrementa el tiempo total de producción y los costos de dicho proceso.

La calibración manual, además, afecta la precisión en los volúmenes envasados, acrecentando el margen de error en la cantidad del líquido final llenado. Como consecuencia, también se ve perjudicada la calidad del producto y puede representar pérdidas económicas si la máquina no está adecuadamente calibrada y el volumen que se dosifica resulta mayor al requerido. Esto hace al sistema altamente sensible a errores humanos.

La Figura 1.4 muestra la parte posterior de la dosificadora que posee el cliente, donde se encuentran los cilindros neumáticos que se deben calibrar uno a uno al hacer el cambio de volumen a dosificar. Cada uno de dichos cilindros regula el volumen de cada una de las líneas de dosificado, por lo que cuentan con perillas reguladoras independientes. Además, estos sistemas de calibración mecánica pierden precisión a largo plazo debido al desgaste de las piezas, requiriendo cada vez más mantenimientos e incrementándose su tiempo de preparación.



Figura 1.4. Sistema de calibración de volumen de máquina dosificadora de cliente

En este contexto, se requiere el diseño de una dosificadora con sistema de calibración automatizado para reducir los tiempos de configuración de las máquinas, al cambiar el volumen a envasar en la línea de producción. Las variables de interés principal serían el volumen por dosificar y el caudal, variable mediante la que se podría controlar el volumen para conseguir una configuración más sencilla, asistida con una pantalla HMI que permita cambiar rápidamente el volumen de llenado y una dosificación más precisa, brindando flexibilidad a la línea de producción.

1.2 Justificación del problema

Las empresas pequeñas de envasado normalmente poseen un presupuesto muy ajustado que no les permite adquirir maquinaria o sistemas de envasado completos en caso de requerirlos. Este es el caso de una empresa de envasado de productos de limpieza ubicada en Guayaquil. Dicha empresa se encarga de realizar el envasado de diferentes tipos de productos, ya sean detergentes o desinfectantes, en estado líquido o sólido.

Debido a la demanda del mercado, es necesario realizar diferentes presentaciones que cuenten con distintas cantidades de producto dentro de un envase. Por esta razón, al intentar satisfacer las necesidades de los clientes, las empresas pequeñas necesitan envasadoras versátiles capaces de satisfacer las demandas del mercado. En el envasado de líquidos existen distintos volúmenes estándares de presentaciones, como lo son: 0.5L, 1L, 4L. Por ende, las empresas pequeñas deben adaptar una línea de producción para que sean capaces de trabajar con diferentes tipos de envase.

En la actualidad, las dosificadoras de líquidos que se encuentran en la empresa son calibradas manualmente. En caso de que se requiera cambiar el tipo de envase, se debe parar la máquina para que los nuevos volúmenes sean calibrados en cada una de las boquillas dosificadoras. Este trabajo se vuelve aún más tardío dependiendo del tamaño de la máquina, lo cual conlleva a una pérdida de eficiencia en los tiempos de producción y pérdidas de dinero.

En consecuencia, este proyecto propone reducir casi en su totalidad los tiempos de calibración de una máquina y evitar los paros de producción a la hora de cambiar

los tipos de envase a dosificar. Siendo este el primer paso para la realización de un sistema flexible de manufactura que reaccione a las demandas del usuario y permita a las empresas pequeñas aumentar su eficiencia y versatilidad; ajustándose a su presupuesto mientras les ayuda a mantener la competitividad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una dosificadora de líquidos automática de tres boquillas que permita variar el volumen a dosificación mediante una interfaz HMI utilizando caudalímetros para el cálculo de volumen.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema mecánico para el llenado de líquidos que permita, mediante un circuito neumático, la dosificación automática en envases de distintos tamaños.
2. Diseñar un sistema de control secuencial con PLC en lenguaje Ladder para la dosificadora que permita la variación del volumen a dosificar, control de pistones y válvulas.
3. Programar una interfaz HMI que facilite al operador la configuración de volumen de llenado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Historia de las dosificadoras

La primera máquina dosificadora fue creada y patentada en el año 1872, por los hermanos John e Isaías Hyatt. Esta máquina poseía únicamente un pistón, el cual era accionado manualmente y en la cámara de dosificado contenía derivados celulósicos fundidos. A pesar de esto, se le asigna el mérito de construir la primera dosificadora hidráulica a Foster Grant [2].

En la actualidad existen varias compañías dedicadas a la fabricación de maquinaria de dosificación automática. En el Ecuador existen empresas dedicadas a la importación y reventa de dosificadoras de distintas partes del mundo, chinas, por ejemplo. Poseyendo elementos neumáticos de diferentes marcas como Festo o AirTAC.

1.4.2 Dosificador de líquidos

Una dosificadora de líquidos es una máquina encargada de llenar productos líquidos de diferentes espesores con el fin de repartir volúmenes de manera precisa en diferentes tipos de envases. El campo de aplicación en la industria es bastante amplio, por ejemplo: productos de limpieza, productos alimenticios, sustancias químicas y farmacéuticas [3]. Las dosificadoras de líquidos neumáticas utilizan sistemas con válvulas, activados por aire a presión para realizar la tarea de precisión de la dosificación. Este tipo de dosificadoras requieren pistones y cilindros para simular una jeringa que absorba el líquido a dosificar, y, posteriormente lo distribuya en los envases.

Existen también dosificadoras de diferentes tipos, como los son las de gravedad. Estas dosificadoras poseen un tanque superior el cual puede estar al ambiente o a presión, y utilizan la fuerza gravitacional para que el líquido a dosificar pase por unas boquillas. Su funcionamiento se basa en mantener un volumen mínimo en el tanque superior. La Figura 1.5 ejemplifica una dosificadora marca *BROTHER* modelo DGF, básica y de una boquilla, ideal para comprender el principio de funcionamiento de estas máquinas.

La dosificadora DGF 500-5000 es un equipo neumático de un pistón que permite la dosificación de un envase a la vez. El sistema de control utilizado para la dosificación es simple. Se utiliza un sensor de carrera en el cuerpo del pistón el cual es calibrado hasta encontrar el desplazamiento de carrera requerido para el volumen deseado. Utiliza una tolva donde se coloca el producto y un sensor de nivel que enciende una bomba neumática para mantener el sistema con suministro. Un compresor envía el aire de suministro a presión, el cual es regulado con reguladores de presión y tratado con unidades de mantenimiento para su posterior inyección en el sistema. La máquina es capaz de entregar una dosis en un rango de 500 a 5000 ml, que se calibrará manualmente por medio del sensor.

La máquina consta de dos etapas. La primera etapa consiste en la apertura de una válvula neumática que permite el paso del producto desde la tolva hasta el cilindro dosificador. El pistón empieza su carrera de retroceso para succionar, hasta que el sensor de carrera envía la señal para que se detenga y dé paso a la segunda etapa. La segunda etapa consiste en la dosificación del producto por medio de la carrera de extensión del pistón. Primero se cierra la válvula de la tolva, dando apertura a una nueva vía. El líquido es empujado por el pistón hacia la boquilla. Sincrónicamente, un pistón neumático es activado en la boquilla para dar paso a la expulsión del líquido hacia el envase.



Figura 1.5. Dosificadora de líquidos DGF 500 a 5000 [4]

1.4.3 Controlador lógico programable (PLC)

Un controlador lógico programable es un dispositivo que opera con los principios de las computadoras, encargado de controlar y activar los componentes eléctricos de un sistema en específico. El PLC es utilizado en la rama de la ingeniería de automatización para el control autónomo y preciso de procesos en una fábrica. La diferencia entre una computadora y un PLC es la forma en la que se los programa. El PLC necesita un lenguaje simple que especifique un control secuencial, como lo son: los diagramas LADDER, ecuaciones booleanas o diagramas lógicos [5], [6]

Puede ser utilizado en gran cantidad de procesos automáticos, como es el caso de las dosificadoras de líquidos. El PLC se encarga de gestionar las entradas del sistema de la dosificación automática, las cuales son obtenidas mediante sensores de tipo analógico o digital; permitiendo controlar las acciones posteriores del sistema eléctrico que, a su vez, controlan el sistema neumático de la máquina. Los elementos que son controlados dentro de la dosificadora por el PLC son: solenoides de electroválvulas neumáticas, motores o servomotores y contactos del sistema.

1.4.4 Estado del arte

Entre proyectos relacionados con el diseño de máquinas dosificadoras automáticas se encuentra el presentado por Vargas Fabian en Santiago de Cali – Colombia (Figura 1.6), quien propone un modelo especial para la dosificación de líquidos viscosos. A lo largo de este diseño se muestran distintas opciones de dosificación, entre ellas el conocido pistón volumétrico de carrera controlada [7].

El modelo presentado destaca por su sistema de empuje especializado que implementa un tornillo de potencia y direccionamiento del flujo mediante una válvula corredera para la dosificación de líquidos viscosos que, por su naturaleza, ejercen oposición a la deformación al aplicarles una fuerza. El sistema es controlado mediante un Micro PIC16F877 y posee una pequeña pantalla LCD para su configuración. En este proyecto se presentan planos y parámetros para la determinación de los distintos componentes mecánicos que forman la estructura de la máquina.

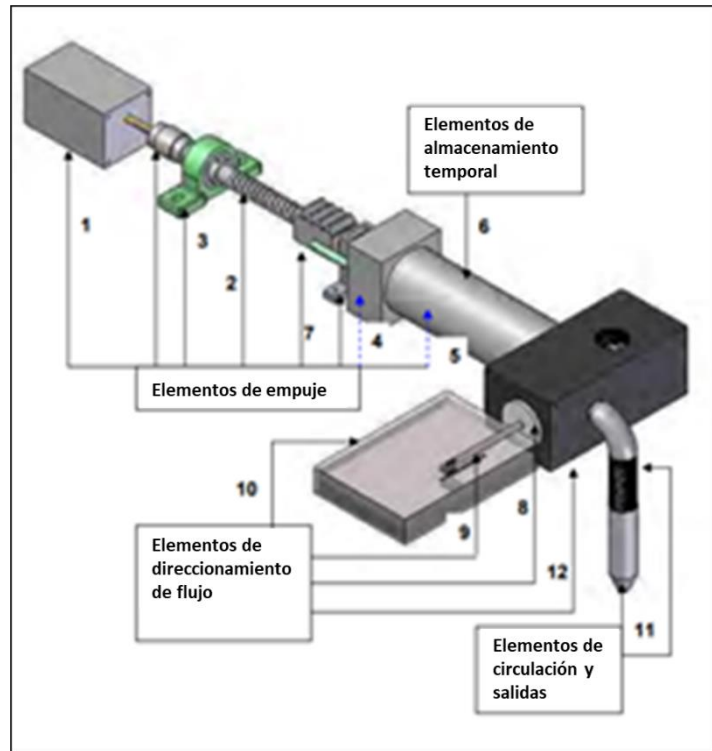


Figura 1.6. Esquema de sistema de dosificación de Vargas Fabian [7]

Como trabajo de investigación y diseño nacional se puede mencionar la “Construcción e implementación de una máquina envasadora y dosificadora de refrescos para la industria de lácteos Santillan Prasol” presentada por Sani y Toapanta de la ciudad de Riobamba – Ecuador (Figura 1.7). En este modelo se utiliza un pistón volumétrico de carrera controlada para la dosificación, teniendo dos opciones de volúmenes de dosificación, una de una carrera de pistón y otra opción del doble de volumen mediante dos carreras de pistón. Dado que el diseño se implementó, se realizaron ensayos en los que se obtuvo en promedio márgenes de errores de +/- 1,2 ml y +/- 1,8 ml respectivamente en los volúmenes de llenado configurados para 250 y 500 ml. [8]

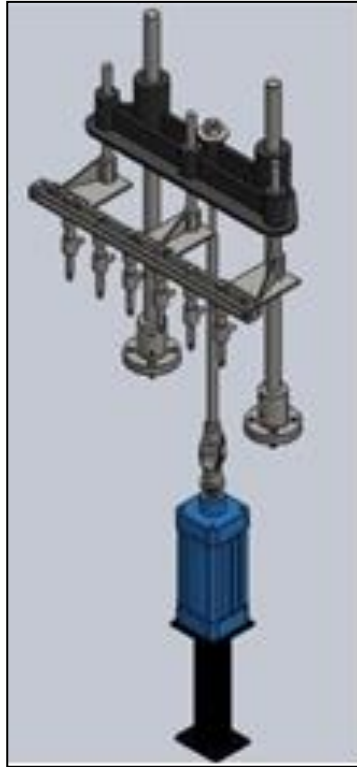


Figura 1.7. Esquema de sistema de dosificación de Sani y Toapanta [8]

En el proyecto de automatización e implementación de sistema de enfundado y modificación de líquidos para máquina industrial de Chuqui y Almeida se presenta un sistema de dosificación controlado mediante un PLC y temporizadores. En este modelo es fundamental mantener el caudal de líquido constante, lo que se logra mediante el uso de un flotador que facilite controlar el nivel del líquido desde el tanque contenedor, como se muestra en la Figura 1.8 Al mantener el nivel constante, el peso ejercido por el fluido también se mantiene constante durante la dosificación. [9]

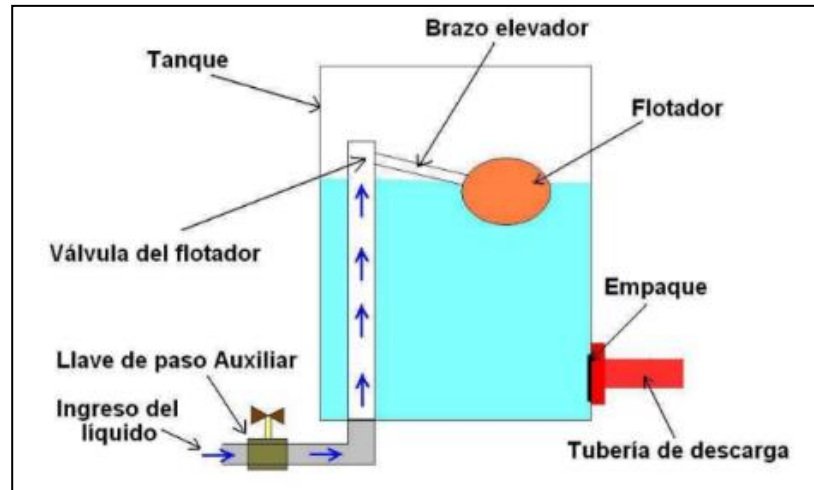


Figura 1.8. Sistema de presión del líquido [9]

Por otro lado, distintos modelos de dosificadoras automáticas se pueden encontrar en el mercado nacional, alguno de estos se detalla a continuación: una empresa ecuatoriana ofrece un modelo de dosificadores neumáticos para líquidos de baja viscosidad (Figura 1.9). Este cuenta con un cilindro neumático que succiona el líquido mediante una manguera, su carrera determina el volumen de llenado y este es ajustable mediante una manivela y un sensor de carrera; la velocidad de dosificación se regula con el flujo de aire que alimenta el sistema. [10]



Figura 1.9. Modelo de dosificadora para líquidos de baja viscosidad [10]

Otra empresa ecuatoriana dispone del modelo DGF500-5000 ML (Figura 1.10) semiautomático para dosificación de líquidos con dos cabezales de llenado, acero inoxidable de grado alimenticio y una precisión de llenado de +/- 7% . [11]



Figura 1.10. Modelo de dosificadora DGF500-5000 ML. [11]

La tercera empresa nacional pone a disposición la llenadora de líquidos viscosos manual PPT-250 (Figura 1.11) con sistema de pistón, potencia de 20W, rango de llenado de 5 a 250 ml. Fabricada con acero inoxidable 304 para contacto con productos alimenticios. [12]



Figura 1.11. Modelo de dosificadora PPT-250 [12]

A nivel internacional, son más variadas las opciones de dosificadoras automáticas disponibles en el mercado y sus precios se disparan debido a las múltiples características y facilidades que brindan. En el portal Alibaba se encuentra una dosificadora de líquidos y selladora de fundas, automatizada, que proporciona de seis a ocho distintos volúmenes a configurar (Figura 1.12). Cuenta con un sistema de control por PLC que facilita la configuración y entrada de parámetros mediante una pantalla táctil. [13]

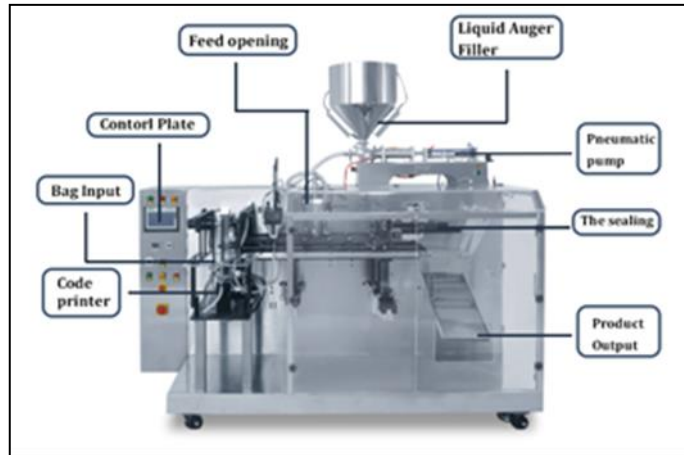


Figura 1.12. Máquina dosificadora y selladora automática [13]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Este capítulo especifica el procedimiento utilizado para efectuar los objetivos del presente proyecto; detallando cada fase del diseño de la máquina dosificadora, desde la selección de la solución más viable para el cliente objetivo, hasta el proceso de selección y diseño mecánico, eléctrico y de control.

2.1 Selección de la alternativa de solución

Para la selección de la alternativa de solución se plantearon cuatro ideas principales capaces de cumplir el objetivo de la calibración automática de volumen en una dosificadora de líquidos. La principal diferencia entre las alternativas fue la utilización de distintos sensores para la obtención de señal de caudal. Estas fueron comparadas por medio de criterios de diseño establecidos y organizadas por la importancia de cada uno de ellos. De esta manera, se seleccionó la mejor solución para la problemática planteada en este proyecto. En el Apéndice A se detallan las alternativas y los criterios de comparación.

2.2 Proceso de diseño

Se ejecutaron varias fases para alcanzar el diseño final, analizando cada una de ellas y satisfaciendo los requerimientos del cliente. En la Figura 2.1 se exhibe, por medio de un diagrama de flujo, la metodología implementada.

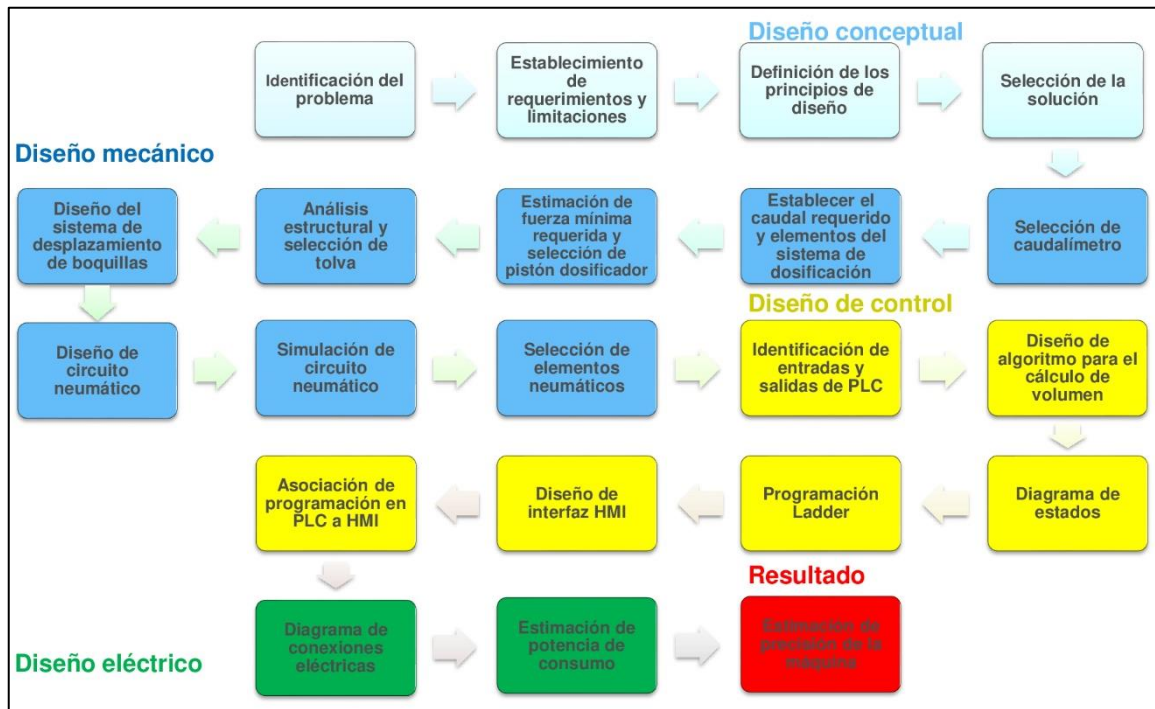


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología

2.3 Requerimientos y restricciones de diseño

Para realizar el diseño de una dosificadora de líquidos con caudalímetro para el cálculo de volumen de envasado, controlado por un PLC y HMI fue necesario conocer los requerimientos iniciales establecidos por el cliente. La Tabla 2.1 detalla los requerimientos y restricciones del diseño.

Tabla 2.1. Requerimientos y restricciones de la dosificadora

Requerimientos	
Volumen de dosificación	250 a 4000 ml
Abastecimiento de tolva	3 ciclos de dosificación
Tiempo de dosificación	Igual o menor que al proporcionado con la actual máquina que posee el cliente (Tiempo actual para llenar: 1 L= 15 segundos)
Sistema de calibración de volumen	Selección de volumen a dosificar mediante pantalla HMI
Restricciones	
Presión de línea máxima	125PSI
Voltaje de fuente	220V

2.4 Diseño conceptual

En la Figura 2.2 se ilustra un boceto inicial del diseño del sistema de dosificación. En esta se pueden identificar los elementos o componentes necesarios para su funcionamiento, entre ellos: la entrada del líquido, actuadores utilizados y sensores final de carrera.

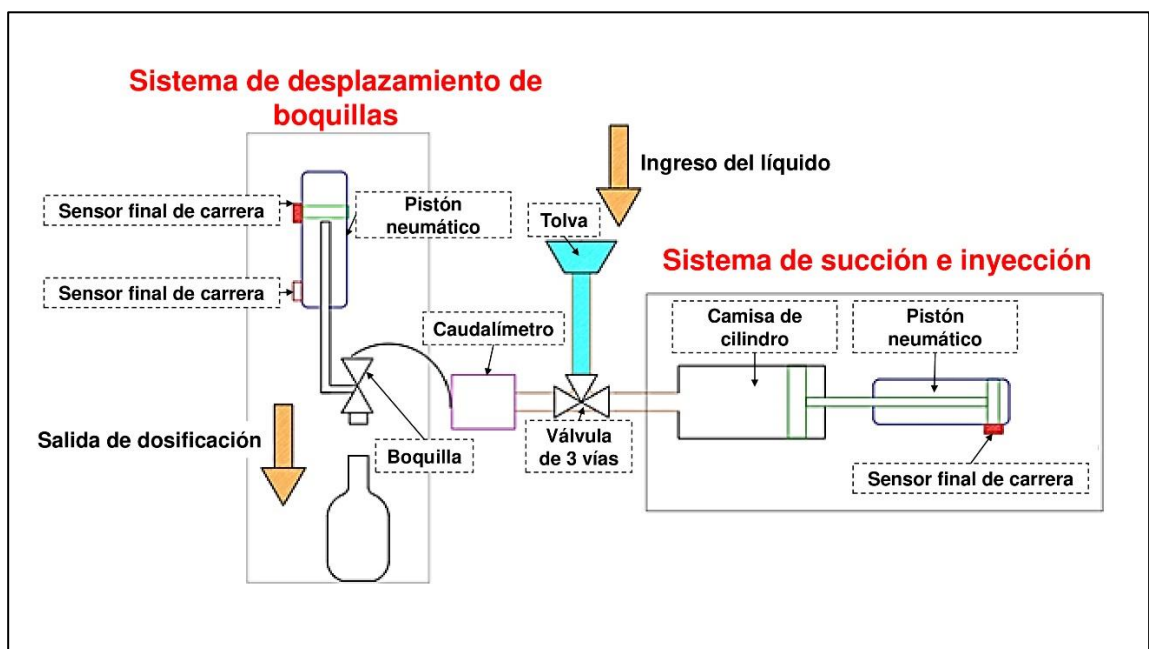


Figura 2.2. Esquema conceptual del sistema de dosificación (AutoCAD)

Para el desarrollo del diseño, fue necesario subdividir el sistema de dosificación en dos sistemas principales: El sistema de succión e inyección y el sistema de desplazamiento de boquillas. El sistema de succión e inyección es el encargado de recolectar el líquido suministrado en la tolva para posteriormente expulsarlo por las boquillas. El sistema de desplazamiento de boquillas se encarga de introducir las boquillas en las botellas para una dosificación segura y limpia.

Dado que se desea mejorar el tiempo de dosificación actual y se busca repetibilidad e independencia en la dosificación de cada boquilla, se propone la utilización de un caudalímetro por cada línea de dosificación en la máquina, permitiendo un diseño modular con capacidad de expansión. De esta forma, se plantea diseñar una máquina capaz de ajustar el volumen a dosificar de todas las boquillas simultáneamente de forma automática. La Tabla 2.2 otorgada por el cliente, presenta las propiedades de los productos que se utilizarán en la dosificadora. En base a lo presentado, se espera dosificar en menos de 15 segundos el litro de producto.

Tabla 2.2. Propiedades de los productos del cliente

Producto	Viscosidad (cP)	Densidad (g/cm ³)	Conductividad (μS/cm)
Suavizante	2000-6000	1	500-600
Desinfectante	0-100	1	900-1000
Lavavajillas	1000-2000	1.03-1.05	5000-6000
Detergente líquido	1000-2500	1.03-1.05	5000-6000
Quitamanchas	0-150	1.01-1.02	7000-8000

2.5 Diseño mecánico

2.5.1 Selección del caudalímetro

Para la selección del caudalímetro se analizaron los criterios detallados a continuación:

- El sistema de calibración debe ser de bajo mantenimiento.
- El caudalímetro debe funcionar con todos los productos que el cliente requiere dosificar (Presentados en la Tabla 2.2).

El caudalímetro electromagnético es capaz de cumplir los requerimientos. Este tipo de caudalímetros requieren un mantenimiento muy bajo debido a que no poseen partes móviles que se encuentren en contacto con el fluido a medir. Se optó por seleccionar el OPTIFLUX 1300 de la marca KROHNE, el cual es capaz de trabajar con líquidos de conductividad mayores a $5\mu\text{S}/\text{cm}$. como se observa en la Tabla 2.3. Siendo esta mucho menor a la conductividad de los productos del cliente.

Tabla 2.3. Propiedades químicas para la operación del caudalímetro [14]

Propiedades químicas	
Condición física	Líquidos eléctricamente
Condición eléctrica	Estándar: $\geq 5 \mu\text{S}/\text{cm}$
	Agua desmineralizada: $\geq 20 \mu\text{S}/\text{cm}$

2.5.2 Cálculo del caudal y selección de tuberías

Para calcular el caudal fue necesario seleccionar el diámetro del caudalímetro y las tuberías anexas. Se optó por seguir las normas de instalación que otorga el manual del caudalímetro para la selección del diámetro de las tuberías: EN1092-1 y la ASME B16.5. Se decidió trabajar con la norma ASME B36.19 [15].

La Figura 2.3 ilustra la variación de la precisión del caudalímetro con respecto a la velocidad del líquido, donde se observa una caída exponencial de precisión a velocidades menores a 5 m/s.

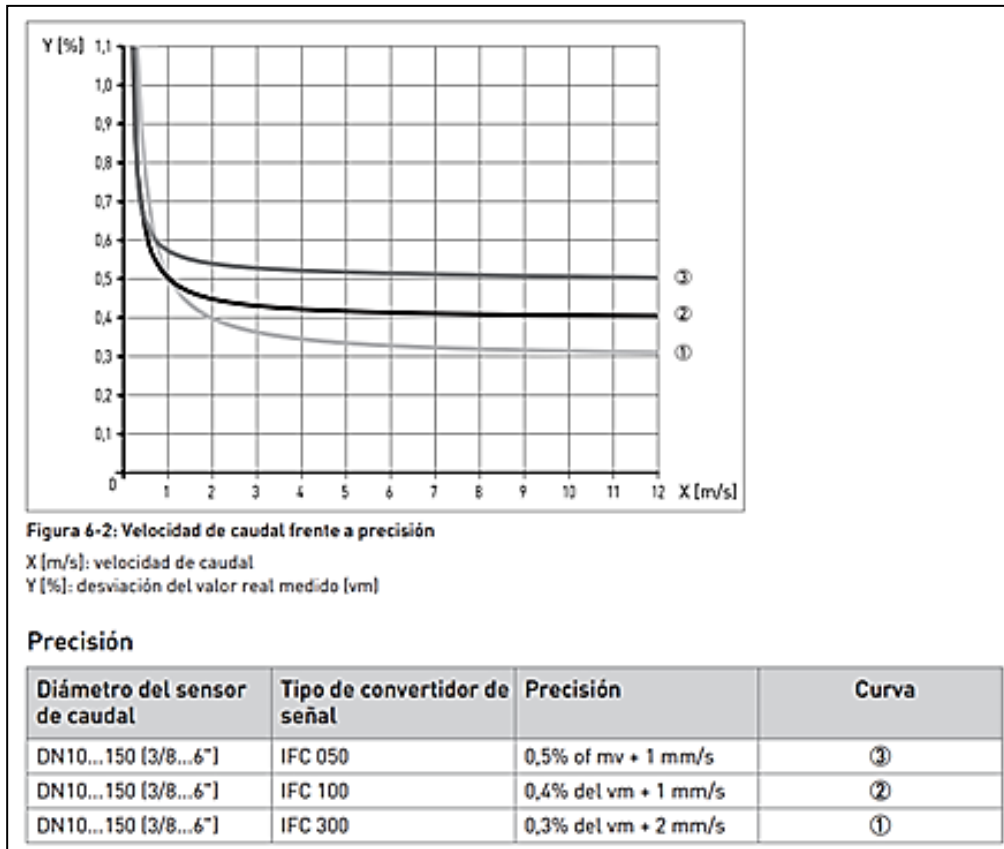


Figura 2.3. Precisión del caudalímetro Vs Velocidad del líquido [14]

Tras analizar lo detallado anteriormente, se decidió seleccionar el diámetro del caudalímetro y las tuberías, de manera que se cumpla una velocidad igual o mayor a 0.5 m/s en el interior del sistema.

Tabulando con diferentes tiempos de dosificación y diámetros de tuberías se seleccionó un tiempo de dosificación de 7 segundos y una tubería de 1/2" cédula 80 bajo la norma ASME B36.19M, obteniendo un caudal de 0.14 L/s como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Caudal necesario y velocidad de diseño

Tiempo (s)	Volumen (L)	Caudal Q (L/S)
7	1	0.14
Diámetro interno (1/2" cédula 80)	Área (m²) 10⁻⁴	Velocidad (m/s)
17.57	2.42	0.59

2.5.3 Instalación del caudalímetro

Para una correcta instalación del caudalímetro, el procedimiento fue basado en el manual del OPTIFLUX 1300. Este otorga información sobre las bridas estandarizadas bajo la norma ASME, instalación delante de una descarga abierta y longitud de secciones de entrada y salida del caudalímetro.

En Figura 2.4, Figura 2.5, Figura 2.6 se ilustra de qué manera se debe instalar un caudalímetro OPTIFLUX 1300.

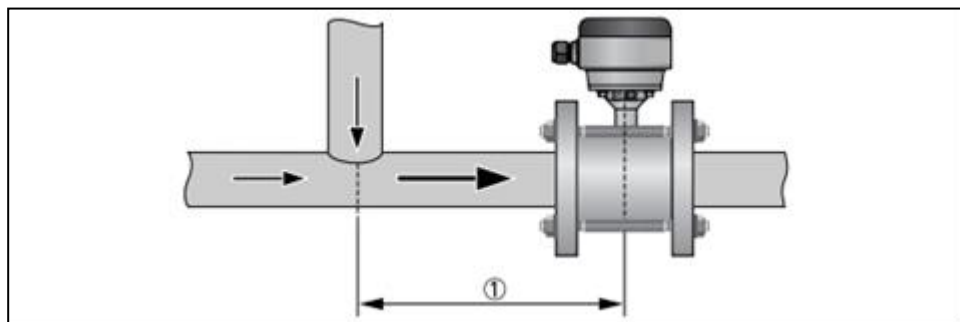


Figura 2.4. Longitud de entrada recomendada $>10DN$ [14]

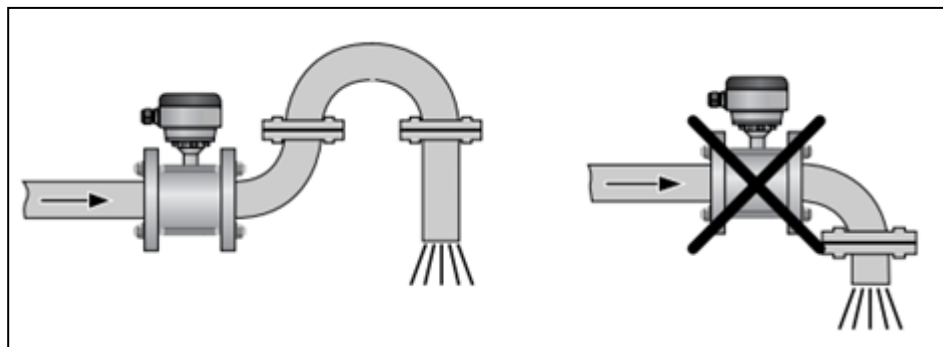


Figura 2.5. Instalación delante de una descarga abierta [14]

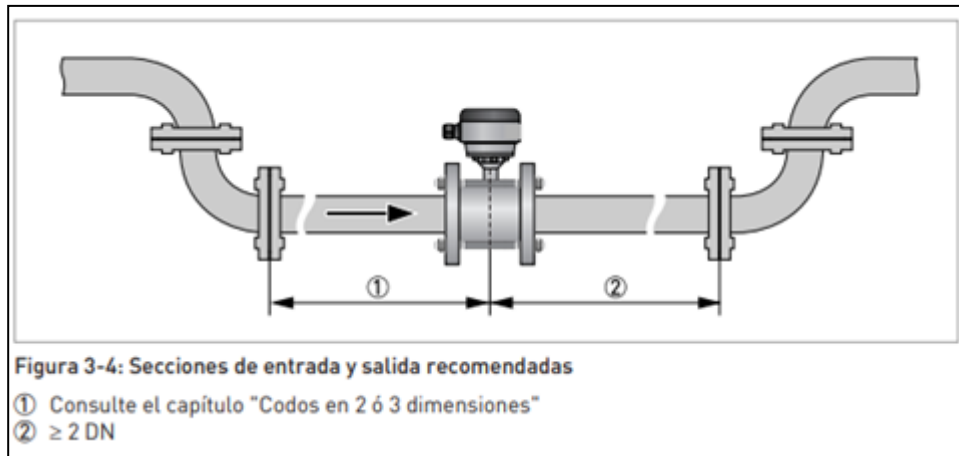


Figura 2.6. Longitud de salida recomendada $>2DN$ [14]

La Figura 2.7 presenta los tamaños recomendados de bridas bajo la norma ASME con respecto al diámetro nominal del caudalímetro.

ASME B16.5					
Diámetro nominal DN [pulgada]	Contrabridas		Presión de operación máx. [psig]	Pernos	Par de apriete máx. [lbs.ft] ②
	Tamaño de brida [inch]	Clase de la brida [lb]			
3/8"	1/2" ①	150/300 lb	230	4 x 1/2"	11,6
1/2"	1/2"	150/300 lb	230	4 x 1/2"	11,6
1"	1"	150/300 lb	230	4 x 1/2"	10,8
1 1/2"	1 1/2"	150/300 lb	230	4 x 1/2"	18,1
2"	2"	150/300 lb	230	4 x 5/8"	32,5
3"	3"	150 lb	230	4 x 5/8"	40,5
3"	3"	300 lb	230	8 x 5/8"	20,5
4"	4"	150/300 lb	230	8 x 5/8"	26
6"	6"	150 lb	230	8 x 3/4"	72,3
6"	6"	300 lb	230	12 x 3/4"	47,7

① Para los tamaños DN3/8" y 1/2" utilice las contrabridas DN1/2" (tubo).
 ② Los valores de par especificados dependen de variables (temperatura, material de los pernos, material de las juntas, lubricantes, etc.) no controladas por el fabricante. Por lo tanto, los valores deben considerarse sólo indicativos.

Figura 2.7. Dimensiones recomendadas de bridas según el tamaño del caudalímetro [14]

Para la instalación serán necesarios codos y bridas que se ajusten a las tuberías de 1/2" de cédula 80 de la norma ASME.

Se seleccionaron codos 1/2" cédula 80 ASME B16.9 y bridas de 1/2" ASME 16.5.

2.5.4 Diseño del sistema de succión e inyección

Para el diseño del sistema de dosificación se optó por una dosificadora vertical, es decir, que el sistema de succión e inyección (SSI) se encuentre orientado verticalmente. De esta manera, se consiguen reducir las dimensiones horizontales de la máquina para optimizar el uso de espacio.

El diseño de la camisa de cilindro del SSI se basó en el requerimiento de una dosificación máxima de 4 L. Se tomaron en cuenta otros parámetros de diseño, como, por ejemplo: la camisa no debe ocupar mucho espacio vertical, el diámetro del cilindro no debe ser muy grande debido a las pérdidas secundarias ocasionadas en su salida.

Para la selección del diámetro de las tuberías fueron consideradas las pérdidas secundarias que ocasionarían la salida de la camisa de cilindro y la entrada de la tubería del caudalímetro. Se optó por un diámetro intermedio entre la camisa del cilindro y la tubería ½" cédula 80 del caudalímetro, el cual es presentado en la

Tabla 2.5:

Tabla 2.5. Dimensiones de una tubería 1 1/2" Norma ASME

Diámetro nominal	Diámetro exterior	Cédula	Espesor de tubería
1 ½"	48.3 mm	80 S	5.08 mm

La válvula tres vías seleccionada debe ser capaz de permitir la succión verticalmente y la dosificación horizontalmente. Debido a esto, la válvula debe poseer una forma de T. Se seleccionó la válvula de asiento angular tres vías del catálogo ESG VALVE la cual se presenta en la

Figura 2.8:



Figura 2.8. Válvula de asiento angular tres vías [16]

La Figura 2.9 ilustra el funcionamiento de la válvula tres vías seleccionada, la cual permite la succión desde la vía B-A y la dosificación por medio de la vía A-C.

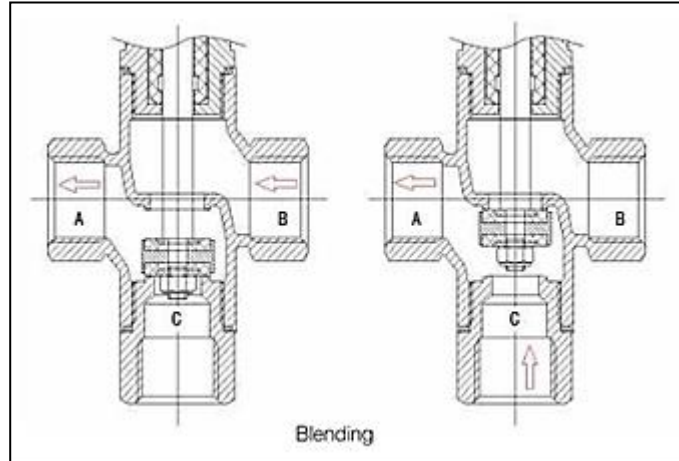


Figura 2.9. Vías y funcionamiento de la válvula [16]

Se seleccionó el tamaño DN40 ofrecido por el fabricante que concuerda con el diámetro de las tuberías del SSI.

2.5.5 Selección del pistón dosificador

Para la selección del pistón dosificador es necesario calcular la fuerza mínima necesaria para conseguir el caudal calculado. La fuerza se calculó utilizando el principio de Bernoulli para fluidos viscosos. Una vez obtenida la fuerza requerida, se procede a buscar un pistón que sea capaz de cumplir con los requerimientos tanto de carrera como de fuerza.

El SSI fue dividido en tres partes. El análisis de cada una de las partes se realizó tomando como base el libro de mecánica de fluidos de Frank White [17]. En la Figura 2.10 se pueden apreciar las divisiones realizadas:

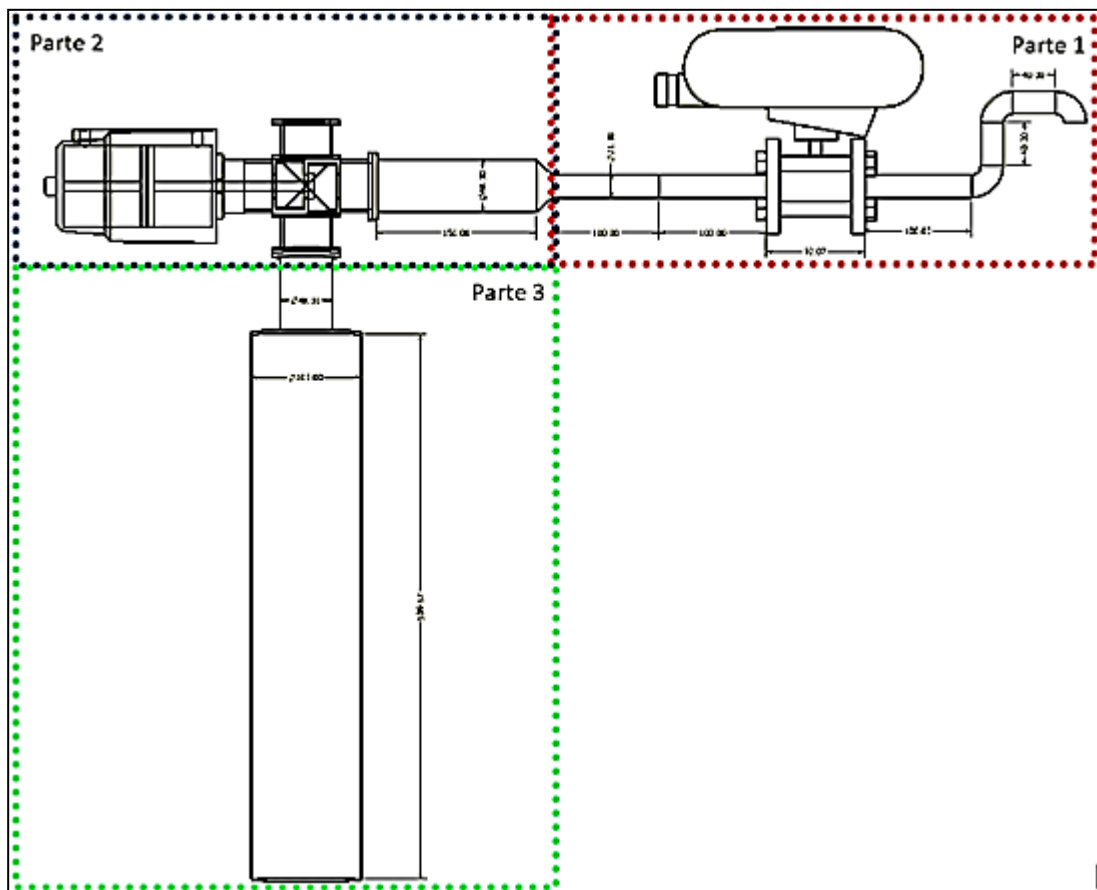


Figura 2.10. Sistema de succión e inyección seccionado

Para calcular la fuerza mínima necesaria en el SSI a la hora de dosificar se consideraron las pérdidas por fricción en las tuberías de $\frac{1}{2}$ " , de $1 \frac{1}{2}$ " y de la camisa de cilindro. De igual manera, se analizaron las pérdidas por accesorios en la línea, como, por ejemplo: reducción brusca, reducción gradual, válvula tres vías y codos

largos. En el Apéndice B se describen a detalle los cálculos para determinar la fuerza mínima necesaria en el SSI y la selección del pistón.

2.5.6 Diseño de tolva de alimentación

Para el diseño de la tolva de alimentación de la dosificadora, se inicia calculando el volumen consumido por tres ciclos de dosificación de la máquina. Para el cálculo se utilizaron las siguientes consideraciones:

- Un sistema de dosificación es capaz de dosificar 4 litros de producto.
- La dosificadora consta con tres sistemas de dosificación.
- Un ciclo de dosificación se completa cuando las tres camisas de cilindro están vacías.

Por estas razones, el volumen mínimo requerido por la tolva es:

$$V = 4 * 3 * 3 = 36L \quad (2.1)$$

Se optó por un diseño con base cilíndrica y una parte superior trapezoidal, como se observa en la Figura 2.11. Una forma trapezoidal permite distribuir la presión hidrostática generada en la tolva, reduciendo los esfuerzos generados en la estructura.

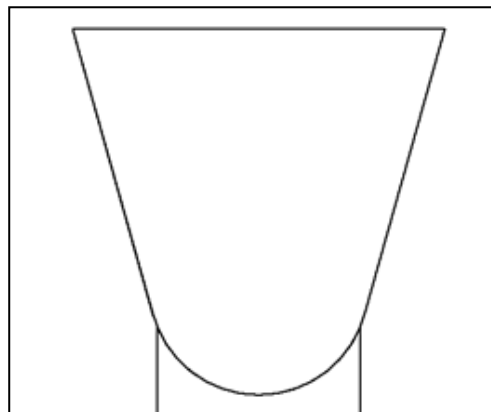


Figura 2.11. Sección transversal de la tolva de alimentación

La tolva diseñada soportará la presión hidrostática generada por el líquido que contiene. Por esta razón, se realizaron simulaciones en el software Inventor para determinar los esfuerzos experimentados a fin de que, al cambiar el espesor de la tolva, se consiga un factor de seguridad mayor a 6.

2.5.7 Diseño del sistema de desplazamiento vertical de boquillas (SDV)

En la solución conceptual se presentó un sistema para subir y bajar las boquillas mediante un pistón neumático; pero, para el diseño del sistema, fue necesario analizar de qué manera se podría calibrar la altura mínima de las boquillas, permitiendo al cliente utilizar diferentes tamaños de botellas.

El sistema debe ser capaz de soportar el peso de la viga, el pistón, las boquillas y el sistema de ajuste de las boquillas. Por esta razón, se descartó la opción de utilizar una sola columna de soporte. En la Figura 2.12 se ilustra el diseño conceptual realizado a partir de los criterios analizados.

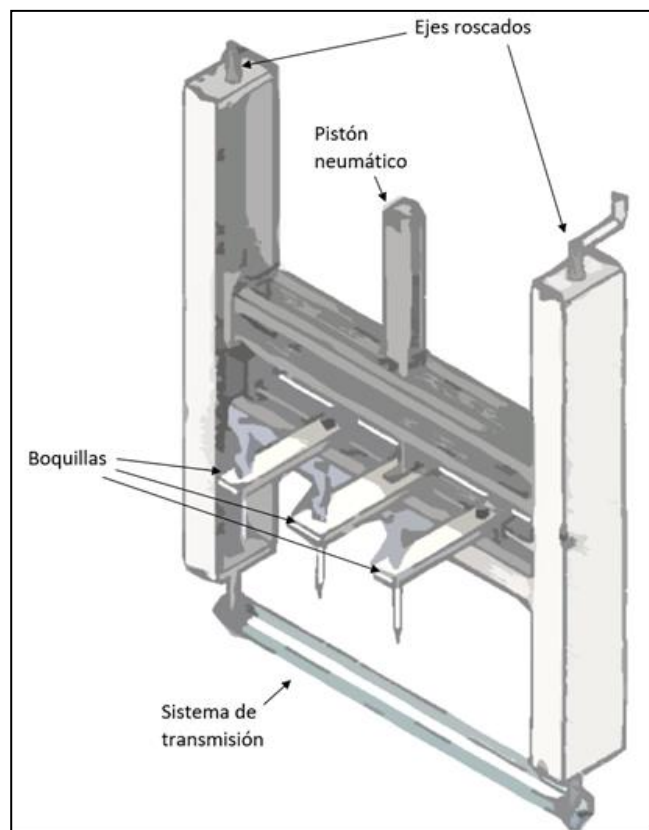


Figura 2.12. Diseño conceptual del sistema de desplazamiento vertical

Se optó por un diseño de dos sin fines (ejes roscados) que soporten a los componentes, capaces de rotar sincronizadamente por medio de un sistema de transmisión de potencia, que permita ajustar la altura final de las boquillas.

Posteriormente, se analizaron los esfuerzos experimentados en la estructura, debido al peso de los componentes, para comprobar que el diámetro de los ejes roscados sea adecuado.

2.5.8 Diseño del sistema de transmisión de potencia para los ejes roscados

Para la selección de un sistema de transmisión entre dos ejes roscados se consideró la importancia del movimiento sincronizado de ambos ejes debido a que, si se mueven de forma descoordinada, el sistema de boquillas presentaría una inclinación no deseada.

Los criterios analizados para la selección del sistema de transmisión de potencia son los siguientes:

- Movimiento sincronizado entre ambos ejes.
- Bajo uso del sistema de transmisión.
- Potencia de transmisión baja.
- Distancia entre centros de los ejes.

Por estas razones, se descartaron los sistemas de engranajes debido a la gran distancia entre centros, y los sistemas de bandas en V debido al deslizamiento existente. Se seleccionó el sistema de transmisión flexible catarinas y cadena, debido a su bajo costo en comparación a las correas sincrónicas. En el Apéndice C se detalla el proceso de selección de la cadena y catarinas.

2.5.9 Diseño del circuito neumático

Para el diseño del circuito neumático se estudió el comportamiento de los actuadores que participan en un ciclo de dosificación. De esta manera, se generó un diagrama de espacio-fase para los actuadores neumáticos. En la Figura 2.13 se ilustra el funcionamiento secuencial de los actuadores en un sistema de dosificación.

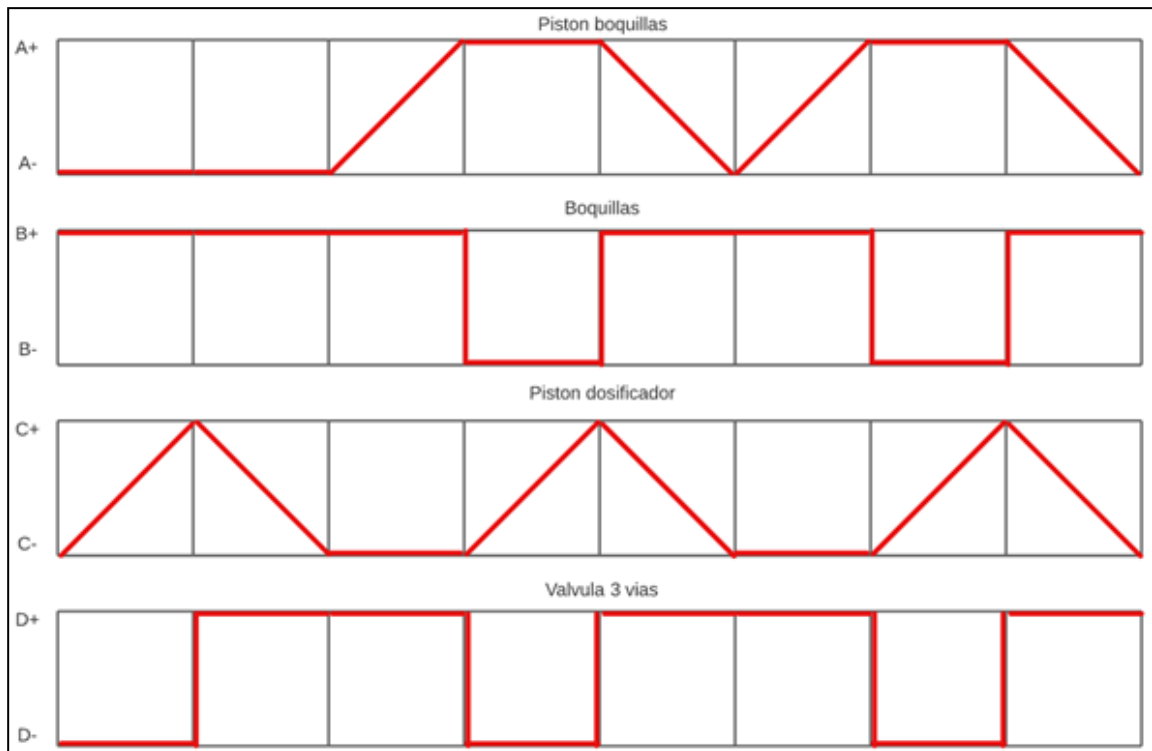


Figura 2.13. Diagrama de espacio-fase

El análisis del diagrama de espacio-fase permitió determinar qué actuadores funcionan sincronizadamente y cuáles funcionan independientemente. Además, se analizaron criterios, como, por ejemplo: estabilidad de presión de aire, grado de inclinación, fuerza experimentada de los actuadores. En el Apéndice D se detalla de mejor manera el diseño neumático y la selección de sus elementos.

2.6 Diseño de control

2.6.1 Programación del PLC para el control de la dosificadora

Como se detalla en las secciones de diseño anteriores, se tienen varios elementos a controlar por cada línea de dosificación: el pistón dosificador, la válvula de salida

del líquido a dosificar y la válvula de tres vías ubicada entre la tolva, el sistema de succión y el camino de salida del líquido dosificado. Además del pistón del sistema de movimiento vertical de las boquillas, que mueve simultáneamente las boquillas de todas las líneas.

Todos estos elementos se controlan mediante un PLC Siemens Simatic S7 1200, este recibirá como entrada una señal digital para dar inicio al ciclo de dosificación y la señal de algunos sensores final de carrera ubicados en los distintos cilindros. Por otro lado, se le anexa al controlador un módulo de entradas analógicas para recibir la señal de corriente de los caudalímetros ubicados en las líneas de dosificación. Los caudalímetros trabajan con transmisores o convertidores de caudal electromagnético IFC 050 a 4 hilos que entregan una señal de corriente de 0 a 20 mA [18]. De esta manera, se obtiene la señal eléctrica que requiere el PLC para realizar el control. La conexión entre el transmisor y el sensor de flujo se muestra en la Figura 2.14.

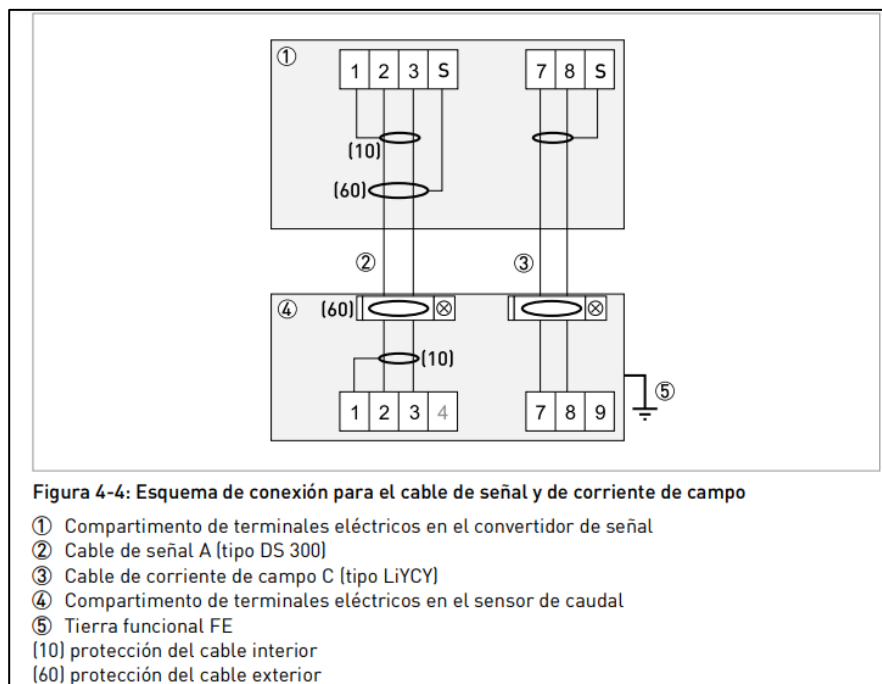


Figura 2.14. Esquema de conexión para el cable de señal y de corriente de campo [18]

Con las señales recibidas y mediante programación Ladder se proceden a enviar las señales de salida pertinentes para accionar los elementos neumáticos acorde al diagrama espacio-fase presentado. Así, se lleva un recuento del volumen de

salida de cada línea para detener el proceso cuando se alcanza el volumen configurado o requerido.

En la Tabla 2.6 se detallan las entradas del PLC, el tipo de datos, la dirección que ocupan en el programa realizada y una breve descripción:

Tabla 2.6. Entradas del PLC

Nombre	Dato	Dirección	Descripción
CAUDALÍMETRO 1	Int	%IW96	Señal analógica del sensor ubicado en la línea 1 de dosificación.
CAUDALÍMETRO 2	Int	%IW98	Señal analógica del sensor ubicado en la línea 2 de dosificación.
CAUDALÍMETRO 3	Int	%IW100	Señal analógica del sensor ubicado en la línea 3 de dosificación.
PULSADOR START	Bool	%I0.0	Pulsador para arrancar la máquina.
PULSADOR EMERFENCIA	Bool	%I0.1	Pulsador de paro de emergencia.
SENSOR DOSIF 1	Bool	%I0.2	Sensor ubicado en el cilindro de succión línea 1, detecta que la camisa se encuentra llena de líquido.
SENSOR DOSIF 2	Bool	%I0.3	Sensor ubicado en el cilindro de succión línea 2, detecta que la camisa se encuentra llena de líquido.
SENSOR DOSIF 3	Bool	%I0.4	Sensor ubicado en el cilindro de succión línea 3, detecta que la camisa se encuentra llena de líquido.
SENSOR BOQUILLAS 1	Bool	%I0.5	Sensor ubicado en el cilindro encargado del movimiento de boquillas, detecta que las boquillas se encuentran abajo, listas para dosificar.
SENSOR BOQUILLAS 2	Bool	%I0.5	Sensor ubicado en el cilindro encargado de movimiento de boquillas, detecta que las boquillas se encuentran arriba, en su posición inicial.
PULSADOR INICIO DOSIF	Bool	%I0.6	Botón para iniciar la dosificación.

Respecto a la programación, se utilizó el software TIA Portal. Se crearon bloques de función y se emplearon bloques de datos para estructurar adecuadamente el proyecto y reciclar código (Ver Figura 2.15), haciendo un mejor uso del espacio de memoria. Dichos bloques se detallan a continuación:

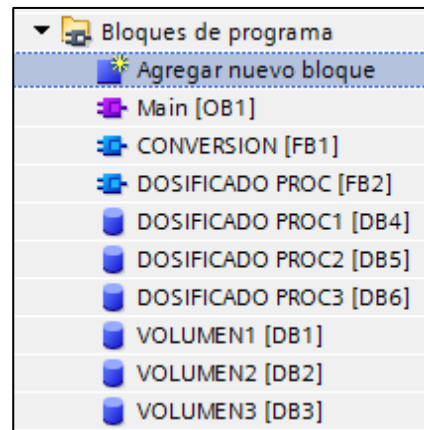


Figura 2.15. Bloques de programa para automatización de dosificación

Se tiene el bloque de función FB2 “DOSIFICADO PROC” donde, como se observa en la Figura 2.16, se tienen las líneas que permiten la activación de las señales de salida, este bloque trabaja con los tres bloques de datos “DOSIFICADO PROCn” donde n es el número de línea (DB4, DB5 y DB6), de esta manera, los mismos escalones de código se utilizan para accionar los componentes de todas las líneas de dosificación.

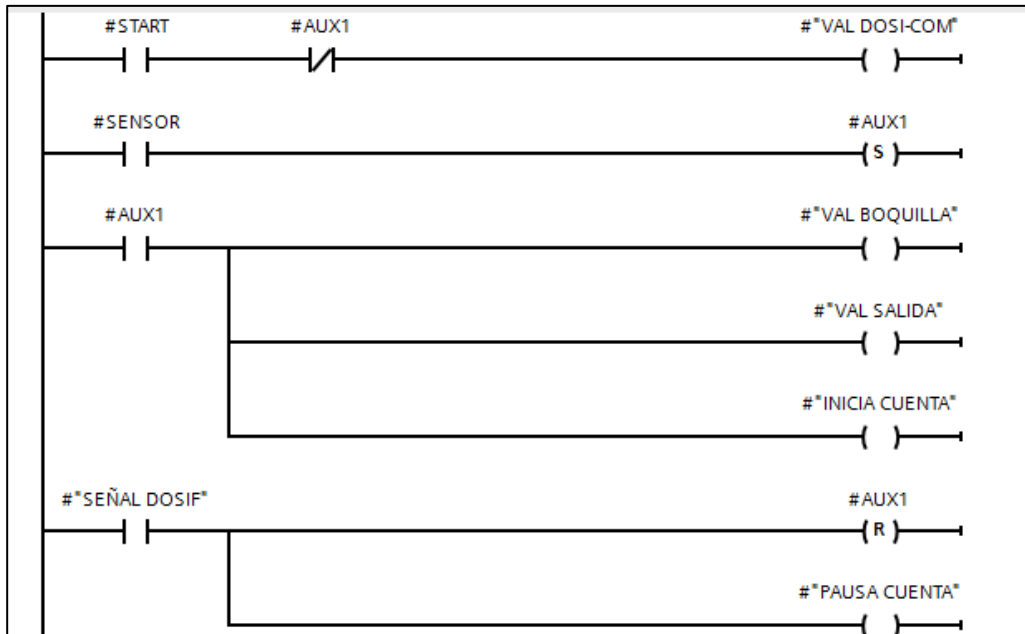


Figura 2.16. Programación en función FB2 para activación de salidas que accionan actuadores neumáticos.

Por otro lado, el bloque de función FB1 “CONVERSION” se encarga de tratar las señales analógicas recibidas de los sensores de flujo; normalizándola y escalándola para obtener un caudal en unidades L/s. El ciclo de trabajo definido para el bloque es de 75ms, por lo que cada 75ms se normalizan y escalan las señales recibidas mediante los bloques mostrados en la Figura 2.17, para la obtención de REAL 2 que guarda valores reales que representan los caudales sensados en L/s.

El caudal obtenido en cada línea se multiplica por el tiempo de muestreo de 75ms para obtener “volúmenes instantáneos” que se totalizan mediante el bloque sumador mostrado en la Figura 2.18. Además, fue necesario el uso de temporizadores y variables de almacenamiento de datos reales para hacer funcionar dicha totalización. Este bloque trabaja con los bloques de dato “VOLUMEN” donde n es el número de línea (DB1, DB2, DB3) para recibir las señales de los sensores de caudal de cada línea y hacer las respectivas totalizaciones de volumen por línea mediante los mismos escalones de código.

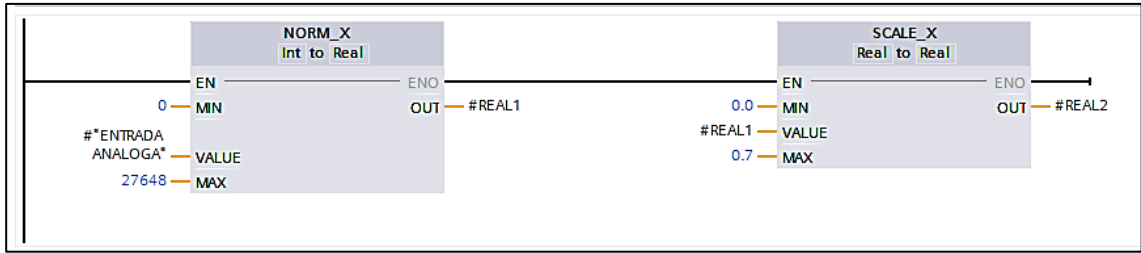


Figura 2.17. Bloques de normalización y escalamiento de la señal analógica de los sensores de flujo

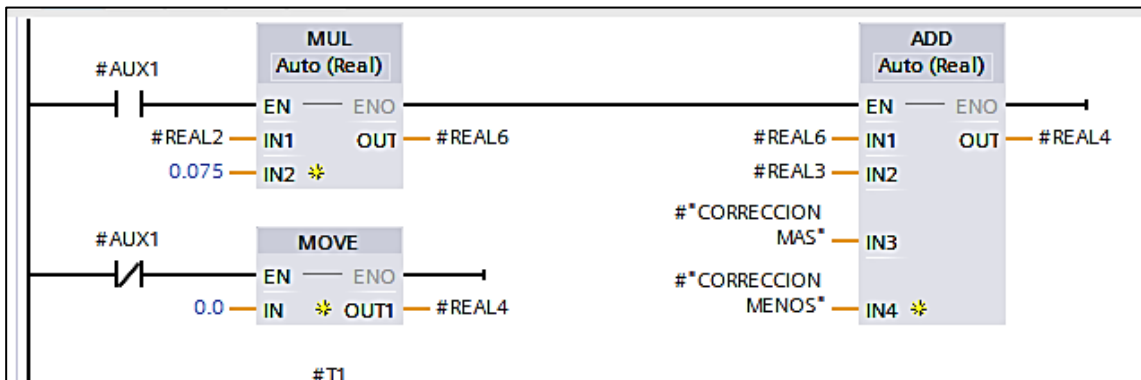


Figura 2.18. Bloques de obtención de volumen instantáneo y totalización de volúmenes en un proceso de dosificación

Finalmente, en el MAIN se ubica la programación básica para arranque del programa y paro de emergencia; los bloques de CONVERSIÓN y DOSIFICADO PROC para cada una de las tres líneas de dosificación; escalones para la selección del volumen a dosificar; selección de líneas de trabajo activas. Y, además, contiene el código para comparar el volumen totalizado con el volumen configurado (ver Figura 2.19), comparación que activa señales auxiliares para detener el proceso de dosificación en el caso de tener un volumen totalizado igual o mayor al requerido. El código completo y más detallado se encuentra en la documentación anexada en el apéndice F.

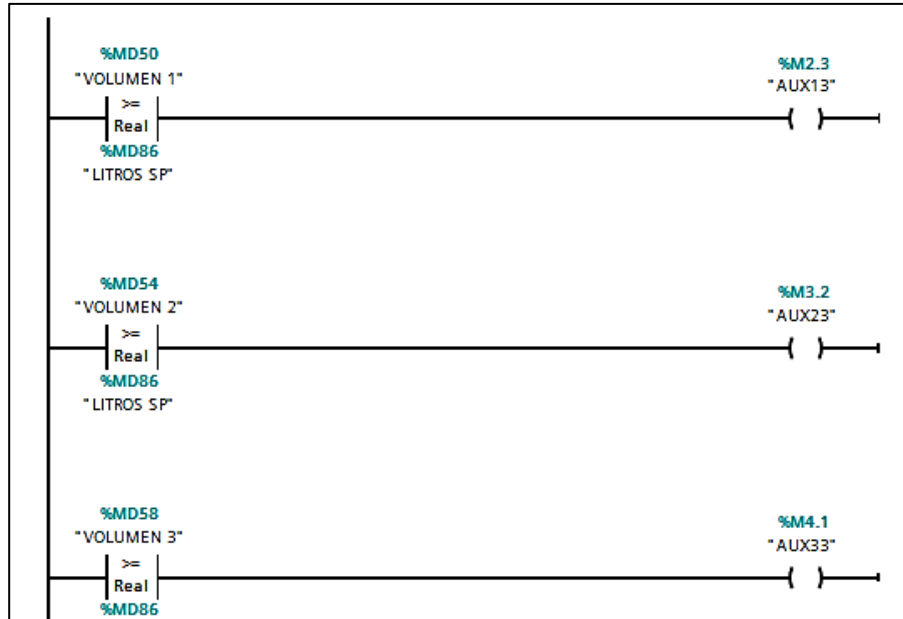


Figura 2.19. Bloques de comparación de volumen totalizado con volumen configurado

Las salidas del PLC son las mostradas en la Tabla 2.7, cabe recalcar que mediante la misma señal se accionan la válvula conmutadora y la ubicada en el cilindro de dosificación, pues a lo largo del proceso mantienen el mismo estado. De esta manera, se tienen menos señales de salida, lo cual es útil si se planea ampliar las líneas de dosificación en el modelo presentado.

Tabla 2.7. Salidas del PLC

Nombre	Dato	Dirección	Descripción
VÁLVULA DOSI-COM 1	Bool	%Q0.0	Señal para el accionamiento de válvula de tres vías o conmutadora y válvula para cilindro de dosificación – línea 1.
VÁLVULA SALIDA 1	Bool	%Q0.1	Señal para el accionamiento de válvula para la salida del líquido a dosificar – línea 1.
VÁLVULA DOSI-COM 2	Bool	%Q0.2	Señal para el accionamiento de válvula de tres vías o conmutadora y válvula para cilindro de dosificación – línea 2.
VÁLVULA SALIDA 2	Bool	%Q0.3	Señal para el accionamiento de válvula para la salida del líquido a dosificar – línea 2.
VÁLVULA DOSI-COM 3	Bool	%Q0.4	Señal para el accionamiento de válvula de tres vías o conmutadora y válvula para cilindro de dosificación – línea 3.
VÁLVULA SALIDA 3	Bool	%Q0.5	Señal para el accionamiento de válvula para la salida del líquido a dosificar – línea 3.
VÁLVULA BOQUILLAS	Bool	%Q0.6	Señal para accionamiento de válvula para el movimiento de boquillas en eje vertical.

2.6.2 HMI

Para facilitar la interacción del usuario con la máquina dosificadora y automatizar el proceso de calibración del volumen dosificado se asocia el PLC a una interfaz HMI en el que se crearon siete pantallas (ver Figura 2.20), donde se incluyen: un menú de inicio; una sección para monitorear el proceso; y una sección de mantenimiento donde el usuario tendrá acceso al accionamiento de los diversos actuadores de la máquina. Esta fue diseñada en TIA PORTAL V16 con una pantalla KTP700 Basic PN.

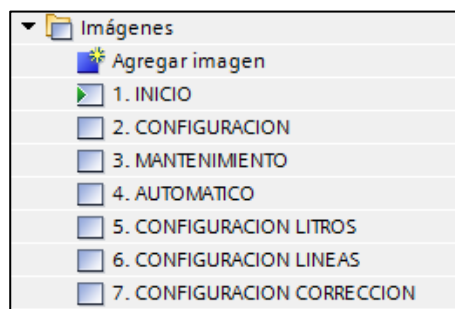


Figura 2.20. Imágenes creadas para interfaz HMI

2.7 Estimación de precisión de la dosificadora de líquidos

Para la estimación de la precisión de dosificación en la máquina se analizaron tres criterios principales: el tiempo de reacción de los componentes mecánicos (TR), la precisión de lectura del caudalímetro y los tiempos totales de ejecución de la programación (TT). La ecuación 2.1 permite calcular el volumen extra ocasionado por los tiempos de retardo.

$$V_e = (TR + TT) * Q \quad (2.2)$$

Finalmente, se utilizó la precisión de lectura del caudalímetro junto con el volumen extra para la obtención de la precisión de dosificación de la máquina. En el Apéndice E se detalla de mejor manera la estimación de la precisión de la dosificadora de líquido.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente capítulo se presentará el diseño 3D de la máquina dosificadora de líquidos, conformada por un sistema de succión e inyección, el sistema de desplazamiento vertical de las boquillas, circuito neumático y su estructura, así como las especificaciones del diseño. Se mostrarán también análisis estructurales para las partes sometidas a grandes cargas. Con respecto al sistema eléctrico y de control, se muestra la programación en Ladder y HMI en TIA Portal, así como el diagrama de conexiones eléctricas.

3.1 Diseño mecánico

En la Figura 3.1. se ilustra la máquina dosificadora de líquidos diseñada en Inventor. Este programa permitió realizar análisis estructurales para los componentes mecánicos, mismos que serán presentados en los siguientes apartados.

La máquina diseñada cuenta con una tolva en la parte superior, misma donde se prevé que los operadores coloquen el producto líquido donde ingresará al sistema de succión e inyección para posteriormente ser dosificado a través de las boquillas. El sistema de desplazamiento de boquillas permite la calibración de la altura de las boquillas dependiendo del tamaño de botellas utilizado. Además, permite el ingreso de las boquillas dentro de las botellas debido al desplazamiento del pistón DNC con una carrera de 300 milímetros.

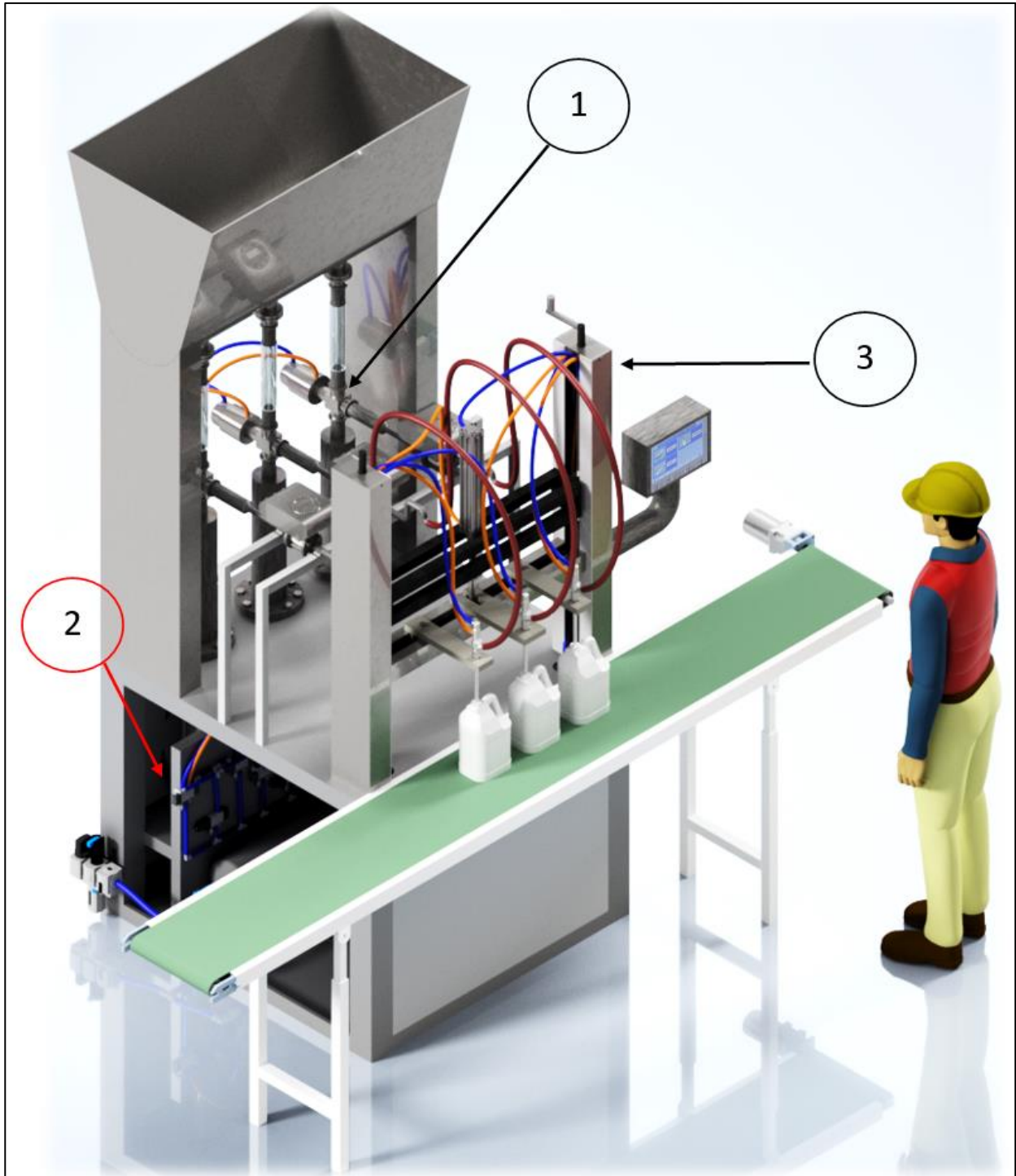


Figura 3.1. Diseño 3D de la máquina dosificadora de líquidos: (1) Sistema de succión e inyección, (2) Sistema neumático, (3) Sistema de desplazamiento vertical de boquillas.

3.1.1 Sistema de succión e inyección (SSI)

La dosificadora de líquidos cuenta con tres sistemas de succión e inyección (Figura 3.2). Cada SSI está compuesto de cuatro elementos principales: la válvula tres vías ESG, el caudalímetro, pistón dosificador y camisa de cilindro. El pistón dosificador DNC 80-500 permite generar la fuerza requerida para dosificar 1 Litro de suavizante en 7 segundos, como se calculó en el Apéndice B; Además, con la camisa de cilindro, permiten la acción de succión y dosificación en el sistema. La válvula tres vías permite controlar el camino del líquido para la succión y su posterior dosificación. El caudalímetro permite medir el flujo de líquido, el cual se utiliza para el cálculo de volumen dosificado. Se utilizaron las tuberías ½" y 1 ½" de cédula 80 para conectar los componentes, mismos que se seleccionaron bajo la norma ASME B36.19M.

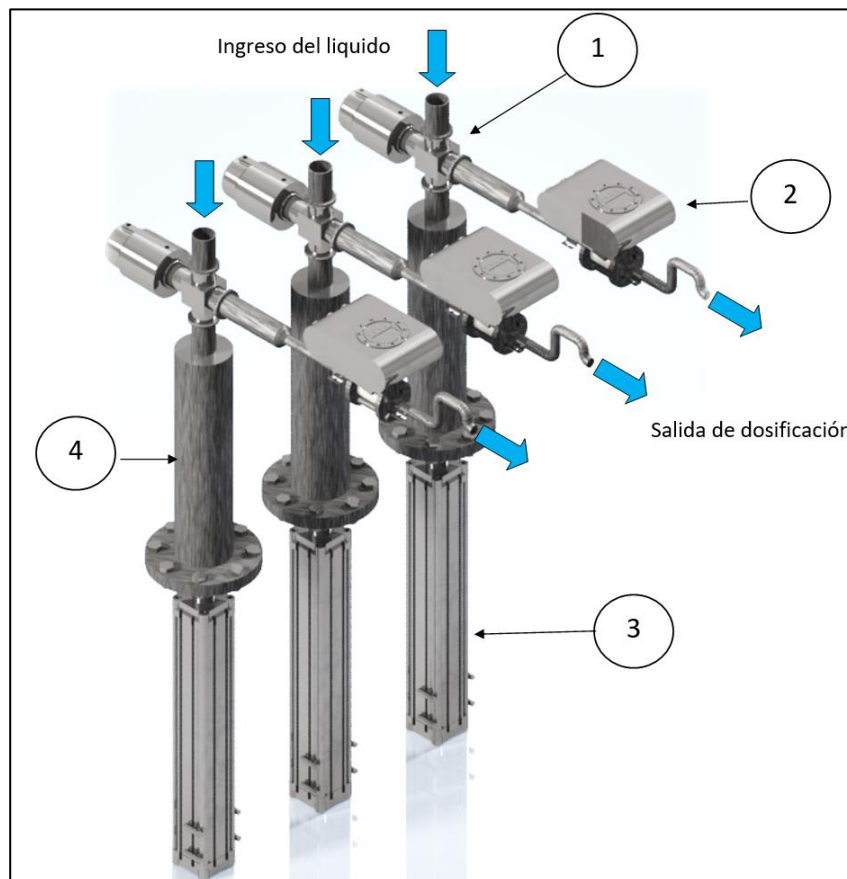


Figura 3.2. Sistema de succión e inyección: (1) Válvulas tres vías ESG, (2) Caudalímetros, (3) Pistones dosificadores, (4) Camisas de cilindro.

3.1.2 Tolva de alimentación

La tolva de alimentación es capaz de soportar una presión de 3.29 kPa, caso de mayor presión, cuando está llena del líquido más denso. Se realizó un análisis estructural de la tolva de acero inoxidable 316 (Figura 3.3), en el cual se simuló la presión a la que se encuentran sometidas las paredes de la tolva. Se determinó que la tolva es capaz de trabajar con líquidos con una densidad de 1.04 g/cm³ o menos, es decir, la tolva es capaz de trabajar con cada uno de los productos estudiados para la selección del pistón dosificador (Apéndice B).

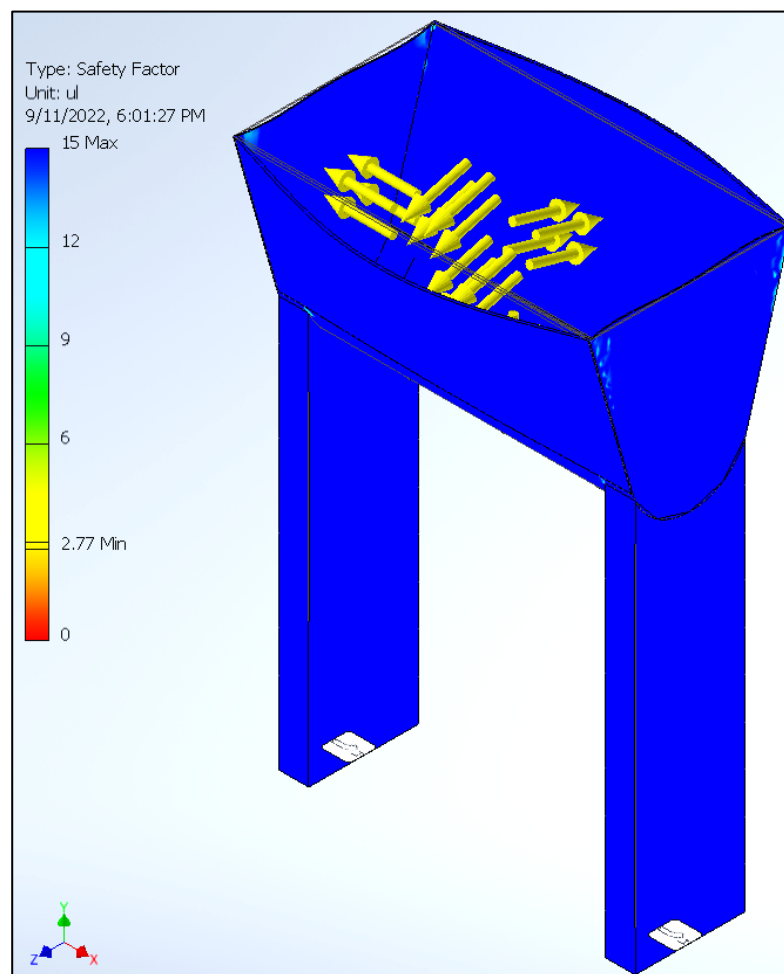


Figura 3.3. Análisis de factor de seguridad en la tolva de alimentación

3.1.3 Sistema de desplazamiento vertical de boquillas

Según lo detallado en el Apéndice D, se seleccionó el pistón neumático capaz de generar la fuerza necesaria para levantar el sistema de boquillas. El pistón DNC 50-300 se encuentra instalado en posición vertical, el cual permite introducir las tres boquillas ESG en los envases por llenar, dosificar y salir nuevamente gracias a su carrera de 300 milímetros. La Figura 3.4 ilustra el diseño 3D del sistema de desplazamiento vertical y sus partes.

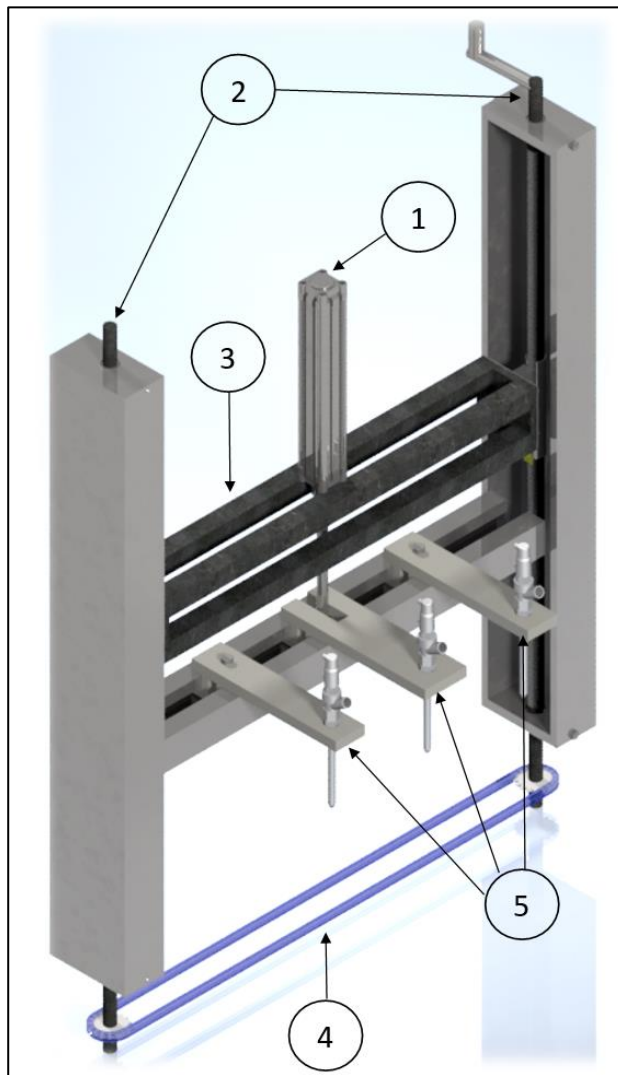


Figura 3.4. Sistema de desplazamiento vertical de boquillas: (1) Pistón neumático, (2) Ejes roscados, (3) Viga de soporte, (4) Sistema cadena-catarinas, (5) boquillas ESG

El diseño del sistema de transmisión (Figura 3.4 - 4) se presenta en el Apéndice C. El sistema seleccionado fue cadena-catarinas, este permite la rotación sincronizada de los ejes roscados, evitando desnivelaciones en la viga. En las Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se detallan las características de los elementos seleccionados.

Tabla 3.1. Especificaciones de catarinas PHS 08B-1A17 SKF

	Catarinas
Paso	12.7 mm
Número de dientes	17
Diámetro primitivo	12.7 mm
Peso	0.18 kg

Tabla 3.2. Especificaciones de cadena PHC 08B-1X10FT SKF

	Cadena
Paso	12.7 mm
Diámetro de rodillo	7.75 mm
Diámetro de pasador	4.45 mm
Altura de placa	11.8 mm
Espesor de placa	1.6 mm
Peso	0.69 kg/m
Longitud	2.25 m

Se realizó un análisis estructural de los ejes roscados y la viga de soporte para determinar el factor de seguridad mínimo en la estructura. En la Figura 3.5 se observa el análisis de factor de seguridad realizado, del cual se obtiene un factor de seguridad mayor a 14 para el sistema de ejes roscados y vigas de acero. De esta manera, se determinó que el diámetro de 30 milímetros seleccionado para cada uno de los ejes roscados es capaz de soportar la carga del sistema de boquillas. De igual manera, al poseer un factor de seguridad tan elevado, permite la reutilización de los ejes roscados en caso de realizar una expansión de dosificación, ya que es capaz de soportar aún más carga que la actual.

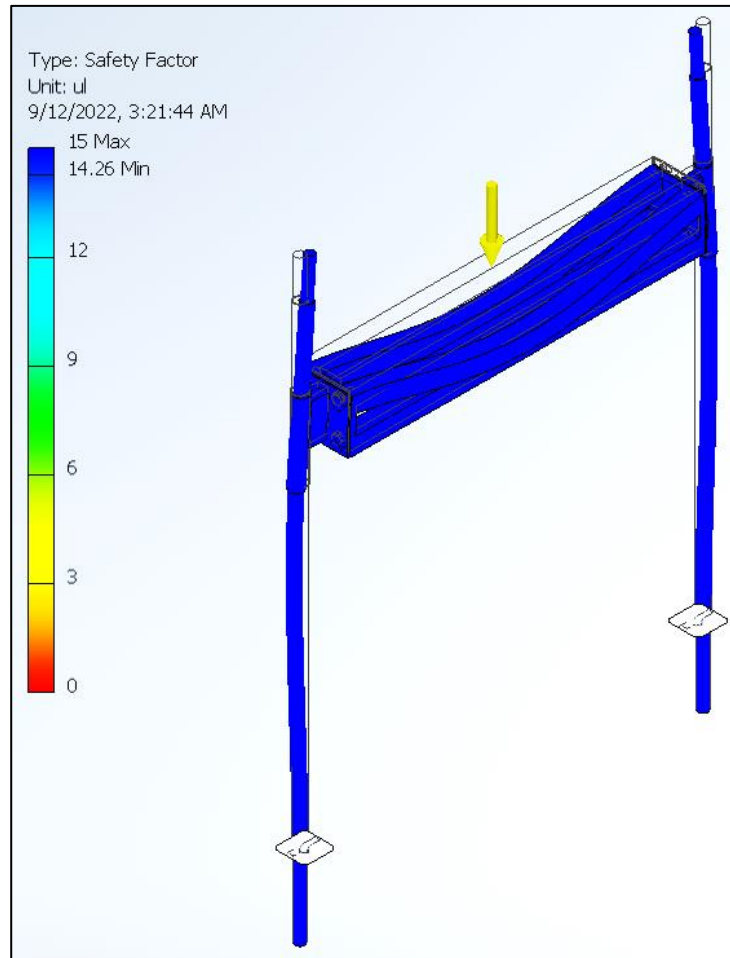


Figura 3.5. Análisis estructural (factor de seguridad) de ejes roscados y viga de soporte

3.1.4 Circuito neumático

Según lo detallado en el Apéndice B y D, se diseñó un circuito neumático capaz de independizar los dos sistemas principales de la dosificadora. En la Figura 3.6 se detalla el circuito diseñado para el sistema de dosificación de líquidos, el cual consiste en tres actuadores neumáticos: una válvula de asiento angular tres vías, un pistón dosificador, una boquilla antigoteo. El pistón dosificador dispone de dos sensores final de carrera: uno para representar la succión completa de 4 Litros y otro para simular el estado de dosificación terminada. En la Figura 3.7 se detalla el circuito diseñado para el sistema de desplazamiento vertical de boquillas, el cual consiste en dos válvulas antirretorno estranguladoras que permiten el control de la velocidad de extensión del pistón neumático.

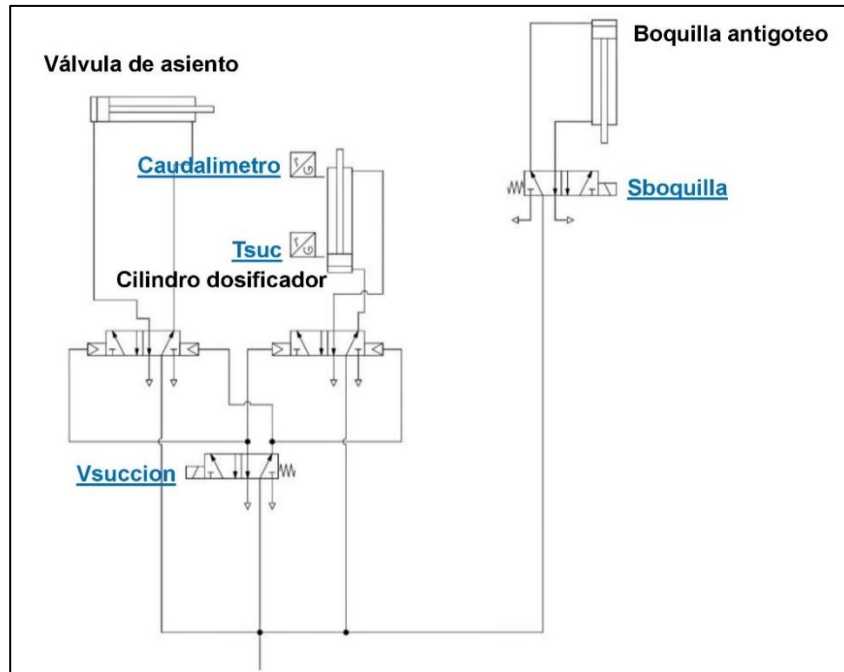


Figura 3.6. Circuito neumático del sistema de dosificación de líquido

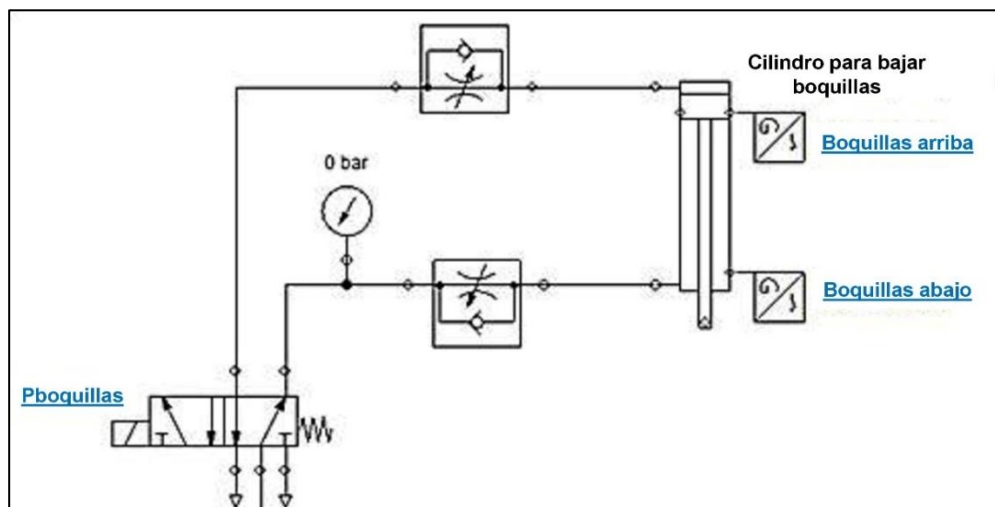


Figura 3.7. Circuito neumático del sistema de desplazamiento vertical de boquillas

La Figura 3.8 presenta el circuito neumático de la máquina dosificadora de líquidos. El circuito consta de tres sistemas de succión e inyección (SSI) y un sistema de desplazamiento vertical (SDV). Además, ambos sistemas se encuentran independizados por medio de dos acumuladores de aire, permitiendo una presión constante en el circuito. Debido a que se utilizó un factor de seguridad para la selección de los pistones neumáticos, la máquina es capaz de funcionar adecuadamente a 4.5 bares

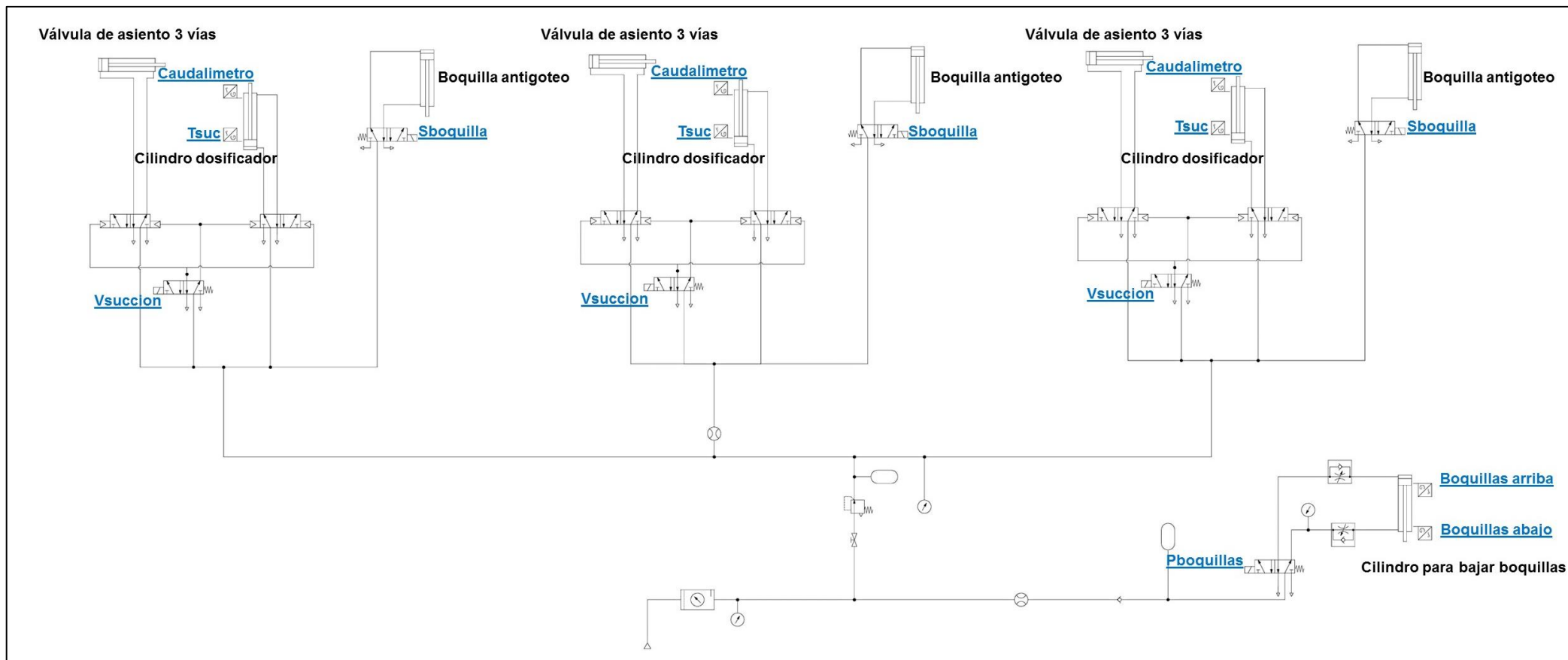


Figura 3.8. Circuito neumático de la máquina dosificadora

3.2 Costos del consumo de aire

Se realizó un análisis del consumo de aire mediante el uso de la calculadora de Festo [19] para la obtención de consumo de aire en cilindros y costos energéticos. Esta calculadora permite ingresar los actuadores utilizados, junto con sus especificaciones más importantes para obtener un consumo estimado en dólares. En la Figura 3.9 se presenta el consumo de aire obtenido a 4.5 bares y 8 horas laborales para los tres pistones dosificadores y un pistón de bajar boquillas. Se obtuvo un consumo de aire de $0.26 \text{ m}^3/\text{min}$ y un costo anual de \$369. El precio energético por cada metro cúbico de aire se calculó conociendo el compresor utilizado por el cliente. En la Tabla 3.3 se presenta el modelo del compresor HERTZ utilizado junto con sus especificaciones. Se utilizó la potencia y capacidad del compresor, y el costo del kW en Ecuador, obteniendo un costo de $1.1 \frac{\text{ctvs}}{\text{m}^3}$.

The image shows a screenshot of a web-based calculator interface for air consumption. It is divided into three main sections: 'Consumo de aire', 'Costos energéticos', and 'Utilización'. Each section contains input fields and calculated results.

Consumo de aire		
por Minuto	por día	Por año
0.26 m ³	124.55 m ³	33503.57 m ³

Costos energéticos		Ahorro de energía
Precio	Por año	<input type="checkbox"/>
0.011 \$ /m ³	368.54\$	

Utilización		
Presión de trabajo	Horas de trabajo por día	Días laborales al año
4.5 bar	8 h	269 d

Figura 3.9. Consumo de aire de los cilindros neumáticos de la máquina dosificadora de líquidos [19]

Tabla 3.3. Especificaciones de compresor HSC 37 HERTZ

	Presión (bar)	Capacidad (m ³ /min)	Potencia (kW)	Peso (kg)
HSC 37	7.5	6.4	37	742
	10	5.4		
	13	4.3		

3.3 Especificaciones de la dosificadora de líquidos

A continuación, en la Tabla 3.4, se presentan las condiciones de trabajo de la máquina dosificadora diseñada:

Tabla 3.4. Especificaciones de trabajo de la máquina dosificadora

Especificaciones	
Rango de llenado	250 a 4000 MI
Fuente de alimentación	220 V 60 Hz
Consumo de aire	0.26 m ³ /min para 3 ciclos de dosificación por minuto
Presión	4.5 Bar
Precisión	250-500mL: $\leq \pm 9\%$ 500-4000mL: $\leq \pm 5\%$ (Apéndice E)
Velocidad de dosificación	Depende de la viscosidad del producto y la presión de aire

3.4 Plan de mantenimiento preventivo

El plan de mantenimiento presentado en la Tabla 3.5 detalla las actividades planificadas para el adecuado funcionamiento de la máquina y su respectiva periodicidad recomendada. Se recomienda el cambio de mangueras neumáticas y racores por lo menos una vez al año como parte de este mantenimiento.

Tabla 3.5. Plan de mantenimiento preventivo para la máquina dosificadora

Dosificadora de líquidos de tres boquillas	
Actividad	Periodicidad
Limpieza externa de componentes y estructura.	Semanal
Chequeo de manómetros y reajuste de reguladores de presión.	Semanal
Cheque de nivel de aceite en lubricador y drenaje del condensado de filtros en unidad de mantenimiento.	Semanal
Chequeo de sujeción y reajuste de abrazaderas en las tuberías.	Semanal
Lubricación y limpieza de ejes roscados.	Semanal
Chequeo de presión en acumuladores de aire.	Semanal
Revisar la correcta alineación de los vástagos de pistón.	Quincenal
Inspección de sistema neumático para detección de fugas de aire.	Quincenal
Limpieza de filtros, vasos de aceite y condensado. Limpieza general de unidad de mantenimiento.	Trimestral
Limpieza de sistema eléctrico.	Trimestral
Ajuste de tornillería de sistema eléctrico.	Semestral
Reemplazo de mangueras neumáticas y racores.	Anual
Reemplazo de mangueras dosificadoras.	Bianual

3.5 Interfaz HMI

A continuación, se detallan las pantallas de la interfaz HMI. En la Tabla 3.6 se muestra, entre otras, la sección de mantenimiento. Los cambios de estado de los actuadores son los siguientes:

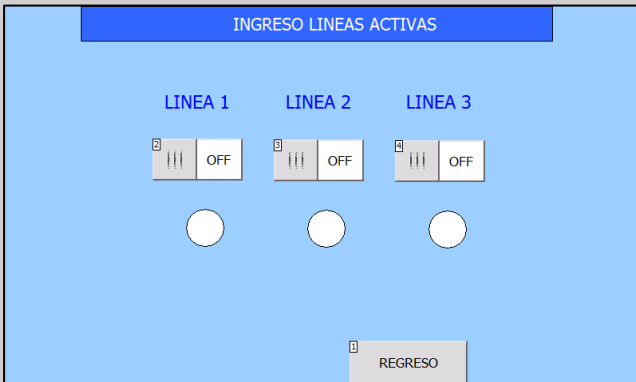
- Cambio de estado de válvula ubicada en el cilindro succionador y válvula tres vías de cada línea de dosificación: en estado ON la camisa ubicada debajo de la tolva se llena, en estado OFF el líquido es expulsado de la camisa con dirección a las boquillas. (Elementos 4, 5 y 6 para válvulas en líneas 1, 2 y 3 respectivamente)
- Cambio de válvula ubicada a la salida de la línea de dosificación: en estado OFF la válvula está cerrada, en estado ON se encuentra abierta permitiendo la salida del líquido por la boquilla. (Elementos 4, 5 y 6 para válvulas en líneas 1, 2 y 3 respectivamente)

- Cambio de estado de válvula para el movimiento vertical de todas las boquillas de manera simultánea: en estado OFF las boquillas se encuentran en su posición original, en estado ON las boquillas bajan. (Elemento 10 para válvula que acciona movimiento de todas las boquillas).

Estos cambios simplifican la limpieza del interior de la máquina, facilitando la circulación del agua que los operadores viertan en la tolva para este proceso.

Tabla 3.6. Pantallas de HMI

Pantalla	Descripción
 <p data-bbox="469 1330 778 1361">Imagen de menú principal</p>	<p data-bbox="976 824 1430 882">El menú de inicio presenta tres opciones:</p> <ol data-bbox="976 887 1430 1218" style="list-style-type: none"> 1. Configuración: permite acceder a un menú de configuración donde se seleccionan las líneas de trabajo y volumen a dosificar. 2. Mantenimiento: permite el cambio de estado de todos los actuadores neumáticos con propósito de facilitar la limpieza y mantenimiento de la máquina. 3. Automático: modo para monitorear el proceso de dosificación.
 <p data-bbox="469 1917 778 1948">Menú de configuraciones</p>	<p data-bbox="976 1442 1430 1523">En la pantalla de configuración se puede acceder a los botones inferiores:</p> <ol data-bbox="976 1559 1430 1827" style="list-style-type: none"> 1. Automático: monitoreo del proceso en modo automático 2. Manual: dosificación mediante un pulsador 3. Inicio: volver al menú de inicio. <p data-bbox="976 1832 1430 1890">Además de las opciones de configuración:</p> <ol data-bbox="976 1895 1430 2069" style="list-style-type: none"> 4. Cantidad: para la selección de la cantidad de volumen a dosificar 5. Líneas: para la activación y desactivación de las líneas en el proceso de dosificación 6. Corrección: ingreso de factores de corrección del volumen a dosificar.



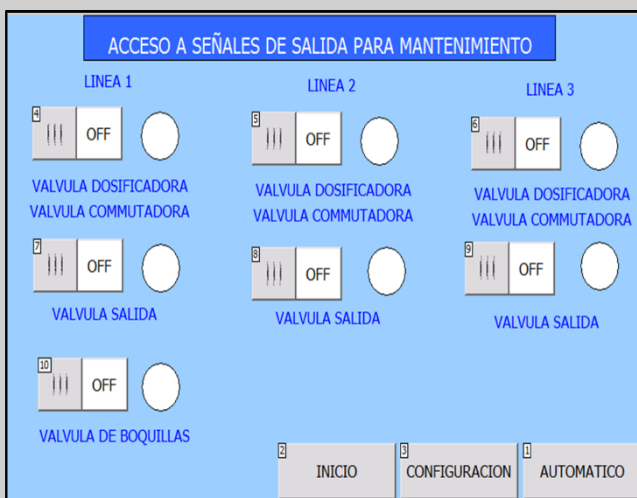
Submenú para selección de líneas de trabajo

Submenú de configuración, pantalla para la activación de líneas de dosificación



Pantalla de selección de volumen

Submenú de selección de volumen a dosificar

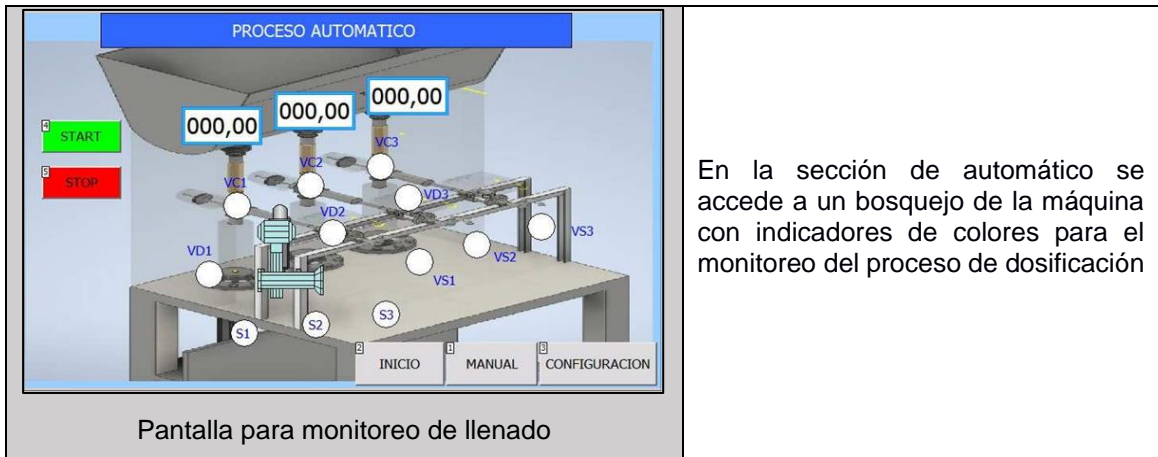


Pantalla de mantenimiento

La pantalla de mantenimiento cuenta con los botones inferiores:

1. Automático: monitoreo del proceso en modo automático.
2. Inicio: volver al menú de inicio.
3. Configuración: acceso al menú de configuraciones.

En esta pantalla se permite cambiar el estado de los actuadores neumáticos para la limpieza y mantenimiento de la máquina.



En la sección de automático se accede a un bosquejo de la máquina con indicadores de colores para el monitoreo del proceso de dosificación

3.6 Planos eléctricos

La Figura 3. 10 muestra las conexiones realizadas entre el PLC y los demás elementos que permiten el control. Se tiene un disyuntor seguido de una fuente de 24V DC para la alimentación de los distintos componentes. En el PLC se conectan las entradas digitales como los sensores ubicados en los cilindros neumáticos, los pulsadores para marcha y paro y en las salidas digitales se tienen los solenoides para el accionamiento de las válvulas. Por otro lado, en el módulo de entradas analógicas anexo se encuentran los transmisores o convertidores de señal de los caudalímetros, estos, son de 4 hilos por lo que tienen cada transmisor sus 2 hilos de alimentación conectados a la fuente, y los hilos de señal conectados al módulo. Por otro lado, la Figura 3. 11 presenta la conexión entre los elementos de control y la parte neumática.

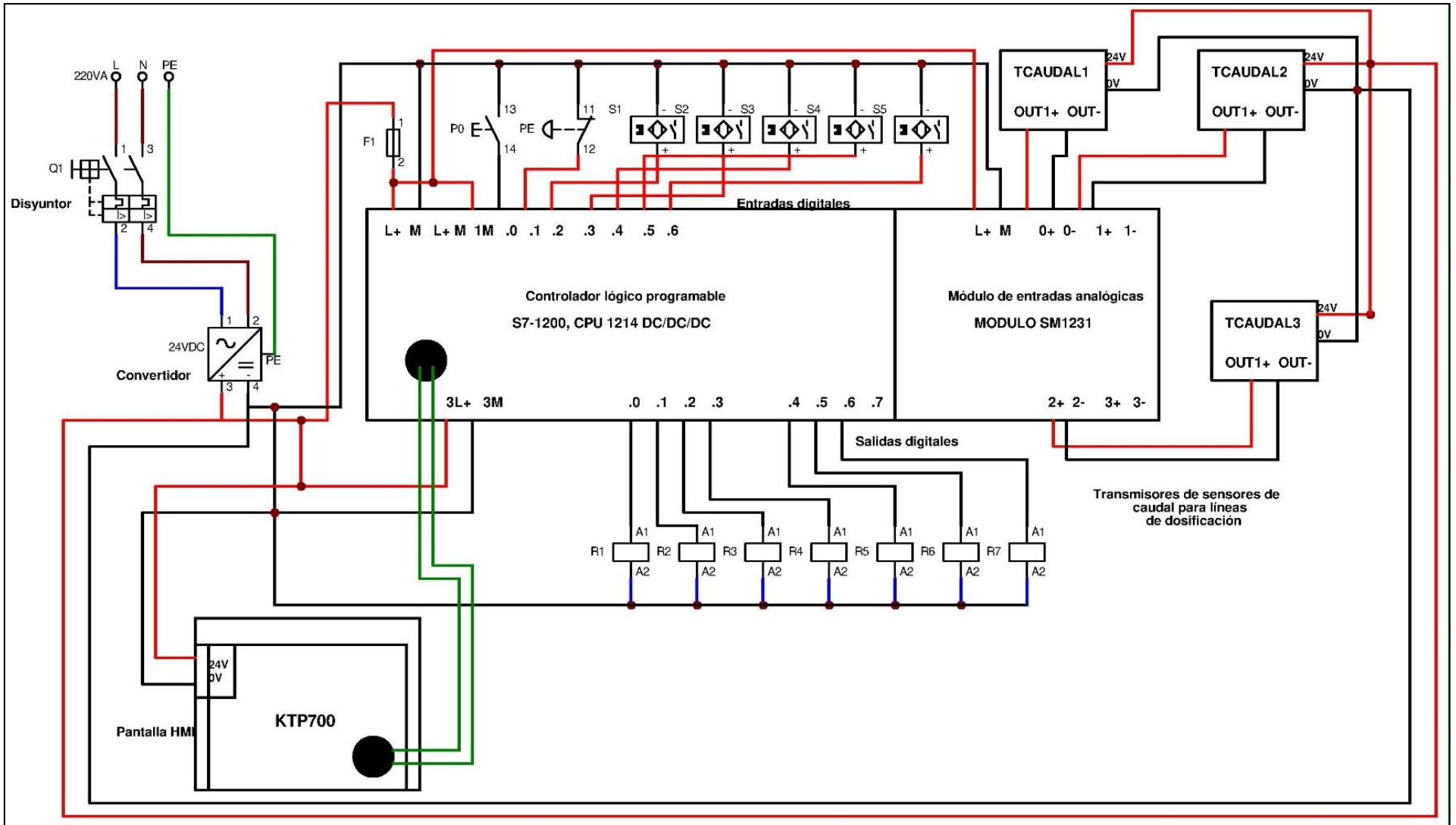


Figura 3. 10. Conexiones eléctricas

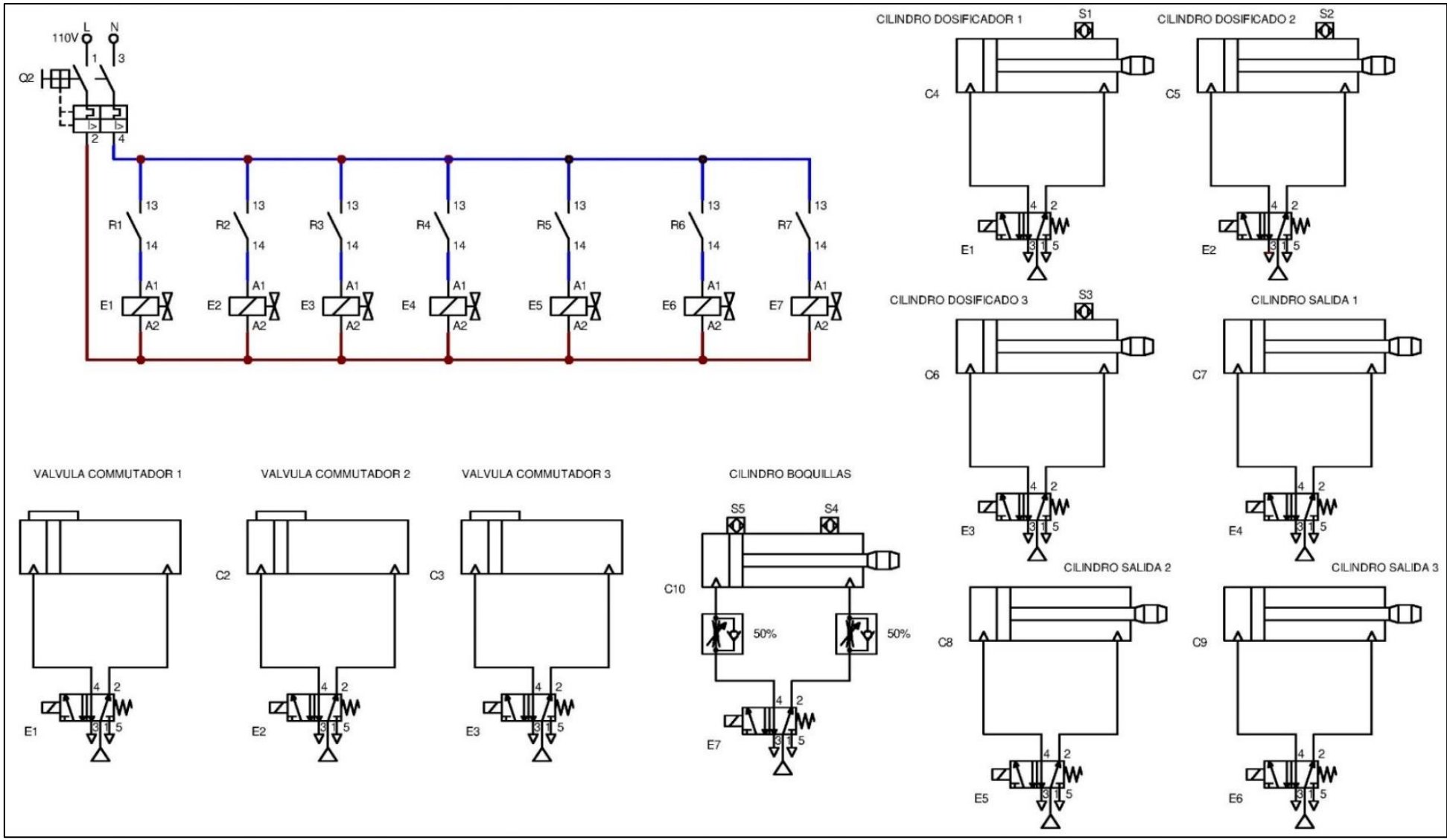


Figura 3. 11. Conexiones de sistema de control con componentes neumáticos

3.7. Análisis de costos

En la Tabla 3.7. Cotización de rubros se presentan los rubros considerados para la fabricación de la máquina, los cuales se separaron en: parte mecánica y neumática; eléctrica y de control; y gastos varios, que incluye aspectos como diseño, mano de obra e instalación.

De la cotización realizada se puede concluir que los mayores costos se encuentran en la sección de componentes mecánicos, debido a que algunas piezas fueron diseñadas por lo que se incluye en dichos valores la compra del material y proceso de fabricación y mecanizado.

Tabla 3.7. Cotización de rubros

Sistema	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
Mecánico y neumático	Fabricación y mecanizado de Tolva	1	U	\$ 300,00	\$ 300,00
	Válvula de asiento tres vías ESG	3	U	\$ 240,00	\$ 720,00
	Boquillas ESG 101-D	3	U	\$ 53,00	\$ 159,00
	Caudalímetro OPTIFLUX 1300 y transductor	3	U	\$ 110,00	\$ 330,00
	Soporte de tolva de acero inoxidable	2	U	\$ 15,00	\$ 30,00
	Mesa/ Estructura de acero inoxidable	1	U	\$ 200,00	\$ 200,00
	Camisa de cilindro de acero inoxidable	3	U	\$ 5,00	\$ 15,00
	Tubería	3	U	\$ 30,00	\$ 90,00
	Brida	2	U	\$ 5,96	\$ 11,92
	Brida	3	U	\$ 8,48	\$ 25,44
	Pistón neumático para dosificación	3	U	\$ 503,89	\$ 1.511,67
	Pistón neumático para bajar boquillas	1	U	\$ 95,59	\$ 95,59
	Tubería	3	U	\$ 33,87	\$ 101,61
	Abrazaderas para tuberías	3	U	\$ 6,90	\$ 20,70

	Mangueras	3	M	\$ 20,00	\$ 60,00
	Mangueras	3	M	\$ 13,89	\$ 41,67
	Sin fin/ ejes	2	U	\$ 149,50	\$ 299,00
	Rail para boquillas	1	U	\$ 4,00	\$ 4,00
	Patinas para boquillas	3	U	\$ 3,00	\$ 9,00
	Guías	2	U	\$ 20,00	\$ 40,00
	Viga para pistón de boquillas	1	U	\$ 156,00	\$ 156,00
	Catarinas	2	U	\$ 27,59	\$ 55,18
	Cadena	1	U	\$ 56,37	\$ 56,37
	Chumaceras	4	U	\$ 8,50	\$ 34,00
	Válvulas de mariposa	3	U	\$ 30,39	\$ 91,17
	Eléctrico y de control	PLC	1	U	\$ 665,00
Módulo de entradas analógicas		1	U	\$ 226,80	\$ 226,80
Pulsador		2	U	\$ 4,50	\$ 9,00
Interruptor magnético de seguridad		1	U	\$ 64,00	\$ 64,00
Tablero y estructura de soporte		1	U	\$ 100,00	\$ 100,00
Gastos Varios	Diseño, mano de obra	1	GLB	\$ 2.000,00	\$ 2.000,00
	Instalación	1	GLB	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
TOTAL					\$ 8.522,12

A modo de comparación del modelo diseñado con alternativas encontradas en el mercado nacional similares, se presentan opciones de máquinas dosificadoras semi-automáticas disponibles en el Ecuador, específicamente, en una importadora de máquinas con sede matriz en Quito- Ecuador. Entre las máquinas que ofrecen está la ZY para envasado de líquidos y la GT especializada en la dosificación de líquidos de mayor viscosidad. Estas son semiautomáticas y de calibración de volumen manual mediante cilindro dosificador. Sus especificaciones y submodelos se describen en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Especificaciones de máquinas semi- automáticas dosificadoras comercializadas [19]

ARTÍCULOS	ZY-2	ZY-4	ZY-6	ZY-8	GT-2	GT-4	GT-6	GT-8
Producto llenado	Líquido: agua				Semi líquido: viscoso			
Boquillas de Llenado	2	4	6	8	2	4	6	8
Rango de llenado Ideal	20-100ml \ 50-250ml \ 100-500ml \ 200-1000ml \ 500-2500ml \ 1000-5000ml							
Velocidad de llenado (1000ml)	480 BPH	960 BPH	1440 BPH	1920BPH	480BPH	960BPH	1440BPH	1920BPH
Precisión de llenado	20-1000ml: $\leq \pm 1\%$							
Consumo de aire	0.17 m ³ /min	0.25 m ³ /min	0.25 m ³ /min	0.36 m ³ /min	0.17 m ³ /min	0.25 m ³ /min	0.25 m ³ /min	0.36 m ³ /min
Fuente de alimentación	220 – 240 V 50Hz							
Consumo de Energía	0.75 kw	1 kw	1 kw	1 kw	0.75 kw	1 kw	1 kw	1 kw
Precio (USD)	\$ 10.900,00	\$ 13.500,00	\$ 15.500,00	\$ 18.500,00	\$ 11.200,00	\$ 15.200,00	\$ 17.500,00	\$ 19.800,00

Con la información presentada en la tabla de especificaciones de máquinas, se puede evidenciar un leve aumento de precio en las dosificadoras para líquidos viscosos respecto a las de líquidos de menor viscosidad, pues estos últimos oponen menos resistencia a ser dosificados por lo que los costos del mecanismo se reducen.

El modelo presentado está diseñado para la dosificación de líquidos semi viscosos, consistencia que predomina en productos de limpieza y detergentes. Y tiene un precio competitivo de \$8.522,12 contando con 3 boquillas de dosificación, un precio por debajo del modelo GT-2 que cuenta con únicamente 2 boquillas y tiene un valor de \$11.200, por lo que el modelo diseñado resulta más conveniente, además de contar con el plus de calibración de volumen mediante pantalla.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- La dosificadora de líquidos presentada se planteó con el objetivo de diseñar un sistema modular de tres boquillas que permita variar el volumen de dosificación mediante una interfaz HMI utilizando caudalímetros para el cálculo de volumen. Esto, con la intención de disminuir el tiempo de preparación de la máquina por la configuración de volumen línea a línea y evitar paros por descalibración de volumen.
- La automatización en el proceso de configuración de volumen se presenta como un sello distintivo del modelo presentado, pues, a diferencia de modelos de dosificadoras de líquidos encontradas en el mercado nacional, esta máquina no requiere de calibración línea a línea, permitiendo la configuración de este parámetro de manera simultánea mediante una pantalla.
- El diseño realizado es ampliable en cuanto a líneas de dosificación, esto, mediante la repetibilidad del código Ladder creado. Al utilizar caudalímetros en cada línea de dosificación se tiene una precisión de $\pm 5\%$ para la dosificación de volúmenes entre 0.5 y 4 L, la cual se mantiene a largo plazo a pesar del desgaste de las piezas mecánicas, a diferencia de las dosificadoras del mercado que, si bien tienen una mejor precisión inicialmente de $\pm 1\%$, esta se ve afectada con el paso del tiempo por el deterioro de sus componentes.
- El aumento de líneas de dosificación incrementa la productividad de la dosificadora permitiendo el llenado de más envases de manera simultánea. Sin embargo, esto también incrementa en gran medida el coste de la máquina, pues se requieren sensores de caudal y transmisores por cada línea de dosificación.
- La máquina dosificadora diseñada permite optimizar los tiempos de producción al reducir el tiempo de llenado de envase a menos de 15 segundos por litro.
- Esta es una propuesta novedosa de dosificación de líquidos, proceso que forma parte de muchas industrias como la alimenticia, cosmética,

farmacéutica, de productos de limpieza del hogar, entre otras, por lo que tiene un amplio nicho de mercado y gran aplicabilidad.

- El diseño realizado resulta en una máquina flexible, que puede ser utilizada para la dosificación de líquidos en distintas presentaciones y tamaños de envase, esto debido a la posibilidad de cambiar por pantalla el volumen a dosificar y al sistema de desplazamiento de boquillas que permite la calibración de la altura de las boquillas mediante una perilla dependiendo del tamaño de botellas a utilizar.
- En cuanto a las limitaciones de la dosificadora, esta puede trabajar únicamente con productos líquidos de conductividad mayores a $5\mu\text{c}/\text{cm}$, dadas las recomendaciones de los fabricantes de los sensores de flujo empleados.

4.2. Recomendaciones

- Para aumentar la precisión de la máquina física se recomiendan realizar pruebas experimentales para la corrección del volumen a dosificar. Los resultados obtenidos mediante ensayos se pueden ingresar en la sección de “correcciones de volumen” encontrada en el menú de configuraciones en la interfaz HMI, donde se podrá restar excedentes de volumen o sumar en caso de faltar producto. Estos casos se pueden presentar por el tiempo de procesamiento del programa y el tiempo de accionamiento mecánico.
- Se puede ampliar el número de líneas de dosificación a utilizar, incluyendo nuevas líneas siguiendo el diseño mecánico mostrado y reutilizando el código Ladder presentado.
- Además, los volúmenes a seleccionar programados mediante el PLC y mostrados en pantalla pueden ser cambiados e incluso brindar más opciones de volumen que se adapten a los envases de presentación de la empresa.
- Se puede aplicar el diseño de dosificadora en la industria alimenticia para el llenado de productos líquidos de alta densidad mediante la utilización de acero de grado alimenticio en las partes donde la máquina tiene contacto con el líquido a dosificar, sin embargo, esto aplica únicamente para alimentos con conductividad mayores a $5\mu\text{c}/\text{cm}$ según las recomendaciones de los fabricantes de los sensores de flujo empleados para el control de dosificación en esta máquina.

- Para obtener una mayor precisión se recomienda modificar el algoritmo de control comparando el caudal cada 175ms y utilizando un temporizador, de manera que, si el caudal tiene una variación pequeña se siga contando el tiempo para la obtención del volumen en base a dicho tiempo por el caudal mantenido. Cuando el caudal cambie se recuenta nuevamente el tiempo para incluir en la totalización de volumen ese nuevo muestreo. De esta manera, se tienen menos sumas de volumen en la totalización y con ello una menor incertidumbre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Disumtec, «Dosificador Neumático,» Disumtec, 01 Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.disumtec.com/cilindros-neumaticos/50260064-dosificador-neumatico-consultar-precio.html>. [Último acceso: 10 Agosto 2022].
- [2] J. Beltran y J. Cepeda, «Automaización de una máquina dosificadora para dosis pequeñas de líquidos en la empresa Fuller Pinto,» Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería Electrónica de Bogotá, Bogotá, 2008.
- [3] W. Vargas, «Automatización de una máquina dosificadora de líquidos,» Universidad Técnica del norte, Ibarra, 2013.
- [4] Packaging Solutions, «Dosificador de líquidos y pastas - Modelo DGF Series,» Envatek, 27 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://envatek.com/producto/dosificador-de-liquidos-y-pastas-modelo-dgf-series/>. [Último acceso: 02 Agosto 2022].
- [5] Autycom, «¿Para qué sirve un PLC?,» Autycom, 02 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://www.autycom.com/para-que-sirve-un-plc/>. [Último acceso: 19 Junio 2022].
- [6] D. Aboott, «Choosing a programmable controller Part 1,» 01 Septiembre 1979. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1177/002029407901200901>. [Último acceso: 20 Junio 2022].
- [7] F. Vargas, «Diseño e implementación de una máquina dosificadora automática para fluidos viscosos,» 19 Febrero 2006. [En línea]. Available: <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6200/T04207.pdf?sequence=1&isAllowed=.> [Último acceso: 21 Junio 2022].
- [8] A. Sani y J. Toapanta, «Diseño, construcción e implementación de una máquina envasadora y dosificadora de refrescos para la industria de lácteos Santillan "Prasol",» 09 Mayo 2015. [En línea]. Available: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4501/1/15T00617.pdf>. [Último acceso: 21 Junio 2022].
- [9] W. Almeida y R. Chuqui, «Automatización e implementación del sistema de enfundado y dosificación de líquidos para un máquina de características semi

- industriales,» 15 Octubre 2008. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/941/1/CD-1849%282009-01-26-08-44-20%29.pdf>. [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [10] Coara, «Dosificadores neumáticos - pistón de baja viscosidad,» COara, 19 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.coara.com.ec/productos/dosificadores/dosificadores-neumaticos-piston-liquidos-baja-viscosidad.html>. [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [11] Finktec S.A., «Dosificadoras Automáticas,» Finktec, 14 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.finktecuador.com/dosificadoras-automaticas/> . [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [12] Ecuapack, «Llenadora de líquidos viscosos manual PPT-1000, máquina dosificadora,» Ecuapack, 20 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.ecuapack.com/llenadora-de-liquidos-viscosos-manual-ppt-1000> . [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [13] EasternPack, «Fully automatic doypack two type sachet popsiole twin liquid dosing and packing machine,» Alibaba, 27 Mayo 2020. [En línea]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/Automatic-Dosing-Machine-Fully-Automatic-Doypack_1600541147011.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.7802459bFNKLCm&s=p . [Último acceso: 14 Julio 2022].
- [14] Krohne, «Manual Optiflux 1000,» Krohne, 19 Octubre 2019. [En línea]. Available: https://cdn.krohne.com/pick2/tagged_docs/MA_OPTIFLUX1000_es_191028_R05_4002444904__1000630548_1__.pdf . [Último acceso: 28 Agosto 2022].
- [15] API, «Prácticas de inspección para tuberías y componentes del sistema 574,» 04 Noviembre 2009. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/document/428103722/352408878-API-574-PRACTICAS-PARA-INSPECCION-DE-TUBERIAS-docx-pdf>. [Último acceso: 01 Septiembre 2022].
- [16] ESG Valve, «Catálogo de válvulas ESG,» ESG Valve, 19 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://www.esgvalve.com/res/yingwen.pdf>. [Último acceso: 29 Agosto 2022].

- [17] F. White, «Mecánica de fluidos, Sexta edición,» Mc Graw Hill Education, 19 Noviembre 2008. [En línea]. Available: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=3D1LDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=mmeccanic+de+fluidos+frank+white&ots=GcbWJBnSXs&sig=bj0OPI8pu17JIQbgmPu4qP-Qrxc#v=onepage&q&f=false>. [Último acceso: 29 Agosto 2022].
- [18] Krohne, «IFC 050,» Krohne Spain, 19 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://es.krohne.com/es/productos/medida-de-caudal/ccomponentes-y-equipo-auxiliar-para-la-medida-de-caudal/convertidores-de-caudal/ifc-050>. [Último acceso: 14 Septiembre 2022].
- [19] Coara, «Dosificadora automática líquidos y viscosos,» Coara, 07 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://www.coara.com.ec/productos/dosificadores/dosificadora-automatica-liquidos-y-viscosos.html>. [Último acceso: 12 Septiembre 2022].
- [20] FESTO, «Standards-based cylinders DNC, ISO 15552,» 13 Septiembre 2019. [En línea]. Available: www.Festo.com/catalogue/... [Último acceso: 01 Septiembre 2022].
- [21] SKF, «SKF Power Transmission Products,» SKF, 2016 Mayo 20. [En línea]. Available: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968040841a-Power-Transmission-catalogue-11015-EN_tcm_12-576542.pdf. [Último acceso: 30 Agosto 2022].
- [22] L. Barbosa y N. Delgado, «Determinación de la fuerza máxima aceptable para empujar y halar cargas por parte de trabajadores con experiencia previa en la manipulación de cargas, en una muestra del personal de la Pontificia Universidad Javeriana,» 07 Mayo 2014. [En línea]. Available: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7133/tesis158.pdf?sequence=3>. [Último acceso: 30 Agosto 2022].

APÉNDICES

APÉNDICE A

Selección de alternativas de solución

Partiendo de la problemática planteada se definieron tres posibles soluciones para la automatización del sistema de dosificación, que se detallan a continuación:

- Alternativa 1
 - Diseño de una dosificadora de líquidos con sensores ultrasónicos para la automatización de la selección de volumen a dosificar.
- Alternativa 2
 - Diseño de una dosificadora de líquidos con sensores infrarrojos para la automatización de la selección de volumen a dosificar.
- Alternativa 3
 - Diseño de una dosificadora de líquidos con caudalímetro para la automatización de la selección de volumen a dosificar.
- Alternativa 4
 - Diseño de una dosificadora de líquidos con sensor de posición de pistón para la automatización de la selección de volumen a dosificar.

Para la selección de la mejor alternativa se analizaron distintos criterios, los cuales se organizaron por prioridad, otorgándoles un peso de importancia, es decir, un valor cuantitativo de la prioridad de cada uno de los apartados.

- **Mantenimiento:** Trabajo de mantenimiento generado por el sistema de calibración de volumen, facilidad de limpieza.
- **Independencia:** Capacidad de calibración de volumen que no dependa de variables externas, es decir, que no se vea afectada por cambios en la máquina. Ya sea por cambio de actuadores o deterioro de sus partes.
- **Replicabilidad:** Facilidad del sistema para poder ser replicado en dosificadoras más grandes.
- **Instalación:** Facilidad de instalación en el sistema de dosificación.

Tabla A- 1: Rango de importancia de los criterios

Criterio	Rango de importancia
Mantenimiento	1
Independencia	2
Replicabilidad	3
Instalación	4

Mantenimiento > Independencia > Replicabilidad > Instalación

Cada una de las alternativas de solución fueron analizadas en base a los criterios de selección. Tras la evaluación, se organizaron de mayor a menor las alternativas que cumplen de mejor manera los criterios establecidos:

Mantenimiento:

Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 1 > Alternativa 2

Independencia:

Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 1 = Alternativa 2

Replicabilidad:

Alternativa 1 = Alternativa 2 = Alternativa 4 > Alternativa 3

Instalación:

Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 1 = Alternativa 2

Logrando de esta manera calcular las prioridades de las alternativas, es decir, organizar las alternativas desde la más viable a la menos viable con respecto a los criterios preestablecidos. En la Tabla A-1 se observan los pesos finales de cada una de las alternativas y la prioridad de cada una de ellas, siendo la tercera alternativa la mejor solución.

Tabla A-2: Selección de mejor alternativa

Pesos de criterios	Instalación	Independencia	Replicabilidad	Mantenimiento	Pesos	Prioridad
<i>Alternativa 1</i>	0.100	0.050	0.033	0.025	0.208	3
<i>Alternativa 2</i>	0.100	0.050	0.033	0.000	0.183	4
<i>Alternativa 3</i>	0.033	0.133	0.089	0.049	0.305	1
<i>Alternativa 4</i>	0.100	0.100	0.067	0.037	0.304	2

APÉNDICE B

Estimación de fuerza requerida

Para empezar con el cálculo de la fuerza requerida por el pistón para la succión e inyección del líquido a dosificares, es necesario seccionar el sistema de succión e inyección en tres ejercicios, de manera que el procedimiento se lleve de forma ordenada. La Figura B.1 ilustra el seccionamiento del sistema de succión e inyección.

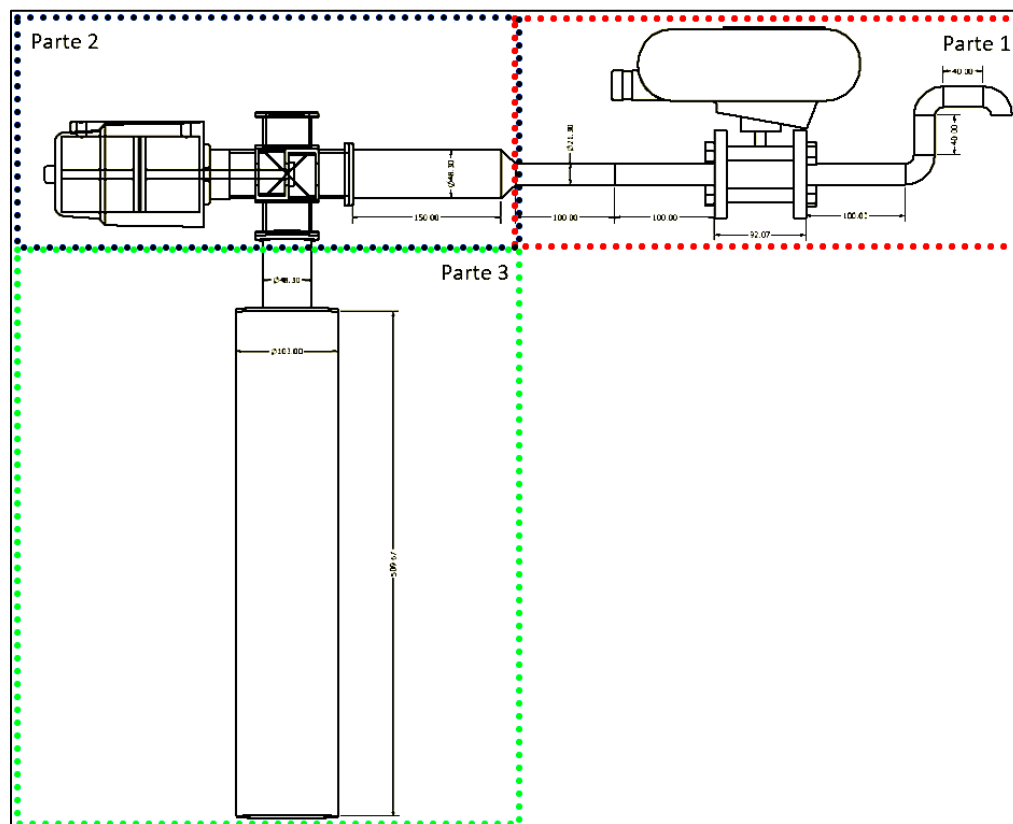


Figura B.1. Sistema de succión e inyección seccionado

La incógnita en todas las secciones será el punto donde la presión es mayor, es decir, el punto más cercano a la camisa del cilindro.

La presión se la calcula con la ecuación B.1, la cual es la ecuación de Bernoulli para fluidos viscosos

$$\frac{P1}{\gamma} + \frac{V1^2}{2g} + Z1 - hf = \frac{P2}{\gamma} + \frac{V2^2}{2g} + Z2 \quad (B.1)$$

Parte 1

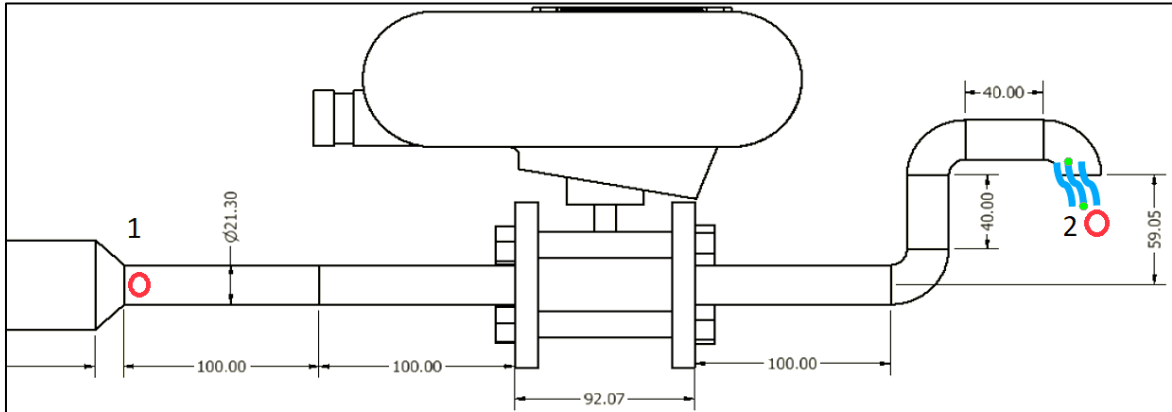


Figura B.2. Medidas (mm) de la línea donde se instala caudalímetro

El primer paso para el análisis de la instalación del caudalímetro es determinar los datos en el sistema. La Figura B.2 otorga información de las longitudes en el sistema.

Datos

- La velocidad en los dos puntos es igual
 - $V_2 = V_1 = 0.589207 \frac{m}{s}$
- La presión en el punto 2 es cero
 - $P_2 = 0$
- La diferencia de alturas es de 0.05905 m
 - $Z_2 - Z_1 = 0.05905m$
- Longitud de la tubería es 472.07 mm
 - $L = 0.47207 m$
- Accesorios
 - Tres codos de radio largo
- Propiedades del fluido:

Tabla B- 1 Propiedades de los productos de limpieza

Producto	Viscosidad (Pa*s)	Densidad (Kg/m3)
Suavizante	4	1000
Desinfectante	0.05	1000
Lavavajillas	1.5	1040
Detergente líquido	1.75	1040
Quitamanchas	0.075	1015

Para calcular la presión en el punto 1, primero es necesario conocer las pérdidas primarias y secundarias.

Las pérdidas primarias se las calcula con la ecuación B.2. Por esta razón, es necesario calcular el factor de fricción de Darcy f , el cual requiere previamente el cálculo del número de Reynolds Re de la ecuación B.3.

$$h_p = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{B.2})$$

$$Re = \frac{V * D}{\nu} = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (\text{B.3})$$

Reemplazando los valores de la Tabla B-1 en la ecuación B.3 se obtiene el número de Reynolds para cada uno de los productos en la instalación del caudalímetro.

Tabla B- 2 Número de Reynold para los productos de limpieza

	Reynolds	Diámetro (mm)
Suavizante	2.59	17.57
Desinfectante	207.05	Velocidad (m/s)
Lavavajillas	7.18	0.59
Detergente líquido	6.15	Longitud para 1/2"
Quitamanchas	140.10	472.07

Para un número de Reynolds menor a 2000 el flujo es catalogado como laminar, como se indica en la ecuación B.4

$$Re < 2000 \quad \text{Flujo laminar} \quad (B.4)$$

Por esta razón, se utilizó la ecuación de Poiseville de flujos laminares B.5 para el cálculo del factor de fricción de Darcy f .

$$f = 64/Re \quad (B.5)$$

Reemplazando los valores de la tabla B-2 en la ecuación B.5 se obtiene el factor de fricción para cada uno de los productos.

Tabla B- 3: Factores de fricción de los productos de limpieza en parte 1

	F Poiseville
Suavizante	24.73
Desinfectante	0.31
Lavavajillas	8.91
Detergente líquido	10.40
Quitamanchas	0.46

Utilizando los valores de la tabla B-3 para la ecuación B.2 se obtienen las pérdidas primarias ocasionadas por cada uno de los productos.

Tabla B- 4: Pérdidas primarias de los productos en parte 1

	hp (m)
Suavizante	11.75
Desinfectante	0.15
Lavavajillas	4.24
Detergente líquido	4.95
Quitamanchas	0.22

Posterior a la obtención de las pérdidas primarias, se procede a calcular las pérdidas secundarias por accesorios utilizando la ecuación B.6, las cuales son independientes de las propiedades del fluido.

$$h_s = K \frac{V^2}{2g} \quad (\text{B.6})$$

En la instalación del caudalímetro están presentes tres codos de radio largo. La constante de pérdidas por accesorios K se la obtiene de la Figura B.2 del libro mecánica de fluidos de Frank White [17] obteniendo así un $k = 1$.

	Diámetro nominal, in								
	$\frac{1}{2}$	Roscado			Acoplado				
		1	2	4	1	2	4	8	20
Válvulas (abiertas):									
Esférica	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
Compuerta	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
De retención	5.1	2.9	2.1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Angulo	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Codos:									
45° normal	0.39	0.32	0.30	0.29					
45° suave					0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° normal	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° suave	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° normal	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° suave					0.40	0.30	0.21	0.15	0.10
Tes:									
Flujo directo	0.90	0.90	0.90	0.90	0.24	0.19	0.14	0.10	0.07
Flujo lateral	2.4	1.8	1.4	1.1	1.0	0.80	0.64	0.58	0.41

Figura B.3. Constantes K de pérdidas por accesorios [17]

Reemplazando el valor de K en la ecuación B.6 se obtienen las pérdidas por accesorios de tres codos de radio largo

$$h_s = (3)(1) \frac{V^2}{2g}$$

$$h_s = 0.053 \text{ m}$$

Finalmente, simplificando la ecuación B.1 para la parte 1 se obtiene la ecuación B.7

$$\frac{P_1}{\gamma} - h_p - h_s = Z_2 - Z_1 \quad (\text{B.7})$$

Reemplazando los datos iniciales de $Z_2 - Z_1$ y los valores conseguidos h_p y h_s se obtiene la tabla B-6, que muestra los valores de las presiones en el punto 1 para cada uno de los productos de limpieza a dosificar.

Tabla B- 5: Resultados de la parte 1

	Presión (Pa)
Suavizante	121643.32
Desinfectante	7755.18
Lavavajillas	49814.76
Detergente líquido	57022.87
Quitamanchas	8570.69

Parte 2

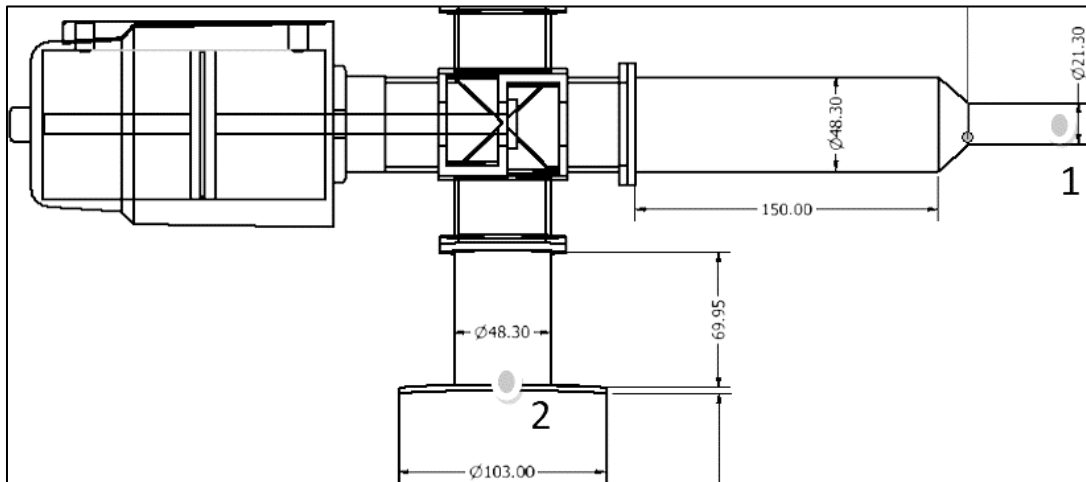


Figura B.4. Dimensiones de tuberías donde se ubica válvula tres vías

La parte dos consiste en la selección de tuberías anexas a la válvulas de tres vías. Para analizar el sistema se deben identificar los datos. La Figura B.4 otorga información de las longitudes en el sistema.

Datos:

- Velocidad 2 por determinar
 - $V_2 = ?$
- Velocidad 1 es igual a la velocidad en la parte 1
 - $V_1 = 0.589207 \frac{m}{s}$
- Longitud de la tubería es 219.95 mm
 - $L = 219.95 \text{ mm}$
- Accesorios
 - Válvula de tres vías
 - Pérdidas por reducción gradual

Para calcular la presión en el punto 2 es necesario conocer la velocidad en ese punto. La velocidad se calcula con la ecuación B.8, conociendo el diámetro interno de la tubería 1 ½" cédula 80 ASME B36.19

$$V = \frac{4Q}{\pi \times D^2} \quad (\text{B.8})$$

$$Q = \frac{1l}{7s} = 1.4 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

$$V = \frac{4(1.4 \times 10^{-4})}{\pi \times 43.22^2}$$

$$V2 = 0.097 \frac{m}{s}$$

Una vez completos los datos de la parte 2, se proceden a calcular las pérdidas por accesorio en la válvula de tres vías. Para este cálculo fue necesario conocer el coeficiente de caudal Kv_{A-C} en la vía de dosificación que otorga el fabricante. La Figura B.5 presenta información sobre la válvula tres vías DN 40 seleccionada.

Type 3 : Double acting , with Normal Spring								
Size	Actuator	Interface	Inner hole	Flow rate KV (m ³ /h)		Differential pressure range ΔP (MPa)A-B/A-C	Differential pressure range ΔP (MPa)C→A	Control pressure (MPa)
				A→B	A→C			
DN15	40	1/2"	14	4.1	4.9	0-1.6	1.6	0.4-0.6
DN20	50	3/4"	18	5.8	6.5	0-1.6	1.6	0.3-0.5
DN25	50	1"	24	13.9	14.4	0-1.4	1.4	0.3-0.65
DN32	90	1 1/4"	31	20.9	22.8	0-1.6	1.6	0.3-0.55
DN40	90	1 1/2"	35	24.4	26.6	0-1.6	1.6	0.3-0.6
DN50	90	2"	45	29.3	31.9	0-1.6	1.6	0.3-0.65

Figura B.5. 1: Dimensiones y propiedades de las válvulas tres vías ESG

$$Kv_{A-C} = 26.6 \frac{m^3}{h}$$

El coeficiente de caudal Kv_{A-C} permite relacionar el caudal que atraviesa la válvula tres vías con la diferencia de presión generada en sus salidas.

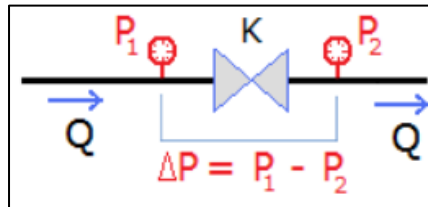


Figura B.6. Caída de presión en una válvula

Se utilizó la ecuación de Bernoulli B.1 para el esquema de la Figura B.6. Se obtiene:

$$-hf = \frac{\Delta P}{\gamma} + \Delta Z \tag{B.9}$$

Debido a que las dimensiones de la válvula de tres vías son conocidas, el término ΔZ no es una incógnita. Mientras que el peso específico γ depende únicamente de la densidad del producto. Por estas razones, se debe calcular la variación de presión a partir de la fórmula B.10. Se utilizó el coeficiente de caudal Kv_{A-C} del fabricante. Finalmente, se reemplazan los valores de presión obtenidos en la ecuación B.9, obteniendo las pérdidas por la válvula de tres vías ESG para cada uno de los productos, como se muestra en la Tabla B-8.

$$Q = Kv * \sqrt{\frac{-\Delta P}{\gamma}} \quad (B.10)$$

$$\gamma \left(\frac{Q}{Kv} \right)^2 = -\Delta P$$

$$hs1 = \frac{P1 - P2}{\gamma} + (Z1 - Z2) = \frac{3.667}{(1000 * 9.81)} - 0.058 = 0.0576 \text{ m}$$

Tabla B- 6: Pérdidas generadas en la válvula tres vías

	Pérdidas por la válvula tres vías (m)
Suavizante	0.0576
Desinfectante	0.0576
Lavavajillas	0.0576
Detergente líquido	0.0576
Quitamanchas	0.0576

Para calcular las pérdidas por el cono de reducción se utilizó la Figura B.7 del libro guía [17] donde se presenta la constante de pérdidas por accesorio para diferentes ángulos de reducción.

Ángulo de contracción 2θ , grados	30	45	60
K en contracción gradual	0.02	0.04	0.07

Figura B.7. Coeficiente K en contracción gradual

Se reemplaza el coeficiente K obtenido en la Tabla B-9 en la ecuación B.6, como se muestra a continuación:

$$h_{s2} = 0.07 \frac{V^2}{2g} = 0.07 \frac{0.589^2}{2g} = 0.00123 \text{ m}$$

Para obtener las pérdidas primarias se sigue el mismo procedimiento realizado en la parte 1. Primero, se calcula Reynolds para todos los productos con la ecuación B.3, obteniendo la tabla B-7:

Tabla B- 7: Número de Reynolds para los productos de limpieza en parte 2

	Reynolds
Suavizante	1.05
Desinfectante	84.17
Lavavajillas	2.918
Detergente líquido	2.5
Quitamanchas	56.96

En segundo lugar, se calcula el factor de fricción de Darcy f con la ecuación B.5 obteniendo la tabla B-8:

Tabla B- 8: Factor de fricción de los productos de limpieza en parte 2.

	F Poiseville
Suavizante	60.83
Desinfectante	0.76
Lavavajillas	21.93
Detergente líquido	25.59
Quitamanchas	1.12

Utilizando los valores de la Tabla B-8 en la ecuación B.2 se obtuvieron las pérdidas primarias exhibidas en la Tabla B-9.

Tabla B- 9: Pérdidas primarias en parte 2.

	hp (m)
Suavizante	0.15
Desinfectante	0.0019
Lavavajillas	0.054
Detergente líquido	0.063
Quitamanchas	0.0028

Finalmente se despeja la presión 1 de la ecuación B.1 para la parte 2, obteniendo la ecuación B.11. Se reemplazan los datos obtenidos y se calcula P1 para cada uno de los productos, obteniendo como resultado la Tabla B-10:

$$P1 = \left(\frac{P2}{\gamma} + \frac{V2^2}{2g} + Z2 - \frac{V1^2}{2g} - Z1 + hp + hs1 + hs2 \right) * \gamma \quad (B.11)$$

Tabla B- 10: Resultados de presión en la parte 2

	Presión (Pa)
Suavizante	125190.49
Desinfectante	9853.11
Lavavajillas	52528.02
Detergente líquido	59827.85
Quitamanchas	10709.04

Parte 3

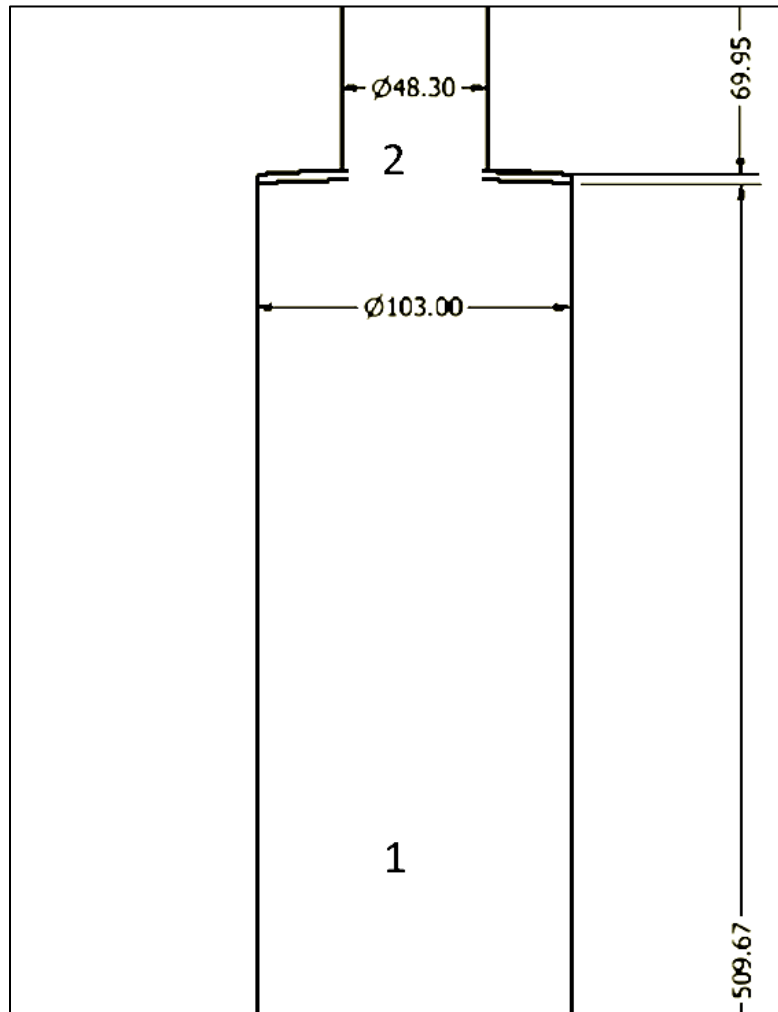


Figura B.8. Cambio brusco de diámetro entre camisa de cilindro y resto de tubería

La parte 3 (Figura B.8) incluye únicamente las pérdidas secundarias por una reducción brusca, ocasionada por el cambio drástico de diámetros entre la camisa de cilindro y la salida de la tubería 1 ½" cédula 80.

Al igual que en la parte 2, es necesario calcular la velocidad del fluido en la camisa de cilindro utilizando la ecuación B.8.

$$V_1 = 0.015 \frac{m}{s}$$

La ecuación B.12 del libro guía [17], permite calcular el coeficiente de pérdidas por accesorios para una contracción brusca. Donde d es el diámetro interno de la tubería 1 ½" y D es el diámetro interno de la camisa de cilindro.

$$K_{cb} = 0.42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (\text{B.12})$$

$$0 < \frac{d}{D} < 0.76$$

$$K = 0.42 \left(1 - \left(\frac{d^2}{D^2} \right) \right) = 0.342$$

Se reemplaza el coeficiente K en la ecuación B.6, obteniendo las pérdidas por reducción brusca en la parte 3.

$$h_s = 0.347 \frac{0.097^2}{2g}$$

$$h_s = 0.00017 \text{ m}$$

Para obtener las pérdidas primarias se sigue el mismo procedimiento realizado en la parte 1 y 2. La tabla B-11 detalla los números de Reynolds, factor de fricción y pérdidas primarias para cada uno de los productos utilizados por el cliente.

Tabla B- 11: Factor de fricción y pérdidas primarias en parte 3.

	Reynols	Tipo de flujo	F Poiseville	Hp (m)
Suavizante	0.413	LAMINAR	154.82	0.0083
Desinfectante	33.07	LAMINAR	1.95	0.00010
Lavavajillas	1.15	LAMINAR	55.82	0.003
Detergente líquido	0.98	LAMINAR	65.13	0.0035
Quitamanchas	22.38	LAMINAR	2.86	0.00015

Finalmente, se reemplazaron los datos obtenidos en la ecuación B.11, obteniendo las presiones requeridas en la base de la camisa del cilindro que cumpla con los requerimientos iniciales, como se observa en la Tabla B-12:

Tabla B- 12: Presión requerida en la base de la camisa de cilindro

	Presión (Pa)
Suavizante	130277.72
Desinfectante	14860.29
Lavavajillas	57764.83
Detergente líquido	65069.73
Quitamanchas	15791.83

Utilizando la ecuación B.13 y conociendo el área de la base de la camisa de cilindro, se logró calcular la fuerza mínima requerida por el pistón dosificador para cada uno de los productos. La Tabla B-13 detalla los resultados obtenidos:

$$P = \frac{F}{A} \tag{B.13}$$

$$A = 95.03317777 \text{ cm}^2$$

Tabla B- 13: Fuerza mínima requerida por el pistón dosificador

	Fuerza requerida por un pistón (N)
Suavizante	1238.07
Desinfectante	141.22
Lavavajillas	548.96
Detergente líquido	618.38
Quitamanchas	150.07

Selección del pistón dosificador

Para la selección del pistón dosificador se tomó en consideración la mayor fuerza requerida calculada. Se analizaron varios criterios a la hora de realizar la selección, como, por ejemplo: la carrera necesaria por el pistón para generar un volumen de 4 L en la camisa del cilindro, y un porcentaje de seguridad del 100% con respecto a la fuerza requerida calculada.

Las especificaciones requeridas en el pistón dosificador que cumplen con los criterios previamente mencionados son:

- Carrera de 500 mm
- Fuerza de 2500 N

Se examinó el catálogo de pistones de doble efecto Festo, del cual se seleccionaron los cilindros DNC normalizados [20]. También se seleccionó un embolo de 80 mm de diámetro, el cual otorga una fuerza de 3000 N a 6 bar.

La Figura B.9 presenta el Cilindro Festo DNC 80-500, el cual cumple con todos los requerimientos necesarios para el sistema de dosificación.



Figura B.9. Cilindro Festo DNC 80-500

APÉNDICE C

Diseño del sistema de transmisión de potencia

Para obtener un movimiento sincronizado entre los ejes roscados fue necesario seleccionar un sistema de transmisión de potencia sin deslizamiento, evitando desnivelaciones debidas a un movimiento asíncrono. La potencia transmitida es la fuerza humana. Por estas razones, se seleccionó el sistema de cadenas y catarinas para obtener un movimiento sin deslizamiento y un bajo costo de elementos.

Se utilizó el manual de SKF para el proceso de selección de la cadena y catarinas [21].

Para empezar con el diseño del sistema cadena-catarinas es necesario definir los parámetros iniciales. La potencia de transmisión fue aproximada a partir de un estudio realizado en la Pontificia Universidad Javeriana [22], la cual indica que la fuerza de empuje de un hombre es de 18 kgf o 177 N.

Utilizando la ecuación C.1 para el cálculo de la potencia, asumiendo que la manivela será conducida a una velocidad de 25 RPM:

$$P = \tau \times \omega \quad (\text{C.1})$$

Donde el torque se determina a través de la ecuación C.2, utilizando el brazo de palanca obtenido de la Figura C.1. Permitiendo calcular la potencia de diseño.

$$\tau = F \times r \quad (\text{C.2})$$

$$r = 136 \text{ mm} = 0.136 \text{ m}$$

$$F = 177 \text{ N}$$

$$\omega = 2,618 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\tau = 24.072 \text{ Nm}$$

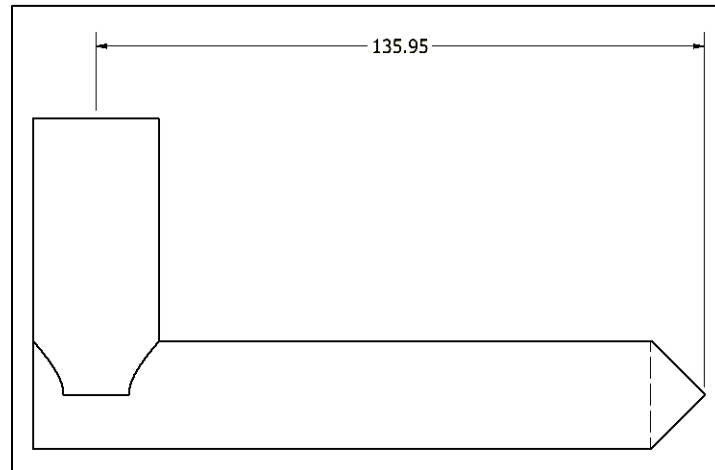


Figura C.1. Brazo de palanca de manivela

$$P = 24.07 \times 2,618 = 63.07 \text{ Watts}$$

Para diseñar un sistema más conservador se utilizó 100 Watts de potencia.

Factor de servicio de la aplicación (F_a)

Para seleccionar el factor de servicio de la aplicación se utilizó la Figura C.2, que describe el tipo de carga dependiendo del sistema motriz y el conducido. Debido a que la potencia de entrada en el sistema es muy baja, se selecciona el factor más bajo.

Application service factor (F_a)		Type of prime mover		
Load classification	Driven equipment	Electric motor or turbine	Internal combustion engine > 6 cylinders, with flywheel, or hydraulic coupling	Internal combustion engine < 6 cylinders, with NO flywheel, or hydraulic coupling
Uniform load (U)	Agitators; centrifugal blowers; generators, centrifugal pumps; Uniformly loaded belt conveyor, lightly loaded chain conveyors	1.0	1.0	1.2
Moderate shock (M)	Centrifugal compressors, kilns and dryers; conveyors and elevators with intermittent, medium load fluctuations; Dryers; Pulverisers; machinery with moderate pulsating loads (machine tools paper, textiles)	1.3	1.2	1.4
Heavy shock (H)	Press, construction and mining equipment; reciprocating machinery, (compressors, reciprocating feeders, oil well rigs) rubber mixers, roll lines, machinery with heavy shock or reversing torques	1.5	1.4	1.7 – 1.9

Figura C.2. Factor de servicio de la aplicación [21]

El fabricante recomienda seleccionar catarinas que posean un número de dientes mayor a 14, debido al mayor desgaste que se genera en aquellas con un número reducido de dientes. Por esta razón, en la Figura C.3 se seleccionó las catarinas ANSI de 17 dientes:

BS / DIN preferred sprockets											
11	12	13	15	17	19	20	21	23	25	27	30
38	45	57	76	95	114						
ANSI preferred sprockets											
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
28	30	32	35	36	40	42	45	48	52	54	60
70	72	80	84	96	112						

Figura C.3. Número de dientes estándares en catarinas.

Debido a que el sistema requiere sincronización de movimientos en los dos ejes, es necesaria una relación de velocidades de 1:1. La Figura C.4 detalla la potencia transmitida de una catarinas de la familia 08B-1, la cual, a 25 RPM con una Catarina de 17 dientes, permite transmitir una potencia mayor a 100 Watts.

08B-1; (12.70 mm Pitch) power ratings in kilowatt (European standard)																	
No of teeth	Pitch circle Dia.	rpm of small (faster) sprocket z_1															
		25	50	75	100	200	400	500	750	1000	1200	1440	1800	2000	2250	2400	3000
13	53,07	0,16	0,24	0,43	0,59	0,82	1,55	2,18	3,24	4,06	4,14	4,56	5,14	6,59	5,33	3,34	2,39
15	61,08	0,18	0,28	0,45	0,62	0,96	1,80	2,32	3,44	4,31	4,84	5,28	6,38	6,99	5,64	4,14	2,97
17	69,12	0,22	0,32	0,56	0,76	1,10	2,06	2,84	4,22	5,28	5,53	5,94	7,69	8,59	6,93	5,00	3,57
19	77,16	0,25	0,36	0,65	0,89	1,25	2,33	3,31	4,91	6,15	6,24	6,91	9,01	9,99	8,06	5,90	4,22
21	85,21	0,27	0,39	0,71	0,98	1,39	2,60	3,64	5,41	6,77	6,96	7,60	10,04	10,99	8,87	6,86	4,91
23	93,27	0,30	0,43	0,78	1,06	1,52	2,85	3,97	5,89	7,37	7,67	8,29	11,07	11,99	9,68	7,86	5,62
25	101,33	0,32	0,48	0,84	1,15	1,67	3,12	4,30	6,39	7,99	8,39	8,98	12,10	12,99	10,49	8,93	6,38
Lubrication method			TYPE 1					TYPE 2					TYPE 3				

Figura C.4. Power ratings de las catarinas 08B-1

Por esta razón, se seleccionaron dos catarinas de la familia 08B-1 con las siguientes especificaciones:

- 12.70 mm de paso

- 17 dientes
- Diámetro de paso

$$Dp = 69.11 \text{ mm}$$

La distancia entre los centros de los ejes roscados debe estar dentro del rango de 30 a 80 pasos de la cadena. Por esta razón, utilizando la ecuación C.3, se calcula la distancia máxima entre centros utilizando 80 pasos de la cadena.

$$Pt * p \tag{C.3}$$

$$\text{Distancia entre centros} = 80 * 12.7 = 1016 \text{ mm}$$

Finalmente, se calcula la longitud de la cadena de la familia 08B-1 para 80 pasos con la ecuación C.4, donde $Z2$ y $Z1$ representan el número de dientes de las catarinas seleccionadas, y C es la distancia entre centros.

$$L = \frac{Z2 + Z1}{2} + 2C + \frac{K}{C} \tag{C.4}$$

El factor K se obtiene de la Figura C.5, la cual relaciona la diferencia de dientes en las catarinas con el factor. Debido a que la diferencia entre $Z1$ y $Z2$ es cero, el factor K es cero.

'K' Factors		Z ₁ -Z ₂		Z ₁ -Z ₂		Z ₁ -Z ₂		Z ₁ -Z ₂		Z ₁ -Z ₂		Z ₁ -Z ₂	
Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K	Z ₁ -Z ₂	K
1	0.0	11,00	3,06	21,00	11,17	31,00	24,34	41,00	42,58	51,00	65,88	61	94,25
2	0.1	12,00	3,65	22,00	12,26	32,00	25,94	42,00	44,68	52,00	68,49	62	97,37
3	0.2	13,00	4,28	23,00	13,40	33,00	27,58	43,00	46,84	53,00	71,15	63	100,54
4	0.4	14,00	4,96	24,00	14,59	34,00	29,28	44,00	49,04	54,00	73,86	64	103,75
5	0.6	15,00	5,70	25,00	15,83	35,00	31,03	45,00	51,29	55,00	76,62	65	107,02
6	0.9	16,00	6,48	26,00	17,12	36,00	32,83	46,00	53,60	56,00	79,44	66	110,34
7	1.2	17,00	7,32	27,00	18,47	37,00	34,68	47,00	55,95	57,00	82,30	67	113,71
8	1.6	18,00	8,21	28,00	19,86	38,00	36,58	48,00	58,36	58,00	85,21	68	117,13
9	2.1	19,00	9,14	29,00	21,30	39,00	38,53	49,00	60,82	59,00	88,17	69	120,6
10	2.5	20,00	10,13	30,00	22,80	40,00	40,53	50,00	63,33	60,00	91,19	70	124,12
71	127,7	81,00	166,19	91,00	209,76	101,00	258,39	111,00	312,09	121,00	370,86	131	434,69
72	131,3	82,00	170,32	92,00	214,40	102,00	263,54	112,00	317,74	122,00	377,02	132	441,36
73	135,0	83,00	174,50	93,00	219,08	103,00	268,73	113,00	323,44	123,00	383,22	133	448,07
74	138,7	84,00	178,73	94,00	223,82	104,00	273,97	114,00	329,19	124,00	389,48	134	454,83
75	142,5	85,00	183,01	95,00	228,61	105,00	279,27	115,00	334,99	125,00	395,79	135	461,64
76	146,3	86,00	187,34	96,00	233,44	106,00	284,67	116,00	340,84	126,00	402,14	136	468,51
77	150,2	87,00	191,73	97,00	238,33	107,00	290,01	117,00	346,75	127,00	408,55	137	475,42
78	154,1	88,00	196,16	98,00	243,27	108,00	295,45	118,00	352,70	128,00	415,01	138	482,39
79	158,1	89,00	200,64	99,00	248,26	109,00	300,95	119,00	358,70	129,00	421,52	139	489,41
80	162,1	90,00	205,18	100,00	253,30	110,00	306,50	120,00	364,76	130,00	428,08	140	496,47

Figura C.5. Factor K de las catarinas

$$L = 17 + 160 = 177 * 12.7 = 2247.9 \text{ mm}$$

Los elementos que constituyen al sistema de transmisión de cadena y catarinas de la familia 08B-1 seleccionados son:

- 2 catarinas PHS 08B-1A17
- 1 cadena PHC 08B-1X10FT de 80 pasos

APÉNDICE D

Diseño del circuito neumático.

Para el diseño del circuito neumático se analizó el diagrama de estado-fase de los actuadores involucrados en el sistema de dosificación. En la figura D.1 se detalla el comportamiento de los actuadores: el pistón de desplazamiento vertical, las boquillas antigoteo, el pistón dosificador y la válvula tres vías.

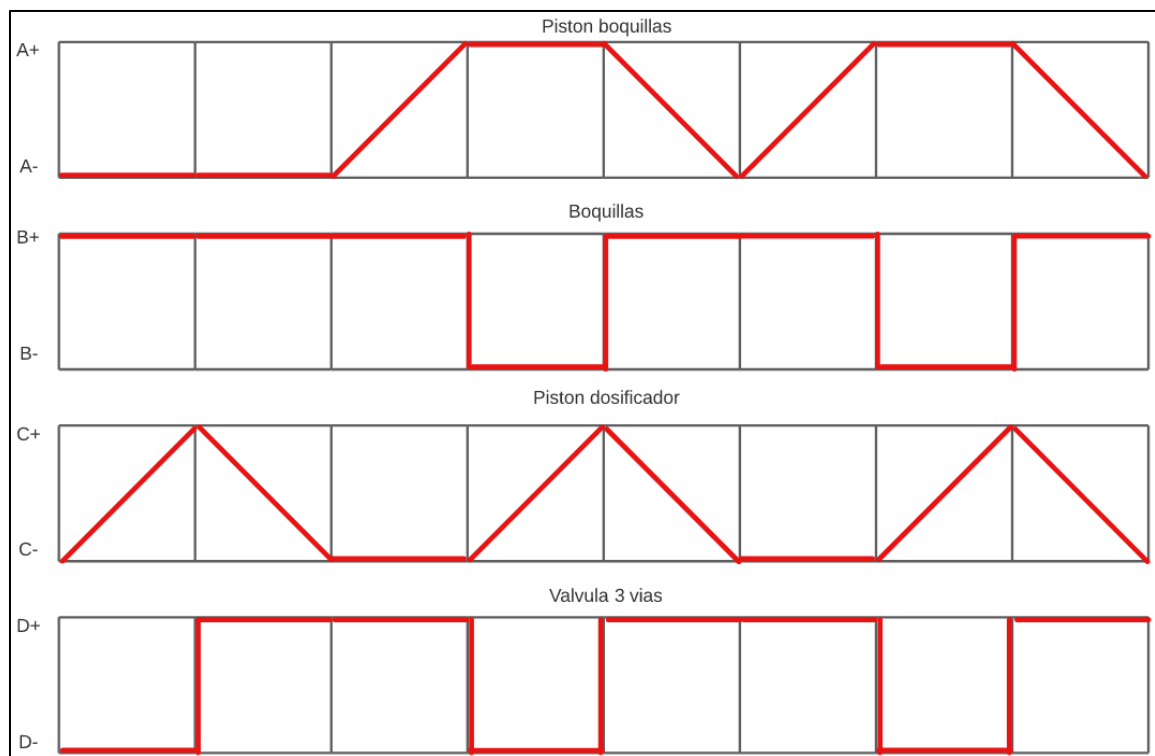


Figura D. 1: Diagrama de estado-fase de un sistema de dosificación.

Tras analizar el diagrama estado fase, se concluyó que los actuadores C (pistón dosificador) y D (válvula tres vías) deben ser accionados simultáneamente. Contrario a esto, los actuadores: B (boquilla) y A (pistón de boquilla) deben funcionar independientemente. Por estas razones, se utilizará 2 válvulas 5/2 vías monoestable con solenoide y retorno por muelle para cada sistema de dosificación: la primera para las boquillas y la segunda para el pistón de desplazamiento vertical. De la misma forma, se utilizará una válvula 5/2 vías monoestable con solenoide y retorno por muelle para controlar los actuadores C y D simultáneamente.

Para conseguir un funcionamiento simultáneo de los actuadores C y D, es necesario utilizar 1 válvulas 5/2 vías biestable para cada uno de los actuadores. La Figura D.2 ilustra las conexiones realizadas entre válvulas seleccionadas y los actuadores presentes en el sistema de dosificación sin el pistón de desplazamiento vertical.

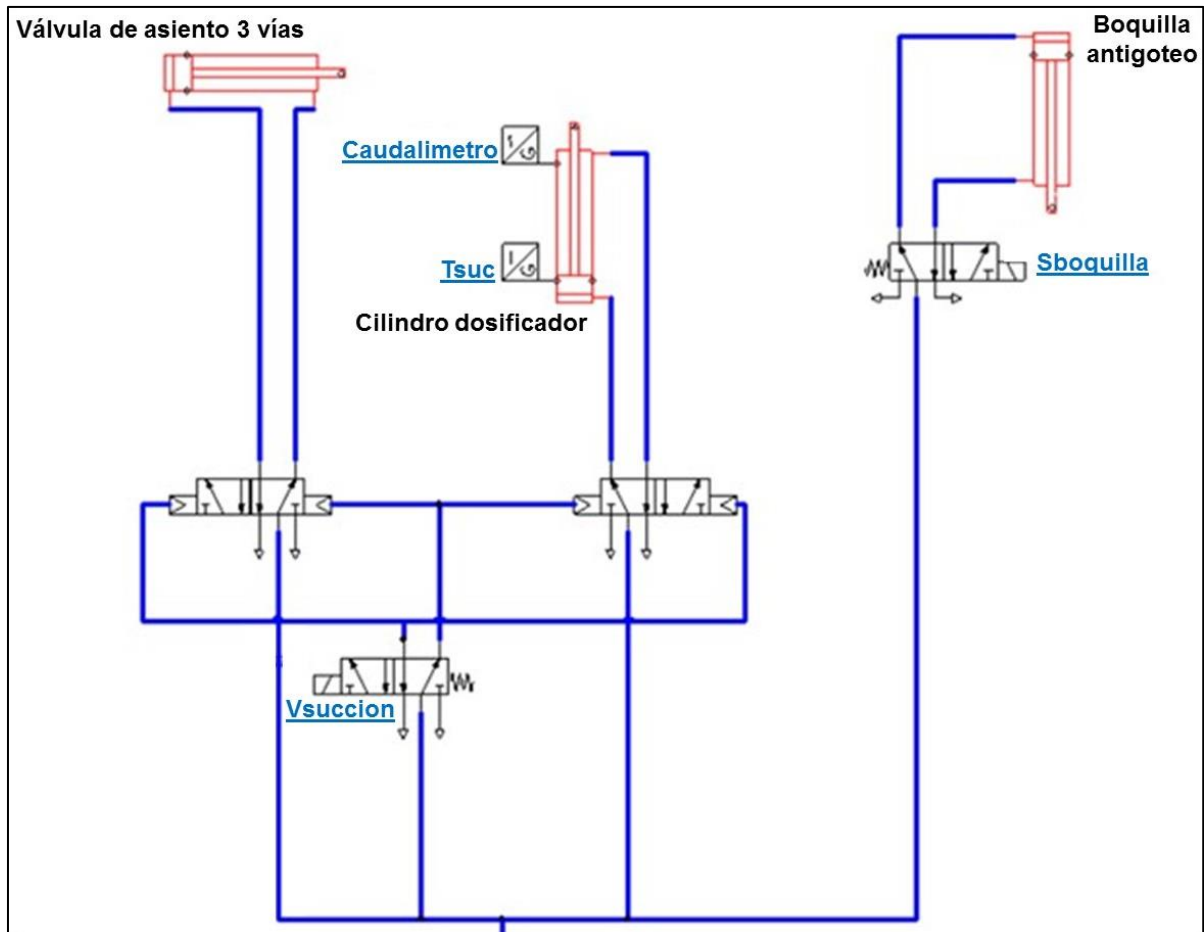


Figura D. 2: Sistema de dosificación sin pistón de desplazamiento vertical

Diseño del sistema de desplazamiento vertical de boquillas

Para la selección del pistón de desplazamiento de boquillas es necesario calcular la fuerza de gravedad que experimenta el vástago del pistón. En la Figura D.3 se presentan las propiedades del sistema de boquillas en el cual se puede observar la masa. Utilizando la ecuación D.1 se calculó el peso del sistema.

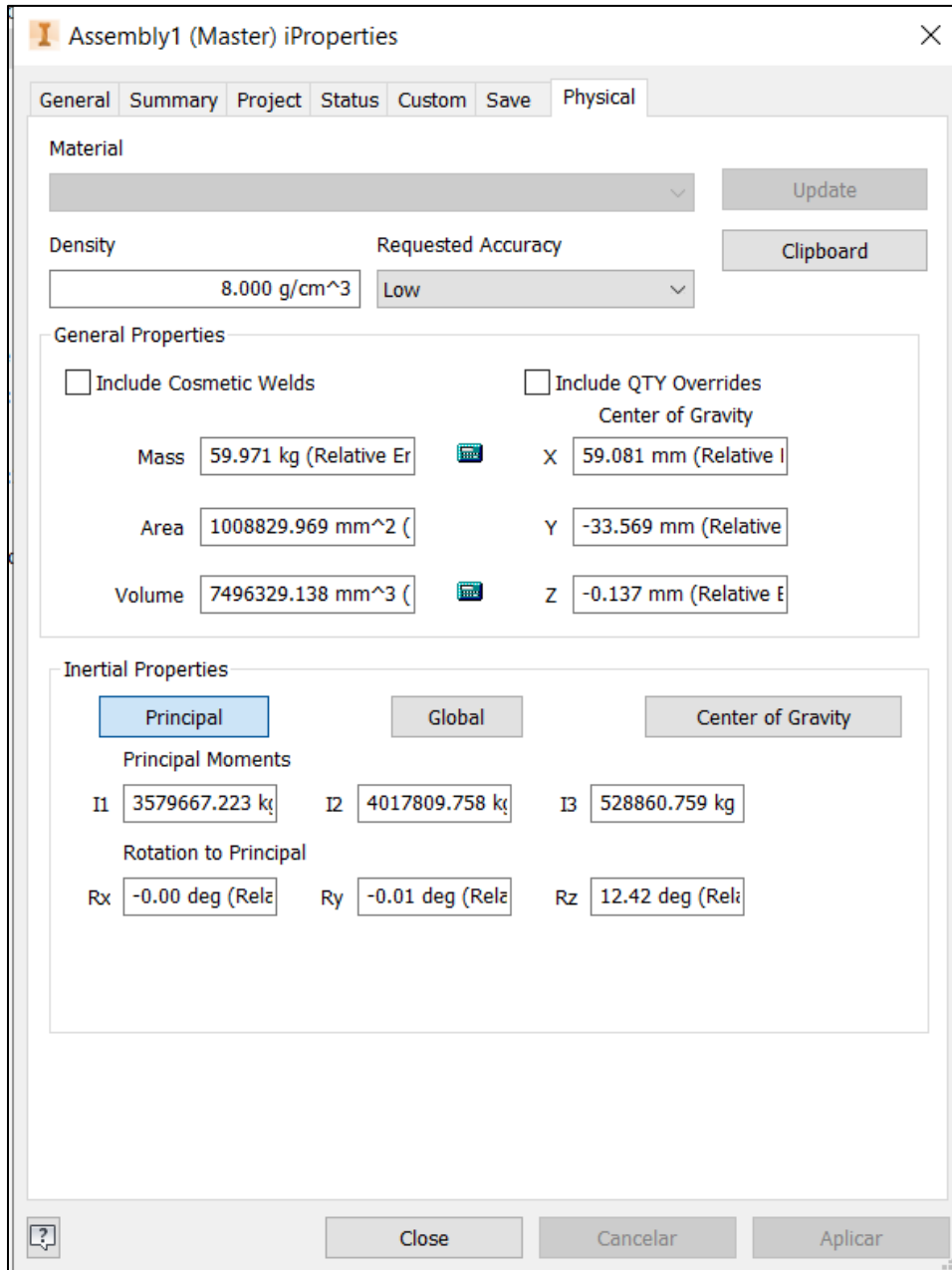


Figura D. 3: Propiedades del sistema de sujeción de boquillas

$$F = m * g \quad (D.1)$$

$$F = 60 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 588.6 \text{ N}$$

Las especificaciones necesarias para la selección del cilindro del SDV son:

- Fuerza de 1000N
- Carrera de 300 mm

Utilizando el catálogo de Festo de los modelos DNC [19], se seleccionó el Pistón neumático DNC 50-300, el cual es capaz de generar más de 1000 N a 6 bares, presentado en la Figura D.4:



Figura D. 4: Cilindro Festo DNC 50-300

Para el diseño neumático del Sistema de calibración vertical se analizó el ángulo de instalación. La Figura D.5 demuestra la posición de instalación del pistón, presentando un ángulo de -90° con respecto al eje horizontal.

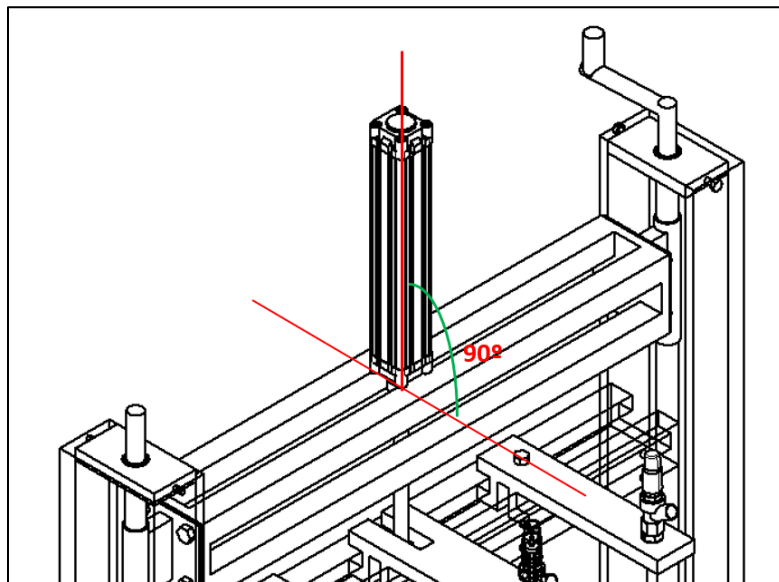


Figura D. 5: Ángulo de inclinación del pistón SDV

El peso soportado por el pistón ocasiona un desplazamiento muy veloz en la carrera de extensión, causando golpes y vibraciones. Debido a esto, es necesario controlar la velocidad de extensión del pistón regulando el flujo de aire con válvulas estranguladoras antirretorno. La Figura D.6 presenta el diseño neumático del SDV.

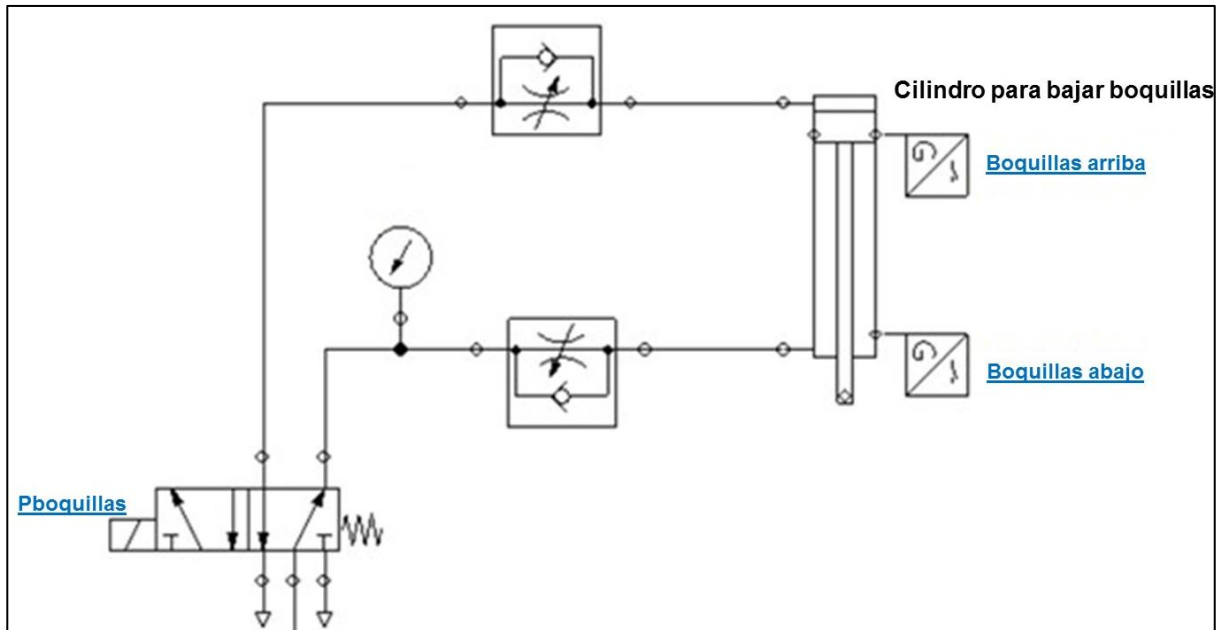


Figura D. 6: Circuito neumático del sistema de desplazamiento vertical

Selección de acumuladores.

La máquina constará con tres sistemas de dosificación, ocasionando una presión discontinua debido a su alto consumo de aire. Por esta razón, es necesaria la utilización de acumuladores de aire, capaces de regular la presión del sistema, evitando así un malfuncionamiento de los actuadores.

Para la selección de los acumuladores se analizó el sistema mediante simulaciones, utilizando el software Automation Studio; y utilizando valores, como, por ejemplo: especificaciones de pistones, tipo de mangueras neumáticas, inclinación de pistones, fuerzas externas.

Según la ecuación de Bernoulli D.2, la presión P_1 disminuye al disminuir las pérdidas primarias, es decir, la fuerza experimentada por el pistón dosificador disminuye al disminuir la longitud de la tubería.

$$P1 = \left(\frac{P2}{\gamma} + \frac{V2^2}{2g} + Z2 - \frac{V1^2}{2g} - Z1 + hp + hs \right) * \gamma \quad (D.2)$$

Por estas razones, es necesario calcular la fuerza final experimentada por el pistón dosificador al estar extendido totalmente, es decir, cuando L de la camisa de cilindro es cero.

Los factores de fricción de Poiseville de la Tabla B.11 no cambian. Se reemplazan los valores del Apéndice B en la ecuación D.2 y D.3, utilizando una longitud igual a cero, obteniendo los resultados de la fuerza experimentada por el pistón dosificador:

$$hp = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (D.3)$$

Tabla D- 1: Fuerza mínima experimentada en pistón dosificador

	Fuerza requerida por un pistón
Suavizante	1237.3
Desinfectante	141.2
Lavavajillas	548.67
Detergente líquido	618.04
Quitamanchas	150.06

En la Figura D.7 se observa la gráfica de la fuerza externa experimentada por el cilindro, según el porcentaje de extensión.

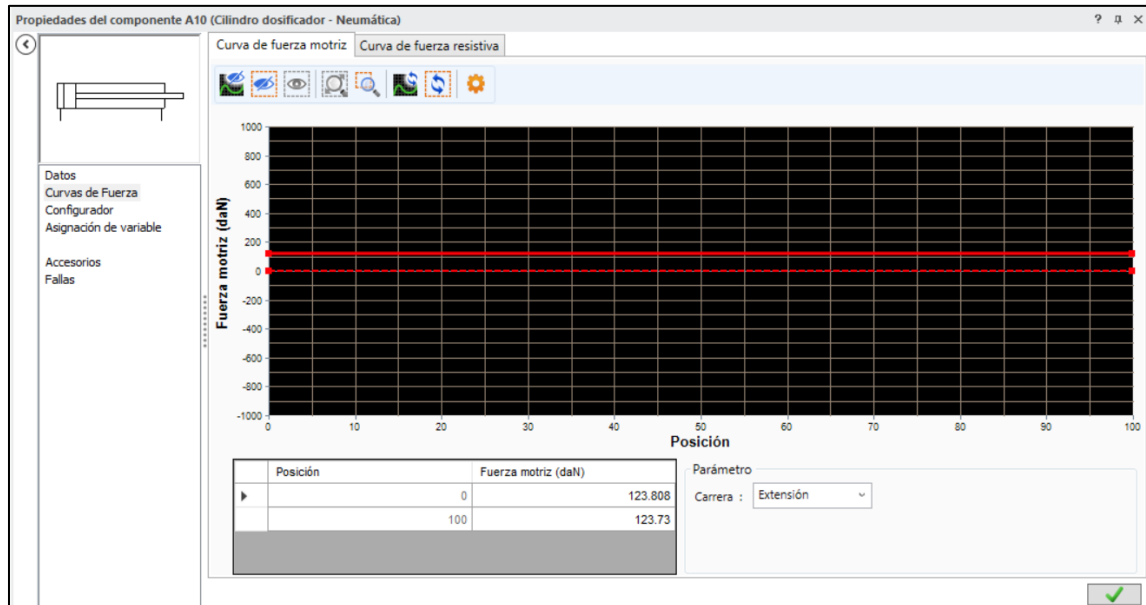


Figura D. 7: Simulación de fuerza externa en pistón dosificador.

Se analizó por medio de simulación el comportamiento del circuito neumático, concluyendo que un solo acumulador no es suficiente para mantener la presión constante, ocasionando malfuncionamiento y desincronización en los actuadores. Por esta razón, se decidió utilizar dos acumuladores: uno para los tres sistemas de succión e inyección y otro para el sistema de desplazamiento vertical. Se utilizaron válvulas antirretornos en las entradas de los acumuladores para independizar los sistemas, evitando así un flujo contrario de aire.

En la Figura D.8 se detallan las conexiones de los acumuladores con los sistemas de la máquina, junto con la válvula antirretorno en el sistema de desplazamiento vertical.

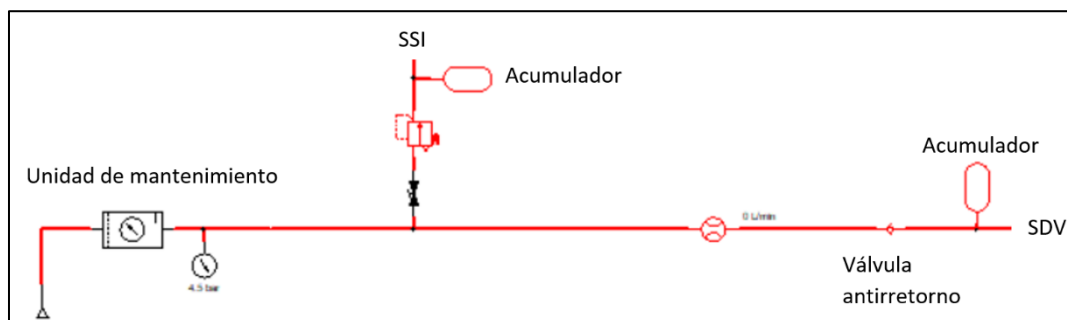


Figura D. 8: Circuito de acondicionamiento de la línea neumática

Finalmente, se determinó mediante simulación la capacidad ideal de los acumuladores para mantener la presión constante en ambos sistemas: 20 Litros para el SSI y 10 Litros para el SDV.

Selección de elementos neumáticos

Para la selección de las válvulas direccionales se analizó el caudal necesario por un SSI mediante simulación. Se graficó el caudal del sistema en funcionamiento con respecto al tiempo, seleccionando el pico más alto, como se ilustra en la Figura D.9:



Figura D. 9: Grafica Caudal Vs Tiempo en el sistema de succión e inyección.

Se utilizó un rango de seguridad del 100%, obteniendo un caudal mínimo necesario en la válvula direccional del SSI de 400 L/min. Se seleccionaron las válvulas universales VUVS de Festo con solenoide, las cuales poseen un caudal nominal de 500 L/min, como se presenta en la Figura D.10.

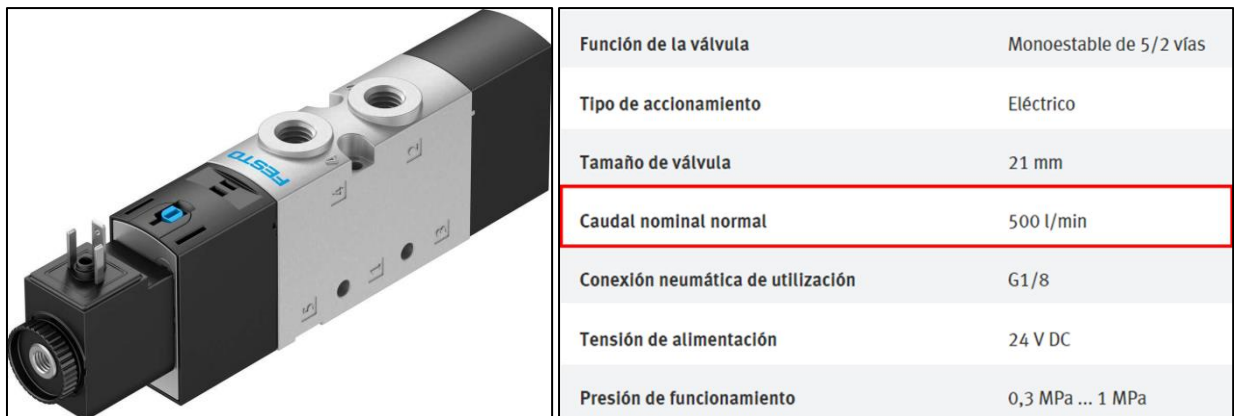


Figura D. 10: Válvula VUVS-LT20-M52-MD-G18-F7-1C1 Festo

Debido a que el SSI es el sistema que consume más caudal en la máquina, se seleccionó el mismo modelo de válvula para el SDV.

Para la selección de las válvulas con accionamiento neumático se seleccionó el modelo VUWS. Las cuales poseen iguales características que las VUVS a excepción del tipo de accionamiento.

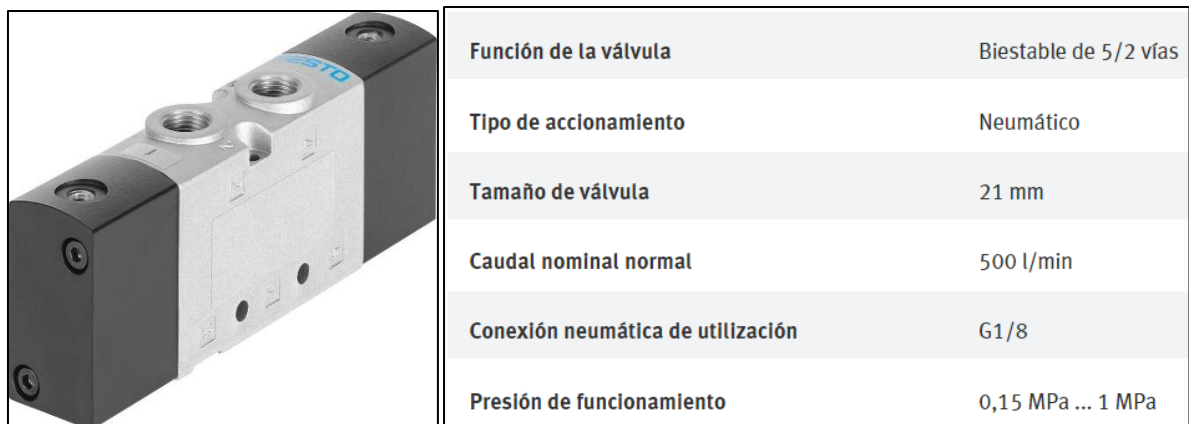


Figura D. 11: Válvula VUWS-LT20-B52-G18 Festo

Para la selección de los acumuladores se buscó en el catálogo de Festo, optando por el modelo CRVZS para ambos acumuladores. La Figura D.12 presenta el acumulador seleccionado.



Figura D. 12: Acumulador Festo modelo CRVZS

El criterio de selección para las válvulas antirretorno fue el tamaño de las conexiones, optando por válvulas de 1/8" para las válvulas del SDV y 1/2" para la entrada de los acumuladores. La Figura D.13 presenta el modelo de válvula antirretorno seleccionada para el circuito neumático.



Figura D. 13: Válvula estranguladora antirretorno modelo CRGRLA Festo

APÉNDICE E

Estimación de precisión de dosificación

El bloqueo de las boquillas es la causa de la imprecisión al momento de dosificar. Por esta razón, es necesario conocer el tiempo de desactivación de la válvula direccional que controla las boquillas. En la Figura E.1 se presentan las especificaciones de la válvula VUSV Festo monoestable 5/2 vías, obteniendo un tiempo de desactivación de 19 ms.

Valor C	2.1 l/sbar
Tiempo de conmutación OFF	19 ms
Tiempo de conmutación ON	15 ms
Tiempo de conexión	100%
Impulso de control positivo máximo con señal 0	1900 μ s
Máx. impulso de prueba negativo con señal 1	2700 μ s
Valores característicos de las bobinas	24 V DC: 2,6 W

Figura E. 1: Especificaciones de válvula VUVS-LT20-M52-MD-G18-F7-1C1 Festo

$$Td1 = 19 \text{ ms}$$

Para conseguir el tiempo de retardo mecánico es necesario determinar el tiempo de transmisión de aire desde las válvulas direccionales hasta las boquillas. La Figura E.3 otorga información de la longitud mínima necesaria para las mangueras neumáticas de las boquillas. Se utilizó 1.5 m como aproximación de la longitud de las mangueras neumáticas.

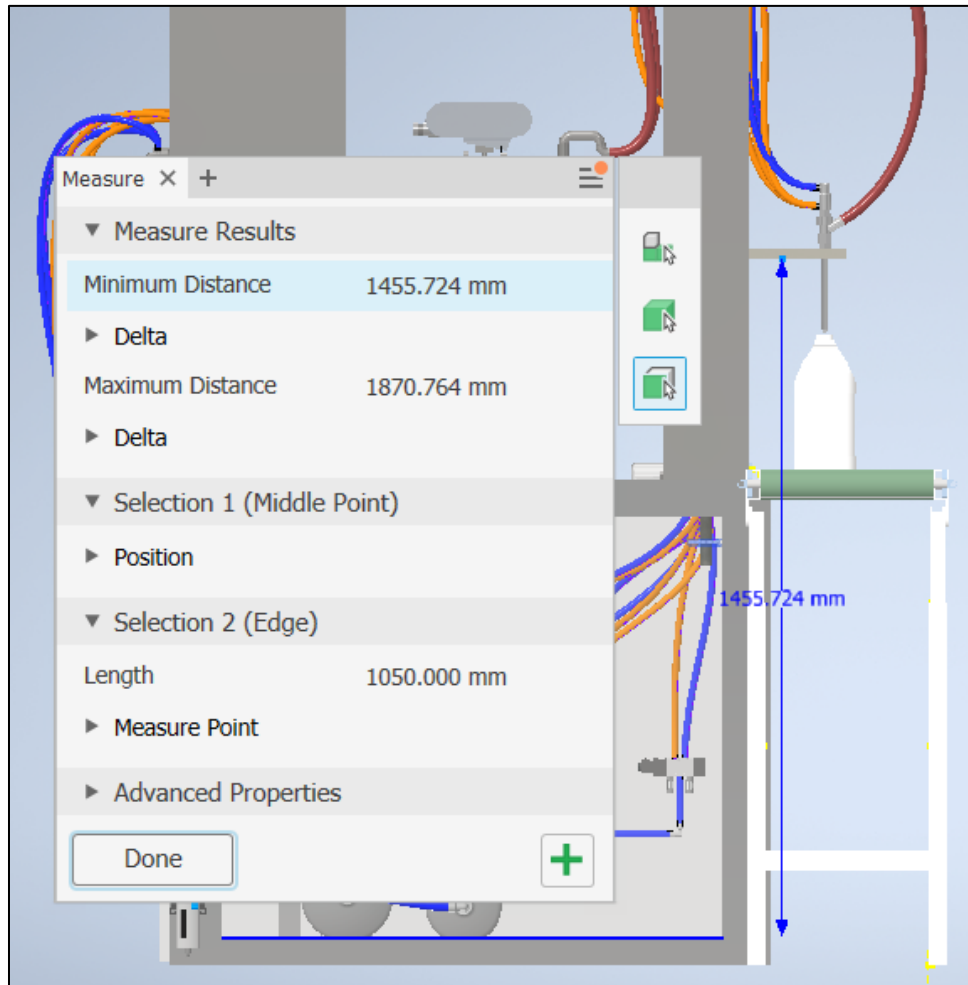


Figura E. 2: Longitud de mangueras neumáticas en boquillas

La ecuación E.1 permite calcular el tiempo de transmisión de aire utilizando su velocidad. La ecuación E.2 permite conocer la velocidad del aire por medio de la relación de caudal y área transversal de la manguera neumática.

$$T_a = \frac{d}{v} \quad (\text{E.1})$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{E.2})$$

El caudal se obtuvo mediante la simulación del circuito neumático en Automation Studio. La Figura E.3 presenta una gráfica del caudal que fluye a través de la manguera neumática hacia las boquillas ESG. Se utilizó 50 L/min como aproximación del caudal.



Figura E. 3: Caudal Vs Tiempo en conexión neumática de boquillas ESG

El diámetro de la manguera neumática se obtuvo del diseño mecánico, como se observa en la Figura E.4. Se utilizó un diámetro de 15 mm para el cálculo del área.

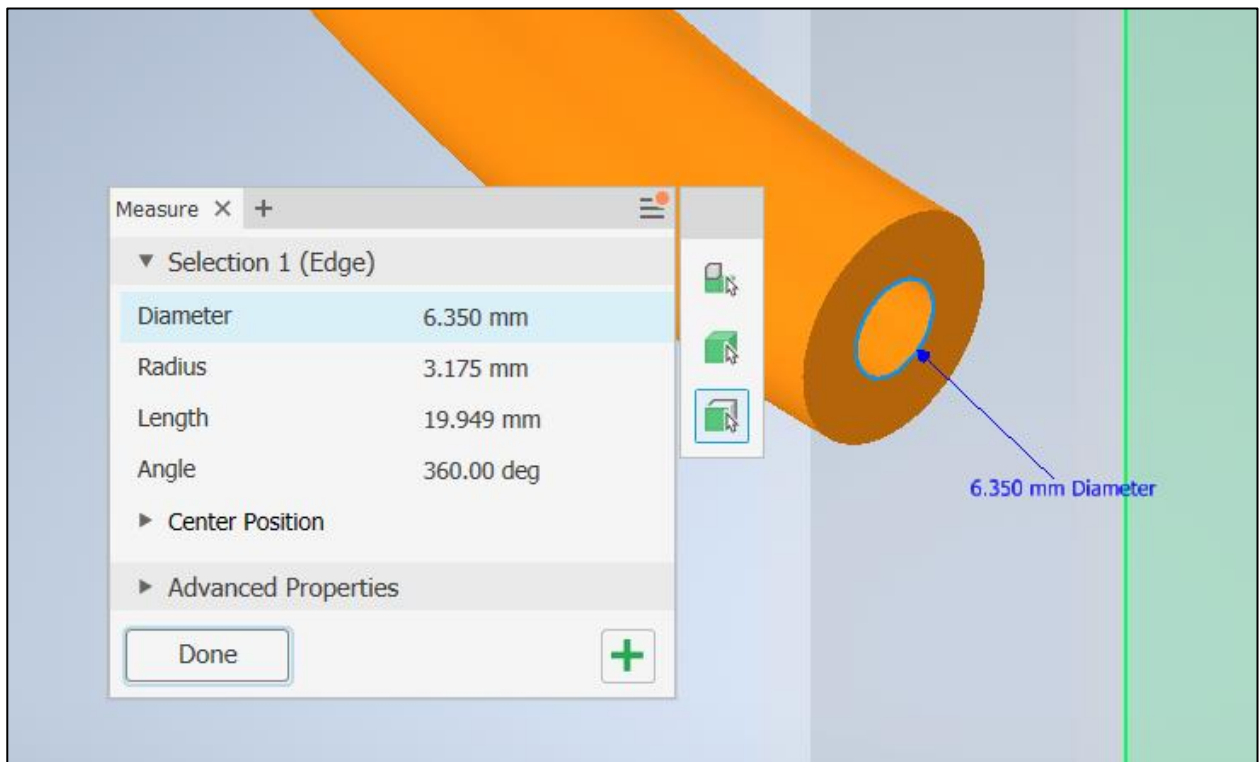


Figura E. 4: Diámetro de manguera neumática en boquillas ESG

Se calcula el tiempo de transmisión de aire utilizando las ecuaciones E.1 y E.2 obteniendo:

$$v = \frac{4 * (8.33 * 10^{-4} m^3/s)}{\pi * (0.00635 m)}$$

$$v = 26.31 m/s$$

$$Ta = \frac{1.5 m}{26.3 m/s}$$

$$Ta = 0.057 s$$

El tiempo de retardo por componentes mecánicos se calcula con la ecuación E.3:

$$TR = Td1 + Ta \quad (E.3)$$

$$TR = 0.019 + 0.057 = 0.076 s$$

Posteriormente al cálculo del tiempo de retardo mecánico, se procedió a calcular el tiempo de retardo por el programa. En la Figura E.5 se observa el tiempo de muestreo utilizado para la detección del caudal, siendo esta la principal causa de la imprecisión de dosificación.

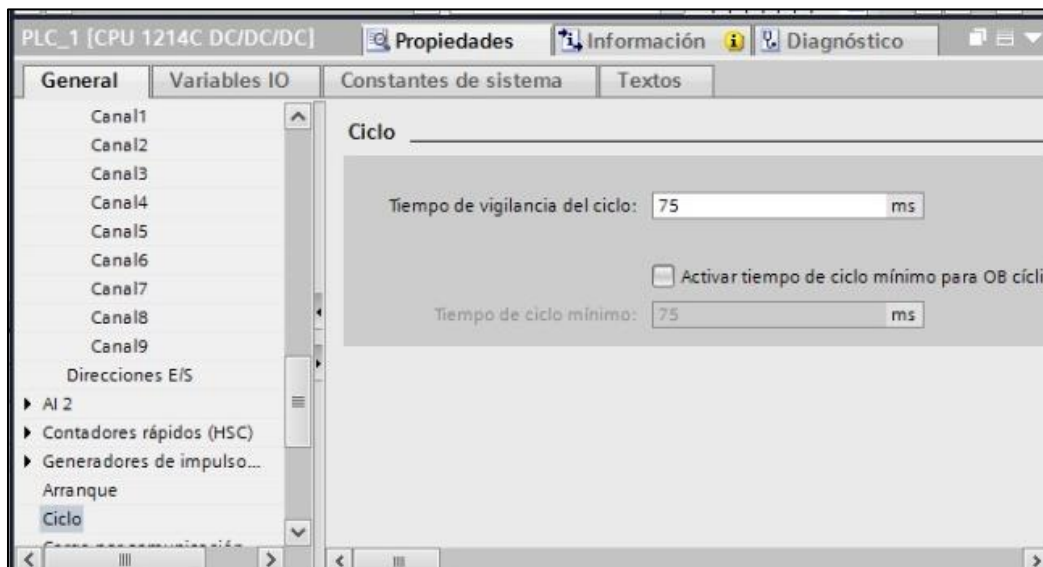


Figura E. 5: Tiempo de muestreo de la señal del caudalímetro.

Cada 75 ms, la señal analógica debe pasar por tres bloques de programación, tres bloques de operaciones reales (Scale, multiplicación, suma) y un bloque de operaciones booleanas, tal y como se observa en la Figura E.6. Las especificaciones del PLC Siemens S7 1200 en la Figura E.7 otorgan las velocidades de ejecución de instrucciones booleanas y reales.

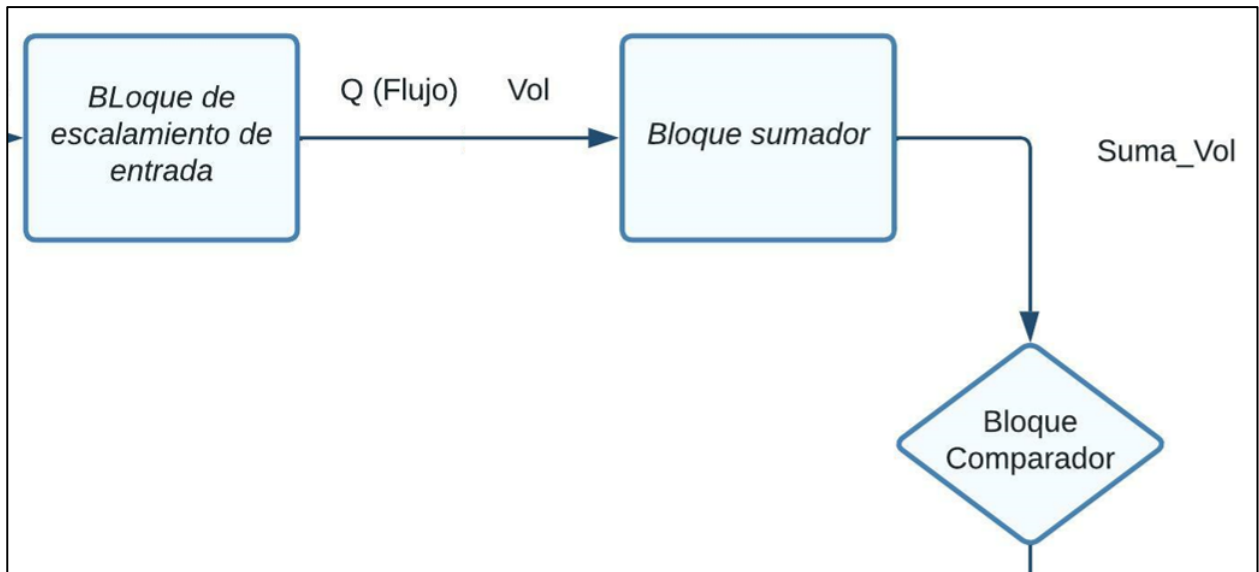


Figura E. 6: Diagrama de flujo de la señal analógica de caudal

Data logs	Number	Maximum 8 open at one time	
	Size	500 MB per data log or as limited by maximum available load memory	
Real time clock retention time	20 days, typ./12 day min. at 40 degrees C (maintenance-free Super Capacitor)		
PROFINET Ethernet communication port	1	2	
Real math execution speed	2.3 μ s/instruction		
Boolean execution speed	0.08 μ s/instruction		

Figura E. 7: Velocidad de ejecución por instrucciones matemáticas y booleanas

Los tiempos de ejecución de las instrucciones se encuentran en micras, por lo que todos los bloques serán aproximados a 1 ms, obteniendo un retardo total de 76 ms.

$$TT = 0.076 \text{ s}$$

Se utilizó la ecuación E.4 para obtener el volumen extra dosificado debido a los tiempos de retardo.

$$V_e = (TR + TT) * Q \quad (E.4)$$

$$V_e = (0.076 \text{ s} + 0.076 \text{ s}) * 0.14 \text{ L/s}$$

$$V_e = 0.021 \text{ L}$$

Se compara el volumen extra con el volumen utilizado para el cálculo de caudal (1 Litro), obteniendo una precisión del 2.1%. Mientras que para una dosificación de 500 mL se obtiene:

$$\% = 21 \text{ mL} * \frac{100\%}{500\text{mL}} = 4.2\%$$

Posteriormente, se incluye la precisión del caudalímetro. La Figura E.8 otorga la precisión del caudalímetro electromagnético OPTIFLUX 1300.

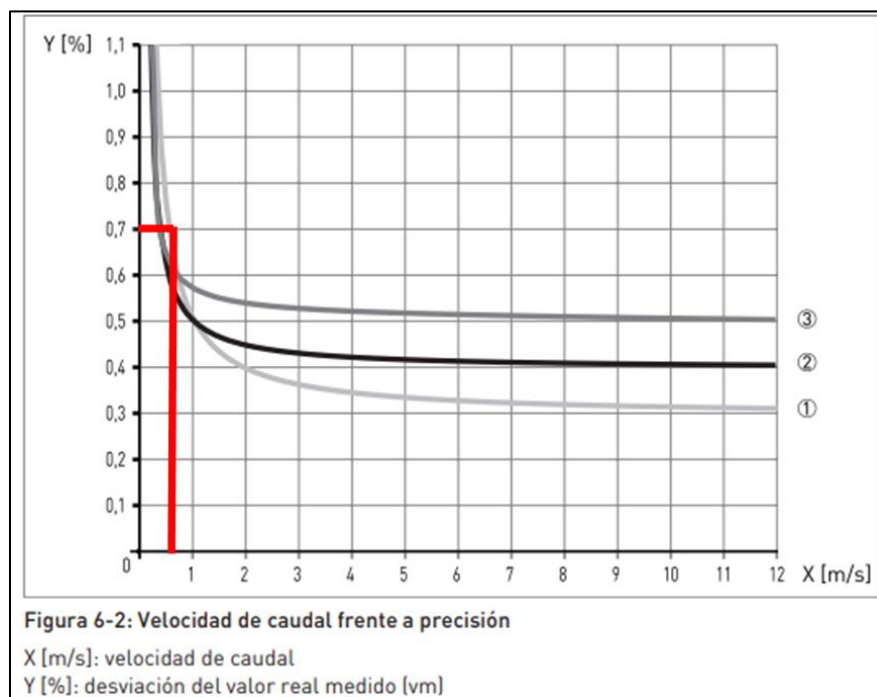


Figura E. 8: Precisión del caudalímetro OPTIFLUX 1300

Finalmente, se suman ambas precisiones obteniendo $\pm 4.9\%$ para el llenado de 500 mL. La tabla E-1 presenta los valores de precisión individuales calculados con la metodología utilizada para 500 mL

Tabla E- 1: Precisión de la dosificadora Vs volumen de llenado

Volumen (L)	Precisión
250	9.10%
500	4.90%
1000	2.80%
2000	1.06%

Se utilizaron los valores de la Tabla E-1 para realizar una regresión potencial, obteniendo los resultados de la Figura E.9 y la ecuación E.5:

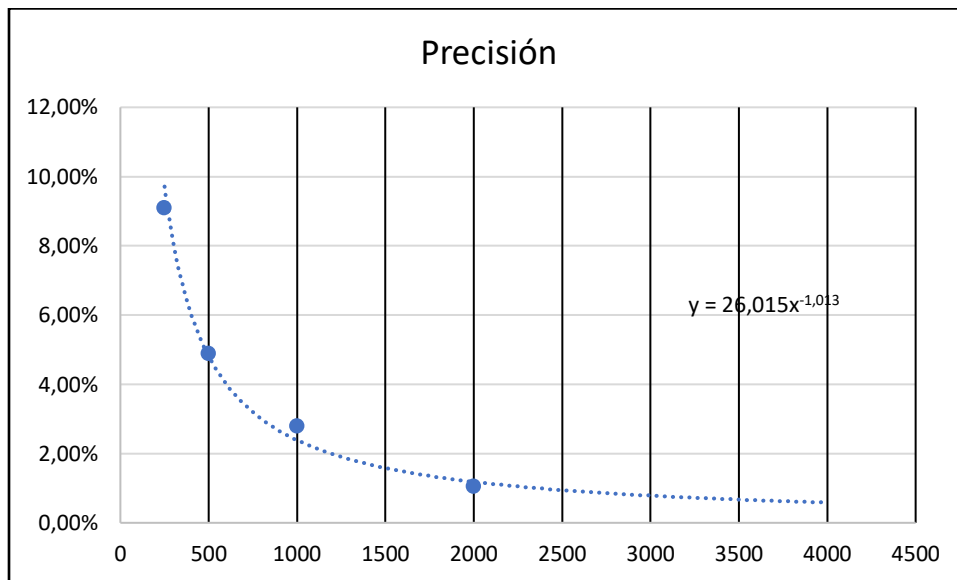


Figura E. 9: Precisión Vs volumen de dosificación

$$y = 26.015x^{-1.013}$$

(E.5)

APÉNDICE F

Programación Ladder para control de dosificadora

Main [OB1]

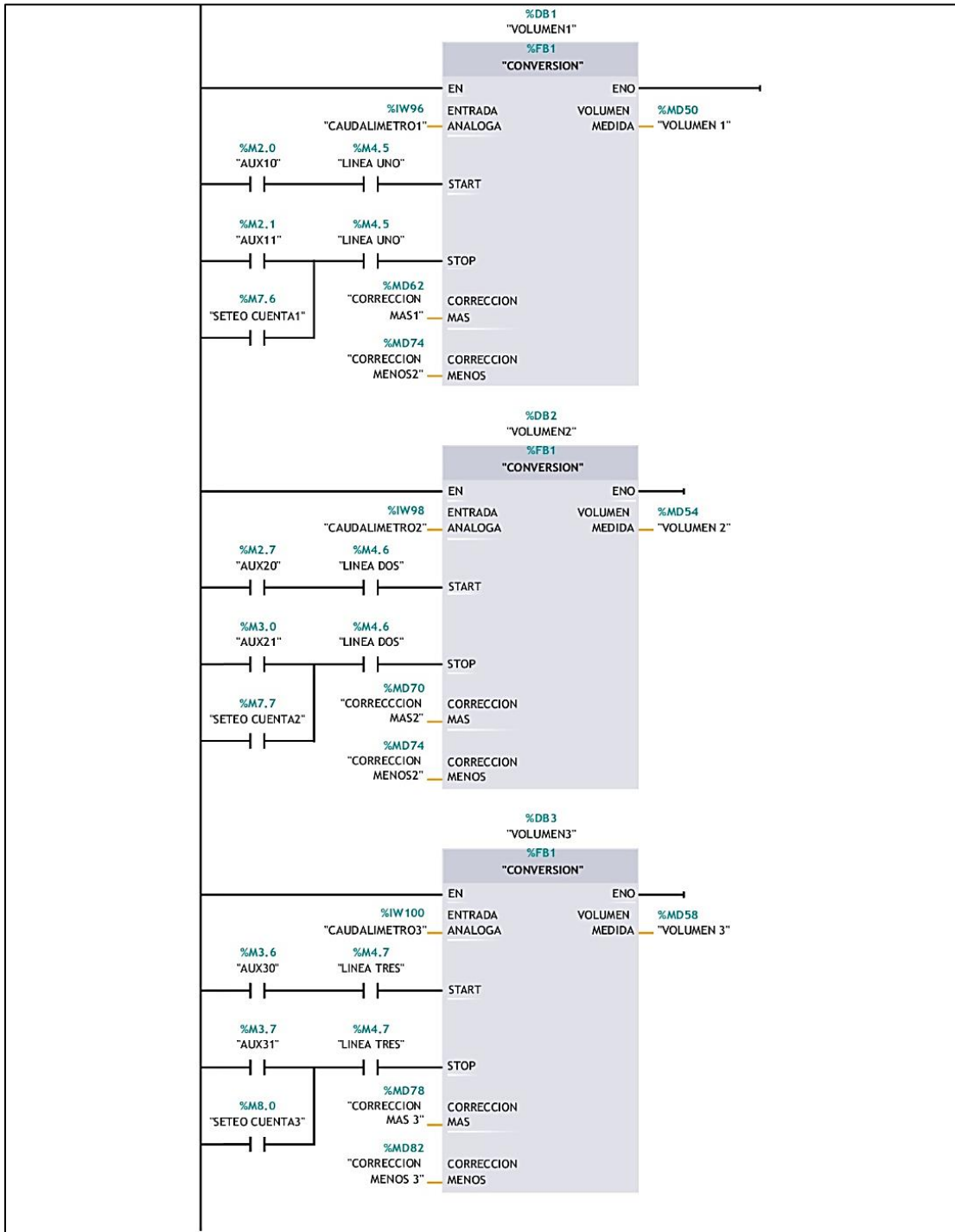


Figura F. 1: Segmento 1 de Main - Conversión caudal volumen en cada línea de dosificación

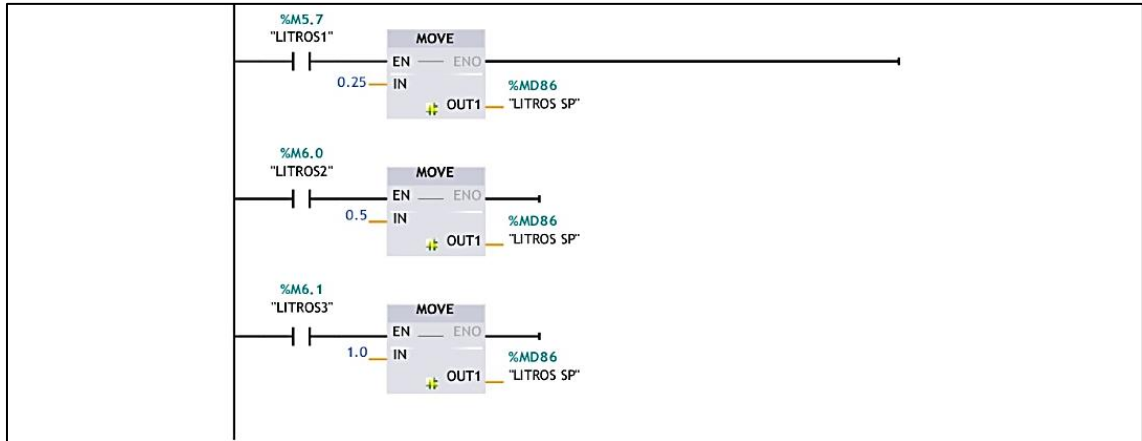


Figura F. 2: Segmento 2 de Main - Selección de cantidad de litros a dosificar

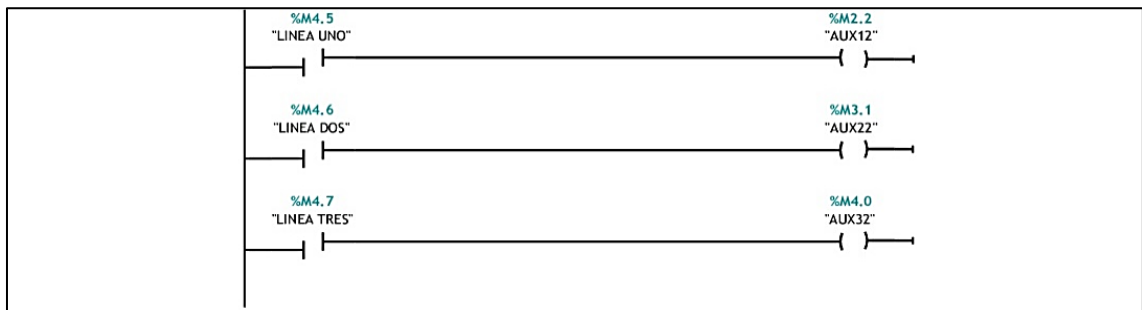


Figura F. 3: Segmento 3 de Main - Selección de líneas activas

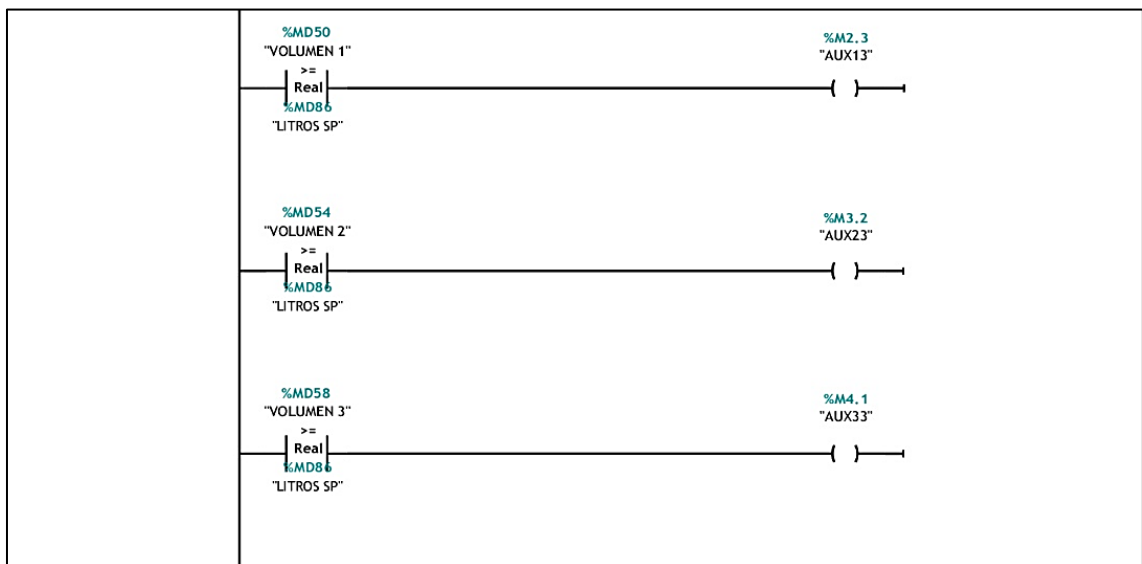


Figura F. 4: Segmento 4 de Main - COMPARACIONES DE VOLÚMENES

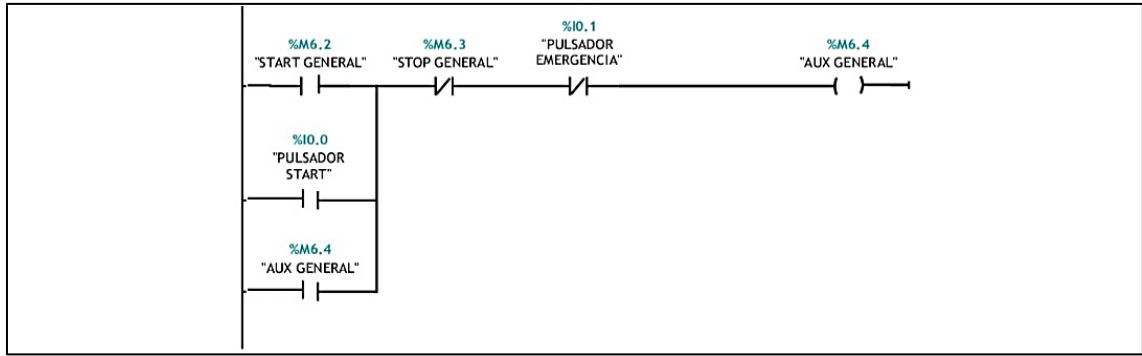


Figura F. 5: Segmento 5 de Main - ARRANQUE SISTEMA GENERAL

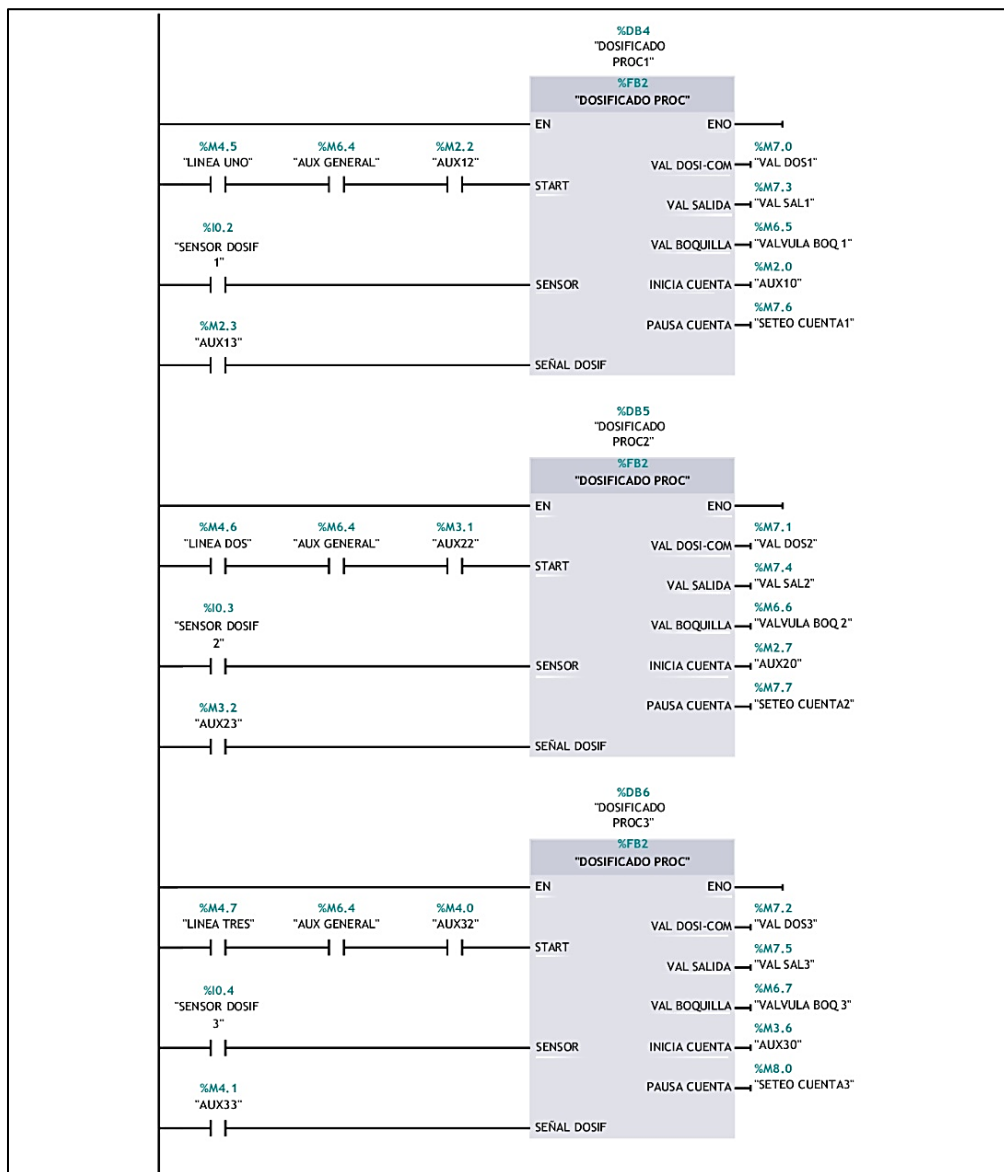


Figura F. 6: Segmento 6 de Main - Bloques de proceso para cada línea de dosificación

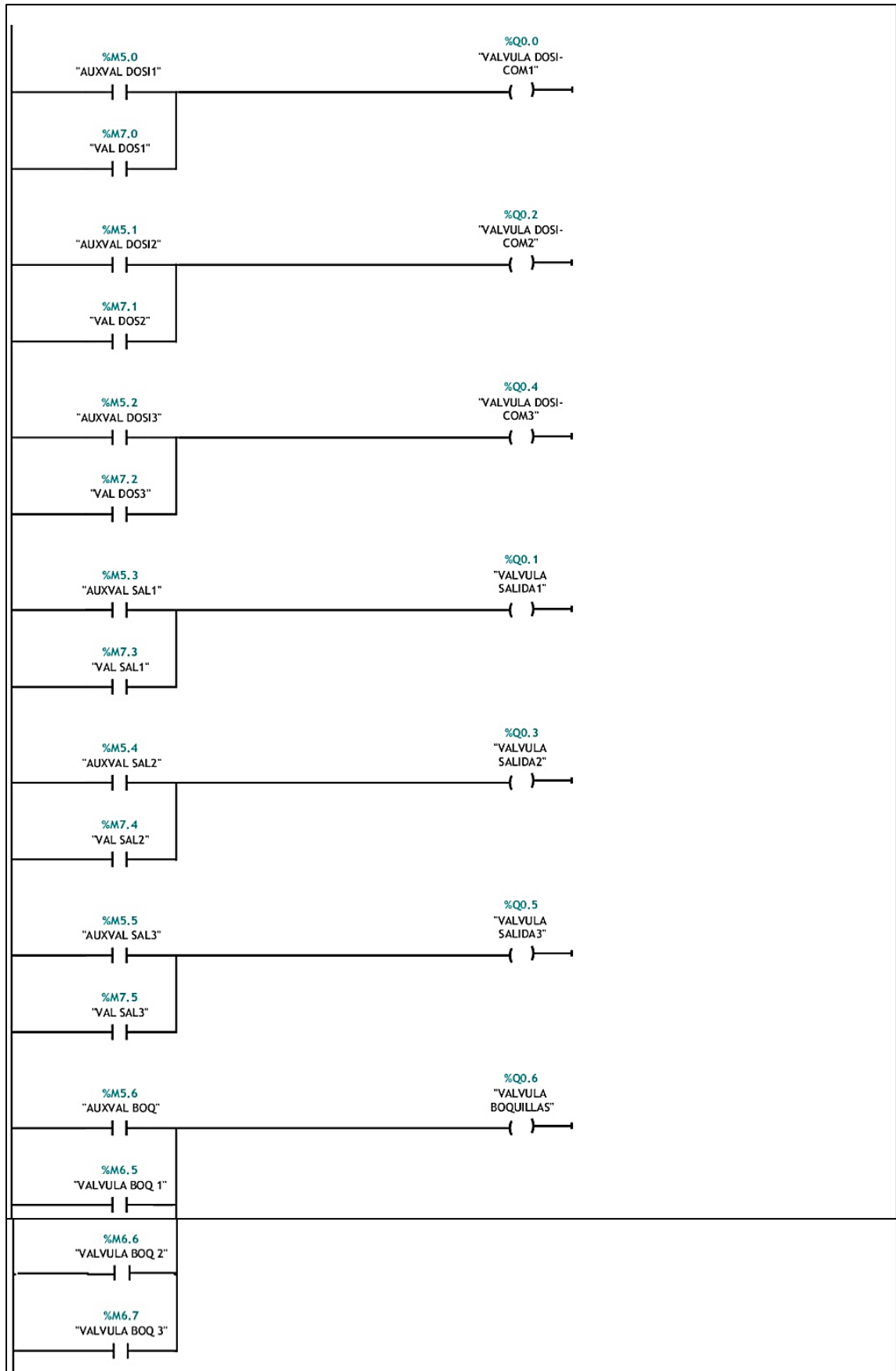


Figura F. 7: Segmento 7 de Main - Salidas válvulas

CONVERSIÓN [FB1]

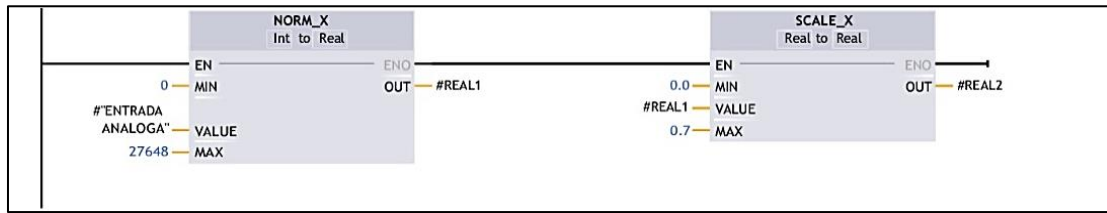


Figura F. 8: Segmento 1 de Conversión - Normalización y escalamiento para obtener valor de caudal en unidades L/s

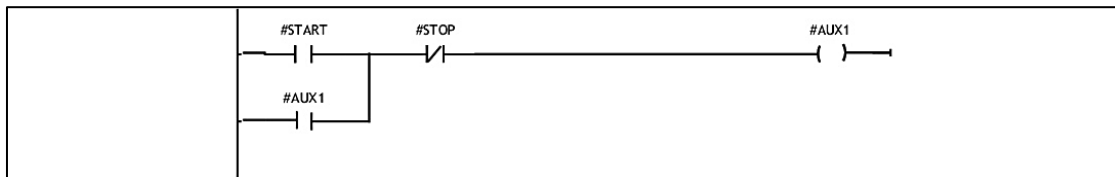


Figura F. 9: Segmento 2 de Conversión - Activación de variable auxiliar para establecer el ciclo de dosificación en el que el volumen se va a totalizar

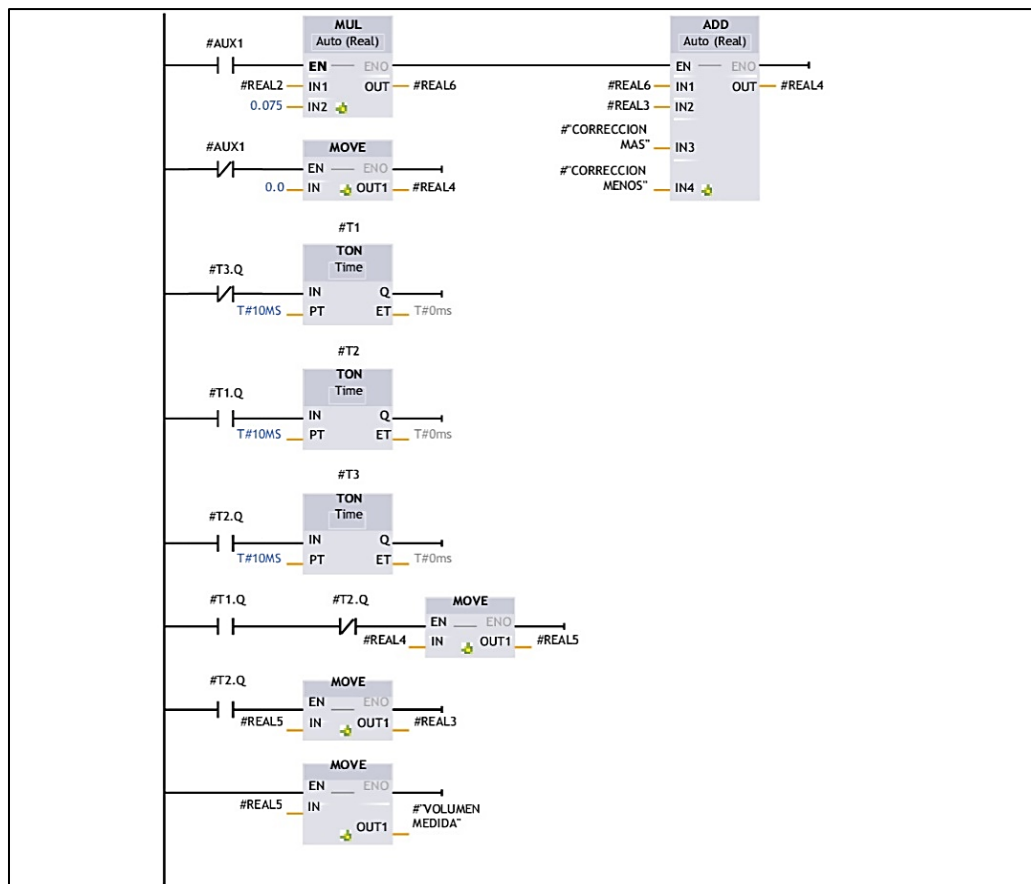


Figura F. 10: Segmento 3 de Conversión - Totalización del volumen dosificado

Las tablas de parámetros de este bloque de función se presentan a continuación:

Tabla F-1: Parámetros de bloque de función de CONVERSIÓN – Entradas y salidas

Nombre	Tipo dedatos	Valor predet.
Input		
ENTRADA ANA-LOGA	Int	0
START	Bool	false
STOP	Bool	false
CORRECCIÓN MAS	Real	0.0
CORRECCIÓN ME-NOS	Real	0.0
Output		
VOLUMEN MEDI-DA	Real	0.0

Tabla F-2: Parámetros de bloque de función de CONVERSIÓN – datos estáticos

Nombre	Tipo dedatos	Valor predet.
Static		
T1	TON_TIME	
PT	Time	T#0ms
ET	Time	T#0ms
IN	Bool	false
Q	Bool	false
T3	TON_TIME	
PT	Time	T#0ms
ET	Time	T#0ms
IN	Bool	false
Q	Bool	false
T2	TON_TIME	
PT	Time	T#0ms
ET	Time	T#0ms
IN	Bool	false
Q	Bool	false
REAL1	Real	0.0
REAL2	Real	0.0
REAL3	Real	0.0
REAL4	Real	0.0
REAL5	Real	0.0
REAL6	Real	0.0
AUX1	Bool	False
REALVOL	Real	0.0

DOSIFICADO PROC [FB2]

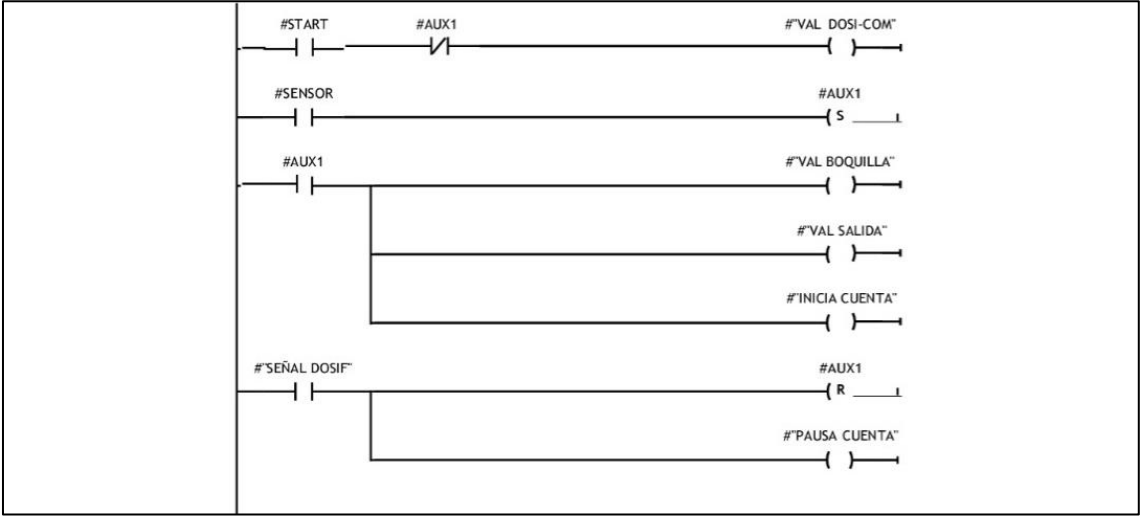


Figura F. 11: Segmento 1 de Dosificador Proc – Activación de señales para actuadores

La tabla de parámetros de este bloque de función se presenta a continuación:

Tabla F-3: Parámetros de bloque de función de DOSIFICADO PROC – Entradas, salidas y datos estáticos

Nombre	Tipo dedatos	Valor predet.
Input		
START	Bool	false
SENSOR	Bool	false
SEÑAL DOSIF	Bool	false
Output		
VAL DOSI-COM	Bool	false
VAL SALIDA	Bool	false
VAL BOQUILLA	Bool	false
INICIA CUENTA	Bool	false
PAUSA CUENTA	Bool	false
Static		
AUX1	Bool	false

APÉNDICE G

Planos mecánicos

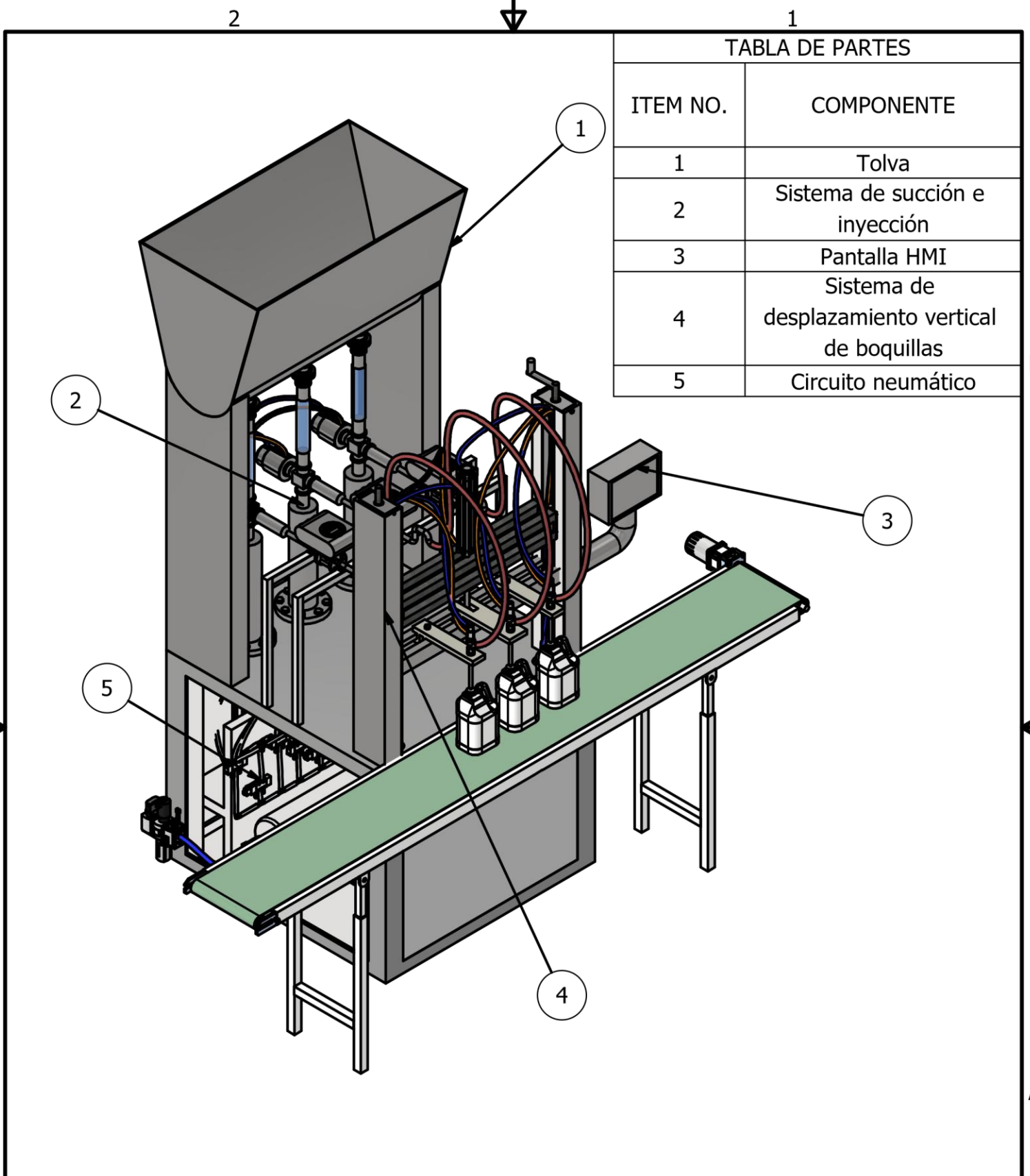



TABLA DE PARTES	
ITEM NO.	COMPONENTE
1	Tolva
2	Sistema de succión e inyección
3	Pantalla HMI
4	Sistema de desplazamiento vertical de boquillas
5	Circuito neumático

Autores Johnny García Elvia de la Cruz		Fecha 9/13/2022		Titulo Máquina dosificadora de líquidos	
		Tamaño A	Escala 1/21	Nº de dibujo	Revisado por Francisco Yumbra, Ph.D.

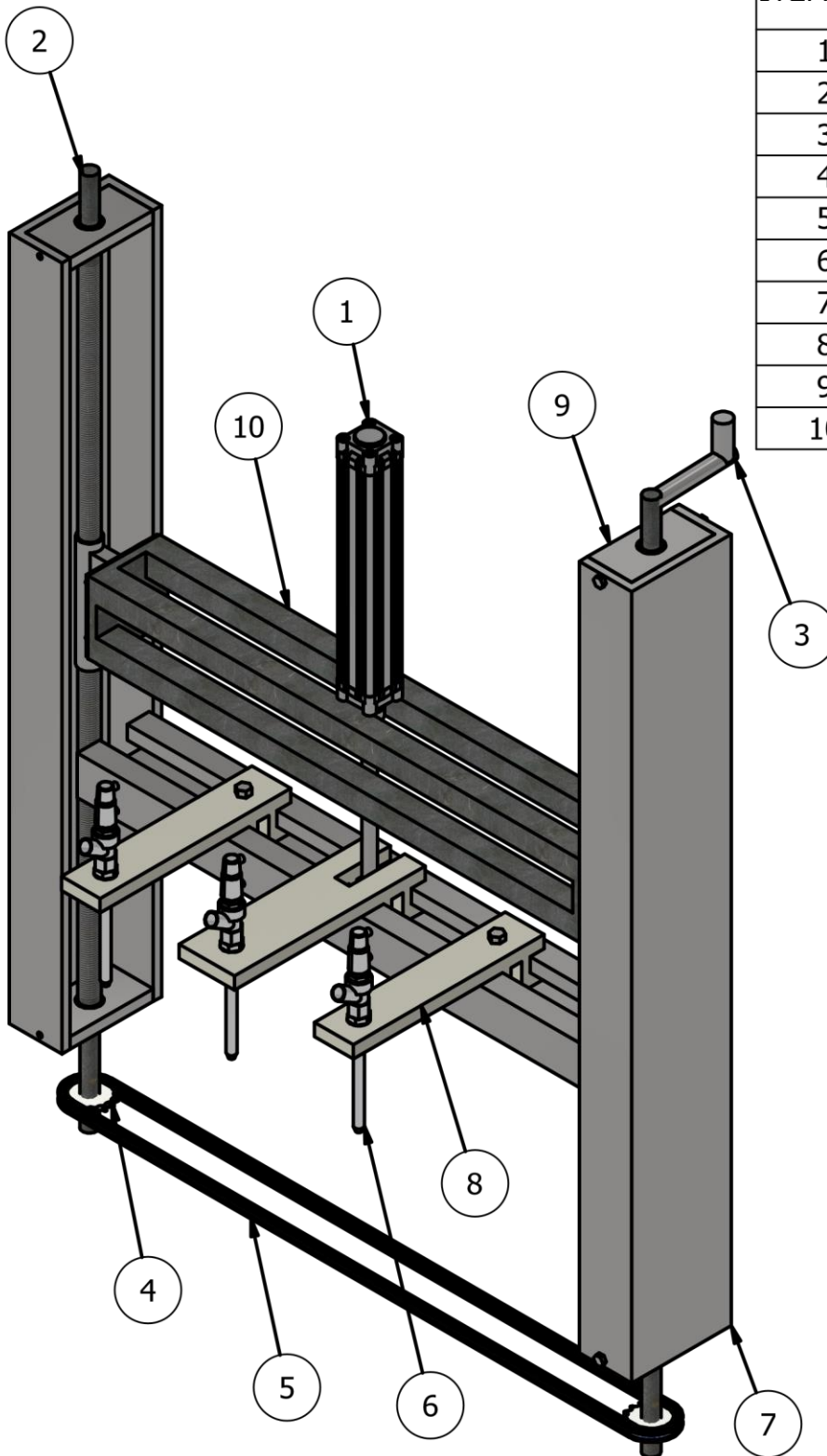
2



1

TABLA DE PARTES

ITEM NO.	COMPONENTE
1	Pistón neumático
2	Eje roscado
3	Manivela
4	Catarinas
5	Cadena
6	Boquillas ESG
7	Cubierta
8	Platina de boquillas
9	Chumaceras
10	Viga



Autores

Johnny García
Elvia de la Cruz

Fecha

9/13/2022

Titulo

Sistema de desplazamiento vertical

Tamaño

A

Escala

1/9

Nº de
dibujo

Revisado por

Francisco Yumbra, Ph.D.

2



1

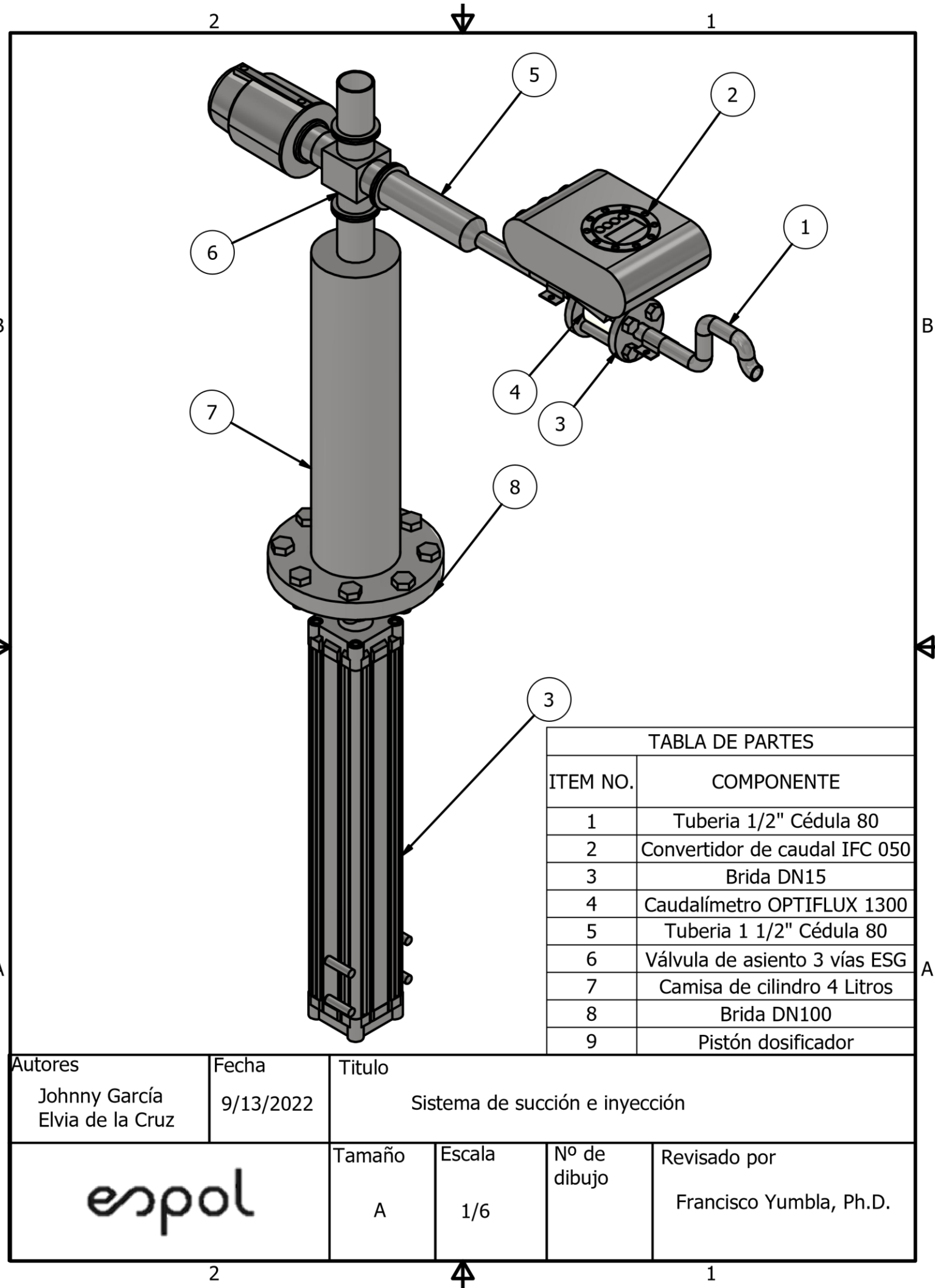


TABLA DE PARTES	
ITEM NO.	COMPONENTE
1	Tuberia 1/2" Cédula 80
2	Convertidor de caudal IFC 050
3	Brida DN15
4	Caudalímetro OPTIFLUX 1300
5	Tuberia 1 1/2" Cédula 80
6	Válvula de asiento 3 vías ESG
7	Camisa de cilindro 4 Litros
8	Brida DN100
9	Pistón dosificador

Autores Johnny García Elvia de la Cruz	Fecha 9/13/2022	Titulo Sistema de succión e inyección		
--	--------------------	--	--	--

	Tamaño A	Escala 1/6	Nº de dibujo	Revisado por Francisco Yumbra, Ph.D.
	2	1		

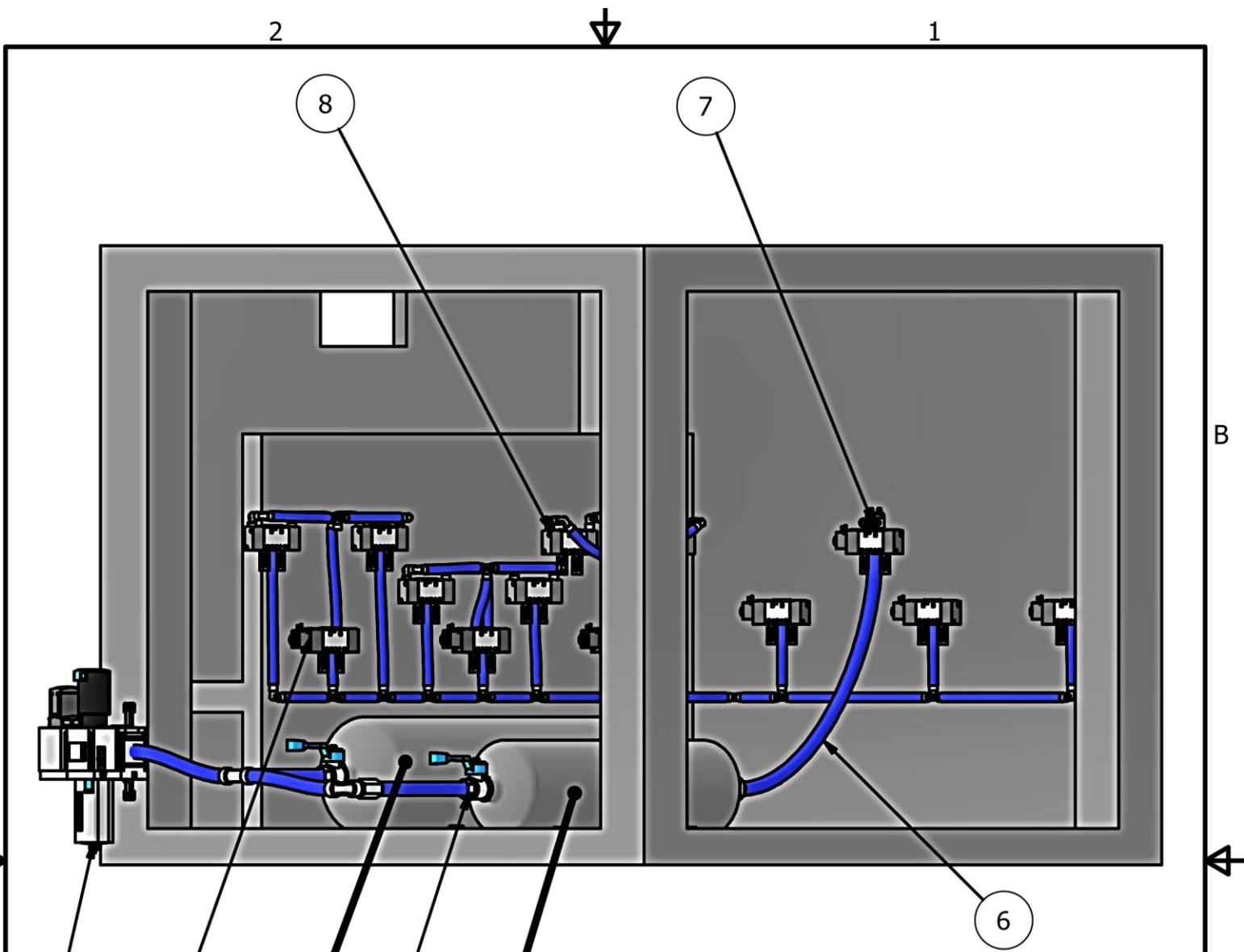


TABLA DE PARTES	
ITEM NO.	COMPONENTE
1	Unidad de mantenimiento
2	Válvula 5/2 vías monoestable
3	Acumulador 20 L
4	Válvula de paso
5	Acumulador 10 L
6	Manguera neumatica
7	Válvula estranguladora antirretorno
8	Válvula 5/2 vías biestable

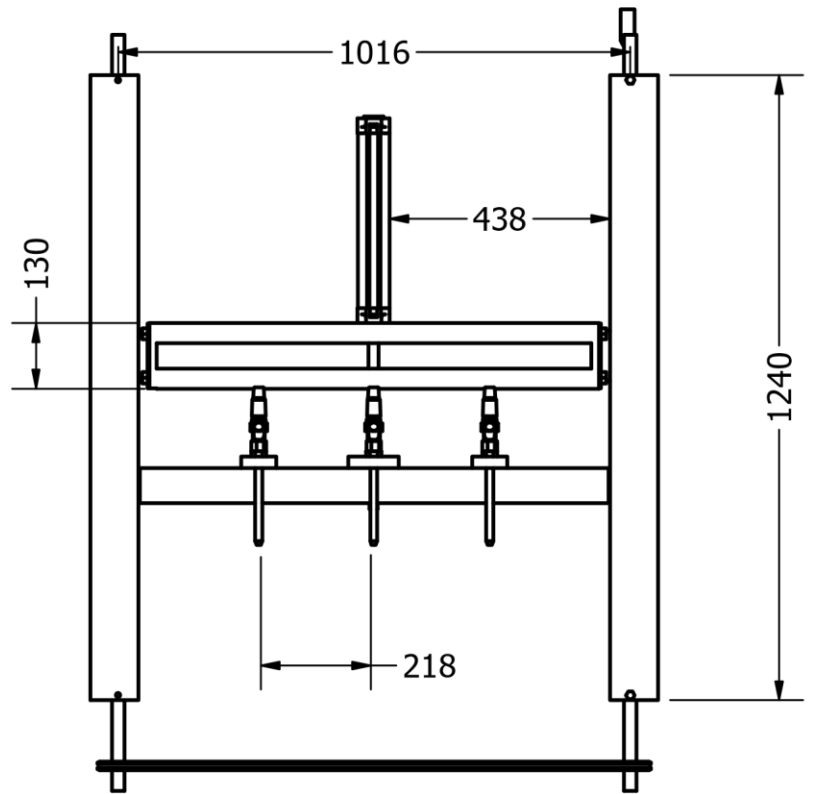
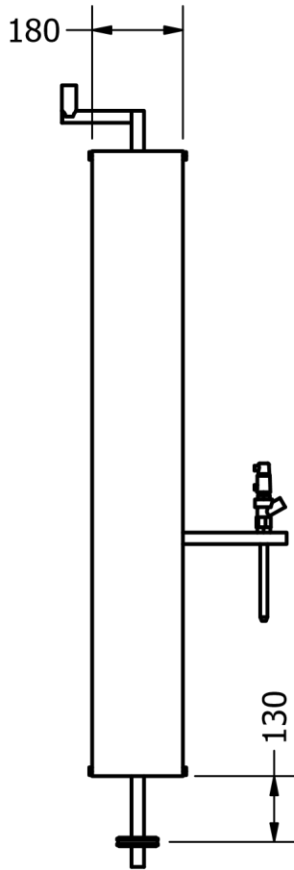
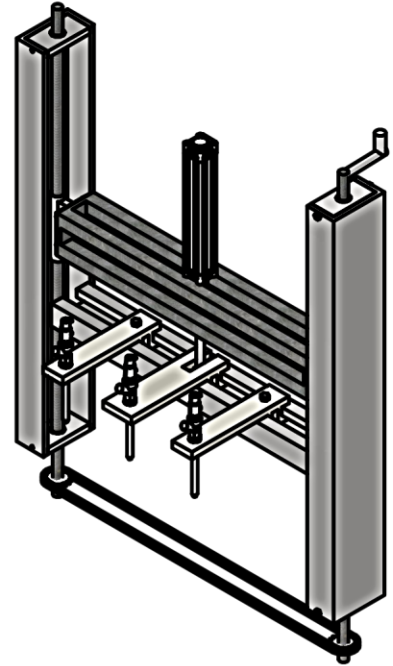
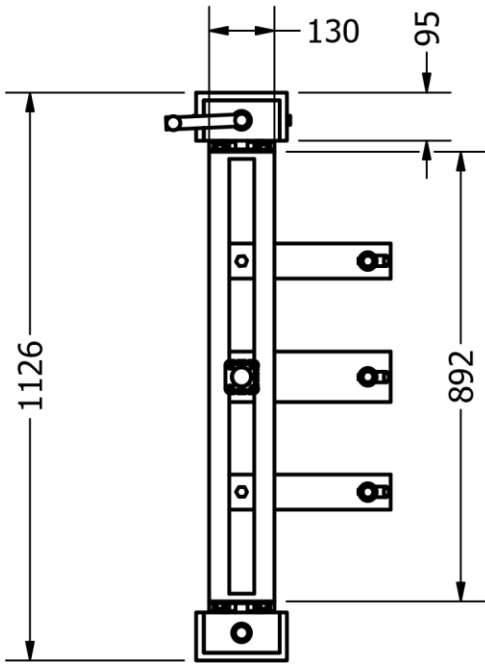
Autores Johnny García Elvia de la Cruz	Fecha 9/13/2022	Titulo Sistema neumático			
--	--------------------	-----------------------------	--	--	--

	Tamaño A	Escala 1/10	Nº de dibujo	Revisado por Francisco Yumbra, Ph.D.
--	-------------	----------------	--------------	---

2



1




B

B

A

A

Autores Johnny García Elvia de la Cruz	Fecha 9/13/2022	Titulo Sistema de desplazamiento vertical de boquillas			
		Tamaño A	Escala 1/15	Unidades mm	Revisado por Francisco Yumbra, Ph.D.

2

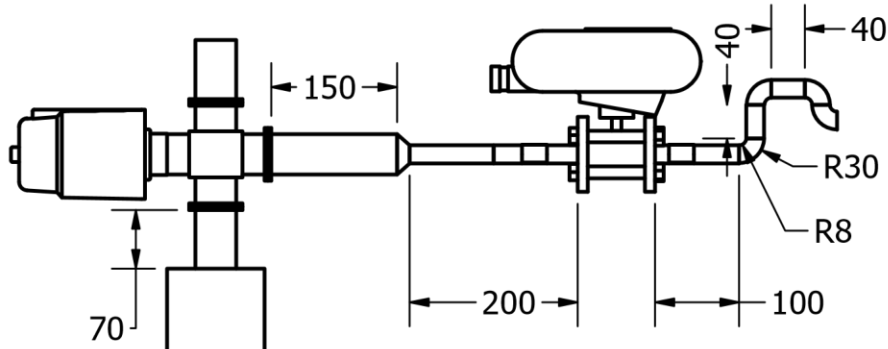
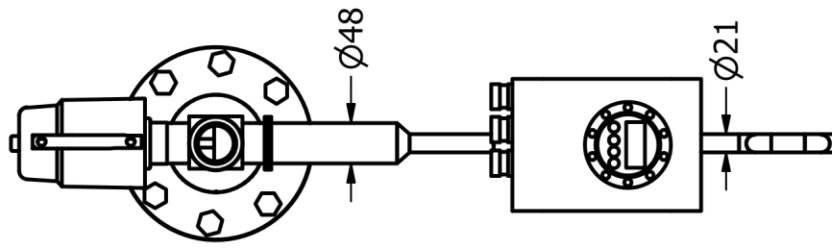


1

2



1



70

150

200

100

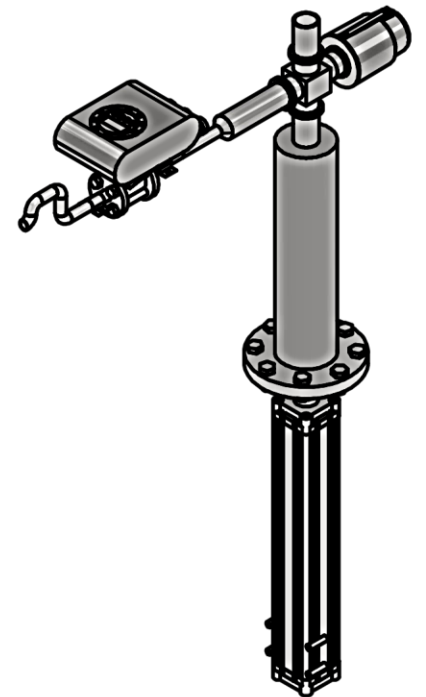
R30

R8

40

40

83



Autores

Johnny García
Elvia de la Cruz

Fecha

9/13/2022

Titulo

Sistema de succión e inyección

Tamaño

A

Escala

1/9

Unidades

mm

Revisado por

Francisco Yumbra, Ph.D.

2

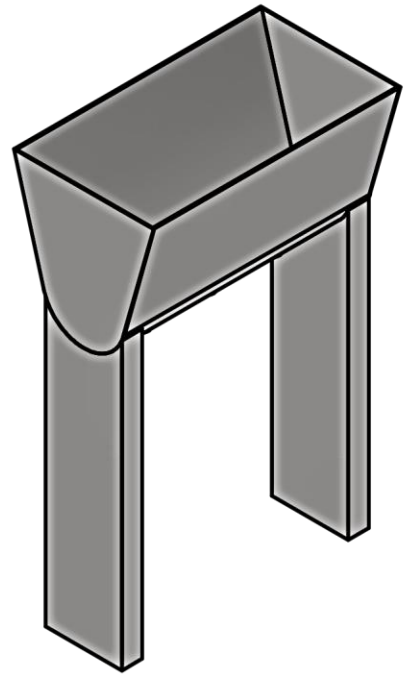
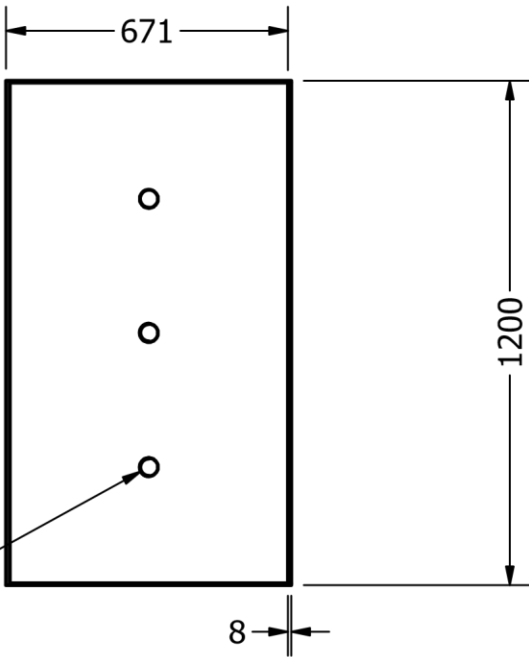


1

2

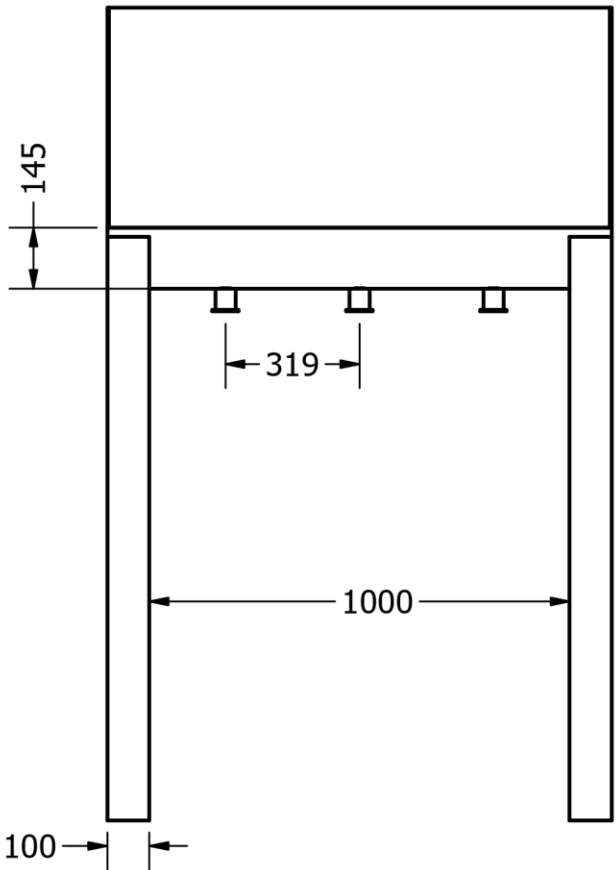
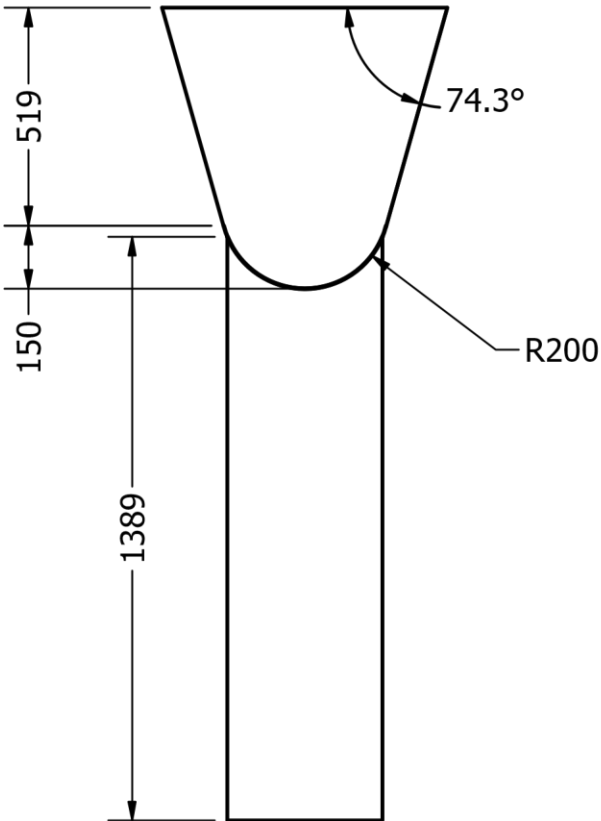


1



B

B



A

A

Autores
 Johnny García
 Elvia de la Cruz

Fecha
 9/13/2022

Titulo
Tolva



Tamaño
 A

Escala
 1/18

Unidades
 mm

Revisado por
 Francisco Yumbra, Ph.D.

2

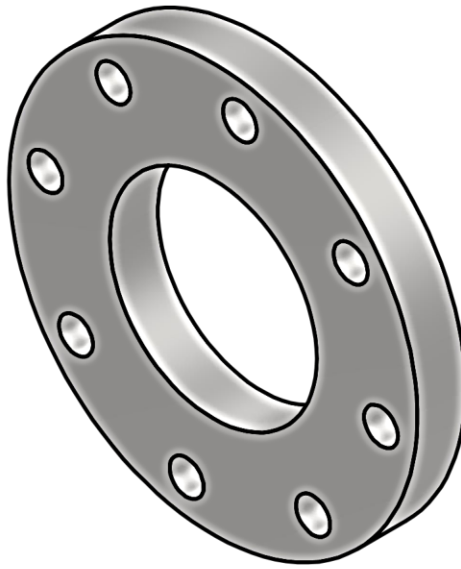


1

2

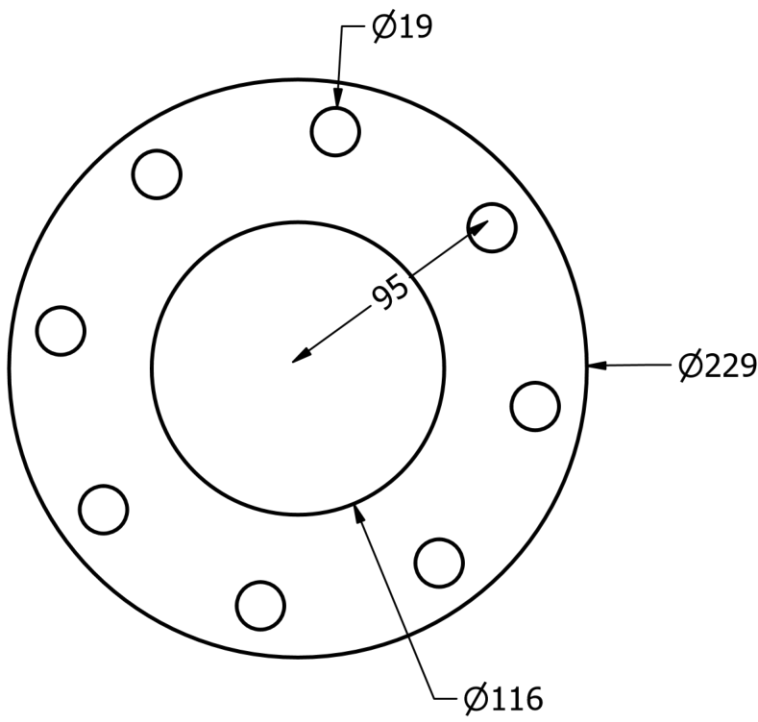


1



B

B



A

A

Autores
 Johnny García
 Elvia de la Cruz

Fecha
 9/13/2022

Titulo
Brida DN100



Tamaño
 A

Escala
 1/3

Unidades
 mm

Revisado por
 Francisco Yumbra, Ph.D.

2

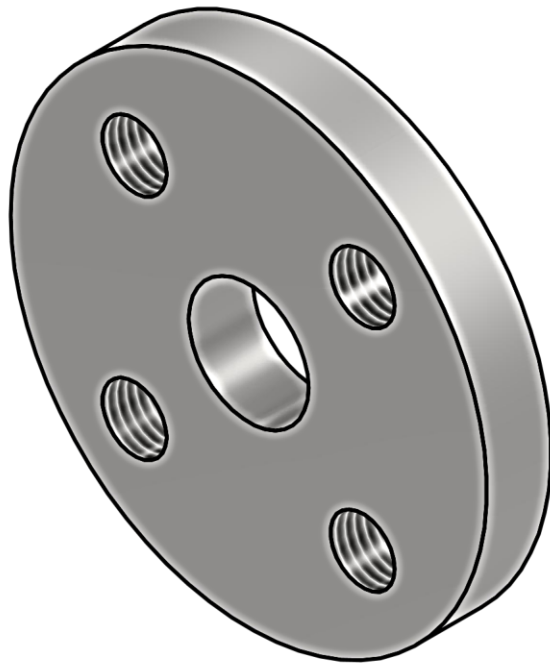


1

2



1



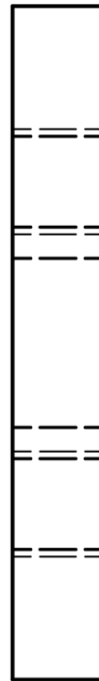
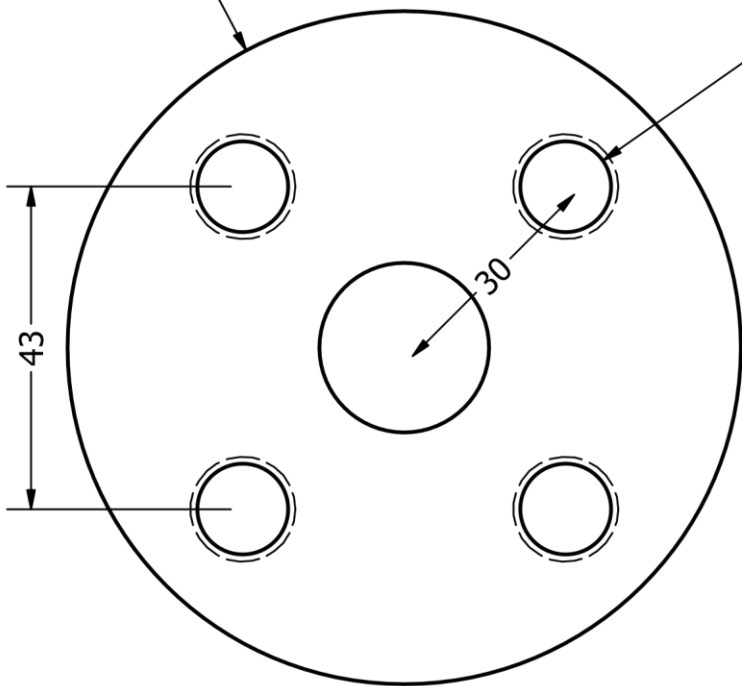
Ø89

Ø12

30

43

12



Autores

Johnny García
Elvia de la Cruz

Fecha

9/13/2022

Título

Brida DN15

espol

Tamaño

A

Escala

1/1

Unidades

mm

Revisado por

Francisco Yumbla, Ph.D.

2



1

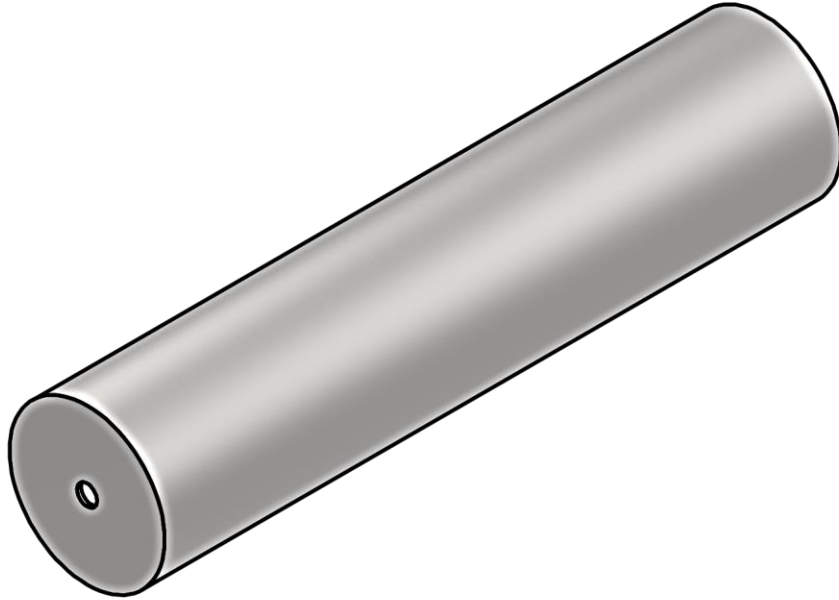
2

1

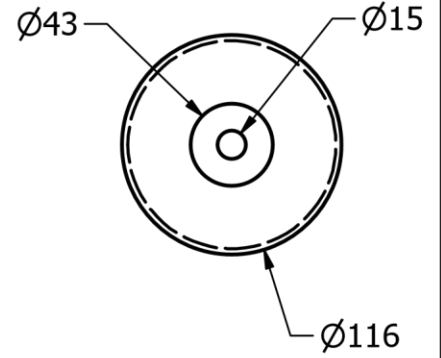
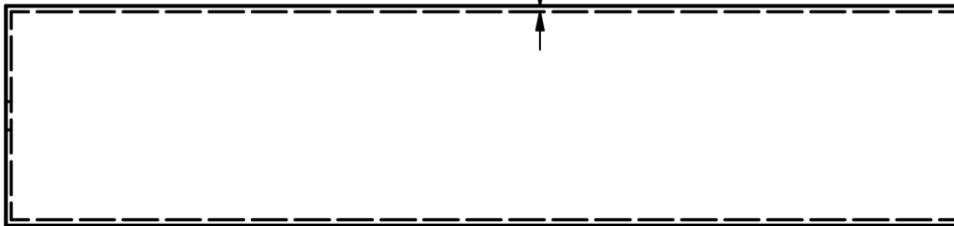


B

B

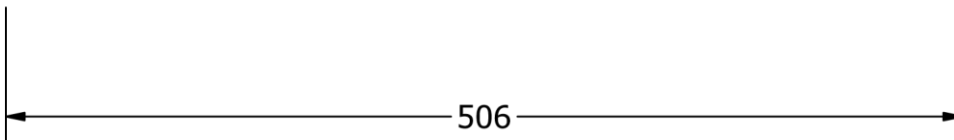


3



A

A



506

Autores

Fecha

Titulo

Johnny García
Elvia de la Cruz

9/13/2022

Camisa de cilindro

espol

Tamaño

Escala

Unidades

Revisado por

A

1/4

mm

Francisco Yumbra, Ph.D.

2

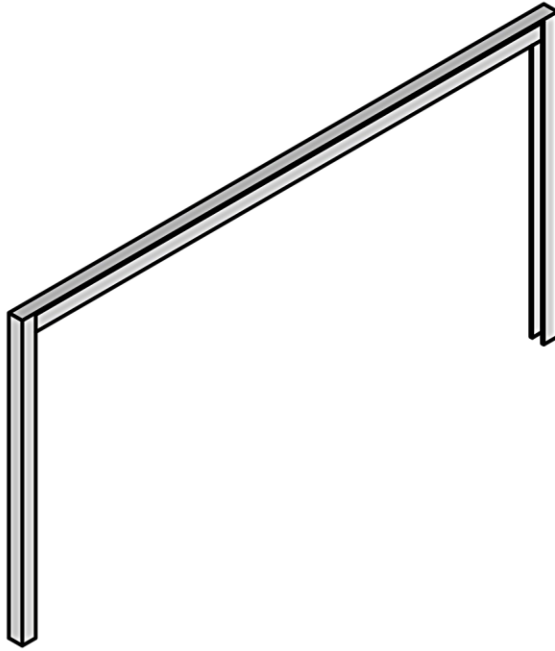
1



2

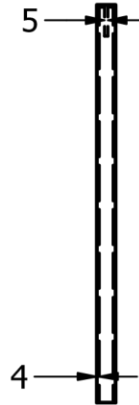
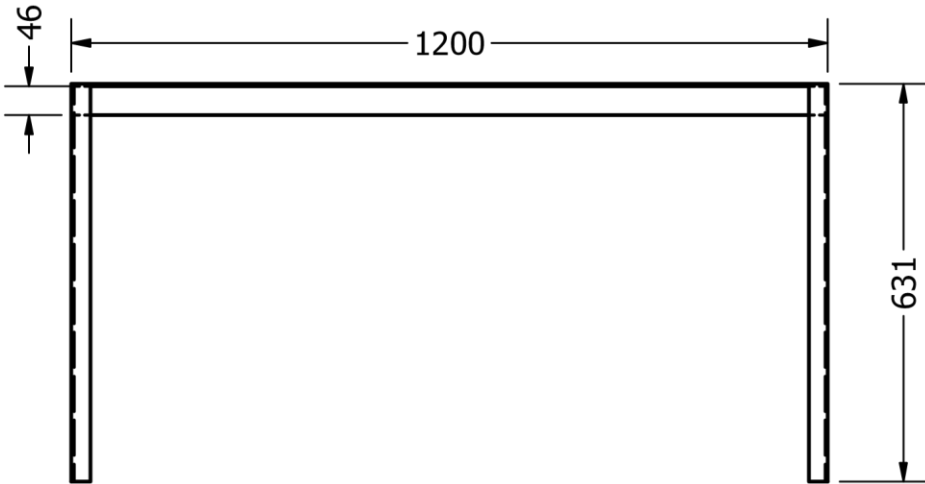


1



B

B



A

A

Autores
 Johnny García
 Elvia de la Cruz

Fecha
 9/13/2022

Titulo
Soporte de caudalímetros



Tamaño
 A

Escala
 1/12

Unidades
 mm

Revisado por
 Francisco Yumbla, Ph.D.

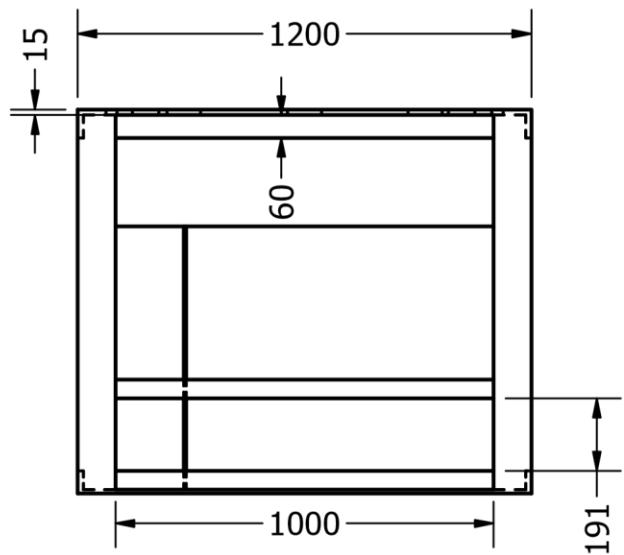
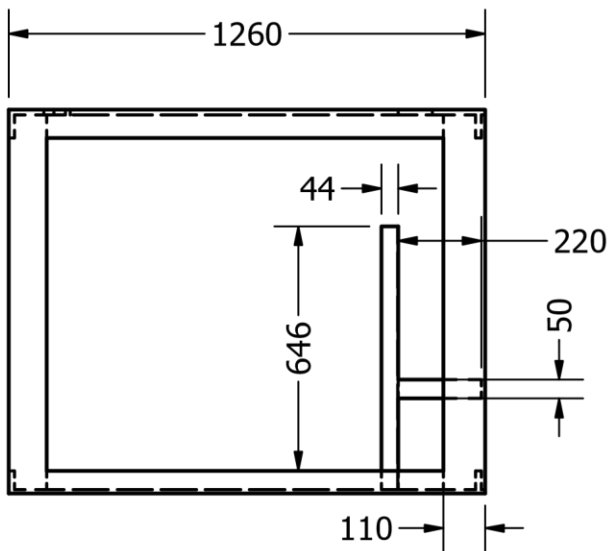
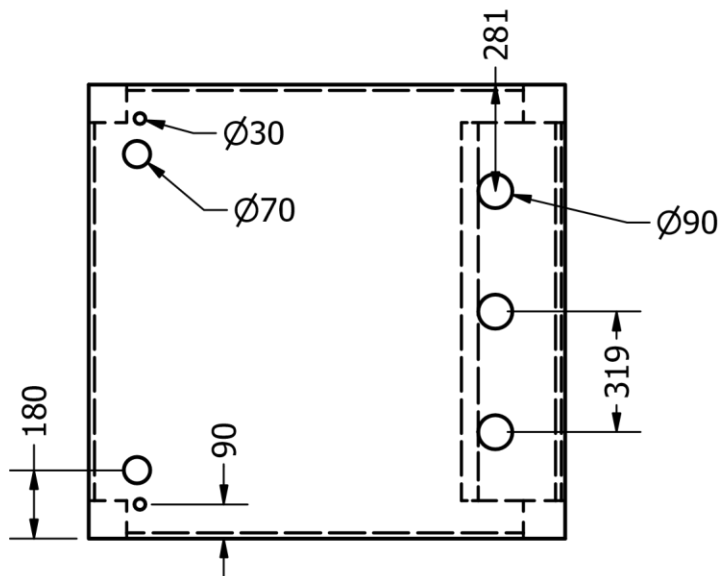
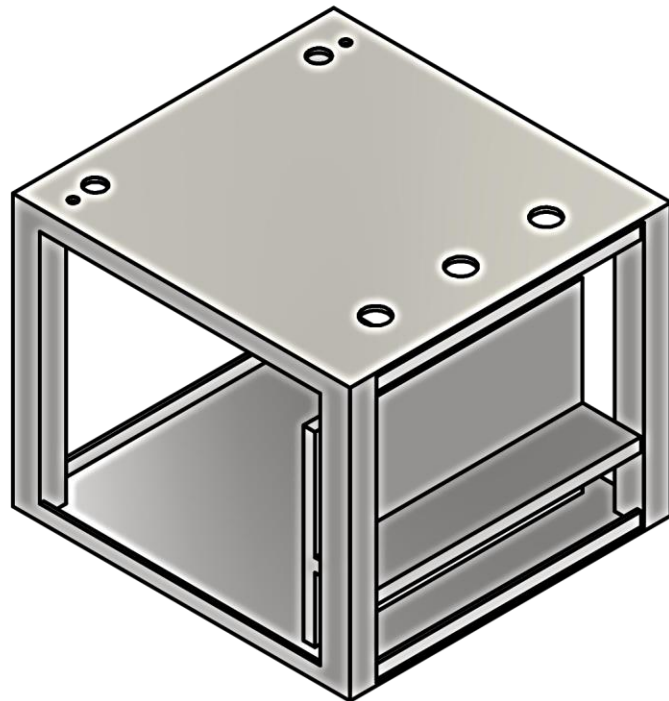
2



1

2

1



Autores

Fecha

Título

Estructura

Johnny García
Elvia de la Cruz

9/13/2022

Tamaño

Escala

Unidades

Revisado por

A

1/20

mm

Francisco Yumbra, Ph.D.

2

1

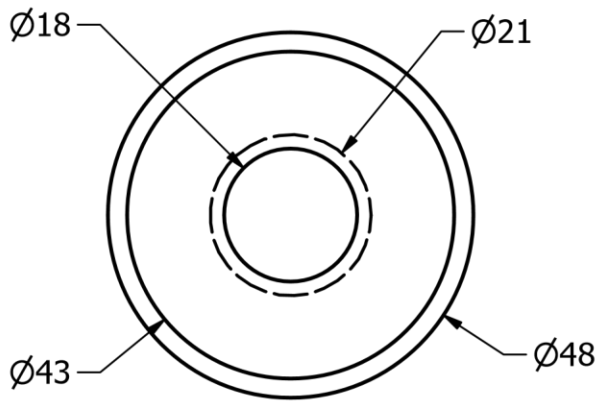
2



1


B

B



A

A

Autores Johnny García Elvia de la Cruz	Fecha 9/13/2022	Titulo Cono de reducción 1 1/2"-1/2"			
		Tamaño A	Escala 1/1	Unidades mm	Revisado por Francisco Yumbra, Ph.D.

2

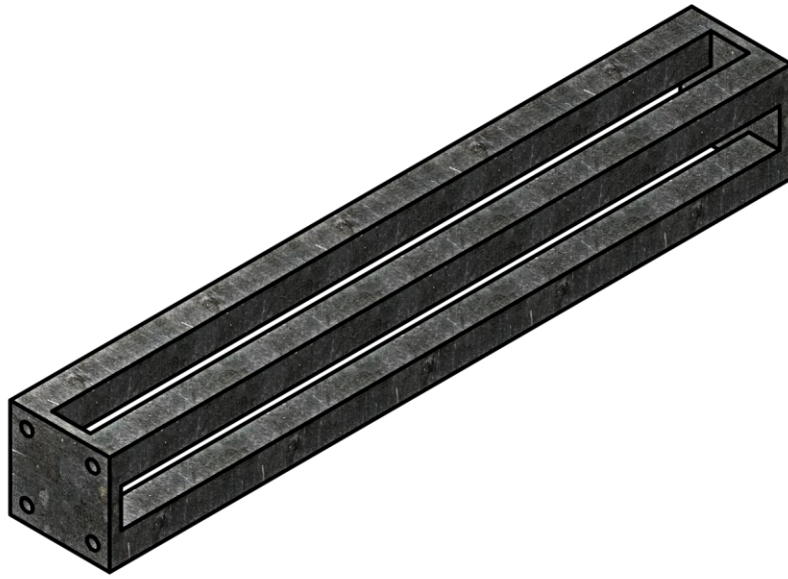


1

2

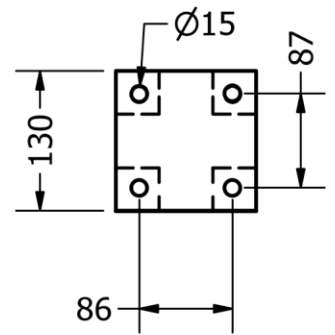
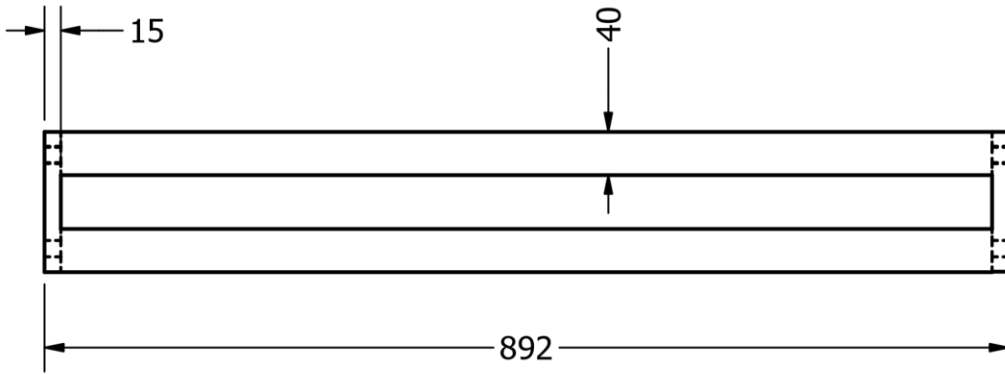


1




B

B



A

A

Autores Johnny García Elvia de la Cruz	Fecha 9/13/2022	Titulo <h1 style="text-align: center;">Viga</h1>			
		Tamaño A	Escala 1/7	Unidades mm	Revisado por Francisco Yumbra, Ph.D.

2

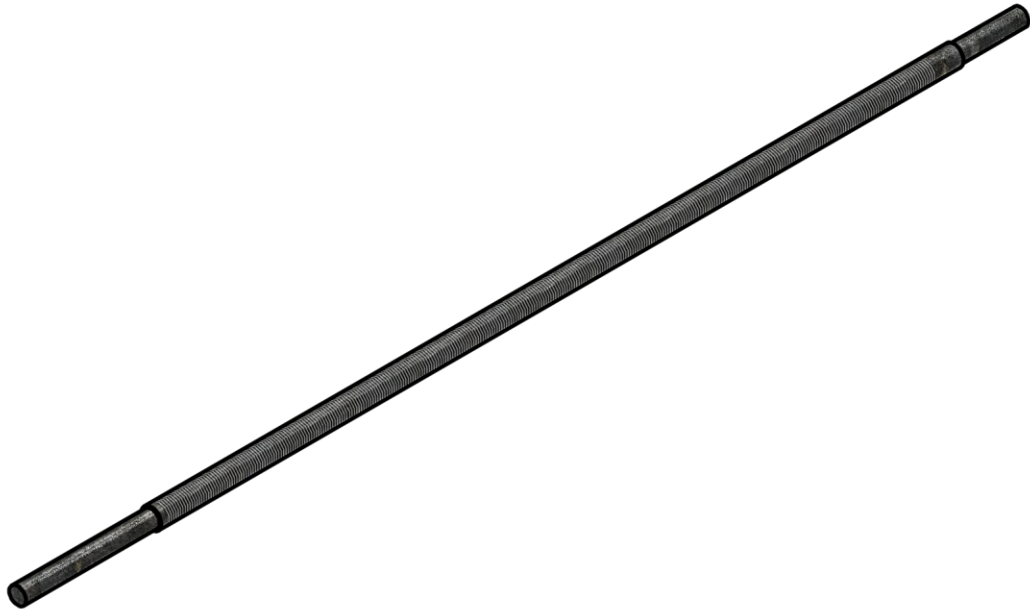


1

2

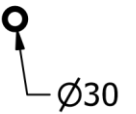
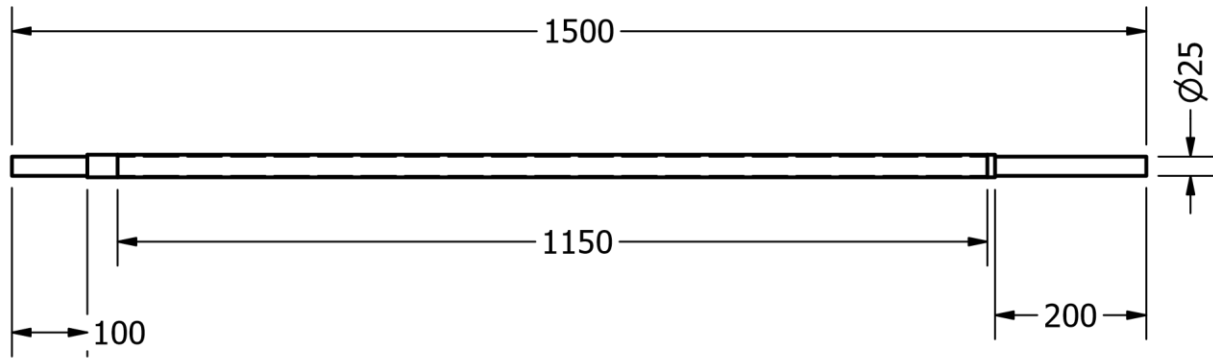


1



B

B



A

A

Autores Johnny García Elvia de la Cruz	Fecha 9/13/2022	Titulo <h2 style="text-align: center;">Eje roscado</h2>			
		Tamaño A	Escala 1/10	Unidades mm	Revisado por Francisco Yumbla, Ph.D.

2



1