

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Diseño de un sistema de llenado automático para fluidos líquidos y viscosos
para la empresa Cosmético Yambal S.A.**

**Proyecto de graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica
con el grado académico de Licenciatura**

Carlos Díaz Sánchez

2016068001

Cartago, 29 de enero 2021



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Cartago, 29 de enero 2021

Carlos Díaz

Firma del autor

Luis Carlos Díaz Sánchez

Céd: 702610778

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME FINAL**

El Profesor Asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Carlos Díaz Sánchez

Proyecto: Diseño de un sistema de llenado automático para fluidos líquidos y viscosos para la empresa Cosmético Yambal S.A.

ANA LUCIA MORERA BARQUERO (FIRMA) Firmado digitalmente por ANA LUCIA MORERA BARQUERO (FIRMA) Fecha: 2021.01.21 16:49:20 -06'00'

Ing. Ana Lucía Morera Barquero

Asesor

Cartago, 29 de enero 2021

Resumen

En años recientes la empresa Cosméticos Yambal S.A. ha empezado a realizar cambios en la estrategia de negocios con el fin de mejorar su competitividad, de manera que se logren reducir los gastos y que se mejore la disponibilidad de los productos. En la actualidad el proceso de llenado se realiza de manera manual, lo cual es un limitante de la capacidad de producción, además de que sólo se cuenta con una máquina de llenado para varios tipos de productos. Es conocido que este proceso es el que produce mayores retrasos en la línea de producción.

Se propone realizar el diseño de un sistema de llenado automático para los distintos fluidos que distribuye la empresa, que permita aumentar en un 25% la capacidad de producción actual. Además, el sistema también busca satisfacer otras necesidades, como, por ejemplo, que la máquina sea confiable, segura y que sea de fácil mantenimiento.

El sistema desarrollado es controlado por medio de un PLC, que es accionado por distintos sensores que monitorean el estado del proceso, para controlar los actuadores del sistema y que su funcionamiento sea correcto y adecuado.

Las pruebas de validación permitieron verificar el funcionamiento del sistema. Estas pruebas muestran que el error de dosificación del sistema es menor al 5% para todos los envases que utiliza la empresa. Además, se obtuvo que la velocidad de llenado se aumenta en un 25,3% con respecto al valor actual, lo que permite comprobar el cumplimiento de las especificaciones establecidas.

Palabras clave: Capacidad de producción, Control automático, Fluidos viscosos, Sistema de llenado.

Abstract

In recent years the company Cosméticos Yambal S.A. has begun to make changes in the business strategy in order to improve its competitiveness, so that expenses are reduced and the availability of products is improved. At present the filling process is carried out manually, which is a limitation of production capacity, in addition to the fact that there is only one filling machine for various types of products. It is known that this process is the one that produces the greatest delays in the production line.

It is proposed to design an automatic filling system for the different fluids that the company distributes, which will allow the current production capacity to be increased by 25%. In addition, the system also seeks to satisfy other needs, such as, for example, that the machine be reliable, safe and easy to maintain.

The developed system is controlled by means of a PLC, which is activated by different sensors that monitor the state of the process, to control the system's actuators and ensure that their operation is correct and adequate.

The validation tests allowed to verify the operation of the system. These tests show that the system's dosing error is less than 5% for all the packages the company uses. In addition, it was obtained that the filling speed increases by 25.3% with respect to the current value, which makes it possible to verify compliance with the established specifications.

Keywords: Automatic control, Filling system, Production capacity, Viscous fluids.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de graduación a mis padres, José Luis y Yamileth, por el gran apoyo que me brindaron durante esta etapa de mi vida, por haberme enseñado los valores de respeto, honestidad y responsabilidad, y por haber formado el hombre que soy, por haberme enseñado que con esfuerzo y dedicación se pueden cumplir las metas que uno se propone. Este logro también es de ustedes.

A mis hermanos Pablo y Fabián, por haberme acompañado durante esta etapa de mi vida, y por enseñarme que, a pesar de las largas semanas de estudio, siempre hay tiempo para realizar actividades personales.

Finalmente, a mis amigos, que me ayudaron y apoyaron durante mi etapa universitaria, también les dedico este trabajo.

Agradecimiento

Le agradezco a mi tutora Ing. Ana Lucía, por su apoyo y asesoramiento durante la realización del proyecto, que me permitió finalizar con éxito el trabajo.

Además, le agradezco inmensamente a Eduardo Sánchez, por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en su empresa, y por el gran apoyo que me brindó durante la realización del proyecto. Así mismo le agradezco a mis asesores, Randall Bonilla y Keylor Mena, quienes me brindaron de su ayuda y guía para poder terminar el trabajo con éxito.

Finalmente agradezco a los docentes del Área Académica de Ingeniería Mecatrónica, por haberme formado durante toda la carrera, permitiéndome crecer profesionalmente.

Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Entorno del proyecto	1
1.2 Definición del problema	1
1.2.1 Generalidades.....	1
1.2.2 Justificación	2
1.2.4 Síntesis del problema	2
1.3 Enfoque de la solución	3
1.4 Objetivo General.....	4
1.5 Objetivos Específicos	4
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 Líneas de producción automáticas	5
2.2 Sistemas de llenado	5
2.2.1 Generalidades de las máquinas de llenado	6
2.2.2 Características de las máquinas de llenado.....	7
2.2.3 Parámetros de llenado	8
2.2.4 Sistemas y máquinas de llenado comunes.....	8
2.2.4.1 Llenadora de pistón de desplazamiento positivo.....	10
2.2.4.2 Llenadora de bomba de engranajes.....	11
2.2.4.3 Llenadora a presión.....	11
2.3 Mecanismos de transferencia en líneas de producción.....	12
2.3.1 Mecanismos de transferencia lineal.....	13
2.3.2 Máquinas de transferencia en línea	14
2.3.3 Mecanismos de transferencia rotativo	15

2.3.4	Máquinas de transferencia rotativas	15
2.4	Tecnologías de automatización y control	16
2.4.1	Elementos básicos de los sistemas de automatización	16
2.4.2	Niveles de automatización	17
2.4.3	Componentes de hardware para la automatización y control de procesos 18	
2.4.3.1	Sensores	18
2.4.3.2	Actuadores	18
2.4.4	Control discreto y controladores lógicos programables	19
2.4.4.1	Diagramas lógicos en escalera	19
2.4.4.2	Controladores lógicos programables	21
CAPÍTULO 3: DESARROLLO CONCEPTUAL.....		23
3.1	Metodología.....	23
3.2	Estudio de las necesidades.....	25
3.3	Estudio de las especificaciones.....	27
3.3.1	Establecimiento de métricas	27
3.3.2	Recopilación de información	29
3.3.3	Establecimiento de valores objetivo	29
3.4	Generación de conceptos.....	32
3.4.1	Descomposición funcional	32
3.4.2	Búsqueda de conceptos.....	33
3.4.2.1	Búsqueda externa	33
3.4.2.2	Búsqueda interna	35
3.4.3	Exploración sistemática	36

3.4.3.1	Árboles de clasificación.....	37
3.4.3.2	Tablas de combinación	38
3.5	Estudio de selección.....	44
3.5.1	Establecimiento de criterio de selección	45
3.5.2	Filtrado de conceptos.....	45
3.5.3	Mejoras de concepto.....	46
3.5.4	Evaluación de conceptos	47
CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA.....		50
4.1	Cálculo de parámetros iniciales.....	50
4.2	Cálculos para diseño del sistema de llenado	53
4.2.1	Desplazamiento del émbolo.....	53
4.2.2	Tiempo de llenado	54
4.2.3	Caudal.....	54
4.2.4	Presión para el dosificado.....	54
4.2.5	Velocidades del fluido en las distintas secciones.....	57
4.2.6	Pérdidas menores en el sistema.....	58
4.2.7	Pérdidas mayores en el sistema	61
4.2.8	Presión y fuerza del cilindro	65
4.2.9	Selección del O-ring.....	66
4.2.10	Selección del motor.....	70
CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL SISTEMA.....		74
5.1	Selección del controlador	74
5.2	Diagrama de flujo	77
5.3	Programación del control automático	78

5.3.1	Determinación de las entradas y las salidas	78
5.3.2	Programación en el PLC	79
CAPÍTULO 6: VALIDACIÓN DEL SISTEMA		81
6.1	Prueba 1: Velocidad de llenado.....	81
6.1.1	Objetivos	81
6.1.2	Parámetros de influencia	81
6.1.3	Métrica de desempeño.....	82
6.1.4	Descripción general	82
6.1.5	Descripción del análisis.....	82
6.1.6	Conclusiones para obtener	82
6.2	Prueba 2: Precisión de dosificación.....	83
6.2.1	Objetivos	83
6.2.2	Parámetros de influencia	83
6.2.3	Métrica de desempeño.....	83
6.2.4	Descripción general	83
6.2.5	Descripción del análisis.....	84
6.2.6	Conclusiones para obtener	84
6.3	Mediciones	84
6.3.1	Velocidad de llenado.....	84
6.3.2	Precisión de dosificación.....	87
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS FINANCIERO		91
7.1	Costos	91
7.1.1	Costo de materiales	91
7.1.2	Costo de accesorios y partes.....	92

7.1.3	Costo del PLC, sensores y actuadores	93
7.1.4	Costo de mano de obra	93
7.1.5	Costo por remuneraciones.....	94
7.2	Análisis de rentabilidad.....	95
7.2.1	Valor actual neto (VAN)	95
7.2.2	Tasa interna de rendimiento (TIR)	95
7.2.3	Cálculo de los indicadores financieros.....	95
CÁPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		97
8.1	Conclusiones.....	97
8.2	Recomendaciones.....	98
Referencias		99
Apéndice A. Planos mecánicos de la máquina de llenado.		101
Apéndice B. Transiciones del diagrama GRAFCET		112
Apéndice C. Diagrama de escalera del programa.....		114
Anexo A. Coeficiente de pérdida KL para expansiones repentinas, contracciones repentinas y accesorios de tuberías.....		116
Anexo B. Densidad y viscosidad de líquidos comunes		117
Anexo C. Tabla de fuerzas de los cilindros doble efecto Camozzi.....		118
Anexo D. Tabla de juntas tóricas AS-568.....		119

Índice de figuras

Figura 2.1: Sistema volumétrico [6].	9
Figura 2.2: Sistema gravimétrico [6].	10
Figura 2.3: Sistema de llenado de pistón de desplazamiento positivo [5].	11
Figura 2.4: Sistema de llenado a presión [5].	12
Figura 2.5: Sistema de vigas caminantes [8].	13
Figura 2.6: Sistema de rodillos motorizados [8].	14
Figura 2.7: Sistema de transporte por cadena [8].	14
Figura 2.8: Máquina de transferencia en línea [8].	15
Figura 2.9: Máquina de transferencia rotativas [8].	16
Figura 2.10: Cinco niveles de automatización y control [2].	17
Figura 2.11: Ejemplo de un diagrama lógico en escalera [2].	20
Figura 2.12: Símbolos de componentes de lógica y secuencia utilizados en diagramas de escalera [2].	21
Figura 3.1: Metodología de desarrollo de la solución (Elaboración propia).	23
Figura 3.2: Diagrama funcional de un sistema dosificador de líquidos y viscosos que surge de una descomposición funcional: a) caja negra; b) refinamiento que muestra subfunciones (Elaboración propia).	32
Figura 3.3: Descomposición de subfunción a) Dosificar fluido; b) Controlar proceso (Elaboración propia).	33
Figura 3.4: Árbol de clasificación para subproblema: Trasladar fluido (Elaboración propia).	37
Figura 3.5: Árbol de clasificación para subproblema: Direccional fluido (Elaboración propia).	37

Figura 3.6: Árbol de clasificación para subproblema: Dispensar fluido (Elaboración propia).....	38
Figura 3.7: Árbol de clasificación para subproblema: Colocar envase (Elaboración propia).....	38
Figura 3.8: Tabla de combinación y boceto del concepto 1 (Elaboración propia).	39
Figura 3.9: Tabla de combinación y boceto del concepto 2 (Elaboración propia).	40
Figura 3.10: Tabla de combinación y boceto del concepto 3 (Elaboración propia).	41
Figura 3.11: Tabla de combinación y boceto del concepto 4 (Elaboración propia).	42
Figura 3.12: Tabla de combinación y boceto del concepto 5 (Elaboración propia).	43
Figura 3.14: Concepto AD (Elaboración propia).....	47
Figura 4.1: Esquema del sistema de llenado (Elaboración propia).	56
Figura 4.2: Parámetros del sello para calcular el apriete (Elaboración propia).	67
Figura 4.3: Parámetros del sello para calcular el estiramiento (Elaboración propia).	68
Figura 4.4: Parámetros del sello para calcular el relleno de ranura (Elaboración propia).....	69
Figura 4.5: simplificación del sistema del transportador (Elaboración propia).....	72
Figura 5.1: Controlador lógico programable seleccionado [13].	77
Figura 5.2: Diagrama de flujo del sistema (Elaboración propia).....	78
Figura 5.3: Diagrama GRAFCET (Elaboración propia).	80

Índice de tablas

Tabla 3.1: Necesidades del sistema automático de llenado y su importancia relativa.	26
Tabla 3.2: Lista de métricas para el sistema de llenado. La importancia relativa de cada métrica y las unidades de la métrica.	27
Tabla 3.3: Matriz de necesidades-métricas.....	28
Tabla 3.4: Comparación de algunas métricas con sistemas de llenado comerciales.	30
Tabla 3.5: Especificaciones objetivo.	31
Tabla 3.6: Búsqueda externa para los subproblemas críticos identificados.	34
Tabla 3.7: Lluvia de ideas para la generación de fragmentos de concepto.....	35
Tabla 3.8: Conceptos de fragmentos generados a partir de la búsqueda externa e interna.	36
Tabla 3.9: Criterios de selección y sus necesidades correspondientes.	45
Tabla 3.10: Matriz de selección de conceptos.....	46
Tabla 3.11: Escala de calificaciones de criterios para evaluar conceptos.....	48
Tabla 3.12: Matriz de evaluación de conceptos.	49
Tabla 4.1: Cálculo de carrera para cilindros.....	51
Tabla 4.2: Verificación de cumplimiento de precisión.....	52
Tabla 4.3: Velocidades en las diferentes secciones del sistema.....	57
Tabla 4.4: Datos necesarios para el cálculo de pérdidas mayores.	62
Tabla 4.5: Velocidad lineal del transportador con distintos reductores.....	71
Tabla 5.1: Características de las alternativas de los controladores.....	75
Tabla 5.2: Matriz de evaluación de los controladores programables.....	76
Tabla 5.3: Entradas y salidas del PLC.	79

Tabla 6.1: Factores de influencia para la prueba 1.	82
Tabla 6.3: Factores de influencia para la prueba 1.	83
Tabla 6.4: Mediciones de tiempos de llenado para el envase de 125 ml.	85
Tabla 6.5: Mediciones de tiempos de llenado para el envase de 250 ml.	85
Tabla 6.6: Mediciones de tiempos de llenado para el envase de 500 ml.	86
Tabla 6.7: Velocidad de llenado promedio para los tres tipos de envases utilizados.	86
Tabla 6.8: Verificación del cumplimiento de la especificación de velocidad.	87
Tabla 6.9: Mediciones masa dispensada para el envase de 125 ml.	88
Tabla 6.10: Mediciones masa dispensada para el envase de 250 ml.	88
Tabla 6.11: Mediciones masa dispensada para el envase de 500 ml.	89
Tabla 6.12: Verificación del cumplimiento de la especificación de precisión.	89
Tabla 7.1: Costos de materiales.	91
Tabla 7.2: Costos de accesorios y partes.	92
Tabla 7.3: Costo del PLC, sensores y actuadores.	93
Tabla 7.4: Costo de mano de obra.	93
Tabla 7.5: Costos por remuneraciones.	94
Tabla 7.6: Costos totales del proyecto.	94
Tabla 7.7: Flujo de operaciones del proyecto.	95
Tabla 7.8: Indicadores financieros.	96

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Entorno del proyecto

La empresa Cosmético Yambal es una empresa costarricense fundada en 1976 la cual se especializa en el desarrollo de productos de cuidado personal, los cuales son fluidos con distintas de viscosidades. Algunos de los productos que se desarrollan son: loción bronceadora, alcohol en gel, bloqueador solar, crema y aceite para masajes, shampoo, distintos tipos de cremas, jabón de manos, menticol, entre otros.

Durante el 2019, el actual dueño, Eduardo Sánchez, tuvo la oportunidad de comprar las acciones de la empresa y el edificio. Desde entonces se le viene dando un giro al negocio debido al momento de dificultad que afrontaba la empresa. A lo largo del año y medio que tiene la nueva administración, la situación del negocio ha mejorado [1].

Dentro del cambio de rumbo de la empresa, también ha surgido la necesidad de automatizar los procesos, para lo cual se quiere crear una línea de ensamblaje para optimizar los diferentes procesos de producción [1].

1.2 Definición del problema

1.2.1 Generalidades

Debido al cambio de estrategia de la empresa, se quiere mejorar la competitividad de esta, lo cual se lograría aumentando la productividad eficientemente, de manera que se reduzcan los costos de operación y se mejore la disponibilidad de los productos.

La optimización del proceso de producción se quiere aplicar a la línea de producción que afecta mayormente la productividad de la empresa, la línea de

llenado de productos embotellados. Actualmente el proceso de llenado se realiza de manera manual, lo que limita la capacidad de producción de los productos, adicionalmente el proceso se ve afectado porque se cuenta con únicamente un sistema de llenado para varios productos de diferentes viscosidades. Por otro lado, ya que el método es manual, el proceso de llenado suele ser agotador para los empleados, lo que puede afectar su desempeño.

1.2.2 Justificación

El presente proyecto busca provocar efectos positivos en la empresa Cosméticos Yambal al automatizar el proceso de llenado de productos. La automatización permite incrementar la productividad, ya que se incrementa la tasa de producción, además, se reducen costos de operación y los tiempos de fabricación, que es el tiempo transcurrido entre el pedido y la entrega del producto [2]. Otro factor importante es que se eliminan las tareas manuales, lo que permite mejorar el nivel general de las condiciones de trabajo de la empresa [2]. También permite que el proceso se realice con mayor consistencia y sea conforme a las especificaciones de calidad [2].

La automatización tiene la ventaja de mejorar la competitividad de la empresa debido a que mejora en la calidad de los productos, permite aumentar las ventas y mejora las relaciones laborales [2].

Por otro lado, el desarrollo de este tipo de sistemas se ajusta a la meta general del país de incorporar el enfoque de la revolución industrial 4.0 para organizar los procesos productivos en el sector industrial del país [3].

1.2.4 Síntesis del problema

Existe la necesidad de optimizar el proceso de llenado de productos de la empresa Cosméticos Yambal, con el fin de mejorar la competitividad y aumentar la productividad de empresa.

1.3 Enfoque de la solución

La solución propuesta al problema en este proyecto está orientada al diseño de sistemas mecatrónicos, este diseño integra conocimientos de distintas áreas de la ingeniería para proporcionar una solución integral, inteligente, flexible y funcional.

En primera instancia se propone la realización de una investigación detallada y exhaustiva acerca de las tecnologías desarrolladas en sistemas de llenado automático. Este estudio permitirá conocer el estado actual de la técnica del tema y será base para determinar el método a emplear por el sistema para realizar el llenado de la manera más adecuada.

Una vez que se conoce el método y la tecnología a utilizar por el sistema se procede a hacer el diseño mecánico del sistema que permita incorporar todos los elementos requeridos. Este diseño estará representado por planos mecánicos.

Después, se diseñará el sistema de control que permita automatizar el proceso de llenado, primeramente, se deben seleccionar los sensores y actuadores adecuados para realizar la medición de variables y aplicar las acciones requeridas. Luego, por medio de programación, se realiza el control que permita realizar todas las acciones de control para automatizar el proceso.

Una vez que se cuente con el diseño del sistema de control y el sistema mecánico, estos se integrarán a manera de crear un prototipo funcional que permita verificar el funcionamiento del sistema de llenado automático.

1.4 Objetivo General

Diseñar un sistema de llenado automático para fluidos líquidos y viscosos, que permita aumentar la productividad en un 25% de la empresa Cosméticos Yambal.

1.5 Objetivos Específicos

- **Determinar** la alternativa de solución del método de dosificado de fluidos más conveniente que se ajuste a la variedad de productos y envases a utilizar por la empresa.
- **Diseñar** los elementos mecánicos necesarios para la construcción del sistema de llenado automático para fluidos líquidos y viscosos.
- **Diseñar** el sistema de control automático que permita garantizar un llenado de productos embotellados confiable y preciso.
- **Plantear** un conjunto de pruebas de experimentos que permita verificar el cumplimiento de las especificaciones del sistema.
- **Realizar** el análisis económico y financiero de la solución propuesta a través de los indicadores TIR y VAN.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta un estudio acerca de los sistemas de llenado de distintos productos. Este estudio presenta características y parámetros asociados a este tipo de sistemas. También se mencionan los sistemas y máquinas de llenado que se utilizan comúnmente en la industria.

2.1 Líneas de producción automáticas

Las líneas de producción automáticas se refieren al uso de dispositivos mecanizados y automáticos para desarrollar diversas tareas de ensamblaje en una línea de producción. Usualmente estas líneas están conformadas por estaciones de trabajo que se conectan por medio de un sistema de transferencia de piezas [8].

El estado de las piezas es monitoreado por sensores que establecen el estado del sistema, con base en el estado del sistema se realizan las acciones del proceso. Este tipo de sistemas se considera cuando se tiene una alta demanda de producto y un diseño estable del producto [8]. Se conforman principalmente por dos partes: las máquinas automáticas que realizan las acciones sobre el producto y los dispositivos de transferencia que movilizan el producto a través de las estaciones de trabajo.

2.2 Sistemas de llenado

Los sistemas de llenado son utilizados en plantas de procesos y en otros sectores de la industria para embalar materiales o productos. Los productos pueden estar en diversas formas: sólidos (cemento, detergente en polvo), líquidos de diferentes viscosidades (cremas, aceites, agua) [6]. Dependiendo del tipo de producto a dosificar, los recipientes pueden ser diferentes, desde una bolsa pequeña hasta botellas.

Existen distintas clasificaciones para las máquinas de llenado, por ejemplo, completamente automática o semi automática. Estas máquinas pueden utilizar

distintos métodos para dosificar, algunas pueden usar un medidor de flujo mientras que otras pueden usar una bomba dosificadora. Pueden dosificar en términos de volumen, o de peso [6].

Este tipo de sistemas son importantes debido a que aceleran las tareas de llenado o dosificado de productos, lo que permite ahorrar tiempo, debido al uso eficiente de éste, lo que conlleva a una reducción de costos en el negocio porque se reducen las horas de trabajo. Por naturaleza, estas máquinas son multitarea, lo que permite realizar otras funciones como lavado o sellado de envases. Una máquina abre la posibilidad de implementar otras tareas. Además, las tecnologías de automatización modernas han reducido la necesidad de mano de obra en los sistemas de empaquetado, factor adicional para reducir los costos [6].

2.2.1 Generalidades de las máquinas de llenado

La posibilidad de empacar distintos materiales es amplia, esto significa que existe una gran variedad de formas, tamaños, cantidades o incluso propiedades de los materiales. Debido a la gran ventana de posibilidades, normalmente estos sistemas se ajustan específicamente a las necesidades del cliente. Algunas de las características estándar en las cuales se desarrollan estas máquinas para usos específicos son [6]:

1. Materiales de construcción: Por lo general se utiliza acero inoxidable porque se ajusta a la mayoría de los productos, además de ser un material robusto con una gran vida útil.
2. Sistemas de visión: Son los sistemas que extraen características deseadas a través de imágenes digitales. Estos sistemas utilizan sensores para prevenir atascos en la línea de producción y verificar la posición de los envases a la hora de realizar el ciclo de llenado. Puede variar mucho entre distintas líneas de producción.
3. Interfaz de operador con sistema de control: Por lo general los sistemas de llenado no son muy complicados, por lo que usan controles simples, usualmente usan un sistema de control centralizado con una interfaz de

operador. Para varias líneas de producción, los controles se conectan a un sistema centralizado de seguimiento y supervisión.

4. Pantalla de recetas: En muchas industrias las líneas de producción son utilizadas para llenar distintos productos. La pantalla de recetas permite controlar todas las configuraciones asociadas a un producto específico.
5. Ajustes: Corresponde a la facilidad de realizar cambios entre tamaños de contenedores, los cambios rápidos ayudan a maximizar el tiempo de funcionamiento de la máquina para lograr ciclos de producción eficientes.

2.2.2 Características de las máquinas de llenado

Las siguientes características se encuentran normalmente en los sistemas de llenado [6]:

1. Medidores de flujo.
2. Válvula de llenado.
3. Control inteligente.
4. Pantalla gráfica con pantalla táctil.
5. Ajustes del producto desde la interfaz del operador.
6. Ajustes sin herramientas y cambio rápido.
7. Ruta de flujo de productos.
8. Alojamiento de una variedad de contenedores en forma y tamaño.
9. Fácil ajuste de volumen.
10. Fácil cambio de envases y productos.
11. Amplio rango de tamaño de productos.
12. Llenado confiable y de alta precisión.
13. Capacidad de manejar un amplio rango de viscosidades.
14. Llenado sin residuos.

2.2.3 Parámetros de llenado

Existen muchos parámetros que se asocian directamente con el proceso de llenado, que afectan la estética y la calidad del producto, estos parámetros son [5]:

1. Tipo de equipo de llenado.
2. Temperatura del producto durante el llenado.
3. Mezcla del producto antes del llenado.
4. Velocidad de llenado.
5. Tamaño de la boquilla.
6. Viscosidad y fluidez del producto.
7. Gravedad específica.
8. Velocidad de enfriamiento.
9. Tipo de contenedor y apertura de llenado.

2.2.4 Sistemas y máquinas de llenado comunes

Dentro de los sistemas de llenado con medidores de flujo para líquidos, se encuentran comúnmente los sistemas volumétricos y gravimétricos [6].

Sistema volumétrico: Corresponde a los sistemas de llenado que pueden necesitar la ayuda de un controlador de lotes, como el que se muestra en la figura 2.1, que muestra una llenadora automática de botellas, este sistema dispensa por medios volumétricos. El controlador puede ser un PLC programado para la aplicación o un sistema de control integrado inteligente.

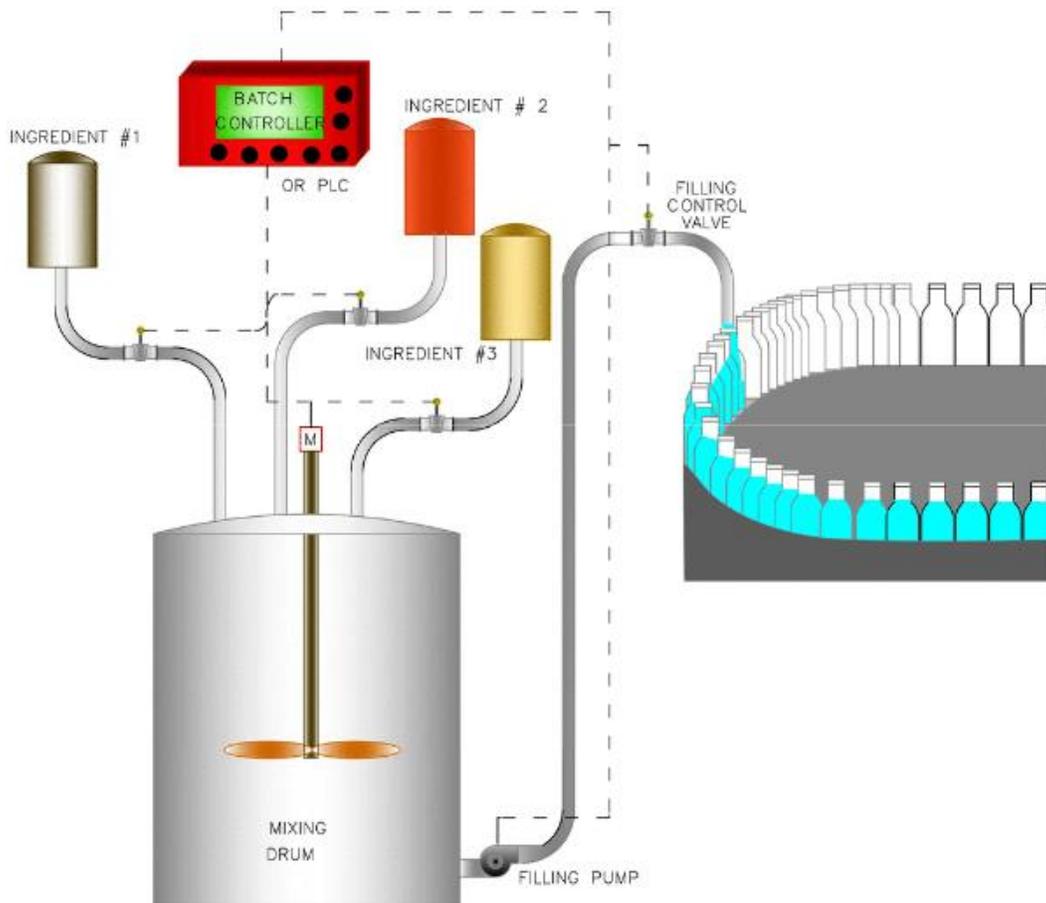


Figura 2.1: Sistema volumétrico [6].

Sistema gravimétrico: Este sistema utiliza medidores de flujo gravimétricos, como básculas o pesas de plataforma, estos no requieren compensación de densidad y al mismo tiempo puede dar el volumen y la densidad. La ventaja de este sistema con respecto al volumétrico es que es mucho más preciso para dosificar pequeñas cantidades de materiales, como los materiales en polvo en las industrias farmacéuticas o los cereales alimentarios.

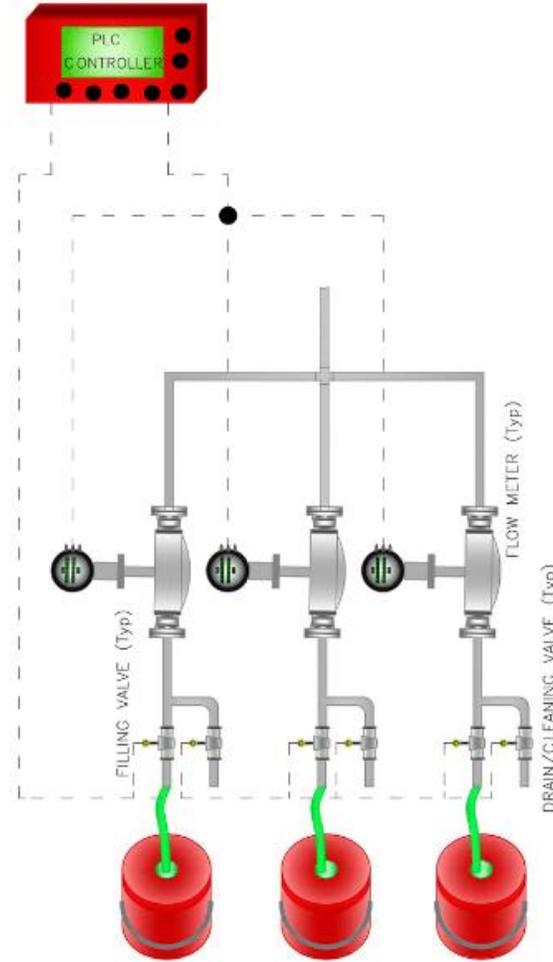


Figura 2.2: Sistema gravimétrico [6].

Por lo general, los sistemas volumétricos son los más comunes para los procesos de llenado, por esta razón, estos son los sistemas que se desarrollan. El llenado de productos cosméticos se puede clasificar en tres categorías: llenadora de pistón de desplazamiento positivo, llenadora de bomba de engranajes y llenadora a presión [5].

2.2.4.1 Llenadora de pistón de desplazamiento positivo

Este método es muy utilizado en la industria cosmética, es capaz de manejar productos con diferentes viscosidades. Se utiliza para llenar productos con viscosidad media a alta. Es un método muy preciso que logra un llenado consistente. Por lo general, este sistema posee una válvula rotativa que permite

direccionar el fluido cuando se mueve el pistón, de esta manera, el producto se mueve hacia el pistón durante la succión, y hacia la boquilla durante la descarga [5].

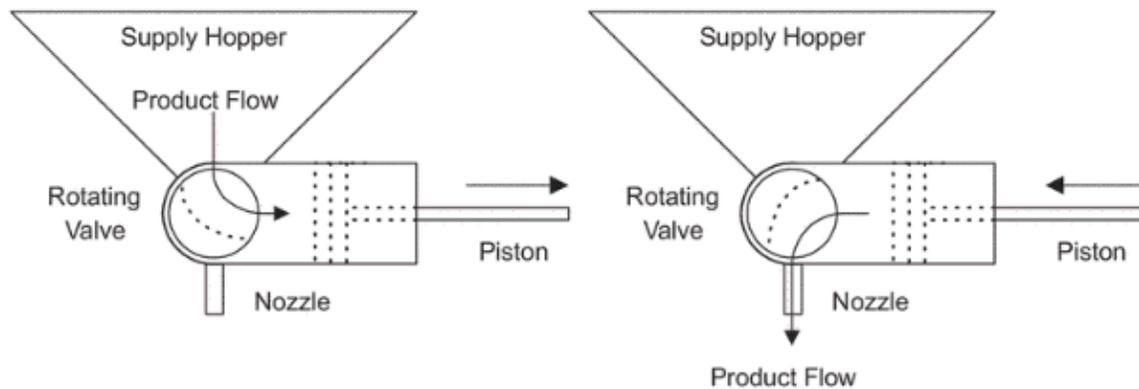


Figura 2.3: Sistema de llenado de pistón de desplazamiento positivo [5].

2.2.4.2 Llenadora de bomba de engranajes

Es un sistema que funciona de manera constante en cualquier dirección del flujo y proporciona una descarga constante. Este método utiliza dos engranajes que generan succión en un lado para conducir el producto hacia la boquilla. Normalmente el llenado se basa en un ciclo de tiempo, el producto circula, luego se dispensa, y luego circula [5].

Esta llenadora es utilizada con productos menos viscosos y que fluyen fácilmente. No se recomienda utilizar con una tolva, ya que el caudal puede cambiar a medida que cambia el nivel del producto durante el llenado [5].

2.2.4.3 Llenadora a presión

Este método empuja el producto utilizando una bomba o sistema de gravedad, o por medio de un sistema de vacío al contenedor. Cuando el llenado llega a la altura establecida, el producto adicional es direccionado hacia el lugar de almacenamiento por medio de la boquilla por reflujo y nivel. En este sistema el producto fluye continuamente a través de la boquilla, y evita la salida por la boquilla cuando no se está llenando [5].

Un sensor de control monitorea el cambio en la contrapresión, una vez que el producto ha llenado el envase y ha verificado la punta de detección de la línea de control, el sensor detiene el flujo de producto a la boquilla [5]. Este método es utilizado para productos de baja viscosidad.

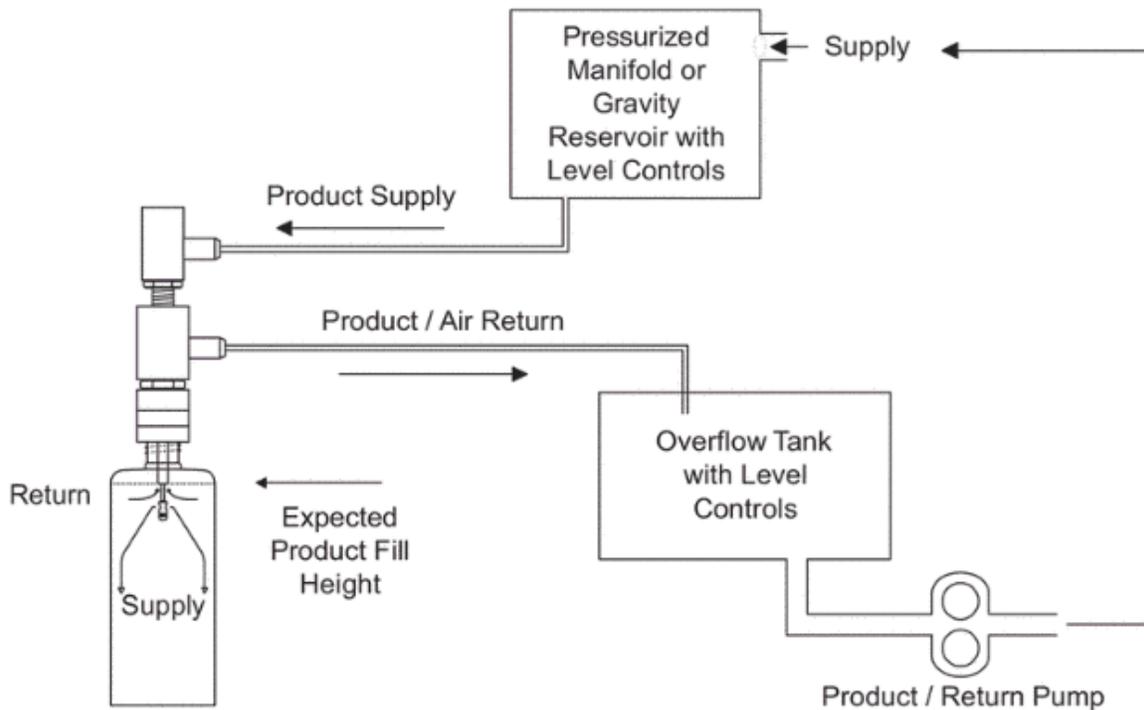


Figura 2.4: Sistema de llenado a presión [5].

2.3 Mecanismos de transferencia en líneas de producción

Los mecanismos de transferencia son los encargados de mover las piezas de trabajo de una estación hacia otra (o de una máquina a otra) en las líneas de producción. Estos mecanismos son controlados comúnmente por sensores que monitorean las piezas de trabajo. Estas máquinas pueden incorporar varios sistemas automáticos para realizar trabajos sobre las piezas o para inspeccionarlas para garantizar el cumplimiento de especificaciones [8]. Existen dos tipos de mecanismos:

1. Mecanismos de transferencia lineal.
2. Mecanismos de transferencia rotativo.

2.3.1 Mecanismos de transferencia lineal

Proveen movimiento lineal para transferir las piezas de trabajo en las líneas de producción, son utilizadas en conjunto con máquinas en línea [8]. A continuación, se mencionan algunos mecanismos de transferencia lineal que son comúnmente usados:

Sistema de vigas caminantes: Las piezas son levantadas de su ubicación por medio de una barra de transferencia y llevada hasta la siguiente estación de trabajo. Luego la barra coloca las piezas en su lugar respectivo en la estación de trabajo, para finalmente, retraerse y prepararse para el siguiente ciclo de transferencia [8]. Este sistema se utiliza para transportar piezas cilíndricas, como ejes de motor, tubos y tuberías. Tiene la ventaja de tener un menor costo el chasis de la máquina, además, se adapta muy bien a máquinas de alta velocidad.

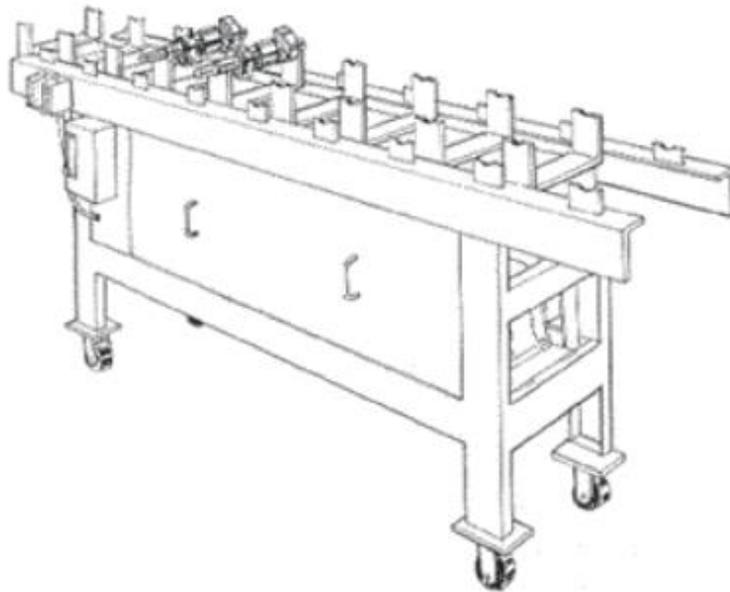


Figura 2.5: Sistema de vigas caminantes [8].

Sistema de transportador de rodillos motorizado: Este tipo de sistema se utiliza en líneas de flujo automatizadas. Puede ser utilizado para mover varios tipos de partes y son flexibles, robustos y altamente eficientes [8].

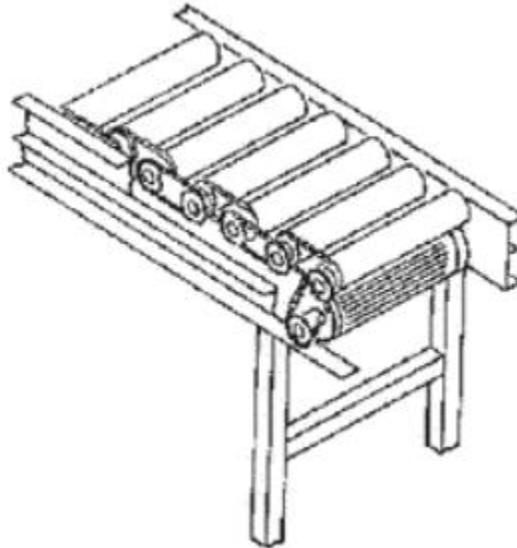


Figura 2.6: Sistema de rodillos motorizados [8].

Sistema de transporte por cadena: Utiliza una cadena para transportar los materiales de trabajo, se puede utilizar para movimiento continuo, intermitente o no sincronizado [8].

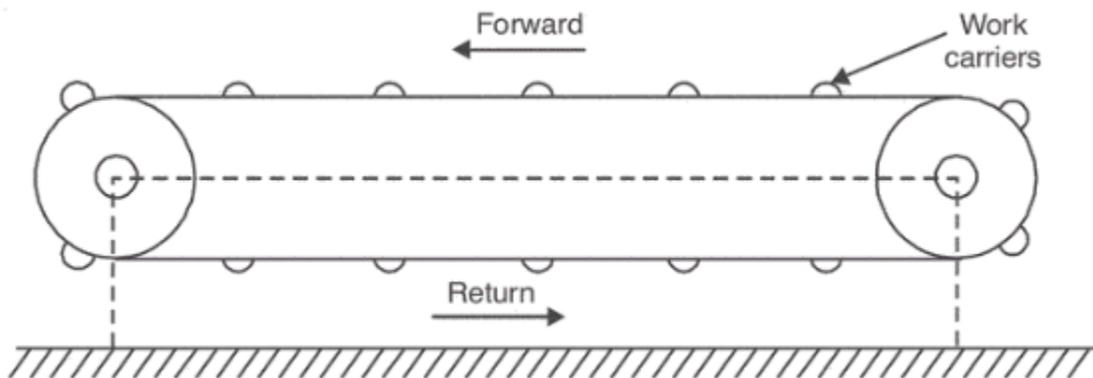


Figura 2.7: Sistema de transporte por cadena [8].

2.3.2 Máquinas de transferencia en línea

Consisten una serie de estaciones de trabajo automáticas ubicadas a lo largo de un sistema de transferencia lineal, como se muestra en la figura 2.8. Tienen una estación de carga en un extremo, y una estación de descarga en el otro extremo [8]. Todo tipo de operaciones se pueden llevar a cabo en las distintas estaciones.

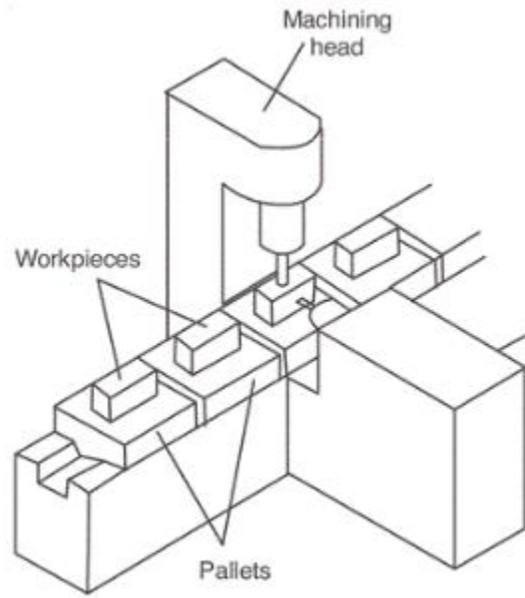


Figura 2.8: Máquina de transferencia en línea [8].

2.3.3 Mecanismos de transferencia rotativo

En los mecanismos de transferencia giratoria, las piezas de trabajo se mantienen fijos en una mesa giratoria continua. Existen varios métodos para indexar una mesa circular a las estaciones de trabajo, algunos métodos son piñón y cremallera, trinquete y el mecanismo de ginebra.

2.3.4 Máquinas de transferencia rotativas

En este tipo de máquinas, las piezas de trabajo se ubican sujetas en accesorios tipo paleta como se muestra en la figura 2.9. El movimiento de la mesa puede ser continuo o intermitente, estas máquinas alimentan automáticamente múltiples estaciones de trabajo que se encuentran alrededor de la mesa. Lo cual agiliza significativamente el proceso de producción [8].

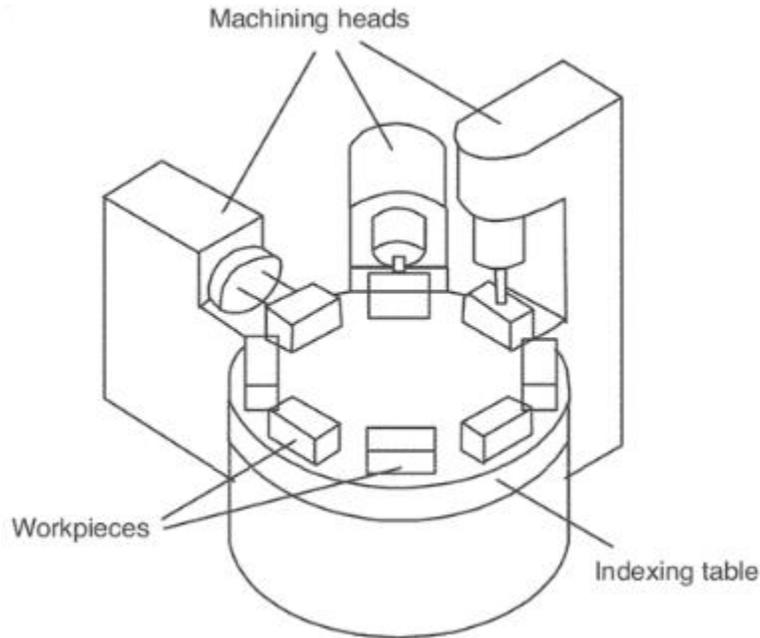


Figura 2.9: Máquina de transferencia rotativas [8].

2.4 Tecnologías de automatización y control

La automatización se refiere al uso de equipo mecanizado para realizar tareas físicas sin necesidad de la supervisión de trabajadores humanos [2].

2.4.1 Elementos básicos de los sistemas de automatización

Los sistemas automáticos consisten en tres elementos básicos:

Poder para realizar el proceso y operar el sistema, se requiere energía para impulsar el proceso y los controles, la principal fuente de energía es la electricidad debido a sus múltiples ventajas. Otras fuentes de energía alternativas son: combustibles fósiles, energía solar, energía proveniente del movimiento del agua, y viento [2].

Un programa de instrucciones para dirigir el proceso, cada parte requiere pasos de procesamiento que son únicos para esa pieza. Estos pasos se llevan a cabo durante el ciclo de trabajo, durante un ciclo de trabajo se puede realizar más de una pieza [2].

Un sistema de control para accionar las instrucciones, que es el encargado de ejecutar el programa de instrucciones. Es el encargado de que el proceso cumpla su función establecida [2].

2.4.2 Niveles de automatización

Los cinco niveles de automatización y su jerarquía se muestran en la figura 2.10.

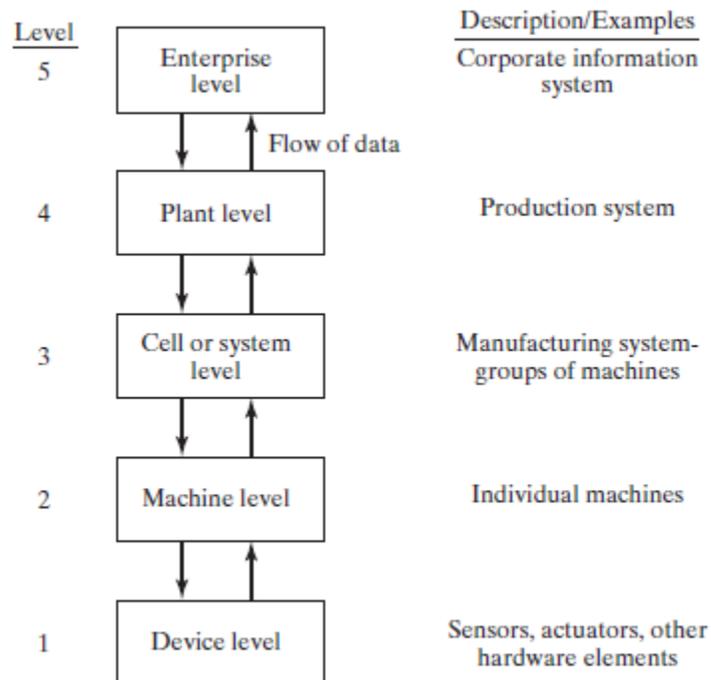


Figura 2.10: Cinco niveles de automatización y control [2].

1. Nivel de dispositivo: Es el nivel más bajo, incluye los sensores actuadores y lo demás componentes de hardware que componen la máquina.
2. Nivel de máquina: Corresponde a la incorporación de hardware a nivel de dispositivos en máquinas individuales.
3. Nivel de celda o sistema: Este nivel opera bajo instrucciones del nivel de planta, corresponde a un grupo de máquinas o estaciones de trabajo conectadas.

4. Nivel de planta: Es el nivel de sistemas de producción, recibe instrucciones del sistema de información corporativo y las traduce a planes operativos de producción.
5. Nivel empresarial: Es el nivel más alto, consiste en un sistema de información corporativo, el cual se ocupa de todas las funciones necesarias para administrar la empresa.

2.4.3 Componentes de hardware para la automatización y control de procesos

Los componentes requeridos para implementar la automatización son: sensores para medir variables del proceso continuas y discretas, actuadores para controlar parámetros de procesos continuos y discretos, dispositivos para convertir señales analógicas en señales digitales y viceversa, y dispositivos de entrada y salida para las señales discretas [2].

2.4.3.1 Sensores

Para recopilar datos de procesos, existe una gran variedad de sensores. Un sensor es un transductor, ya que convierte una variable física de una forma a otra, generalmente convierte una variable, como lo puede ser la temperatura, presión desplazamiento, entre otros, en una forma más conveniente, normalmente tensión con el propósito de medir el estímulo [2]. Los sensores se dividen en dos tipos, analógicos y digitales, los sensores analógicos producen una señal analógica continua que varía según cambia la variable analógica medida, y los sensores digitales que solo suelen tener dos posibles estados en la salida.

2.4.3.2 Actuadores

En los sistemas de control industrial, los actuadores son dispositivos de hardware que convierten la señal del controlador en un cambio en un parámetro físico, que por lo general es mecánico, como cambio en la posición o en la velocidad. La mayoría de los actuadores se clasifica en tres categorías, eléctrico, hidráulico y neumático, siendo los eléctricos los más comunes; utilizan electricidad para realizar el cambio en el parámetro físico. Los actuadores hidráulicos utilizan fluidos

hidráulicos para amplificar la señal de control del controlador, y los actuadores neumáticos utilizan aire comprimido como fuerza motriz [2].

Los convertidores de señal son utilizados ya que las señales del proceso, que pueden ser analógicas deben convertirse en señales digitales para ser utilizadas por un computador, y las señales digitales generadas por el computador deben convertirse en señales analógicas para accionar los actuadores analógicos.

2.4.4 Control discreto y controladores lógicos programables

Los sistemas de control de procesos discretos tratan con parámetros y variables que son discretas y cambian su valor en momentos discretos en el tiempo. típicamente estos valores son binarios, 1 o 0. Las variables binarias están asociadas a señales de entrada y de salida del controlador, las señales de entrada se generan mediante sensores binarios (como interruptores y fotosensores). Las señales de salida son generadas por el controlador para operar el proceso en respuesta a las señales de entrada y en función del tiempo, estas señales de salida encienden motores válvulas y otros actuadores binarios del proceso [2]. El control discreto se puede dividir en dos categorías, control lógico, que se relaciona con los cambios impulsador por eventos en el sistema, y control de secuencia, que se relaciona con los cambios impulsador por el tiempo en el sistema.

2.4.4.1 Diagramas lógicos en escalera

Es un método gráfico para programar los controladores que es análogo a los circuitos eléctricos utilizados en el control lógico secuencial. En los diagramas de escalera los componentes se muestran a lo largo de las líneas horizontales conectados a dos rieles verticales (como se muestra en la figura 2.11). Los componentes de este método son: contactos, que representan las entradas, y cargas, conocidas como bobinas, que representan las salidas [2].

Las entradas pueden ser interruptores, contactos de relé, sensores binarios, temporizadores y otros dispositivos de contacto binario. Las cargas pueden ser

motores, lámparas, solenoides, alarmas, entre otros. Las entradas se encuentran a la izquierda de cada línea y las salidas a la derecha [2].

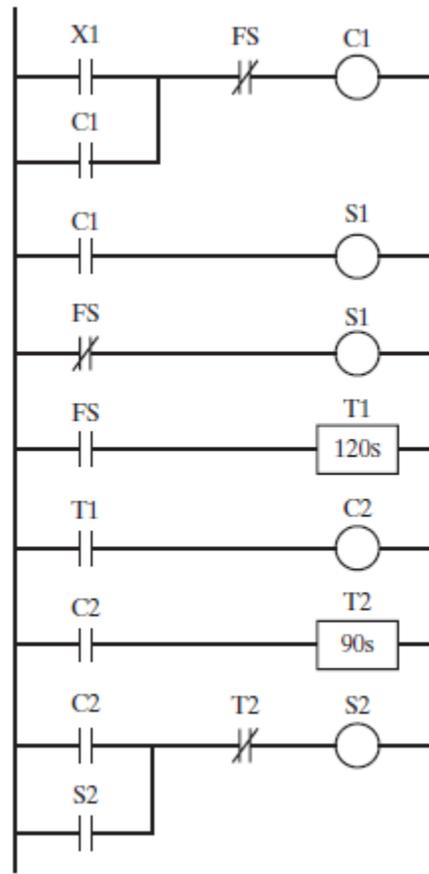


Figura 2.11: Ejemplo de un diagrama lógico en escalera [2].

Los símbolos comunes de componentes de lógica y secuencia utilizados en diagramas de escalera se muestran en la figura 2.12. Hay dos tipos de contactos, normalmente abierto y normalmente cerrado, los cuales cambian de estado cuando son activados y vuelven al primer estado cuando se desactivan. Las salidas se encienden o apagan por el sistema de control lógico. El temporizador requiere una señal de activación y un valor de tiempo, que corresponde al tiempo de espera para activar la salida una vez que la señal de activación se enciende. El contador requiere una señal de tren de pulsos que se cuenta, y una señal de *reset* para reiniciar el contador (poner en cero el contador), el valor del contador se almacena en la memoria para ser utilizado en el proceso [2].

Ladder symbol	Hardware component
(a) 	Normally open contacts (switch, relay, other ON/OFF devices)
(b) 	Normally closed contacts (switch, relay, etc.)
(c) 	Output loads (motor, lamp, solenoid, alarm, etc.)
(d) 	Timer
(e) 	Counter

Figura 2.12: Símbolos de componentes de lógica y secuencia utilizados en diagramas de escalera [2].

2.4.4.2 Controladores lógicos programables

Un controlador lógico programable (PLC por sus siglas en inglés) se puede definir como un controlador basado en una microcomputadora que utiliza instrucciones almacenadas en la memoria para implementar funciones lógicas, de secuencia, temporización, conteo y aritmética a través de entradas y salidas, analógicas o digitales, para controlar máquinas y procesos [2].

Los controladores están conformados por componentes básicos: un procesador, una unidad de memoria, una fuente de energía y un módulo de entradas y salidas [2]. La programación del controlador se puede realizar por medio lenguaje gráfico y lenguaje basado en texto. El lenguaje gráfico incluye diagrama lógico en escalera (antes mencionado), diagrama de bloques de función (FBD por sus siglas en inglés), donde las funciones se componen de bloques operativos, cada bloque tiene una o más entradas y una o más salidas, y en el bloque se realizan ciertas operaciones. Por último, se tienen los gráficos de funciones secuenciales (SFC por sus siglas en inglés, también llamados GRAFCET), donde se muestra gráficamente

las funciones secuenciales de un sistema automatizado como una serie de pasos y transiciones de un estado del sistema al siguiente [2].

El lenguaje de programación basado en texto incluye listas de instrucciones (IL por sus siglas en inglés), el cual es una forma de ingresar el diagrama de escalera utilizando lenguaje informático de bajo nivel, y texto estructurado (ST por sus siglas en inglés), que es un lenguaje informático de alto nivel [2].

CAPÍTULO 3: DESARROLLO CONCEPTUAL

3.1 Metodología

El abordaje del problema descrito se lleva a cabo siguiendo la metodología de desarrollo de conceptos presentada en [4], el desarrollo de la metodología de diseño se realizará hasta la selección de conceptos. El proceso consta de cuatro etapas principales, las cuales son: identificación de las necesidades, establecimiento de las especificaciones, generación de conceptos y selección del concepto.

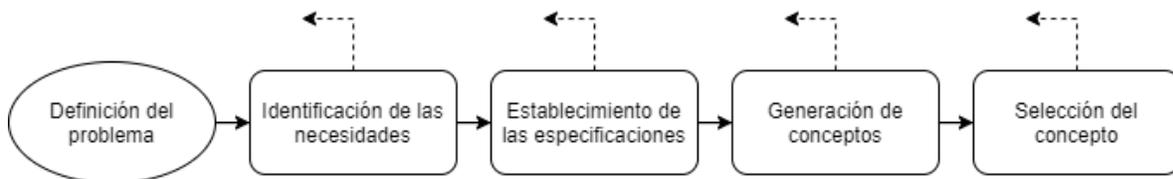


Figura 3.1: Metodología de desarrollo de la solución (Elaboración propia).

La identificación de necesidades consiste en cuatro pasos, primero se recopilan datos acerca de las necesidades percibidas por los clientes, luego estos datos se interpretan de manera que se reescriben como enunciados escritos, posteriormente se establece la importancia relativa para cada necesidad y finalmente se reflexiona acerca de los resultados obtenidos.

El establecimiento de especificaciones permite explicar con detalles precisos y medibles lo que el producto tiene que hacer y consisten en una métrica y un valor [4]. El proceso consiste en determinar una lista de métricas que satisfagan las necesidades establecidas, posterior a esto se realizará una evaluación comparativa de productos similares existentes en el mercado, lo que permite obtener rangos de valores de las métricas del producto. A partir de esta evaluación y de otras consideraciones, se establecerán las especificaciones meta ideales y

marginalmente aceptables del producto. Finalmente se realizará una reflexión de los resultados obtenidos.

En la etapa de generación de conceptos se seguirá un método de cinco pasos, en las cuales se debe considerar el conjunto de necesidades y especificaciones objetivo. El primer paso es aclarar el problema, esto se hace por medio de una descomposición de este en problemas más sencillos, lo que permite centrarse en los subproblemas críticos y además facilita la generación de fragmentos de conceptos. Se realizará una búsqueda externa e interna de fragmentos de conceptos para los subproblemas encontrados, la cual es importante expandir ya que el conjunto de fragmentos corresponde al espacio de posibles soluciones al problema. Después se realizará una exploración sistemática de las posibles soluciones, para esto se crean árboles de clasificación y tablas de combinación con los fragmentos de concepto encontrados. Finalmente se realizará una reflexión de los resultados obtenidos.

Para la selección del concepto se consideran las soluciones más prometedoras de la etapa anterior. El proceso consiste en cuatro pasos, primero se determinarán los criterios de selección con base en el conjunto de necesidades y especificaciones. Después se realizará un filtrado de conceptos, esto permite reducir de forma rápida la cantidad de opciones y permite mejorarlos [4]. Las soluciones se pueden mejorar realizando combinaciones de las alternativas. Finalmente se realizará una evaluación de conceptos, lo que permite realizar una revisión mucho más detallada de los criterios considerados y permite determinar la propuesta de solución más promisoría.

3.2 Estudio de las necesidades

Para determinar las necesidades que el sistema de llenado debe considerar se llevó a cabo el proceso de cuatro pasos mencionado en la metodología. La recopilación de datos se realizó a través de reuniones con el dueño de la empresa y con dos asesores industriales, en las cuales se definió el problema existente, además se establecieron las necesidades percibidas por el personal de la empresa. Los datos recopilados de las reuniones son analizados e interpretados para ser expresados como enunciados escritos. Posteriormente a cada necesidad se le asigna una importancia relativa. La escala utilizada para la calificación se muestra a continuación.

1. La función es indeseable.
2. La función no es importante.
3. Sería bueno tener esa función.
4. La función es altamente deseable.
5. La función es de importancia crítica.

Finalmente se realiza una reflexión acerca de los resultados obtenidos, de manera que se realizan correcciones y se agregan necesidades que no se consideraron en un inicio. Las necesidades, con su respectiva importancia relativa, se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Necesidades del sistema automático de llenado y su importancia relativa.

Núm.		Necesidad	Importancia
1	El sistema de llenado	llena envases rápidamente.	4
2	El sistema de llenado	tiene alta capacidad de producción.	5
3	El sistema de llenado	almacena gran cantidad de producto.	3
4	El sistema de llenado	permite dosificar distintas cantidades.	5
5	El sistema de llenado	es preciso.	5
6	El sistema de llenado	se adapta a distintos tipos de envases.	4
7	El sistema de llenado	se adapta a distintos fluidos.	5
8	El sistema de llenado	es seguro para el operario.	4
9	El sistema de llenado	es confiable.	3
10	El sistema de llenado	tiene bajo costo.	5
11	El sistema de llenado	tiene una larga vida útil.	4
12	El sistema de llenado	es resistente a la corrosión.	4
13	El sistema de llenado	es de fácil acceso para mantenimiento.	3
14	El sistema de llenado	es fácil de ensamblar.	3
15	El sistema de llenado	es fácil de desensamblar.	3
16	El sistema de llenado	es fácil de mover.	2
17	El sistema de llenado	es fácil de utilizar.	4
18	El sistema de llenado	requiere mínima intervención.	3
19	El sistema de llenado	ocupa poco espacio.	2
20	El sistema de llenado	genera un proceso limpio.	3
21	El sistema de llenado	genera mínimo desperdicio.	3
22	El sistema de llenado	es realista.	5
23	El sistema de llenado	es silencioso.	1
24	El sistema de llenado	tiene consumo de energía óptimo.	4

Fuente: elaboración propia.

3.3 Estudio de las especificaciones

3.3.1 Establecimiento de métricas

A partir de las necesidades del cliente encontradas se deben generar un conjunto de especificaciones que oriente al diseño del sistema, de manera que se satisfagan las necesidades de forma concreta y medible. Estas especificaciones establecen lo que el producto tiene que hacer, y cada una consiste en una métrica y un valor. Las métricas se muestran en la tabla 3.2, las cuales se establecen con base en un análisis de cada una de las necesidades de la tabla 3.1.

Tabla 3.2: Lista de métricas para el sistema de llenado. La importancia relativa de cada métrica y las unidades de la métrica.

Núm. métrica	Núm. necesidad	Métrica	Importancia	Unidades
1	1, 2	Velocidad de llenado	5	bpm
2	2, 3	Capacidad de almacenamiento	4	litros
3	4	Rango de volúmenes	5	ml
4	5	Precisión de dosificación	5	%
5	6	Capacidad de ajuste de boquillas	4	binario
6	7	Fluidos	5	lista
7	8, 9, 20, 21	Confiability	4	subjetivo
8	10	Costo	4	\$
9	11, 12, 13	Vida útil	4	años
10	13, 14, 15	Tiempo de mantenimiento	3	min
11	16	Masa total	2	kg
12	17, 18	Facilidad de uso	4	binario
13	19	Volumen	2	m ³
14	22	Es realista	5	subjetivo
15	23	Nivel de ruido	1	dB
16	24	Consumo eléctrico	4	W/h

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3.3: Matriz de necesidades-métricas.

		Métrica															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Necesidad		Velocidad de llenado	Capacidad de almacenamiento	Rango de volúmenes	Precisión de dosificación	Capacidad de ajuste de boquillas	Fluidos	Confiabilidad	Costo	Vida útil	Tiempo de mantenimiento	Masa total	Facilidad de uso	Volumen	Es realista	Nivel de ruido	Consumo eléctrico
1	Llena envases rápidamente	•															
2	Tiene alta capacidad de producción	•	•														
3	Almacena gran cantidad de producto		•														
4	Permite dosificar distintas cantidades			•													
5	Es preciso				•												
6	Se adapta a distintos tipos de envases					•											
7	Se adapta a distintos fluidos						•										
8	Es seguro para el operario							•									
9	Es confiable							•									
10	Tiene bajo costo								•								
11	Tiene una larga vida útil									•							
12	Es resistente a la corrosión									•							
13	Es de fácil acceso para mantenimiento									•	•						
14	Es fácil de ensamblar										•						
15	Es fácil de desensamblar										•						
16	Es fácil de mover											•					
17	Es fácil de utilizar												•				
18	Requiere mínima intervención												•				
19	Ocupa poco espacio													•			
20	Genera un proceso limpio							•									
21	Genera mínimo desperdicio							•									
22	Es realista														•		
23	Es silencioso															•	
24	Tiene consumo de energía óptimo																•

En la tabla 3.3 se muestra la relación que existe entre las necesidades primarias y las métricas. Se puede observar que todas las necesidades están cubiertas por al menos una métrica, por lo que se puede decir que el diseño tomará en cuenta las necesidades del cliente.

3.3.2 Recopilación de información

Con el fin de determinar las especificaciones se procede a realizar una búsqueda de valores de las métricas establecidas en sistemas de llenado comerciales, esto con el fin de tener un punto de referencia sobre las métricas. La búsqueda de los valores de las métricas en máquinas comerciales es limitada, por lo que solo se muestran las métricas a las que se les encontraron valores.

En la tabla 3.4 se muestran los valores de algunas métricas de seis máquinas existentes, estos valores son utilizados para establecer los valores objetivos del sistema de dosificado.

3.3.3 Establecimiento de valores objetivo

Utilizando como referencia los datos de la tabla 3.4, y realizando estimaciones para algunas de las métricas a las cuales no se les determinó algún valor, se determinan las especificaciones objetivo del sistema de dosificado de fluidos líquidos y viscosos. En la tabla 3.5 se muestran dichos valores.

Tabla 3.4: Comparación de algunas métricas con sistemas de llenado comerciales.

Núm Mét	Métrica	Unidades	Llenadora automática Accurofill™, Capmatic	System F-600, Adelphi	Llenadora de Líquidos Viscosos CWVP1B, CWMaq.	Llenadora volumétrica para viscosos, Pack System	SVF1-32, Accutek	ENVPAST1000, Cetro
1	Velocidad de llenado	bpm	120	50	10 - 18	10 - 20	30	14 - 40
2	Capacidad de almacenamiento	litros	-	-	-	19 a 200	-	55
3	Rango de volúmenes	ml	-	100-5000	50 - 1000	-	60 - 1000	100 - 1000
4	Precisión de dosificación	%	-	0.15	1	-	-	5
5	Capacidad de ajuste de boquillas	binario	Sí	Sí	No	No	No	No
6	Fluidos	lista	Champú, cremas cosméticas, jarabe para la tos, crema de cacahuete salsa, productos alimenticios, pintura, aceites y gel en base a petróleo.	Productos viscosos	-	Shampoo, cremas, pegamentos, salsas, moles, aderezos, mieles, mermeladas, etc	Líquido espumoso, líquido corrosivo, líquido calentado, líquido con partículas	Pastas, grasas, mascarilla capilar, cremas en general, dulce de leche, mantequilla de mani, manteca, cuajada, miel, ceras en general, químicos de alta viscosidad, yogures, etc.
8	Costo	\$	-	-	2561	-	-	1773
11	Masa total	kg	-	-	-	-	30,4	-
12	Facilidad de uso	binario	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
13	Volumen	m ³	-	1 x 0,8 x 1,4	1,4 x 0,5 x 1	-	1,22 x 0,37 x 0,33	1,37 x 0,3 x 0,67

Fuente: elaboración propia

Tabla 3.5: Especificaciones objetivo.

Núm. métrica	Núm. necesidad	Métrica	Impor-tancia	Unidades	Valor marginal	Valor ideal
1	1, 2	Velocidad de llenado	5	bpm	<10	<120
2	2, 3	Capacidad de almacenamiento	4	litros	<19	<200
3	4	Rango de volúmenes	5	ml	100 - 1000	50 - 1000
4	5	Precisión de dosificación	5	%	<5	<0,5
5	6	Capacidad de ajuste de boquillas	4	binario	Sí	Sí
6	7	Fluidos	5	lista	Shampoo, cremas, aceite, jabón líquido, menticol.	Shampoo, cremas, aceite, jabón líquido, menticol, yogurt, miel, grasas.
7	8, 9, 20, 21	Confiabilidad	4	subjetivo	-	-
8	10	Costo	4	\$	<2561	<1773
9	11, 12, 13	Vida útil	4	años	4	5
10	13, 14, 15	Tiempo de mantenimiento	3	min	30	20
11	16	Masa total	2	kg	<30,4	<30,4
12	17, 18	Facilidad de uso	4	binario	Sí	Sí
13	19	Volumen	2	m ³	< 1 x 0,8 x 1,4	< 1,37 x 0,3 x 0,67
14	22	Es realista	5	subjetivo	-	-
15	23	Nivel de ruido	1	dB	<75	<62
16	24	Consumo eléctrico	4	W/h	-	-

Fuente: elaboración propia.

3.4 Generación de conceptos

3.4.1 Descomposición funcional

Siguiendo lo expuesto en la metodología, se realiza una *descomposición funcional* del problema. En la figura 3.2-a se muestra la representación de caja negra de la descomposición, donde se tiene como entrada de material el fluido por dosificar y los envases, como señal se tiene el accionamiento manual y los sensores, y la entrada de energía como indefinida. La salida corresponde al producto dosificado en el envase. En la figura 3.2-b se muestra el problema descompuesto en subproblemas más simples que facilitan la búsqueda de fragmentos.

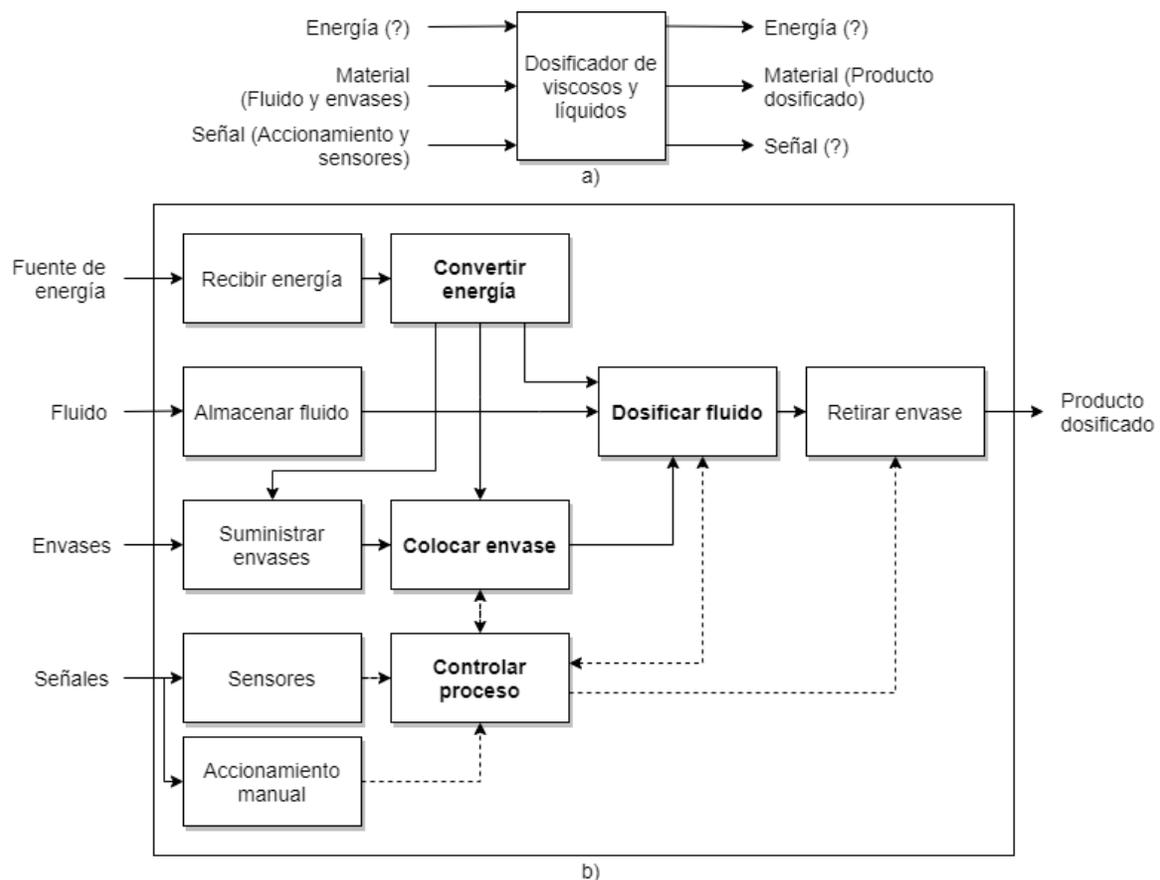


Figura 3.2: Diagrama funcional de un sistema dosificador de líquidos y viscosos que surge de una descomposición funcional: a) caja negra; b) refinamiento que muestra subfunciones (Elaboración propia).

Al realizar un análisis de la descomposición se determinó que el subproblema “dosificar fluido” se puede dividir en 3 subproblemas: “Trasladar fluido”, “Direccionar fluido”, y “Dispensar fluido”. Y el subproblema “Controlar proceso” se puede dividir en 2 subproblemas: “Control automático” y “Control manual”. Esto se presenta en la figura 3.3.

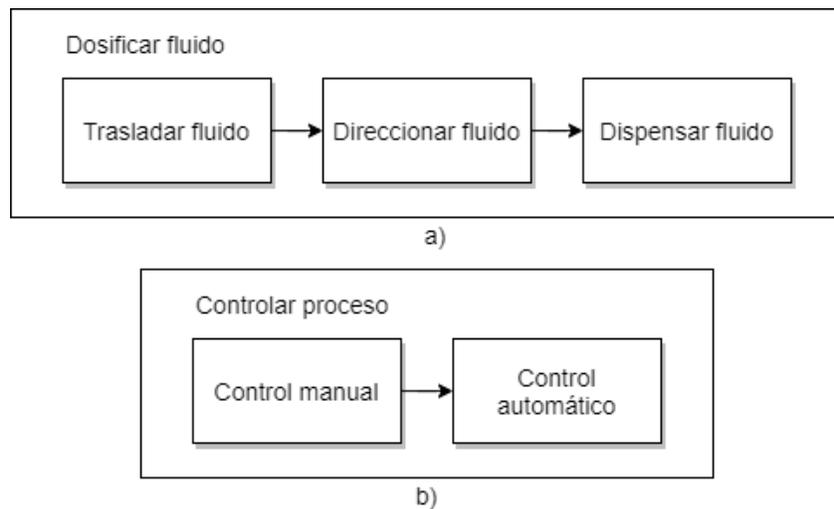


Figura 3.3: Descomposición de subfunción a) Dosificar fluido; b) Controlar proceso (Elaboración propia).

3.4.2 Búsqueda de conceptos

La búsqueda de conceptos se enfoca en los subproblemas más importantes, de manera que los conceptos generados solucionen más eficientemente el problema general. Los subproblemas críticos identificados son: “Convertir energía”, “Dosificar fluido”, “Colocar envase” y “Controlar proceso”.

3.4.2.1 Búsqueda externa

Para la búsqueda externa se indagó exhaustivamente en los procesos de dosificado de fluidos líquidos y viscosos, así como en sistemas de llenado actuales, esta búsqueda se orientó de manera general al problema, de manera que se generaron muchos fragmentos de concepto para tratar de satisfacer cada

subproblema. Posterior a la búsqueda, se clasificaron los conceptos encontrados con sus correspondientes subproblemas. Esto se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Búsqueda externa para los subproblemas críticos identificados.

Subproblema	Fragmento
Dosificar fluido - Trasladar fluido	Pistón de desplazamiento positivo
	Bomba de engranajes
	Vacío / Presión
Dosificar fluido - Direccionar fluido	Pistón neumático para girar válvula
	Válvula rotativa
	Válvula de 3 vías manual
	Válvula de 3 vías neumática
	Válvulas antirretorno
Dosificar fluido - Dispensar fluido	Disco con leva para girar válvula
	Boquillas móviles
	Pistón de bloqueo
	Boquillas ajustables
	Boquilla fija
Convertir energía	Compresor de aire
	Servomotor
	Motor CD
Controlar proceso - Control automático	PLC
	Microcontrolador
	Válvula electroneumática
Controlar proceso - Control manual	Válvulas reguladoras de flujo
	Sensores magnéticos
	Botón de emergencia
	Pedal
Colocar envase	Pistón para empujar
	Pistón para sujetar
	Pistón para detener

Fuente: elaboración propia.

3.4.2.2 Búsqueda interna

Para la búsqueda interna se realizó una lluvia de ideas para encontrar soluciones para los subproblemas determinados, esta actividad se realizó sin limitaciones para tratar de expandir el espacio de soluciones. Los resultados de la lluvia de ideas se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Lluvia de ideas para la generación de fragmentos de concepto.

Dosificar fluido			Convertir energía	Controlar proceso		Colocar envase
Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido		Automático	Manual	
Bomba	Válvula antirretorno	Boquillas ajustables	Compresor	PLC	Botón de inicio	Retenedor
Pistón neumático	Válvula de 3 vías	Bandeja para prevenir goteo	Motor eléctrico	Microcontrolador	Pedal	Piñón y cremallera
Pistón eléctrico	-	Boquillas móviles	-	Válvula electroneumática	Paro emergencia	Pistón para detener envases
Gravedad	-	Boquilla por reflujo y nivel	-	-	-	Motor con pieza para detener envases

Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la lluvia de ideas no fueron tan provechosos debido a que muchas de las ideas generadas coincidían con conceptos encontrados en la búsqueda externa, sin embargo, su realización es importante, ya que puede aportar ideas nuevas y creativas que pueden impulsar el impacto del producto.

Finalmente se realizó una combinación de los fragmentos generados en ambas búsquedas, se llevó a cabo un análisis de los conceptos de cada subproblema de manera que no haya conceptos redundantes. Esta combinación se muestra en la tabla 3.8.

Tabla 3.8: Conceptos de fragmentos generados a partir de la búsqueda externa e interna.

Dosificar fluido			Convertir energía	Controlar proceso		Colocar envase
Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido		Automático	Manual	
Pistón de desplazamiento positivo	Pistón neumático para girar válvula	Boquillas móviles	Compresor de aire	PLC	Válvulas reguladoras de flujo	Pistón para empujar
Bomba de engranajes	Válvula rotativa	Pistón de bloqueo	Servomotor	Microcontrolador	Sensores magnéticos	Pistón para sujetar
Vacío / Presión	Válvula de 3 vías manual	Boquillas ajustables	Motor CD	Válvula electroneumática	Botón de emergencia	Pistón para detener
Gravedad	Válvula de 3 vías neumática	Boquilla fija	-	-	Pedal	Retenedor
-	Válvulas antirretorno	Bandeja para prevenir goteo	-	-	Botón de inicio	Motor con pieza para detener envases
-	Disco con leva para girar válvula	Boquilla por reflujó y nivel	-	-	-	Piñón y cremallera

Fuente: elaboración propia.

3.4.3 Exploración sistemática

El siguiente paso consiste en conocer el espacio de posibles soluciones al problema tras un análisis de los fragmentos encontrados. El análisis se centró en los subproblemas “trasladar fluido”, “direccionar fluido”, “dispensar fluido” y “colocar envase”. El subproblema “convertir energía” no se consideró ya que los conceptos por su naturaleza ya incorporan la manera de transformar la energía. Por otro lado, el subproblema “control de proceso manual” no se sintetiza ya que se determinó que los conceptos son independientes entre sí, y pueden incorporarse sin ningún tipo de problema. Para el subproblema “control de proceso automático”, que corresponde al controlador del sistema, se posterga su análisis para el capítulo 5.

3.4.3.1 Árboles de clasificación

Antes de empezar con las combinaciones de conceptos, se realiza una síntesis de estos, para esto se clasifican y seleccionan los fragmentos de concepto, de manera que se logra disminuir la cantidad de posibles soluciones, y así se logra un enfoque en las soluciones más promisorias. Se realizaron los árboles de combinación que se muestran en las figuras 3.4 a 3.7. Cada uno de estos árboles corresponde a los subproblemas en los cuales se enfocó la búsqueda, los fragmentos que aparecen con trazo más grueso y de color azul fueron los seleccionados para la etapa de combinación.

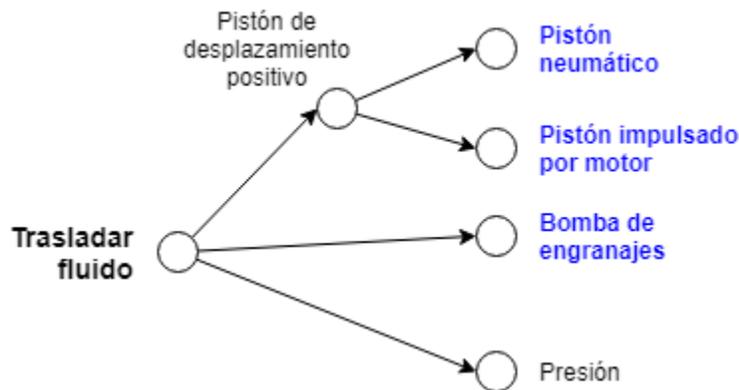


Figura 3.4: Árbol de clasificación para subproblema: Trasladar fluido (Elaboración propia).

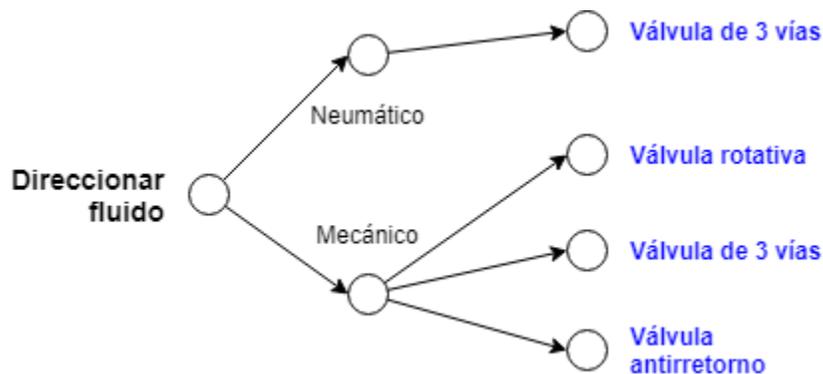


Figura 3.5: Árbol de clasificación para subproblema: Direccionar fluido (Elaboración propia).

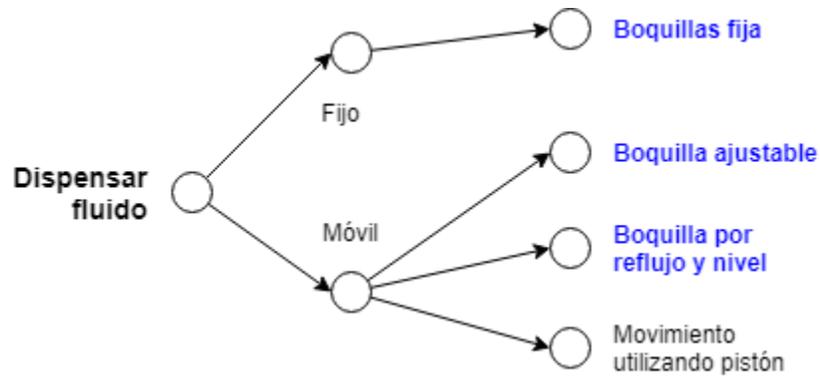


Figura 3.6: Árbol de clasificación para subproblema: Dispensar fluido (Elaboración propia).

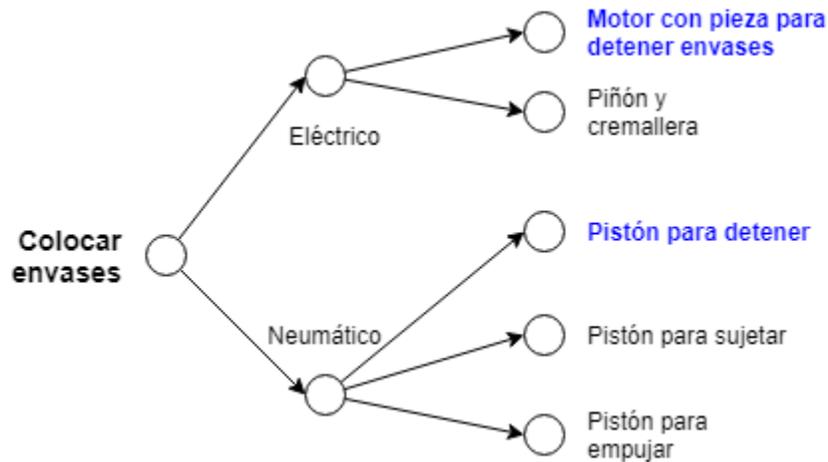


Figura 3.7: Árbol de clasificación para subproblema: Colocar envase (Elaboración propia).

3.4.3.2 Tablas de combinación

A partir de la selección realizada en los árboles de clasificación se realizó la combinación de conceptos. El proceso de combinación consistió en combinar los fragmentos de concepto que más se relacionaran entre sí para generar los conceptos más prometedores, cada fragmento se seleccionó al menos una vez. Esto dio a lugar a cinco alternativas de solución que se desarrollaron preliminarmente como conceptos, estos se muestran en las figuras 3.8 a 3.12.

Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido	Colocar envase
Pistón neumático	Válvula de 3 vías neumática	Boquilla fija	Motor con pieza para detener
Pistón impulsado por motor	Válvula rotativa	Boquilla ajustable	Pistón para detener
Bomba de engranajes	Válvula de 3 vías manual	Boquilla por reflujo y nivel	
	Válvula antirretorno		

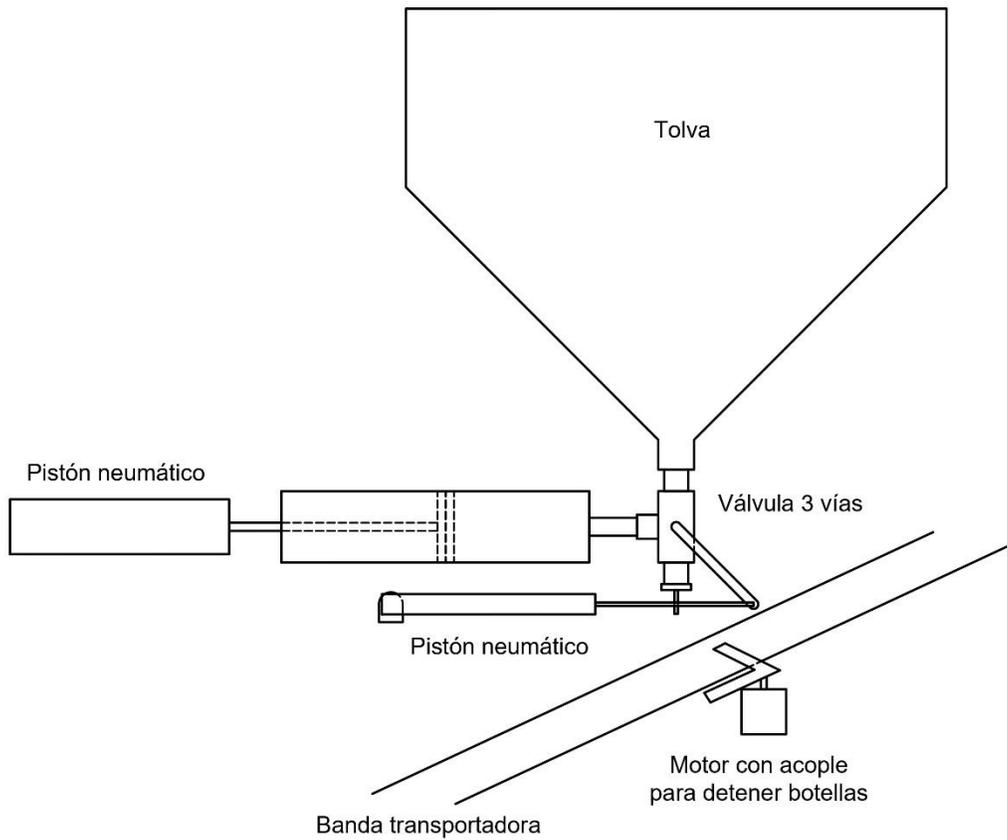


Figura 3.8: Tabla de combinación y boceto del concepto 1 (Elaboración propia).

Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido	Colocar envase
Pistón neumático	Válvula de 3 vías neumática	Boquilla fija	Motor con pieza para detener
Pistón impulsado por motor	Válvula rotativa	Boquilla ajustable	Pistón para detener
Bomba de engranajes	Válvula de 3 vías manual	Boquilla por reflujo y nivel	
	Válvula antirretorno		

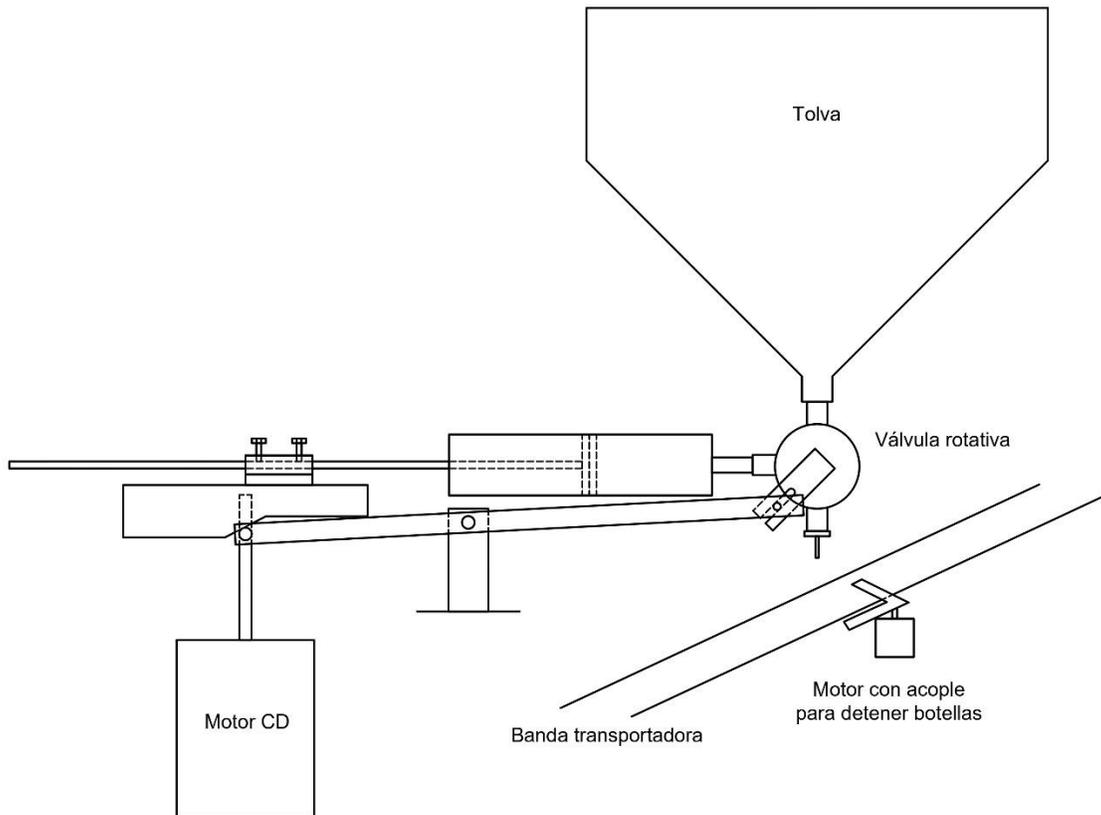


Figura 3.9: Tabla de combinación y boceto del concepto 2 (Elaboración propia).

Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido	Colocar envase
Pistón neumático	Válvula de 3 vías neumática	Boquilla fija	Motor con pieza para detener
Pistón impulsado por motor	Válvula rotativa	Boquilla ajustable	Pistón para detener
Bomba de engranajes	Válvula de 3 vías manual	Boquilla por reflujo y nivel	
	Válvula antirretorno		

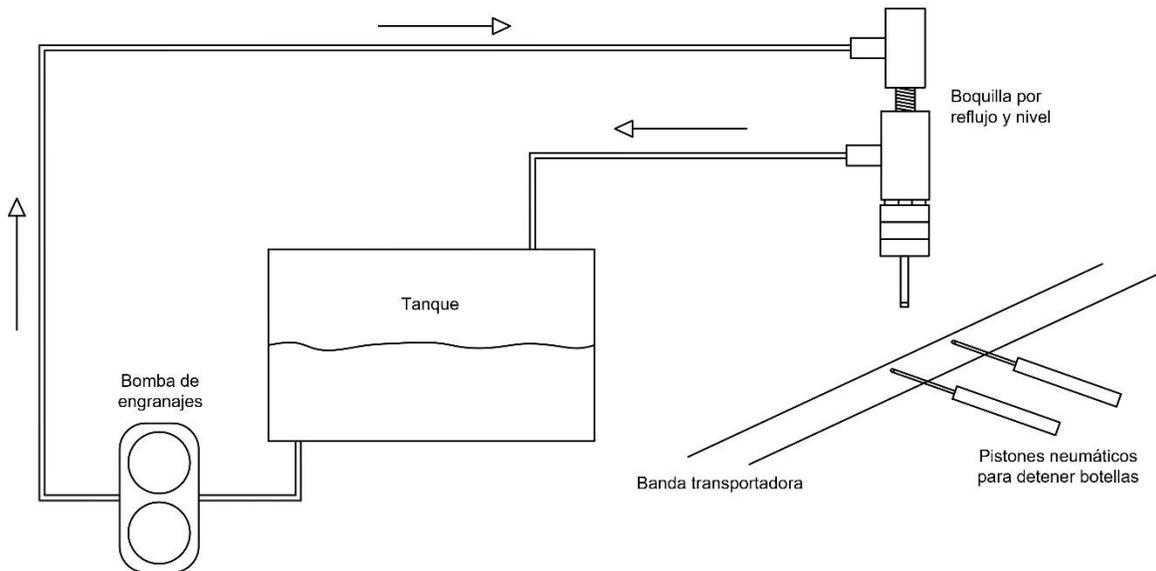


Figura 3.10: Tabla de combinación y boceto del concepto 3 (Elaboración propia).

Es importante notar que debido a la naturaleza del funcionamiento del concepto 3, no se presenta el subproblema “direccionar fluido”, ya que la boquilla por reflujo y nivel se encarga direccionar el fluido hacia el envase o hacia el tanque. Por esta razón la tabla de combinación de la figura 3.10 no incluye ningún fragmento de concepto de la columna referente a ese subproblema.

Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido	Colocar envase
Pistón neumático	Válvula de 3 vías neumática	Boquilla fija	Motor con pieza para detener
Pistón impulsado por motor	Válvula rotativa	Boquilla ajustable	Pistón para detener
Bomba de engranajes	Válvula de 3 vías manual	Boquilla por reflujo y nivel	
	Válvula antirretorno		

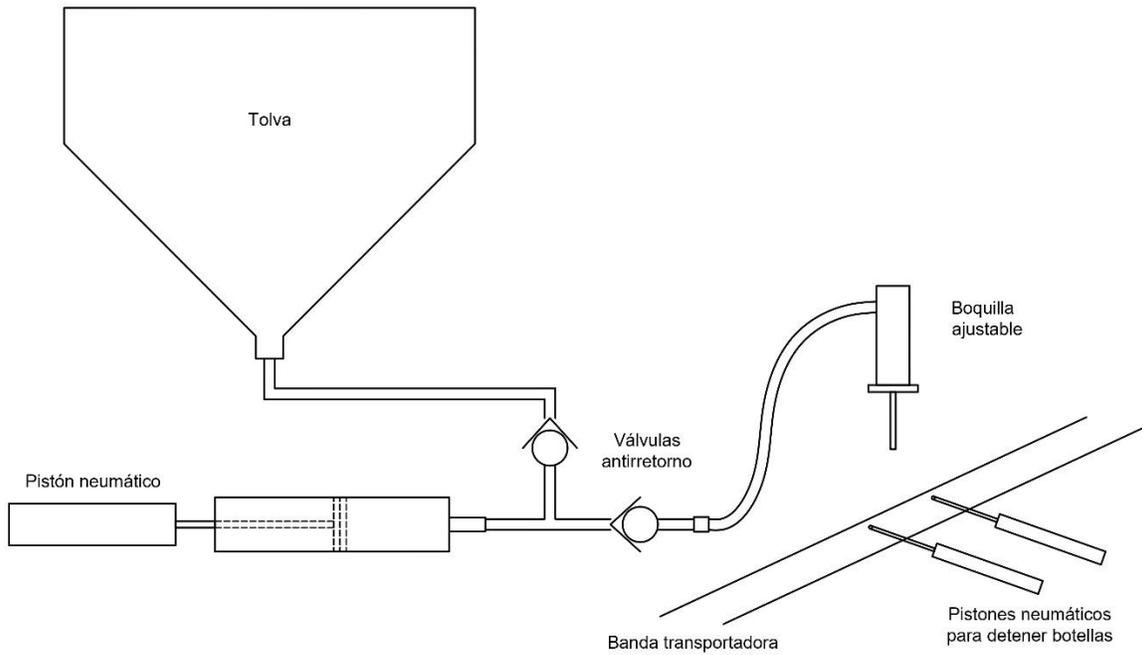


Figura 3.11: Tabla de combinación y boceto del concepto 4 (Elaboración propia).

Trasladar fluido	Direccionar fluido	Dispensar fluido	Colocar envase
Pistón neumático	Válvula de 3 vías neumática	Boquilla fija	Motor con pieza para detener
Pistón impulsado por motor	Válvula rotativa	Boquilla ajustable	Pistón para detener
Bomba de engranajes	Válvula de 3 vías manual	Boquilla por reflujo y nivel	
	Válvula antirretorno		

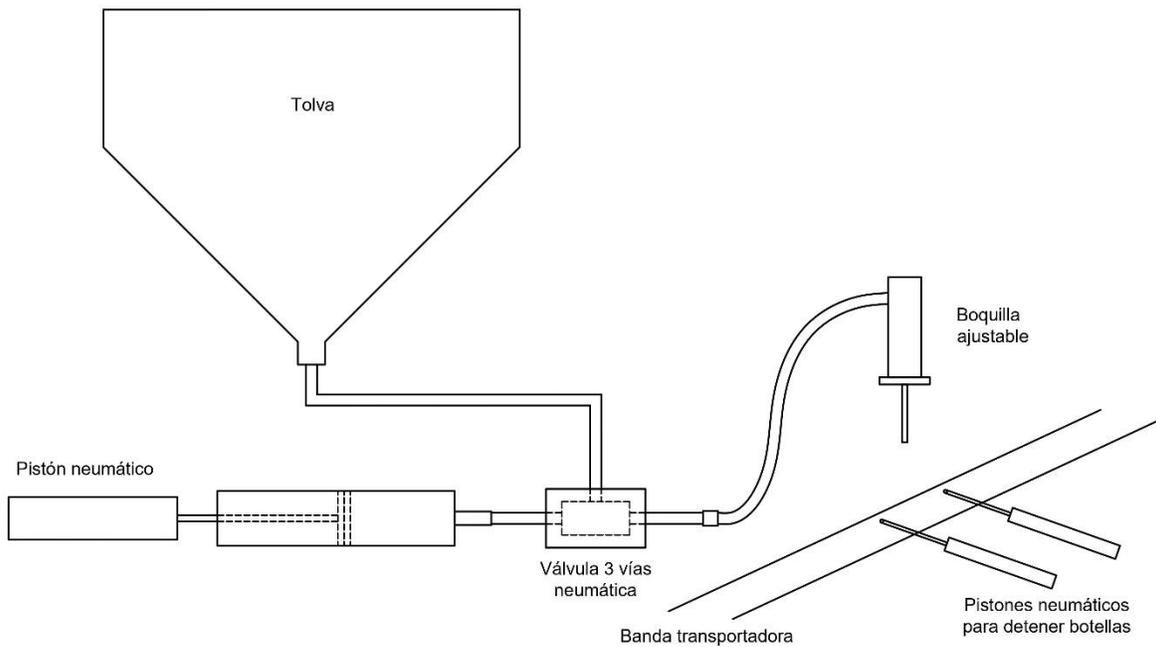


Figura 3.12: Tabla de combinación y boceto del concepto 5 (Elaboración propia).

3.5 Estudio de selección

Para el proceso de selección se utilizan los conceptos generados en la etapa de generación de conceptos. Estos se muestran en la figura 3.13.

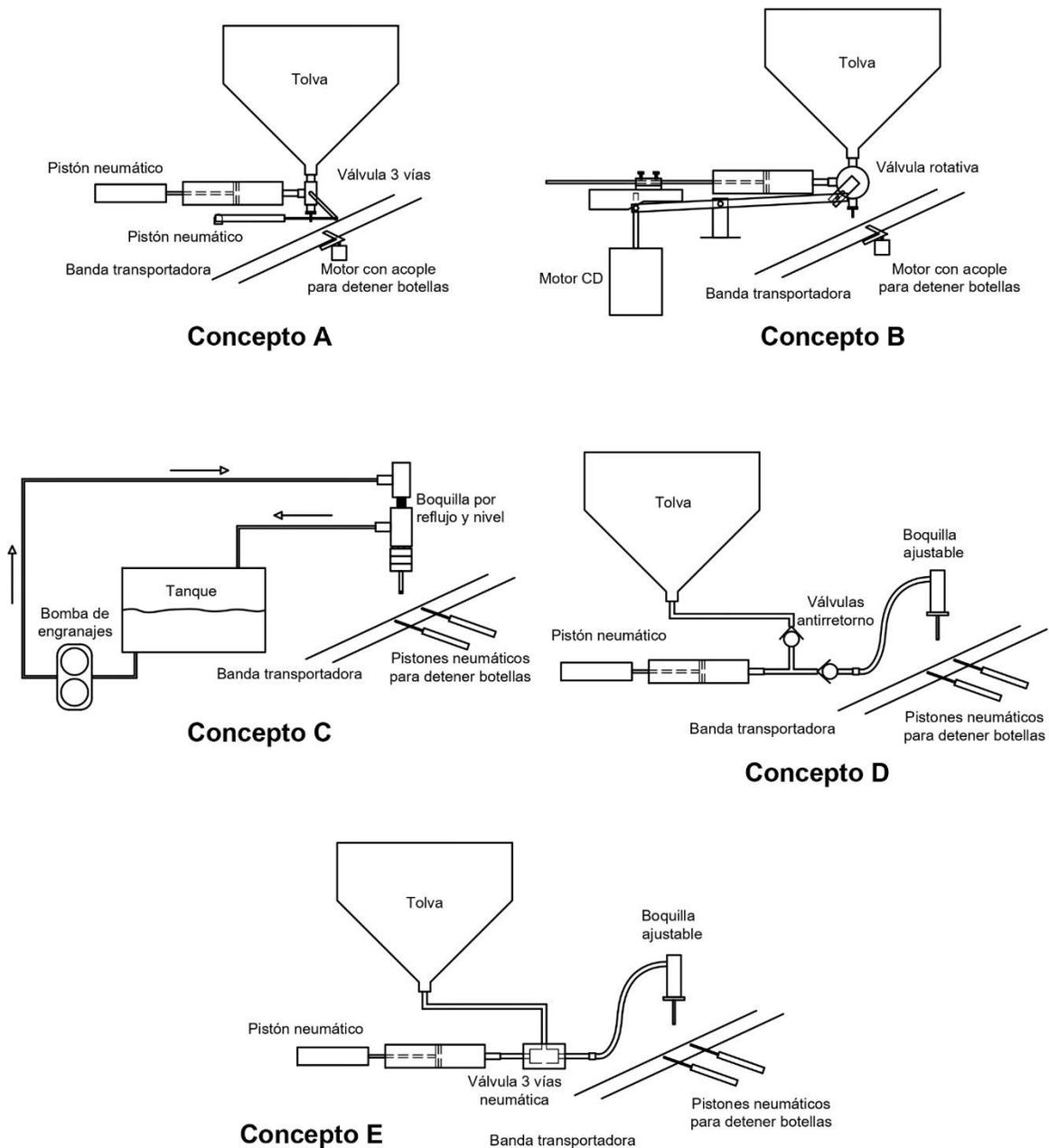


Figura 3.13: Conceptos utilizados para el proceso de selección (Elaboración propia).

3.5.1 Establecimiento de criterio de selección

Para realizar la selección, se debe primeramente establecer una serie de criterios que sirvan como base para calificar los conceptos, estos criterios deben elegirse con base en las necesidades establecidas para el sistema. Los criterios establecidos se muestran en la tabla 3.9, donde también se indica las necesidades que cubren dichos criterios.

Tabla 3.9: Criterios de selección y sus necesidades correspondientes.

Núm.	Criterio	Necesidad
1	Velocidad de llenado	1, 2
2	Precisión de dosificado	5
3	Adaptabilidad a distintos envases	6
4	Funcionalidad con distintos fluidos	7
5	Confiabilidad	8, 9, 20, 21
6	Costo total	10
7	Facilidad de mantenimiento	13, 14, 15
8	Facilidad de uso	17, 18

Fuente: elaboración propia.

Los criterios son utilizados posteriormente para la etapa de filtrado en la matriz de selección de conceptos, y en la etapa de evaluación en la matriz de evaluación de conceptos.

3.5.2 Filtrado de conceptos

Para el proceso de filtrado se selecciona un concepto que funcione como referencia, el cual se utiliza para calificar al resto de conceptos con respecto a cada criterio. La escala utilizada para la calificación consiste simplemente en un “+” para indicar un mejor desempeño con respecto a la referencia, un “-” para indicar un peor desempeño con respecto a la referencia o un “0” para indicar un desempeño igual. Como referencia en este caso se utilizó el concepto D, por lo que este concepto se nombra D (REF) (ver en figura 3.13). Los resultados del filtrado se muestran en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Matriz de selección de conceptos.

Criterios de selección	Conceptos				
	A	B	C	D (REF)	E
Velocidad de llenado	0	0	+	0	0
Precisión de dosificado	0	0	-	0	0
Adaptabilidad a distintos envases	-	-	0	0	0
Funcionalidad con distintos fluidos	+	+	-	0	+
Costo total	+	+	-	0	-
Facilidad de mantenimiento	+	0	+	0	+
Facilidad de uso	0	-	0	0	0
Suma +	3	2	2	0	2
Suma 0	3	3	2	7	4
Suma -	1	2	3	0	1
Evaluación neta	2	0	-1	0	1
Lugar	1	3	5	3	2
Continuar	Sí	Revisar	No	Revisar	Sí

Fuente: elaboración propia.

Las evaluaciones netas muestran cómo en primer lugar se tiene el concepto A, y en segundo lugar el concepto E, estos dos conceptos pasan la prueba de filtrado como los dos más prometedores. Luego se tiene un empate en el tercer lugar con los conceptos B y D, los cuales pasan a una revisión para determinar si pasan la prueba o son utilizados para realizar una combinación de conceptos. Por último, se tiene el concepto C, el cual no pasa el filtrado por lo que es desechado como posible solución.

3.5.3 Mejoras de concepto

Con respecto a la revisión que se debe hacer en los conceptos B y D, se decide que el concepto D pasa el filtrado sin ningún tipo de mejora, y además se realiza una combinación entre los conceptos A y D, de tal manera que utiliza el sistema de dos pistones neumáticos para la succión y dirección, con el sistema de detención de botellas con dos pistones neumáticos y la boquilla ajustable que permita una mayor

adaptabilidad a distintos envases. Este nuevo concepto AD se muestra en la figura 3.14.

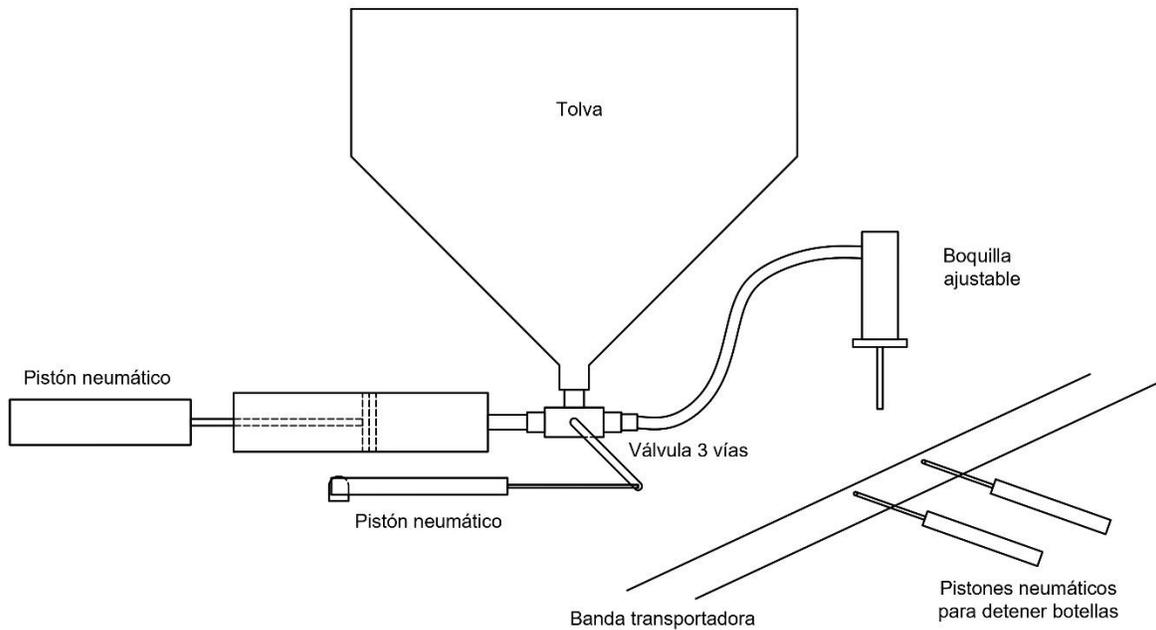


Figura 3.14: Concepto AD (Elaboración propia).

3.5.4 Evaluación de conceptos

Para finalizar, se tiene la etapa de evaluación, en la cual se utilizan los conceptos A, D, AD, y E. La evaluación de conceptos permite realizar una revisión mucho más detallada de los conceptos con base en los criterios establecidos. Esto se logra agregando un peso para cada criterio (representando su importancia), estos pesos son seleccionados con base en consideraciones de diseño y también basándose en la importancia de las necesidades asociadas a cada criterio.

La escala de clasificación consiste en los valores del 1 al 5, los cuales permiten determinar el desempeño del concepto en cada criterio, con base en una referencia. El valor 3 representa la calificación base, ya que equivale a que el desempeño del concepto es igual al de la referencia. Por encima del valor base se hace referencia a un mejor desempeño, y por debajo del valor base se hace

referencia a un peor desempeño. En la tabla 3.11 se muestra la escala de clasificación junto con su descripción.

Tabla 3.11: Escala de calificaciones de criterios para evaluar conceptos.

Calificación	Desempeño
1	Mucho peor que la referencia
2	Peor que la referencia
3	Igual que la referencia
4	Mejor que la referencia
5	Mucho mejor que la referencia

Fuente: elaboración propia.

Una vez definida la escala de clasificación, se le asignan las clasificaciones a cada concepto, para cada criterio, con respecto a una referencia. La referencia en esta etapa es variable, lo que significa que para cada criterio se debe seleccionar un concepto que funcione como base para comparar, esto se hace así para evitar la compresión de escala que se puede generar al utilizar un solo concepto como referencia. Para los criterios “Velocidad de llenado”, “Precisión de dosificado”, “Funcionalidad con distintos fluidos”, “Facilidad de mantenimiento” y “Facilidad de uso” se utiliza como referencia el concepto A. Para el criterio de “Costo total” se utiliza el concepto AD como referencia. Y para el criterio de “Adaptabilidad a distintos envases” se utiliza el concepto E como referencia.

Finalmente, se calculan las evaluaciones netas en cada criterio para cada concepto, lo cual se hace multiplicando el peso del criterio por la nota asignada. Para cada concepto se suman las evaluaciones ponderadas, lo que da como resultado una evaluación neta para cada criterio. La evaluación neta es utilizada para comparar el desempeño de los conceptos y así determinar cuál es el mejor concepto con base en los pesos asignados a los criterios. Como se observa en la tabla 3.12, el concepto con mayor calificación corresponde al concepto D, por lo que este concepto es seleccionado para ser desarrollado.

Tabla 3.12: Matriz de evaluación de conceptos.

		Conceptos							
		A		D		AD		E	
Criterio de selección	Peso	Nota	Evaluación neta	Nota	Evaluación neta	Nota	Evaluación neta	Nota	Evaluación neta
Velocidad de llenado	13%	3	0,39	3	0,39	3	0,39	4	0,52
Precisión de dosificado	12%	3	0,36	4	0,48	3	0,36	3	0,36
Adaptabilidad a distintos envases	20%	2	0,4	3	0,6	3	0,6	3	0,6
Funcionalidad con distintos fluidos	15%	3	0,45	3	0,45	3	0,45	3	0,45
Costo total	15%	4	0,6	4	0,6	3	0,45	2	0,3
Facilidad de mantenimiento	20%	3	0,6	3	0,6	3	0,6	4	0,8
Facilidad de uso	5%	3	0,15	3	0,15	3	0,15	3	0,15
Evaluación neta	100%	2,95		3,27		3		3,18	
Lugar		4		1		3		2	
Continuar		No		Desarrollar		No		No	

Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 4: DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA

4.1 Cálculo de parámetros iniciales

Para iniciar con el diseño del sistema se debe tomar en consideración algunos parámetros, los cuales dependen principalmente de las especificaciones establecidas para el sistema.

Considerando que en la empresa se trabajan envases de 60, 125, 250, 500 y 1000 ml, se debe diseñar el sistema para que pueda dosificar todas estas cantidades de manera precisa. Primero se determina el diámetro y la carrera del cilindro, debido a que existe un amplio rango de volúmenes (60-1000 ml), se decide hacer dos cilindros, uno que permita dosificar de manera precisa los primeros 3 volúmenes, y otro que permita dosificar de manera precisa los últimos 3 volúmenes.

Los valores de diámetros utilizados para el cálculo corresponden a los valores comerciales de tubos (1", 1 ½", 2", 2 ½", 3", 4") y para determinar el largo del cilindro se realizaron los cálculos aumentando cada vez 5 cm hasta 30 cm. Con estos valores se realizó el cálculo del volumen para cada diámetro y carrera, con base en los resultados se determinó que los tubos que satisfacen lo establecido son los tubos de 1 ½" y 3", usando una carrera de 30 cm.

Como se muestra en la tabla 4.1, el cilindro de 1 ½" comprende los volúmenes de 60, 125 y 250 ml, mientras que el cilindro de 3" comprende los volúmenes de 250, 500 y 1000 ml.

Para verificar el cumplimiento de la especificación de la precisión se calcula la incertidumbre de dispensado para cada cilindro, considerando que existe un error de desplazamiento del cilindro de $\pm 0,1$ cm.

Tabla 4.1: Cálculo de carrera para cilindros.

Diámetro (in)	Diámetro interno (cm)	Carrera (cm)	Volumen (ml)
1 ½"	3,51	0	0,00
	3,51	5	48,38
	3,51	10	96,76
	3,51	15	145,14
	3,51	20	193,52
	3,51	25	241,90
	3,51	30	290,29
3"	7,22	0	0,00
	7,22	5	204,71
	7,22	10	409,42
	7,22	15	614,12
	7,22	20	818,83
	7,22	25	1023,54
	7,22	30	1228,25

Fuente: elaboración propia.

$$V_{inc1} = \frac{\pi * \phi^2}{4} * s = \frac{\pi * (3,51 \text{ cm})^2}{4} * 0,1 \text{ cm} = 0,97 \text{ ml}$$

$$V_{inc2} = \frac{\pi * \phi^2}{4} * s = \frac{\pi * (7,22 \text{ cm})^2}{4} * 0,1 \text{ cm} = 4,09 \text{ ml}$$

Esto da como resultado una incertidumbre de dispensado para lo cilindros de 1 ½" y 3" de 0,97 y 4,09 ml respectivamente.

Tabla 4.2: Verificación de cumplimiento de precisión.

Diámetro (in)	Volúmenes (ml)	Error permisible en dosificación 5% (ml)	Incertidumbre de volumen dispensado (ml)	¿Cumple?
1 ½"	60	3	0,97	Sí
	125	6,25	0,97	Sí
	250	12,5	0,97	Sí
3"	250	12,5	4,09	Sí
	500	25	4,09	Sí
	1000	50	4,09	Sí

Fuente: elaboración propia.

Debido a que la incertidumbre en todos los casos es menor al error permisible se logra verificar el cumplimiento de la especificación de precisión de dosificación del 5%. Realizando el cálculo, se puede obtener la precisión de dosificación del sistema (utilizando los menores volúmenes en cada caso).

$$\%Error\ dosificado = \frac{V_{inc1}}{V_{mínimo}} = \frac{0,97\ ml}{60\ ml} = 0,02 = 2\%$$

$$\%Error\ dosificado = \frac{V_{inc2}}{V_{mínimo}} = \frac{4,09\ ml}{250\ ml} = 0,02 = 2\%$$

Actualmente, la capacidad de producción de la empresa ronda alrededor de 4500 productos embotellados al día, considerando un día laboral (8 horas), se obtiene la velocidad de llenado promedio.

$$v_{llenado} = \frac{4500}{8\ horas} * \frac{1\ hora}{60\ min} = 9,4\ bpm$$

Hay que recordar que esta velocidad de llenado es una velocidad de llenado general, debido a que se cuentan con distintos tipos de envases de distintos tamaños,

Por lo que para cumplir con el principal objetivo del proyecto de aumentar la productividad en un 25% se debe tener una velocidad de llenado promedio de 11,75 bpm.

$$bpm_{objetivo} = bpm_{actual} * 1,25 = 9,4 bpm * 1,25 = 11,75 bpm$$

4.2 Cálculos para diseño del sistema de llenado

Para los cálculos del sistema se utiliza el cilindro mayor debido a que es el que dosifica la mayor cantidad de producto (1000 ml).

4.2.1 Desplazamiento del émbolo

Tal como se mencionó anteriormente, el sistema debe dispensar 1000 ml, además el diámetro interno del cilindro es 72,2 cm. Para calcular el desplazamiento del émbolo se utiliza la fórmula del volumen de un cilindro.

$$V = \frac{\pi * \emptyset^2}{4} * s \quad (4.1)$$

Donde: V : Volumen por dispensar (m^3)

\emptyset : Diámetro interno del cilindro (m)

s : Carrera del cilindro (m)

Al sustituir los valores y despejar la carrera del cilindro se tiene:

$$s = \frac{4 * 0,001 m^3}{\pi * (0,0722 m)^2} = 0,2442 m$$

4.2.2 Tiempo de llenado

Como se estableció anteriormente, la velocidad de llenado promedio debe ser al menos de 11.75 bpm, lo que significa que el tiempo de llenado entre botellas debe ser de 5,1 segundos. Como el proceso consiste en una carga y descarga, el tiempo debe dividirse, en este caso se estableció 2 seg para carga, 2 seg para descarga, y el segundo restante se deja para contrarrestar el tiempo de espera entre botella y botella.

4.2.3 Caudal

El caudal es el volumen de un fluido que fluye a lo largo de una sección por unidad de tiempo [9]. por lo que se define de la siguiente manera:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4.2)$$

Donde: Q : Caudal (m^3/s)

V : Volumen (m^3)

t : Tiempo (s)

Como se estableció que el tiempo de carga y descarga era 2 seg, el caudal en ambos casos es el mismo:

$$Q = \frac{0,001 m^3}{2 s} = 0,0005 \frac{m^3}{s}$$

4.2.4 Presión para el dosificado

Es muy importante determinar la presión y la fuerza necesaria para realizar el ciclo de dosificado ya que de eso depende tamaño del pistón neumático. Para realizar los cálculos se utiliza la ecuación general de la energía, la cual es una ampliación de la ecuación de Bernoulli, utilizada para resolver problemas donde se

producen pérdidas y ganancias de energía [9]. En la ecuación 4.3 se presenta la ecuación general de la energía [9].

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A + h_R - h_L = \frac{P_5}{\gamma} + Z_5 + \frac{v_5^2}{2g} \quad (4.3)$$

Donde: P_1 : Presión en el punto 1 (Pa)

P_5 : Presión en el punto 5 (Pa)

γ : Peso específico del fluido (N/m³)

Z_1 : Distancia del punto 1 a la referencia (m)

Z_5 : Distancia del punto 5 a la referencia (m)

v_1 : Velocidad del fluido en el punto 1 (m/s)

v_5 : Velocidad del fluido en el punto 5 (m/s)

h_A : Energía añadida al sistema (Nm/N)

h_R : Energía removida del sistema (Nm/N)

h_L : Energía perdida en el sistema (Nm/N)

g : Gravedad (m/s²)

En la figura 4.1 se muestra un esquema del sistema de llenado, donde se divide el sistema en 5 secciones, cada sección está separada por los distintos diámetros por los cuales atraviesa el fluido. La sección 1 corresponde al cilindro de dosificado que tiene un diámetro de 72,2 mm, La sección 2 hace referencia a la boquilla del cilindro y la sección de la tee, que tienen un diámetro de 35,1 mm. La sección 3 corresponde a la sección que posee un diámetro de 22,4 mm, desde la manguera hasta el final del codo a 90°, la sección 4 se refiere a la válvula check, cuyo diámetro es 35,1 mm. Finalmente, la sección 5 corresponde a la boquilla, que tiene un diámetro de 12 mm.

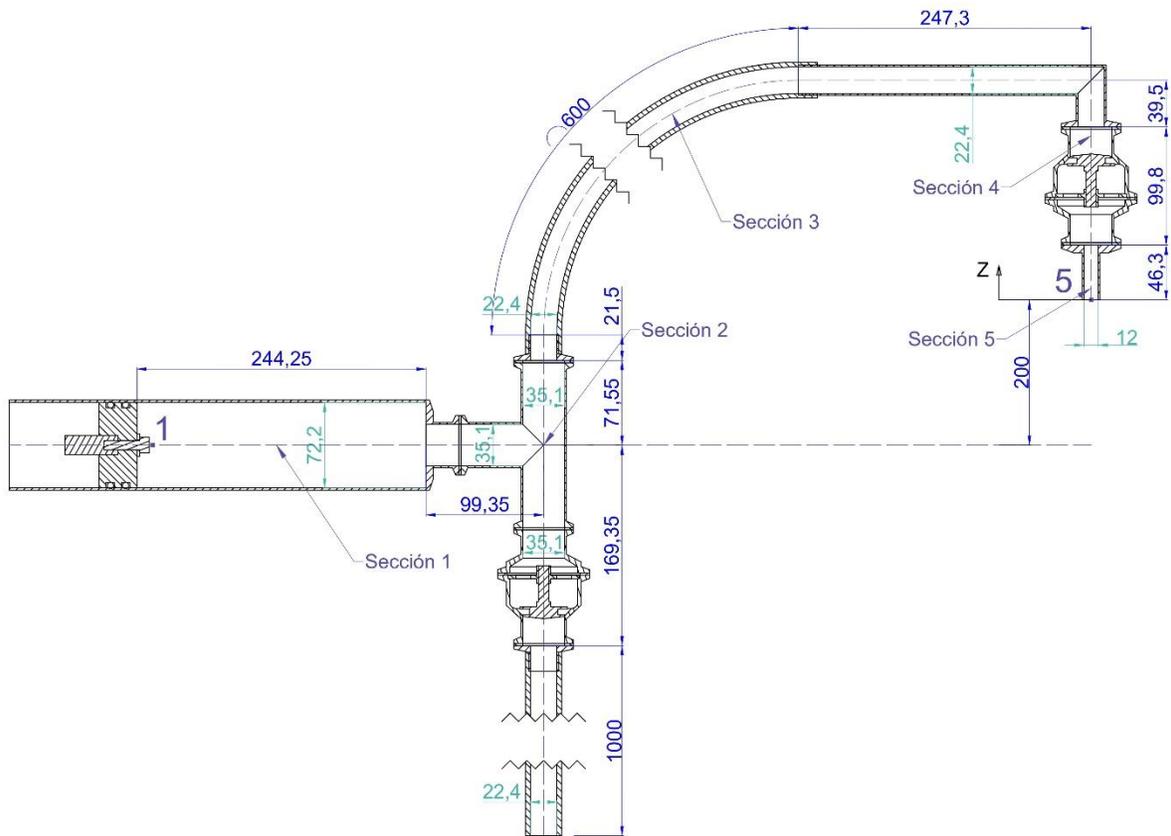


Figura 4.1: Esquema del sistema de llenado (Elaboración propia).

Para este caso, en la ecuación 4.3 h_A y h_R son cero porque no se añade ni remueve energía, la altura Z_5 es cero porque se encuentra en el nivel de la referencia y la presión P_5 se encuentra a presión atmosférica, por lo que su valor es cero. El peso específico se puede sustituir por su equivalente de la ecuación 4.4.

$$\gamma = \rho g \quad (4.4)$$

Donde: ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

Al sustituir la ecuación 4.4 en la ecuación 4.3, y al despejar la presión en el punto 1 se obtiene:

$$P_1 = \rho g * \left(\frac{v_5^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + h_L - Z_1 \right) \quad (4.5)$$

De esta manera se puede determinar la presión en el cilindro, primero se deben obtener las velocidades en cada tramo, así como las pérdidas menores y mayores del sistema.

4.2.5 Velocidades del fluido en las distintas secciones

Para el cálculo de la velocidad del fluido en cada sección se utiliza la ecuación 4.6 [9]. En este caso se muestra el procedimiento detallado para el punto 1 y el punto 5.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (4.6)$$

Donde: Q : Caudal (m^3/s)

A : Área transversal por la que circula el fluido (m)

La velocidad en el interior del cilindro y en la boquilla se calcula de la siguiente manera utilizando la ecuación 4.6:

$$v_1 = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d_{i1}^2} = \frac{4 * 0,0005 \text{ m}^3/s}{\pi * (0,0722 \text{ m})^2} = 0,1221 \text{ m/s}$$

$$v_5 = \frac{Q}{A} = \frac{4Q}{\pi d_{i5}^2} = \frac{4 * 0,0005 \text{ m}^3/s}{\pi * (0,012 \text{ m})^2} = 4,42 \text{ m/s}$$

Las velocidades del resto de las secciones se muestran en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Velocidades en las diferentes secciones del sistema.

Sección	Diámetro (m)	Caudal (m^3/s)	Velocidad (m/s)
1	0,0722	0,0005	0,1221
2	0,0351	0,0005	0,5167
3	0,0254	0,0005	0,9867
4	0,0351	0,0005	0,5167
5	0,012	0,0005	4,420

Fuente: elaboración propia

4.2.6 Pérdidas menores en el sistema

Las pérdidas menores son pérdidas de energías presentes en tuberías las cuales son proporcionales a la carga de velocidad del fluido que fluye por una ampliación o contracción de la sección, o a través de una codo o válvula [9]. Estas pérdidas se representan por medio de la ecuación 4.7.

$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (4.7)$$

Donde: K : Coeficiente de resistencia (adimensional)

v : Velocidad del flujo promedio donde se produce la pérdida (m/s)

g : Gravedad (m/s²)

El coeficiente de resistencia se puede obtener de tablas para distintos tipos de accesorios de tubería, y para expansiones y reducciones repentinas de tuberías se utilizan gráficos que relacionan la razón de los diámetros con el coeficiente de resistencia. En el anexo A se presenta una tabla para accesorios de tuberías y un gráfico para contracciones repentinas para determinar los coeficientes de resistencia [10].

Para el caso de cuando ocurre el proceso de dosificado hay siete lugares donde se producen pérdidas menores. Hay que tener en cuenta que para los cambios de secciones se debe calcular la relación de los cuadrados de los diámetros, como se muestra en la ecuación 4.8.

$$C = \frac{d^2}{D^2} \quad (4.8)$$

Donde: C : Relación de diámetros (adimensional)

d : Diámetro de la sección menor (m)

D : Diámetro de la sección mayor (m)

Pérdidas por reducción | Sección 1-2

Corresponde a la reducción repentina del cilindro, se utiliza la ecuación 4.8 para obtener la relación de diámetros:

$$C_{1-2} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{(0,0351 \text{ m})^2}{(0,0722 \text{ m})^2} = 0,2363$$

Con esta relación, se puede obtener del gráfico del anexo A el coeficiente de resistencia, el cual para este caso es 0,41. Sustituyendo los valores encontrados en la ecuación 4.7 se obtiene:

$$h_{L1-2} = K_{1-2} \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 0,41 \left(\frac{(0,5167 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,005579 \text{ m}$$

Pérdidas por codo | Sección 2

La pérdida ocurre por el codo a 90° en la dirección del flujo en la sección 2. Del anexo A se obtiene que el coeficiente de fricción es 1,1. Sustituyendo en la ecuación 4.7:

$$h_{Lcodo2} = K_{codo2} \left(\frac{v_2^2}{2g} \right) = 1,1 \left(\frac{(0,5167 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,01497 \text{ m}$$

Pérdidas por reducción | Sección 2-3

La pérdida ocurre en la reducción repentina hacia la manguera, primero se calcula la relación de diámetros.

$$C_{2-3} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{(0,0254 \text{ m})^2}{(0,0351 \text{ m})^2} = 0,5236$$

Con base en el gráfico del anexo A, se obtiene el coeficiente de fricción, el cual es de 0,24. Sustituyendo en la ecuación 4.7:

$$h_{L2-3} = K_{2-3} \left(\frac{v_3^2}{2g} \right) = 0,24 \left(\frac{(0,9867 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,01191 \text{ m}$$

Pérdidas por codo | Sección 3

La pérdida ocurre por el codo a 90° en la dirección del flujo de la sección 3. Del anexo A se obtiene que el coeficiente de fricción es 1,1. Sustituyendo en la ecuación 4.7:

$$h_{Lcodo3} = K_{codo3} \left(\frac{v_3^2}{2g} \right) = 1,1 \left(\frac{(0,9867 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,05459 \text{ m}$$

Pérdidas por expansión | Sección 3-4

La pérdida ocurre en la expansión repentina en la válvula check, primero se calcula la relación de diámetros.

$$C_{3-4} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{(0,0254 \text{ m})^2}{(0,0351 \text{ m})^2} = 0,5236$$

Del anexo A se puede observar que el coeficiente de fricción se calcula de la siguiente manera:

$$K_{3-4} = (1 - C_{3-4})^2 = (1 - 0,5236)^2 = 0,2269$$

Sustituyendo en la ecuación 4.7:

$$h_{L3-4} = K_{3-4} \left(\frac{v_3^2}{2g} \right) = 0,2269 \left(\frac{(0,9867 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,01126 \text{ m}$$

Pérdidas por válvula check | Sección 4

La pérdida ocurre por la válvula check de la sección 4. Del anexo A se obtiene que el coeficiente de fricción para una válvula semejante es 2. Sustituyendo en la ecuación 4.7:

$$h_{Lvalv4} = K_{valv4} \left(\frac{v_4^2}{2g} \right) = 2 \left(\frac{(0,5167 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,02722 \text{ m}$$

Pérdidas por reducción | Sección 4-5

La pérdida ocurre en la reducción repentina de la boquilla, primero se calcula la relación de diámetros.

$$C_{4-5} = \frac{d^2}{D^2} = \frac{(0,012 \text{ m})^2}{(0,0351 \text{ m})^2} = 0,1169$$

Con base en el gráfico del anexo A, se obtiene el coeficiente de fricción, el cual es de 0,47. Sustituyendo en la ecuación 4.7:

$$h_{L4-5} = K_{4-5} \left(\frac{v_5^2}{2g} \right) = 0,47 \left(\frac{(4,420 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} \right) = 0,4682 \text{ m}$$

Total de pérdidas menores

$$h_{Lm} = h_{L1-2} + h_{Lcodo2} + h_{L2-3} + h_{Lcodo3} + h_{L3-4} + h_{Lvalv4} + h_{L4-5}$$

$$h_{Lm} = 0,005579 \text{ m} + 0,01497 \text{ m} + 0,01191 \text{ m} + 0,05459 \text{ m} \\ + 0,01126 \text{ m} + 0,02722 \text{ m} + 0,4682 \text{ m} = 0,5937 \text{ m}$$

4.2.7 Pérdidas mayores en el sistema

Las pérdidas mayores del sistema corresponden a las pérdidas de energía provocadas por la fricción del fluido al fluir por las tuberías del sistema [9]. La pérdida de energía se puede calcular para flujo laminar y flujo turbulento como se presenta en la ecuación 4.9 [9].

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.9)$$

Donde: f : Factor de fricción (adimensional)

L : Longitud de la corriente de flujo (m)

v : Velocidad del flujo promedio (m/s)

D : Diámetro de la sección de la tubería (m)

El flujo con el que se trabaja es laminar, esto se puede verificar calculando el número de Reynolds (ecuación 4.10 [9]), el cual debe ser menor a 2000 para que esto se cumpla [9], para calcular la pérdida de energía para flujo laminar se utiliza la ecuación 4.11 [9].

$$NR = \frac{vD\rho}{\eta} \quad (4.10)$$

$$h_L = \frac{32\eta Lv}{\rho g D^2} \quad (4.11)$$

Donde: η : Viscosidad dinámica (kg/m³s)

ρ : Densidad del fluido (Pa s)

Como se tienen secciones con distintos diámetros se calculan las pérdidas por cada tramo. Para los cálculos se utiliza la densidad y viscosidad de la glicerina que se muestra en la tabla del anexo B, se utiliza este fluido porque su viscosidad es similar a la de los productos que distribuye la empresa, además, su viscosidad posee un valor alto comparado con el resto de los fluidos. Su densidad es de 1258 kg/m³ y su viscosidad dinámica es de 0,96 Pa s.

Para los cálculos se necesitan los valores de la longitud, la velocidad y el diámetro de cada sección, las velocidades se obtienen de los cálculos anteriores y las longitudes y diámetros se obtiene de la figura 4.1.

Tabla 4.4: Datos necesarios para el cálculo de pérdidas mayores.

Sección	Velocidad (m/s)	Diámetro (m)	Longitud (m)
1	0,1221	0,0722	0,2442
2	0,5167	0,0351	0,1709

3	0,9867	0,0254	0,9083
4	0,5167	0,0351	0,0998
5	4,420	0,012	0,0463

Fuente: elaboración propia

Pérdidas mayores | Sección 1

Primero se verifica que el flujo sea laminar utilizando la ecuación 4.10.

$$NR_1 = \frac{vD_1\rho}{\eta} = \frac{0,1221 \text{ m} * 0,0722 \text{ m} * 1258 \text{ kg/m}^3}{0,96 \text{ Pa s}} = 11,55$$

Se cumple que el NR es menor a 2000 por lo que el flujo es laminar y se puede utilizar la ecuación 4.11.

$$h_{L1} = \frac{32\eta L_1 v_1}{\rho g D_1^2} = \frac{32 * 0,96 \text{ Pa s} * 0,2442 \text{ m} * 0,1221 \text{ m/s}}{1258 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (0,0722 \text{ m})^2}$$

$$= 0,0142 \text{ m}$$

Pérdidas mayores | Sección 2

Se calcula el NR utilizando la ecuación 4.10.

$$NR_2 = \frac{vD_2\rho}{\eta} = \frac{0,5167 \text{ m} * 0,0351 \text{ m} * 1258 \text{ kg/m}^3}{0,96 \text{ Pa s}} = 23,76$$

Se cumple que el NR es menor a 2000 por lo que el flujo es laminar y se puede utilizar la ecuación 4.11.

$$h_{L2} = \frac{32\eta L_2 v_2}{\rho g D_2^2} = \frac{32 * 0,96 \text{ Pa s} * 0,1709 \text{ m} * 0,5167 \text{ m/s}}{1258 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (0,0351 \text{ m})^2}$$

$$= 0,1784 \text{ m}$$

Pérdidas mayores | Sección 3

Se determina si el flujo es laminar utilizando la ecuación 4.10.

$$NR_3 = \frac{vD_3\rho}{\eta} = \frac{0,9867 \text{ m} * 0,0254 \text{ m} * 1258 \text{ kg/m}^3}{0,96 \text{ Pa s}} = 32,84$$

Se cumple que el NR es menor a 2000 por lo que el flujo es laminar y se puede utilizar la ecuación 4.11.

$$h_{L3} = \frac{32\eta L_3 v_3}{\rho g D_3^2} = \frac{32 * 0,96 \text{ Pa s} * 0,9083 \text{ m} * 0,9867 \text{ m/s}}{1258 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (0,0254 \text{ m})^2}$$

$$= 3,4579 \text{ m}$$

Pérdidas mayores | Sección 4

Se calcula el NR utilizando la ecuación 4.10.

$$NR_4 = \frac{vD_4\rho}{\eta} = \frac{0,5167 \text{ m} * 0,0351 \text{ m} * 1258 \text{ kg/m}^3}{0,96 \text{ Pa s}} = 23,76$$

Se cumple que el NR es menor a 2000 por lo que el flujo es laminar y se puede utilizar la ecuación 4.11.

$$h_{L4} = \frac{32\eta L_4 v_4}{\rho g D_4^2} = \frac{32 * 0,96 \text{ Pa s} * 0,0998 \text{ m} * 0,5167 \text{ m/s}}{1258 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (0,0351 \text{ m})^2}$$

$$= 0,1042 \text{ m}$$

Pérdidas mayores | Sección 5

Se calcula el NR utilizando la ecuación 4.10.

$$NR_5 = \frac{vD_5\rho}{\eta} = \frac{4,420 \text{ m} * 0,012 \text{ m} * 1258 \text{ kg/m}^3}{0,96 \text{ Pa s}} = 69,5$$

Se cumple que el NR es menor a 2000 por lo que el flujo es laminar y se puede utilizar la ecuación 4.11.

$$h_{L5} = \frac{32\eta L_5 v_5}{\rho g D_5^2} = \frac{32 * 0,96 \text{ Pa s} * 0,0463 \text{ m} * 4,420 \text{ m/s}}{1258 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (0,012 \text{ m})^2}$$

$$= 3,5376 \text{ m}$$

Total de pérdidas mayores

$$h_{LM} = h_{L1} + h_{L2} + h_{L3} + h_{L4} + h_{L5}$$

$$h_{LM} = 0,0142 \text{ m} + 0,1784 \text{ m} + 3,4579 \text{ m} + 0,1042 \text{ m} + 3,5376 \text{ m} = 7,2923 \text{ m}$$

Con los cálculos anteriores se obtiene la energía que se pierde en el sistema, esto corresponde a la suma de las perdidas mayores y pérdidas menores:

$$h_L = h_{Lm} + h_{LM} = 0,5937 \text{ m} + 7,2923 \text{ m} = 7,886 \text{ m}$$

4.2.8 Presión y fuerza del cilindro

Para calcular la presión que debe haber en el cilindro para llevar a cabo el proceso de dosificado se utiliza la ecuación 4.5; se sustituyen los valores calculados:

$$P_1 = \rho g * \left(\frac{v_5^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + h_L - Z_1 \right)$$

$$P_1 = 1258 \text{ kg/m}^3 * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$* \left(\frac{(4,42 \text{ m/s})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2} - \frac{\left(0,1221 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 7,886 \text{ m} - 0,2 \text{ m} \right)$$

$$= 107131,8 \text{ Pa}$$

Y para el cálculo de la fuerza requerida por el pistón se utiliza la ecuación 4.12 [9].

$$P = \frac{F}{A} \quad (4.12)$$

Despejando la fuerza y sustituyendo los valores del problema se obtiene:

$$F = PA = 107131,8 \text{ Pa} * \pi * \frac{(0,0722 \text{ m})^2}{4} = 438,6 \text{ N}$$

Se necesita un pistón neumático que pueda extenderse aplicando al menos 438,6 N. En el anexo C se muestra una tabla de fuerzas de cilindros doble efecto marca Camozzi, de la cual se puede observar la fuerza que aplican distintos pistones dependiendo de la presión que se les suministre. Suponiendo que el sistema de aire trabaje a una presión de 4 bar, el pistón que satisface las necesidades corresponde al de 40 mm de diámetro. Para el sistema se selecciona un pistón de diámetro de 40 mm y carrera de 30 cm.

4.2.9 Selección del O-ring

Es de suma importancia incorporar sellos al émbolo del pistón para evitar fugas del fluido que se está dosificando. Para seleccionar el O-ring (o junta tórica) se siguieron las recomendaciones del manual de la marca Parker [11].

Hay tres parámetros que se tienen que determinar para el sello que se debe seleccionar; apriete, estiramiento y relleno de ranura, los cuales se calculan a continuación.

Apriete (Squeeze)

Corresponde a la compresión radial del O-ring cuando se encuentra posicionado en la ranura, se calcula como se muestra en la ecuación 4.14 [11]. En aplicaciones dinámicas se recomienda un apriete máximo de 16% debido a la fricción y a consideraciones de uso [11].

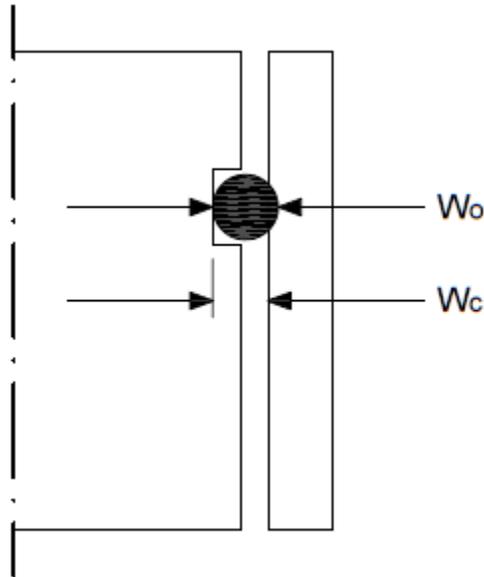


Figura 4.2: Parámetros del sello para calcular el apriete (Elaboración propia).

$$\%Apriete = \frac{W_o - W_c}{W_o} * 100 \quad (4.13)$$

A partir de este parámetro se obtiene el diámetro interno de la ranura para el sello. Para el cálculo se debe saber el diámetro de la sección transversal de la junta tórica, la selección se hizo del estándar AS-568 (anexo D), y se seleccionó 5,334 mm para ambas juntas tóricas, por lo que el cálculo es el mismo para los dos émbolos. Se seleccionó un apriete de 12%.

$$\%Apriete = \frac{5,334 \text{ mm} - W_c}{5,334 \text{ mm}} * 100 = 12 \Rightarrow W_c = 4,69 \text{ mm}$$

El diámetro de la ranura del émbolo menor es:

$$D_{iranuram} = 35.1 \text{ mm} - 2 * 4.69 \text{ mm} = 25,72 \text{ mm}$$

El diámetro de la ranura del émbolo mayor es:

$$D_{iranuraM} = 72,2 \text{ mm} - 2 * 4,69 \text{ mm} = 62,82 \text{ mm}$$

Estiramiento (Stretch)

Corresponde a cuánto se estira tangencialmente el O-ring después de que es colocado en la ranura, se calcula como se muestra en la ecuación 4.13 [11]. Se recomienda usar un estiramiento menor al 5%, de lo contrario, la tensión interna del O-ring provoca un envejecimiento más rápido [11].

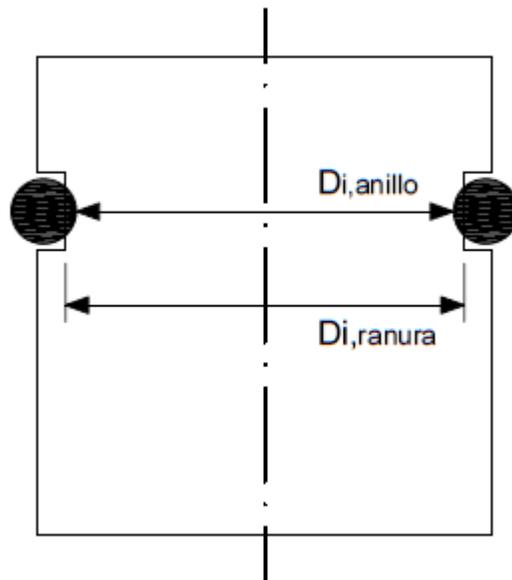


Figura 4.3: Parámetros del sello para calcular el estiramiento (Elaboración propia).

$$\%Estiramiento = \frac{D_{iranura} - D_{ianillo}}{D_{ianillo}} * 100 \quad (4.14)$$

Para el émbolo menor:

$$\%Est = \frac{25,72 \text{ mm} - D_{ianillo}}{D_{ianillo}} * 100 < 5 \Rightarrow D_{ianillo} > 24,49 \text{ mm}$$

$$\%Est = \frac{25,72 \text{ mm} - D_{ianillo}}{D_{ianillo}} * 100 > 0 \Rightarrow D_{ianillo} < 25,72 \text{ mm}$$

Con base en los cálculos realizados, se seleccionó la junta tórica AS 568-319, cuyo diámetro interno es 26,34 mm y se encuentra cerca del rango.

Para el émbolo mayor:

$$\%Est = \frac{62,82 \text{ mm} - D_{ianillo}}{D_{ianillo}} * 100 < 5 \Rightarrow D_{ianillo} > 59,83 \text{ mm}$$

$$\%Est = \frac{62,82 \text{ mm} - D_{ianillo}}{D_{ianillo}} * 100 > 0 \Rightarrow D_{ianillo} < 62,82 \text{ mm}$$

Con base en los cálculos realizados, se seleccionó la junta tórica AS 568-333, cuyo diámetro interno es 62,87 mm y se encuentra cerca del rango.

Relleno de ranura (Gland fill)

Corresponde al porcentaje de volumen de la ranura que la sección transversal del O-ring desplaza en su glándula de confinamiento, se calcula como se muestra en la ecuación 4.15 [11]. En la mayoría de las aplicaciones se utiliza un relleno de ranura entre 60% y 85%, siendo 75% de relleno el valor óptimo [11].

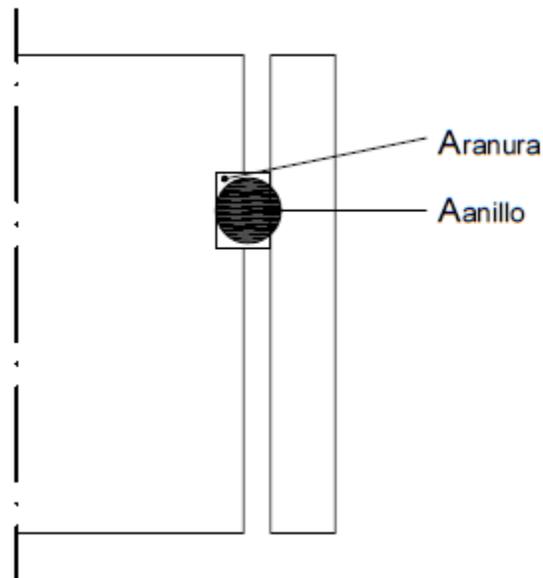


Figura 4.4: Parámetros del sello para calcular el relleno de ranura (Elaboración propia).

$$\%Relleno = \frac{A_{anillo}}{A_{ranura}} * 100 \quad (4.15)$$

El Relleno de ranura es igual para ambos émbolos ya que ambos O-rings tienen la misma sección transversal y ambas ranuras tienen la misma profundidad. Sustituyendo en la ecuación 4.15 se obtiene:

$$\%Relleno = \frac{\pi * \frac{(5,334 \text{ mm})^2}{4}}{4,69 \text{ mm} * W} * 100 > 60 \Rightarrow W < 7,94 \text{ mm}$$

$$\%Relleno = \frac{\pi * \frac{(5,334 \text{ mm})^2}{4}}{4,69 \text{ mm} * W} * 100 < 85 \Rightarrow W > 5,61 \text{ mm}$$

Se seleccionó un ancho de ranura de 7.1 mm, el cual se encuentra dentro del rango calculado.

4.2.10 Selección del motor

Para la selección del motor primero se calculó la relación de la caja reductora, para esto se realizó el cálculo de velocidad lineal del transportador para todas las relaciones que tienen disponible los proveedores, se calcula la velocidad angular, y utilizando el radio del piñón se obtiene la velocidad lineal de la banda, se utiliza la ecuación 4.16 [12].

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (4.16)$$

En la tabla 4.5 se muestran las opciones de velocidades posible utilizando distintas relaciones de cajas reductoras.

Tabla 4.5: Velocidad lineal del transportador con distintos reductores

n1 (rpm)	Relación	n2 (rpm)	ω (rad/s)	r (m)	v (m/s)	v (m/min)
1695	5:1	339	35,50	0,0646	2,2933	137,60
1695	7,5:1	226	23,67	0,0646	1,5289	91,73
1695	10:1	169,5	17,75	0,0646	1,1466	68,80
1695	15:1	113	11,83	0,0646	0,7644	45,87
1695	20:1	84,75	8,87	0,0646	0,5733	34,40
1695	25:1	67,8	7,10	0,0646	0,4587	27,52
1695	30:1	56,5	5,92	0,0646	0,3822	22,93
1695	40:1	42,375	4,44	0,0646	0,2867	17,20
1695	50:1	33,9	3,55	0,0646	0,2293	13,76
1695	60:1	28,25	2,96	0,0646	0,1911	11,47
1695	70:1	24,214	2,54	0,0646	0,1638	9,83
1695	80:1	21,187	2,22	0,0646	0,1433	8,60
1695	100:1	16,95	1,77	0,0646	0,1147	6,88

Fuente: elaboración propia.

Se requiere que el transportador se mueva despacio, por lo que se seleccionó la caja reductora de relación 100:1, con esta velocidad se dura menos de un segundo trasladando la botella más gruesa de la posición de llenado, con lo que no se ve afectada la productividad por estar dentro del tiempo establecido.

Después se calculó la potencia requerida para poder mover el sistema, para eso se realizó una simplificación del sistema del transportador como se muestra en la figura 4.5.

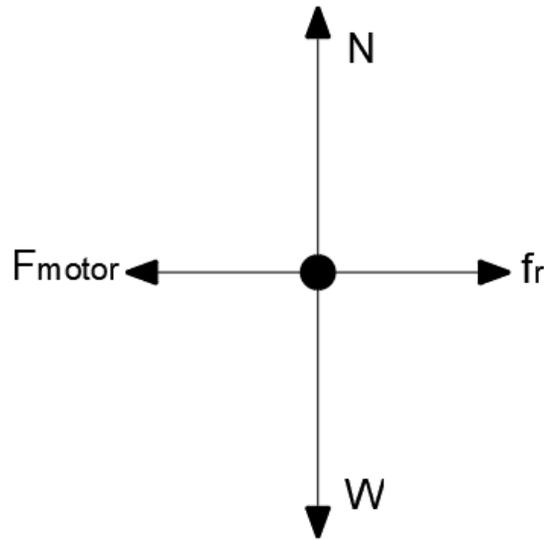


Figura 4.5: simplificación del sistema del transportador (Elaboración propia).

Se calcula el peso que debe mover el sistema, este corresponde al peso de las tabletillas del transportador y al peso de la carga, las tabletillas que se utilizan son de la serie UNI 820 de la marca unichain, las cuales, para una caja 3,048m tienen un peso de 3,048 kg. Por otro lado, se el peso de la carga que se debe llevar no es muy elevado, ya que la primera mitad del transportador lleva botellas vacías, se asume un caso extremo donde el transportador moviliza 9 kg de carga. Con esto se obtiene:

$$W = m * g = (3,048 \text{ kg} + 9 \text{ kg}) * 9,81 \text{ m/s}^2 = 118,2 \text{ N}$$

Posteriormente se calculó la fuerza de fricción que se opone al movimiento, para lo cual se requiere el coeficiente de fricción dinámico, en este caso el fabricante proporciona el dato, el cual es 0,2 en seco.

$$f_r = \mu N = 0,2 * 118,2 \text{ N} = 23,64 \text{ N}$$

Lo cual nos indica que la fuerza generada por el motor debe ser mayor a este valor. Se procede a calcular el par necesario para generar el movimiento utilizando la ecuación 4.17 [12].

$$\tau = r * F \quad (4.17)$$

$$\tau = 0,0646 \text{ m} * 23,64 \text{ N} = 1,53 \text{ Nm}$$

Por último, para calcular la potencia se debe conocer la velocidad angular a la que gira el motor, en este caso se seleccionó un motorreductor con velocidad de salida de 16,95 rpm, valor que se utiliza para obtener la velocidad angular. La potencia se calcula como se muestra en la ecuación 4.18 [12]

$$P = \tau * \omega \quad (4.18)$$

$$P = \tau * \omega = \tau * \frac{2\pi n}{60} = 1,53 \text{ Nm} * \frac{2\pi * 16,95 \text{ rpm}}{60} = 2,71 \text{ W}$$

Como se puede observar, la potencia requerida es muy pequeña, y no hay motorreductores de tan poca potencia, por esta razón se seleccionó un motorreductor de potencia de ¼ HP, que corresponde al más pequeño que se pudo encontrar en el mercado.

Los planos mecánicos de la máquina de llenado se muestran en el apéndice A.

CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL SISTEMA

5.1 Selección del controlador

En el capítulo 3 se contempló el subproblema correspondiente al control del proceso de manera automática. En esta sección se detalla la selección del controlador para el sistema.

Se obtuvieron tres principales alternativas para el subproblema, las cuales corresponden a: controlador lógico programable (PLC), microcontrolador y válvulas electroneumáticas. En primera instancia se consideró utilizar un microcontrolador, sin embargo, debido a que la empresa está realizando un cambio de rumbo hacia la automatización de sus procesos, se consideró que utilizar un PLC se adecuaba mejor a las necesidades de la empresa. En este caso se utilizan válvulas electroneumáticas que se conectan a las salidas del PLC, para controlar los pistones.

Para la selección del PLC se utilizaron cinco modelos de controladores, los cuales se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Características de las alternativas de los controladores.

	TM221CE16R	TM221C16R	SR3B101FU	APB-12MRA(L)	APB-12MRA
Precio (¢)	196.190,00	181.710,00	113.340,00	92.000,00	67.000,00
Tensión de alimentación	100 - 240 V AC	100 - 240 V AC	100 - 240 V AC	100 - 240 V AC	100 - 240 V AC
Entradas digitales	9	9	6	8	8
Entradas analógicas	2 0 – 10 V	2 0 – 10 V	-	-	-
Salidas discretas	7	7	4	4	4
Tipo salida discreta	Relay NO	Relay NO	Relay NO	Relay NO	Relay NO
Tensión salida discreta	5 - 125 V DC 5 - 250 V AC	5 - 125 V DC 5 - 250 V AC	5 - 30 V DC 24 - 250 V AC	0 - 24 V DC 0 - 240 V AC	0 - 24 V DC 0 - 240 V AC
Corriente salida discreta	2 A	2 A	2 A	2 A	2 A
Memoria	256 kB 10000 instrucciones 2GB memoria SD	256 kB 10000 instrucciones 2GB memoria SD	500 líneas FBD 240 líneas escalera	320 bloques de función	320 bloques de función
Programación	Ecostruxure	Ecostruxure	Zelio Soft 2	APB Software	APB Software

Fuente: elaboración propia.

Para la selección se realizó una evaluación con base en criterios que se adecúan a las necesidades del sistema, donde cada uno tiene un peso distinto en la evaluación. La evaluación se realizó siguiendo la misma metodología utilizada en el capítulo 3; la escala de la calificación varía entre 1 y 5 (tabla 3.11), donde 3 equivale al valor de referencia da la comparación de cada criterio (la referencia se muestra en un trazo más grueso de color azul). La matriz de evaluación se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Matriz de evaluación de los controladores programables.

Criterio de evaluación	Peso	Controladores lógicos programables									
		TM221CE16R		TM221C16R		SR3B101FU		APB-12MRA(L)		APB-12MRA	
		Nota	Calificación	Nota	Calificación	Nota	Calificación	Nota	Calificación	Nota	Calificación
Facilidad para programar	20%	4	0,8	4	0,8	3	0,6	2	0,4	2	0,4
Métodos para programar	25%	5	1,25	5	1,25	3	0,75	3	0,75	3	0,75
Costo	15%	2	0,3	2	0,3	3	0,45	4	0,6	5	0,75
Memoria	15%	4	0,6	4	0,6	3	0,45	2	0,3	2	0,3
Facilidad de carga de programas	10%	5	0,5	4	0,4	2	0,2	3	0,3	3	0,3
Cantidad I/O digitales	15%	4	0,6	4	0,6	2	0,3	3	0,45	3	0,45
Evaluación neta	100%	4,05		3,95		2,75		2,8		2,95	
Posición		1		2		5		4		3	

Fuente: elaboración propia.

En la tabla 5.2 se observa que el modelo del PLC con mejor evaluación neta es el TM221CE16R, con una evaluación muy similar al PLC de modelo TM221C16R, con la diferencia de que el primero tiene la facilidad de cargar programas por medio de cable Ethernet, por lo que tiene una mayor calificación en el criterio “facilidad de carga de programas”.

Con respecto a los otros criterios, se puede decir del controlador seleccionado que su facilidad de programación es más sencilla debido a que la interfaz gráfica del software que utiliza es más intuitivo comparado con los de las otras marcas. Uno de los criterios que influyó mayormente fue el de “métodos para programar”, ya que el software de este modelo permite programar el proceso automático por medio de un diagrama de control con etapas y transiciones (GRAFSET), además del diagrama de escalera que se utiliza convencionalmente. El modelo seleccionado posee una mayor memoria que los modelos de las otras marcas, por lo que obtuvo una mejor calificación en el criterio “memoria”. En el criterio “costo” su calificación se vio afectada debido a que es el controlador más caro, sin embargo, los beneficios que ofrece compensan este factor.



Figura 5.1: Controlador lógico programable seleccionado [13].

5.2 Diagrama de flujo

El primer paso antes de programar el control del sistema, se debe realizar el diagrama de flujo del proceso, este es de suma importancia ya que facilita la programación del proceso porque muestra gráficamente los pasos que sigue la secuencia. El diagrama de flujo del sistema se muestra en la figura 5.2.

El proceso cuenta con dos modos de operación, modo manual y modo automático. Cuando se utiliza el modo manual, el proceso comienza cuando se realiza el accionamiento manual por medio del pedal y del botón de inicio, una vez accionado, se realiza un ciclo de llenado y termina la secuencia.

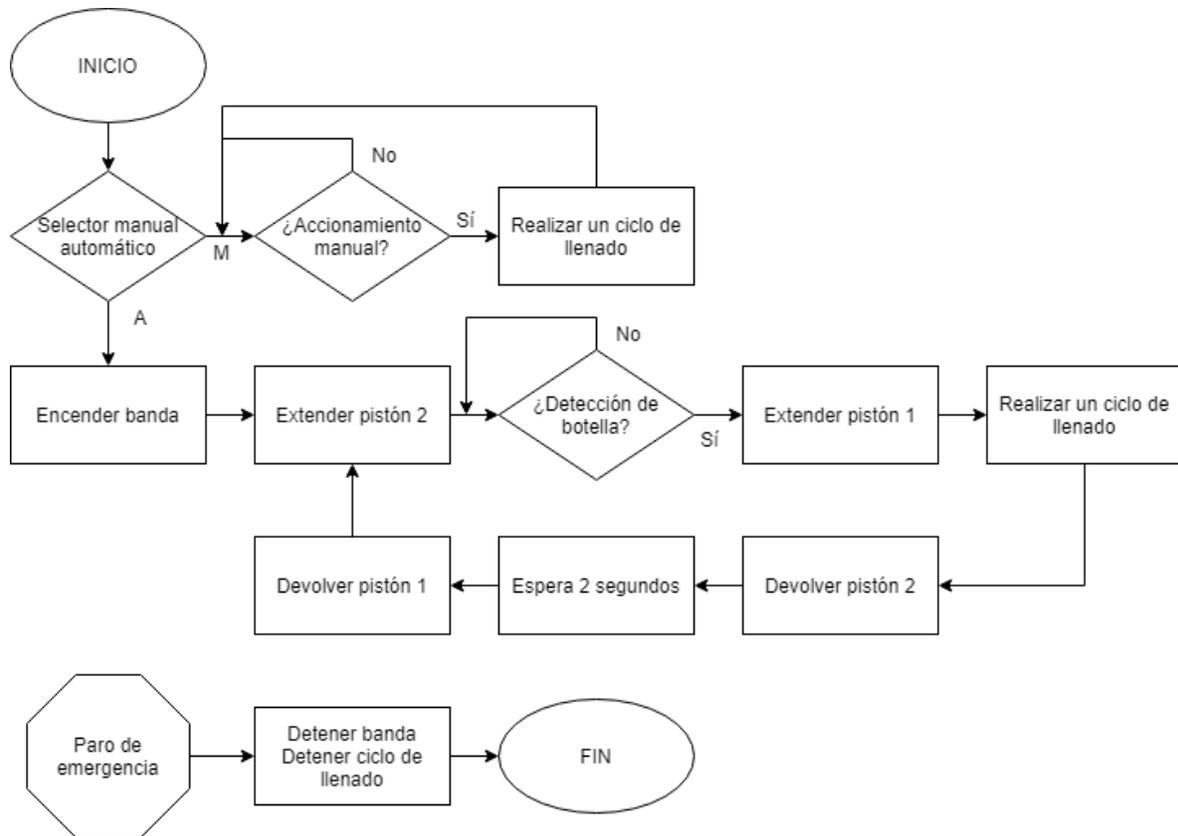


Figura 5.2: Diagrama de flujo del sistema (Elaboración propia).

En el modo automático una vez que se inicia el proceso se enciende el motor de la banda transportadora, y se extiende el pistón 2, el cual detiene las botellas en la posición de llenado, cuando el sensor detecta que llegó una botella, se extiende el pistón 1 para detener la posible cola de botellas, se realiza el ciclo de llenado y cuando se termina, el pistón 2 se devuelve permitiéndole paso a la botella llenada, y después de dos segundos se vuelve a la posición inicial de ambos pistones para continuar con el proceso. En cualquier momento que se presione el botón de paro de emergencia, se detienen todos los procesos.

5.3 Programación del control automático

5.3.1 Determinación de las entradas y las salidas

La entradas y salidas de controlador se muestran en la tabla 5.3, solamente se requieren siete entradas y cuatro salidas para el PLC.

Tabla 5.3: Entradas y salidas del PLC.

Dirección	Designación	Símbolo	Descripción
I0.0	Entrada	DEVUELTO	Detector de proximidad magnéticos con cable de 3 hilos para ranura en T
I0.1	Entrada	EXTENDIDO	Detector de proximidad magnéticos con cable de 3 hilos para ranura en T
I0.2	Entrada	OPTICO	Sensor óptico reflectivo BRP100-DDT-P
I0.3	Entrada	INICIO	Botón de inicio
I0.4	Entrada	PEDAL	Pedal
I0.5	Entrada	PARO	Botón de paro de emergencia
I0.6	Entrada	AUTOMATICO	Selector de 2 posiciones
Q0.0	Salida	PISTONSUCCION	Pistón neumático Camozzi 40x300
Q0.1	Salida	PISTON1	Pistón neumático Camozzi 12x80
Q0.2	Salida	PISTON2	Pistón neumático Camozzi 12x80
Q0.3	Salida	MOTOR	Motorreductor SITI MI 30 1:20 ¼ HP

Fuente: elaboración propia.

5.3.2 Programación en el PLC

La programación de la secuencia se realizó en GRAFCET, lo cual se muestra en la figura 5.3. Se muestran las etapas del programa y las transiciones entre ellas, con sus respectivos nombres.

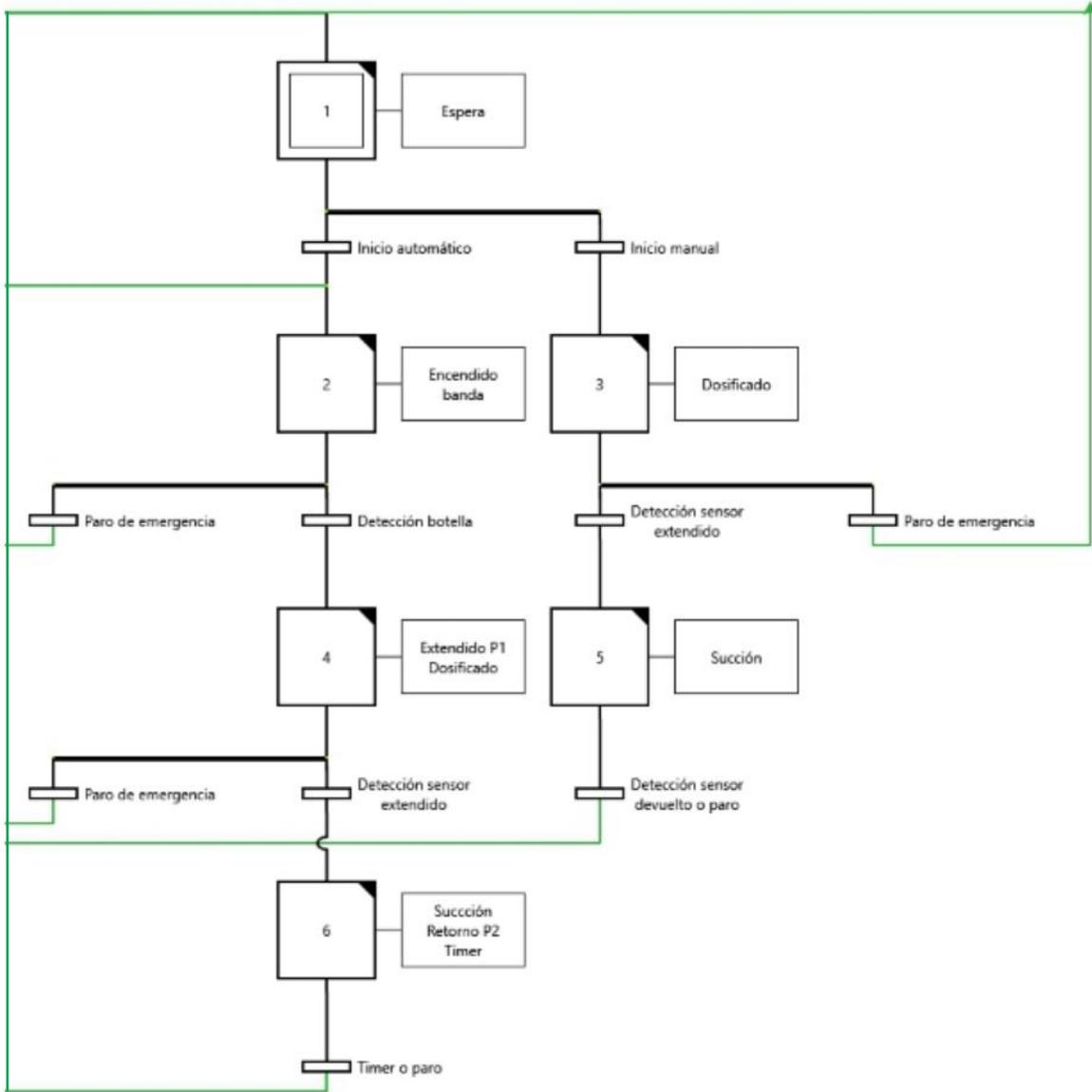


Figura 5.3: Diagrama GRAFCET (Elaboración propia).

En el apéndice B se presentan las instrucciones que representan las condiciones de transición entre cada etapa. También, en cada etapa hay una transición de paro de emergencia que lleva el proceso a la etapa inicial, esto para el caso de que suceda algún percance durante el funcionamiento normal del sistema.

En el apéndice C se expone la tarea maestra del programa, donde se indica por medio de diagramas de escalera las acciones de *set* y *reset* de todas las salidas.

CAPÍTULO 6: VALIDACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se presentan las pruebas de validación que permiten verificar el funcionamiento del sistema y permiten definir que combinación de parámetros mejoran el desempeño. Para esto se debe conocer las métricas de desempeño para el sistema, así como los parámetros de influencia. Se sigue la metodología presentada por Mark Anderson [7]. Se determinaron dos pruebas principales para verificar las especificaciones de mayor peso: *velocidad de llenado* y *precisión de dosificación*.

Estas pruebas suelen tener un costo elevado, debido a que se debe contar distintos elementos para realizar las pruebas, como, por ejemplo, se debe contar con un variador de frecuencia para variar la velocidad del motor, y se deben tener distintas boquillas para variar el diámetro de salida, por los que las mediciones realizadas para verificar el funcionamiento del sistema se realizaron con los elementos que se tenían disponibles.

6.1 Prueba 1: Velocidad de llenado

Esta prueba consiste en realizar mediciones, cambiando parámetros para medir la velocidad de llenado, de manera que se cumpla la especificación de velocidad de llenado establecida.

6.1.1 Objetivos

Medir la velocidad de llenado del sistema de dosificado variando algunos parámetros del sistema.

6.1.2 Parámetros de influencia

Los parámetros de influencia establecidos son: velocidad de salida del motor del transportador, tiempo de espera en la programación y presión de alimentación del sistema neumático.

Tabla 6.1: Factores de influencia para la prueba 1.

Factor	Nombre	Nivel 1 (+)	Nivel 2 (-)
A	Velocidad de salida del motor del transportador	6,88 m/min	8,60 m/min
B	Tiempo de espera en la programación	1 seg	2 seg
C	Presión de alimentación del sistema neumático	4 bar	6 bar

Fuente: elaboración propia.

6.1.3 Métrica de desempeño

La métrica de desempeño corresponde únicamente a la velocidad de llenado que puede alcanzar el sistema, se mide en botellas por minuto (bpm) y el objetivo es maximizar la métrica.

6.1.4 Descripción general

La prueba consiste en realizar las combinaciones de los factores de influencia establecidos en la tabla 6.1. Se van a realizar 5 mediciones de velocidad para cada combinación, y el resultado de cada combinación va a ser el promedio de las velocidades medidas. Para realizar la medición se utiliza un cronómetro tradicional, y se toma el tiempo que se tarda en llenar 10 botellas.

6.1.5 Descripción del análisis

El análisis consiste en comparar la velocidad de llenado con la especificación de velocidad de llenado del sistema, lo que se busca es la combinación de parámetros que posea una mayor velocidad de llenado, y, por ende, una mayor capacidad de producción. Si sucede que ninguna de las combinaciones satisface la especificación de velocidad objetivo, se debe realizar un estudio de las posibles causas del resultado. Considerar si el valor de la especificación objetivo es muy estricto, o si se debe mejorar el sistema para mejorar el resultado.

6.1.6 Conclusiones para obtener

De la prueba se debe concluir la mejor combinación de parámetros de influencia que afectan la velocidad de llenado. También se podrá concluir si el

sistema cumple con la especificación objetivo o se requiere algún tipo de rediseño en el sistema.

6.2 Prueba 2: Precisión de dosificación

6.2.1 Objetivos

Cuantificar la métrica de desempeño de precisión de dosificado del sistema de llenado de fluidos líquidos y viscosos.

6.2.2 Parámetros de influencia

Los parámetros de influencia establecidos son: presión de alimentación del sistema neumático, Abertura de la válvula reguladora de flujo de dispensado y diámetro de la boquilla.

Tabla 6.3: Factores de influencia para la prueba 1.

Factor	Nombre	Nivel 1 (+)	Nivel 2 (-)
A	Presión de alimentación del sistema neumático	4 bar	6 bar
B	Abertura de la válvula reguladora de flujo de dispensado	½ vuelta	1 vuelta
C	Diámetro de la boquilla	9 mm	11 mm

Fuente: elaboración propia.

6.2.3 Métrica de desempeño

La métrica de desempeño corresponde únicamente a la precisión de llenado del sistema, se mide en valor porcentual y el objetivo es maximizar la métrica.

6.2.4 Descripción general

La prueba consiste en realizar las combinaciones de los factores de influencia de la tabla 6.3. Para cada volumen de dosificado se va a medir la precisión realizando cambios de posición de los sensores del pistón de dosificado, se realizan 6 pruebas en cada posición. El resultado de cada posición corresponde al valor

promedio de las mediciones. La medición se realiza utilizando una báscula para pesar la cantidad de masa dispensada.

6.2.5 Descripción del análisis

El análisis consiste en comparar la precisión del sistema de llenado con la especificación de precisión del sistema, lo que se busca es la combinación de parámetros que posea una mayor precisión. Si sucede que ninguna de las combinaciones satisface la especificación de precisión objetivo, se debe realizar un estudio de las posibles causas del resultado. Considerar si el valor de la especificación objetivo es muy estricto, o si se debe mejorar el sistema para mejorar el resultado.

6.2.6 Conclusiones para obtener

De la prueba se debe concluir la mejor combinación de parámetros de influencia que afectan la precisión de llenado. También se podrá concluir si el sistema cumple con la especificación objetivo o se requiere algún tipo de rediseño en el sistema.

6.3 Mediciones

6.3.1 Velocidad de llenado

Con respecto al prototipo del sistema para dispensar fluidos líquidos y viscosos, se realizó una serie de mediciones para determinar su velocidad y precisión de llenado. Para la velocidad se realizaron cinco mediciones, en las cuales se llenaron siete envases y se midió el tiempo que tardó cada envase en llenarse. Con estos valores se calculó un tiempo promedio de llenado, para así calcular la velocidad promedio de llenado del sistema.

En las tablas 6.4 a 6.6 se muestran las mediciones de los tiempos en cada etapa. En la tabla 6.7 se calcula la velocidad de llenado promedio para los tres tipos de envases utilizados.

Tabla 6.4: Mediciones de tiempos de llenado para el envase de 125 ml.

Envases	Medición 1: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 2: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 3: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 4: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 5: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s
1	4,67	4,78	5,07	5,19	5,47
2	3,9	4,29	4,43	4,66	4,79
3	4,07	4,3	4,55	4,65	4,51
4	4,19	4,38	4,43	4,68	4,31
5	4,07	4,21	4,45	4,69	4,2
6	4,13	4,39	4,54	4,73	4,22
7	4,22	4,39	4,43	4,7	4,2
\bar{X}	4,18	4,39	4,56	4,76	4,53

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.5: Mediciones de tiempos de llenado para el envase de 250 ml.

Envases	Medición 1: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 2: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 3: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 4: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 5: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s
1	6,56	7,08	7,16	6,37	6,58
2	6,27	6,58	6,67	5,5	6,06
3	5,98	6,22	6,71	5,62	6,05
4	5,88	6,48	6,71	5,74	6,01
5	6,17	6,45	6,13	5,79	6,07
6	6,11	6,59	5,84	5,78	6,07
7	6,19	6,3	5,78	5,8	6,17
\bar{X}	6,17	6,53	6,43	5,80	6,14

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.6: Mediciones de tiempos de llenado para el envase de 500 ml.

Envases	Medición 1: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 2: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 3: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 4: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s	Medición 5: Tiempo de llenado ($t \pm 0,01$) s
1	11,35	10,34	10,93	11,56	10,37
2	11,23	9,63	10,27	10,95	9,36
3	10,75	9,49	10,36	10,9	9,41
4	9,82	9,73	10,24	9,76	9,58
5	9,49	9,78	10,41	9,58	9,7
6	9,39	9,9	10,53	9,46	9,72
7	9,21	9,99	10,62	9,36	9,82
\bar{x}	10,18	9,84	10,48	10,22	9,71

Fuente: elaboración propia.

Para calcular la velocidad de llenado promedio que se muestra en la tabla 6.7 se utilizó la ecuación que se muestra a continuación:

$$v = \frac{1 \text{ botella}}{t \text{ s}} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = \frac{60}{t} \text{ bpm} \quad (6.1)$$

Donde: t : tiempo de llenado promedio (s)

Tabla 6.7: Velocidad de llenado promedio para los tres tipos de envases utilizados.

Medición	Tiempo de llenado promedio para el envase de 125 ml ($t \pm 0,01$) s	Tiempo de llenado promedio para el envase de 250 ml ($t \pm 0,01$) s	Tiempo de llenado promedio para el envase de 500 ml ($t \pm 0,01$) s
1	4,18	6,17	10,18
2	4,39	6,53	9,84
3	4,56	6,43	10,48
4	4,76	5,8	10,22
5	4,53	6,14	9,71
\bar{x}	4,484	6,214	10,09
Velocidad de llenado promedio ($v \pm 0,01$) bpm	13,38	9,66	5,95

Fuente: elaboración propia.

Para determinar si se cumple con la especificación de velocidad de llenado se debe considerar la capacidad de producción de manera general, ya que, es cierto que entre mayor es la cantidad para dispensar, más lento va a ser el proceso, sin embargo, se debe considerar que posiblemente se distribuyan menos cantidades de esos volúmenes. Para esto se necesita conocer el dato porcentual de la cantidad de productos que se venden en la empresa, estos datos fueron solicitados a la empresa y se muestran en la tabla 6.8. Además, se deben conocer la velocidad de llenado al utilizar todos los tamaños de envases, para esto, se utilizaron los valores de las mediciones realizadas, y se aproximaron las velocidades de los envases de 60 y 1000. Todos estos valores se muestran en la tabla 6.8.

Tabla 6.8: Verificación del cumplimiento de la especificación de velocidad.

Tamaño del envase (ml)	% de ventas del total	Velocidad de llenado promedio (bpm)	Velocidad de llenado individual (bpm)
60	17,65	14,7	2,59
125	13,38	36,9	4,94
250	9,66	37,4	3,61
500	5,95	10,3	0,61
1000	3,43	0,7	0,02
Velocidad de llenado general			11,78

Fuente: elaboración propia.

Se obtiene como velocidad de llenado general 11,78 bpm, lo cual es mayor a la especificación establecida de velocidad de llenado (11,75 bpm), por lo que se concluye que se satisface la especificación de velocidad.

6.3.2 Precisión de dosificación

Con respecto a la precisión del sistema se realizaron cinco series de mediciones, en las que se realizaron ocho mediciones de la masa dispensada, esto con el fin de obtener la desviación estándar de tres envases: 125, 250 y 500 ml. Las mediciones se presentan en las tablas 6.9 a 6.11. En la tabla 6.12 se determina la precisión de dosificación para los tres tipos de envases utilizados.

Tabla 6.9: Mediciones masa dispensada para el envase de 125 ml.

Envase	Medición 1: Masa (m ± 1) g	Medición 2: Masa (m ± 1) g	Medición 3: Masa (m ± 1) g	Medición 4: Masa (m ± 1) g	Medición 5: Masa (m ± 1) g
1	134	134	134	133	133
2	132	133	132	133	134
3	131	132	130	131	131
4	131	134	131	133	131
5	130	132	132	131	131
6	131	131	131	130	129
7	131	133	130	131	127
8	132	132	131	131	127
\bar{X}	131,5	132,625	131,375	131,625	130,375
σ	1,2	1,1	1,3	1,2	2,6

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.10: Mediciones masa dispensada para el envase de 250 ml.

Envase	Medición 1: Masa (m ± 1) g	Medición 2: Masa (m ± 1) g	Medición 3: Masa (m ± 1) g	Medición 4: Masa (m ± 1) g	Medición 5: Masa (m ± 1) g
1	256	255	259	254	261
2	234	257	257	256	251
3	255	257	257	254	251
4	254	256	257	256	250
5	253	257	254	255	252
6	255	256	253	254	248
7	253	256	253	257	250
8	253	257	253	254	249
\bar{X}	251,625	256,375	255,375	255	251,5
σ	7,2	0,7	2,4	1,2	4,0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.11: Mediciones masa dispensada para el envase de 500 ml.

Envase	Medición 1: Masa ($m \pm 1$) g	Medición 2: Masa ($m \pm 1$) g	Medición 3: Masa ($m \pm 1$) g	Medición 4: Masa ($m \pm 1$) g	Medición 5: Masa ($m \pm 1$) g
1	455	473	474	481	468
2	484	474	471	474	476
3	469	476	470	465	478
4	466	474	478	471	478
5	470	470	474	474	475
6	462	473	469	467	476
7	469	470	473	474	471
8	462	472	473	473	473
\bar{X}	467,125	472,75	472,75	472,375	474,375
σ	8,5	2,1	2,8	4,9	3,5

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.12: Verificación del cumplimiento de la especificación de precisión.

Medición	Desviación estándar para el envase de 125 ml ($\sigma \pm 1$) g	Desviación estándar para el envase de 250 ml ($\sigma \pm 1$) g	Desviación estándar para el envase de 500 ml ($\sigma \pm 1$) g
1	1,2	7,2	8,5
2	1,1	0,7	2,1
3	1,3	2,4	2,8
4	1,2	1,2	4,9
5	2,6	4	3,5
σ_{max}	2,6	7,2	8,5
Error permisible en dosificación 5% (ml)	6,25	12,5	25
¿Cumple?	Sí	Sí	Sí

Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, al tomar la desviación estándar de mayor valor en las mediciones de cada envase, y comparar este valor con el error permisible, se comprueba que se cumple la especificación de precisión con error del 5%.

Con base en ambas pruebas, de velocidad de llenado y precisión de dosificación, se puede afirmar que el sistema automático de llenado cumple con las

especificaciones establecidas. Se cumple la especificación de precisión de dosificación que establece que no se debe dispensar volúmenes con un error mayor al 5%, esta especificación es de suma importancia ya que se debe ser consistente con los productos que se llenan en la línea de producción, lo cual permite afirmar que el proceso es confiable y preciso.

La especificación de la velocidad de llenado también se cumple con base en las pruebas realizadas, esta prueba es la más importante debido a que se relaciona directamente con el objetivo del proyecto, el cual es poder aumentar la productividad de la empresa en un 25%. Los resultados muestran que la velocidad de llenado general, considerando que se llenan distintos productos en distintas cantidades, es de 11,78 bpm. Este valor corresponde a un aumento del 25,3% en la capacidad de producción actual de la empresa.

CAPÍTULO 7: ANÁLISIS FINANCIERO

En este capítulo se presentan los costos de los elementos que conforman al sistema de llenado de productos embotellados, los cuales son utilizados para determinar la rentabilidad y viabilidad del proyecto con base en los indicadores financieros TIR y, VAN.

7.1 Costos

Los costos de todos los elementos y servicios requeridos para la implementación del sistema se obtienen a partir de proformas de distintos proveedores costarricenses. Los costos se muestran en las tablas 7.1 - 7.5.

7.1.1 Costo de materiales

Tabla 7.1: Costos de materiales.

No.	Denominación	Cantidad	Precio unitario (¢)	Precio nominal (¢)
1	Tubo sanitario inox 304 1 1/2" ASTM A-270 6mts	1	33.007,26	33.007,26
2	Tubo sanitario inox 304 3" ASTM A-270 6mts	1	61.050,46	61.050,46
3	Manguera spiraflex transparente FDA 1"	2	9.344,93	18.689,86
4	Barra de aluminio cuadrado de 2 1/2" 6.5cm	1	5.330,00	5.330,00
5	Lámina acero inox 430 calibre 16 4'x8'	1	52.300,00	52.300,00
6	Barra de acero 1020 de 1" 44 cm	1	3.650,00	3.650,00
7	Barra de acero cuadrado de 1/4" 4cm	1	285,40	285,40
8	Barra de acero cuadrado de 5/16 4cm	1	313,20	313,20
9	Barra de acero inoxidable de 9/16" 50cm	1	2.833,00	2.833,00
10	Barra de teflón de 75mm 5cm	1	8.850,00	8.850,00
11	Barra de acero inoxidable de 5/8"	1	6.903,75	6.903,75
12	Tubo acero inox orn. cuadrado en 1.5mm 1" 60cm	1	2.106,80	2.106,80
13	Placa 250x250mm en acero inox 5/8"	1	51.357,00	51.357,00
			Subtotal gravado	246.676,73
			Impuesto	32.067,97
			Total	278.744,70

7.1.2 Costo de accesorios y partes

Tabla 7.2: Costos de accesorios y partes.

No.	Denominación	Cantidad	Precio unitario (¢)	Precio nominal (¢)
1	Válvula check 1 1/2" T-304 3A	2	40.580,97	81.161,94
2	Tee sanitaria con ferrule 3A 1 1/2"	1	12.423,84	12.423,84
3	Ferrule sanitario 1" T-304 3A	3	1.375,39	4.126,17
4	Ferrule sanitario 1 1/2" T-304 3A	2	1.343,35	2.686,70
5	Sello sanitario epdm 1 1/2" T-304 3A	7	296,93	2.078,51
6	Clamp sanitario 1 1/2" T-304 3A	6	3.209,36	19.256,16
7	Tapa sólida sanitaria 2 1/2" T-304 3A	1	2.597,91	2.597,91
8	Tapa sólida sanitaria 1 1/2" T-304 3A	1	1.564,10	1.564,10
9	Translink muñonera parche 2 huecos 3/4"	3	3.982,30	11.946,90
10	Caja de cadena tabletillas 4.5" ancho LF 820K450 3 mts	1	80.530,97	80.530,97
11	Juego de piñones Z21	1	79.646,02	79.646,02
12	O-rings (319 y 333)	4	517,70	2.070,80
13	Perfil de deslizamiento guía de desgaste 50x5mm 1.5m	1	9.225,66	9.225,66
14	Unión hembra rosca 1/4"	1	697,00	697,00
15	Acople TEE manguera 6mm	1	2.062,56	2.062,56
16	Acople TEE rosca 1/4"	1	2.083,63	2.083,63
17	Botón pulsador plástico 22mm 1NA	1	3.042,00	3.042,00
18	Botón tipo hongo paro de emergencia 30mm 1NC	1	3.063,32	3.063,32
19	Selector de muletilla plástica 2 posiciones sostenida 22mm	1	2.480,00	2.480,00
20	Cable calibre 18 10mts	1	2.000,00	2.000,00
21	Manguera poliuretano 6mm 150PSI 6mts	1	2.442,00	2.442,00
22	Unidad de mantenimiento de 1/4 con manómetro	1	55.833,23	55.833,23
23	Tornillos y arandelas	1	10.000,00	10.000,00
24	Flanger de salida p/ l 30	1	7.987,00	7.987,00
25	Flanger 63x90 SITl	1	3.879,00	3.879,00
26	Flanger entrada p/ l 30 B14	1	5.763,94	5.763,94
27	Acople codo 6 mm rosca M5	4	1.784,01	7.136,04
28	Silenciador cónico 1/8	6	797,82	4.786,92
29	Acople recto 6mm rosca 1/8	9	705,50	6.349,50
			Subtotal gravado	428.921,82
			Impuesto	55.759,84
			Total	484.681,66

7.1.3 Costo del PLC, sensores y actuadores

Tabla 7.3: Costo del PLC, sensores y actuadores.

No.	Denominación	Cantidad	Precio unitario (¢)	Precio nominal (¢)
1	Controlador 16 IO relay ethernet TM221CE16R	1	180.761,60	180.761,60
2	Motor EUROMOTOR cerrado 1/4HP 1F 120/240V, doble capacitor	1	40.625,32	40.625,32
3	Reductor MI 30 20/1 PAM 11/140 SITI	1	68.351,39	68.351,39
4	Pistón neumático 40x300mm CAMOZZI	1	65.250,00	65.250,00
5	Válvula reguladora de flujo 6mm rosca 1/8" CAMOZZI	2	6.515,32	13.030,64
6	Sensor magnético CST-232 3 hilos 5-30V AC/DC PNP CAMOZZI	2	11.879,30	23.758,60
7	Minicilindro doble efecto Ø12 x 80 mm	2	21.215,00	42.430,00
8	Válvula eléctrica 5 vías 2 pos 1/8 CAMOZZI	3	29.887,38	89.662,14
9	Conector p/ bobina CAMOZZI	3	932,15	2.796,45
10	Bobina p/ electroválvula 110V AC CAMOZZI	3	4.824,98	14.474,94
11	Sensor BRP difusorefectivo 12-24V sens. 100mm sal. PNP	1	40.269,00	40.269,00
			Subtotal gravado	581.410,08
			Impuesto	75.583,31
			Total	656.993,39

7.1.4 Costo de mano de obra

Tabla 7.4: Costo de mano de obra.

No.	Denominación	Cantidad	Precio unitario (¢)	Precio nominal (¢)
1	Mecanizado de piezas en taller	1	280.350,00	280.350,00
2	Corte de lámina	1	12.000,00	12.000,00
3	Doblado de lámina	1	5.000,00	5.000,00
4	Corte de placa con waterjet	1	32.010,00	32.010,00
			Subtotal gravado	329.360,00
			Impuesto	42.816,80
			Total	372.176,80

7.1.5 Costo por remuneraciones

Tabla 7.5: Costos por remuneraciones.

Oficio	Salario		Horas totales	Salario total (¢)
	Jornada (¢)	Hora (¢)		
Mecánico	13.872,7	1.734,1	120	208.092
Electricista	11.761,76	1.470,1	100	147.010
Operador	11.761,76	1.470,1	100	147.010
			Costo total	502.112

A partir de las tablas expuestas se obtiene el costo total del proyecto, en la tabla 7.6 se presentan los costos resumidos. También se agrega un rubro para imprevistos que puedan presentarse durante la elaboración del proyecto.

Tabla 7.6: Costos totales del proyecto.

Rubro	Costo (¢)
Costo de materiales	278.744,70
Costo de accesorios y partes	484.681,66
Costo del PLC, sensores y actuadores	656.993,39
Costo de mano de obra	372.176,80
Costos por remuneraciones	502.112
Total	2.294.731,05
Imprevistos (15%)	344.209,66
Inversión inicial	2.638.940,71

Fuente: elaboración propia

7.2 Análisis de rentabilidad

7.2.1 Valor actual neto (VAN)

Es el método más conocido y aceptado para evaluar proyectos, permite medir el excedente resultante después de obtener la rentabilidad deseada y después de recuperar la inversión [14]. Consiste en calcular el valor actual de los flujos de operación, y se le resta la inversión total desde el momento inicial [14].

7.2.2 Tasa interna de rendimiento (TIR)

Permite medir la rentabilidad como porcentaje. Exige tener una rentabilidad superior al 10%. La tasa máxima exigible corresponde a la que haga que el VAN sea 0 [14].

7.2.3 Cálculo de los indicadores financieros

Para realizar el cálculo se utiliza la inversión inicial calculada anteriormente y se necesitan los flujos de operaciones por 10 años, que corresponde al tiempo de vida útil del proyecto. En la tabla 7.7 se muestran los flujos de operaciones por 10 años, se supone un aumento anual del 3% en costos de materia prima.

Tabla 7.7: Flujo de operaciones del proyecto.

Años	Inversión inicial (¢)	Flujo de ingresos (¢)	Flujo de egresos (¢)	Flujo de efectivo neto (¢)
0	-2.638.940,71			-2.638.940,71
1		4.750.093,28	1.266.691,54	3.483.401,74
2		4.892.596,08	1.304.692,29	3.587.903,79
3		5.039.373,96	1.343.833,06	3.695.540,90
4		5.190.555,18	1.384.148,05	3.806.407,13
5		5.346.271,83	1.425.672,49	3.920.599,34
6		5.506.659,99	1.468.442,66	4.038.217,32
7		5.671.859,79	1.512.495,94	4.159.363,84
8		5.842.015,58	1.557.870,82	4.284.144,76
9		6.017.276,05	1.604.606,95	4.412.669,10
10		6.197.794,33	1.652.745,15	4.545.049,18

Fuente: elaboración propia

Tabla 7.8: Indicadores financieros.

Indicador	Valor	Umbral	¿Cumple?
VAN	¢21.339.904,02	>0	Sí
TIR	135%	>10%	Sí

Fuente: elaboración propia

Se puede observar que el indicador del valor actual neto es mayor que cero, y el valor de la tasa interna de rendimiento es mayor al 10%, por lo que se puede concluir que el proyecto es financieramente rentable.

CÁPITULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

El método utilizado para la búsqueda de alternativas de solución permitió abarcar una gran parte del espacio de soluciones, para así tener una mayor variedad de opciones y poder seleccionar la que mas se ajustara a las necesidades de la empresa. La utilización de criterios con distintos pesos asignados, que se relacionan con las necesidades de la empresa, permitió que se realizara una evaluación adecuada, que permitió comparar el desempeño de todas las alternativas de acuerdo con cada criterio, para así finalmente seleccionar la alternativa que, de manera general, tuviera un mayor desempeño que el resto de las alternativas.

El diseño de los elementos mecánicos del sistema de llenado se realizó de manera que se pudiera cumplir con las especificaciones establecidas, y de manera que hubiera compatibilidad entre las distintas piezas y elementos del sistema. El diseño desarrollado se representó en planos mecánicos, los cuales se utilizaron para su fabricación, además, esto permite que el sistema pueda ser replicado a futuro.

El diseño del control automático permitió que el proceso de llenado de productos líquidos y viscosos se realizara de manera confiable y segura, cumpliendo con las especificaciones establecidas por la empresa. El controlador se seleccionó siguiendo criterios que permitieron determinar la mejor solución según las necesidades de la empresa. El control automático fue capaz de controlar todos los elementos del sistema, así como monitorear el estado del sistema.

Las pruebas realizadas al sistema mostraron resultados satisfactorios, debido a que se cumplieron las especificaciones más importantes que se relacionan con las necesidades de la empresa, la precisión de dosificación tiene un error menor al 5% y la velocidad de llenado permite aumentar la productividad de la empresa en un 25,3%.

Finalmente se concluye que el proyecto es viable económicamente, ya que este permite aumentar los ingresos de la empresa, debido a que genera un gran aumento en la productividad de la empresa.

8.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar capacitaciones de los empleados de la empresa para que se familiaricen con la manera de utilizar el sistema automático.

Se debe utilizar acero inoxidable para la construcción de las piezas del sistema debido al grado sanitario que debe manejarse en la industria cosmética.

Se deben utilizar sellos en todas las conexiones del sistema para evitar fugas que puedan alterar el correcto funcionamiento del sistema.

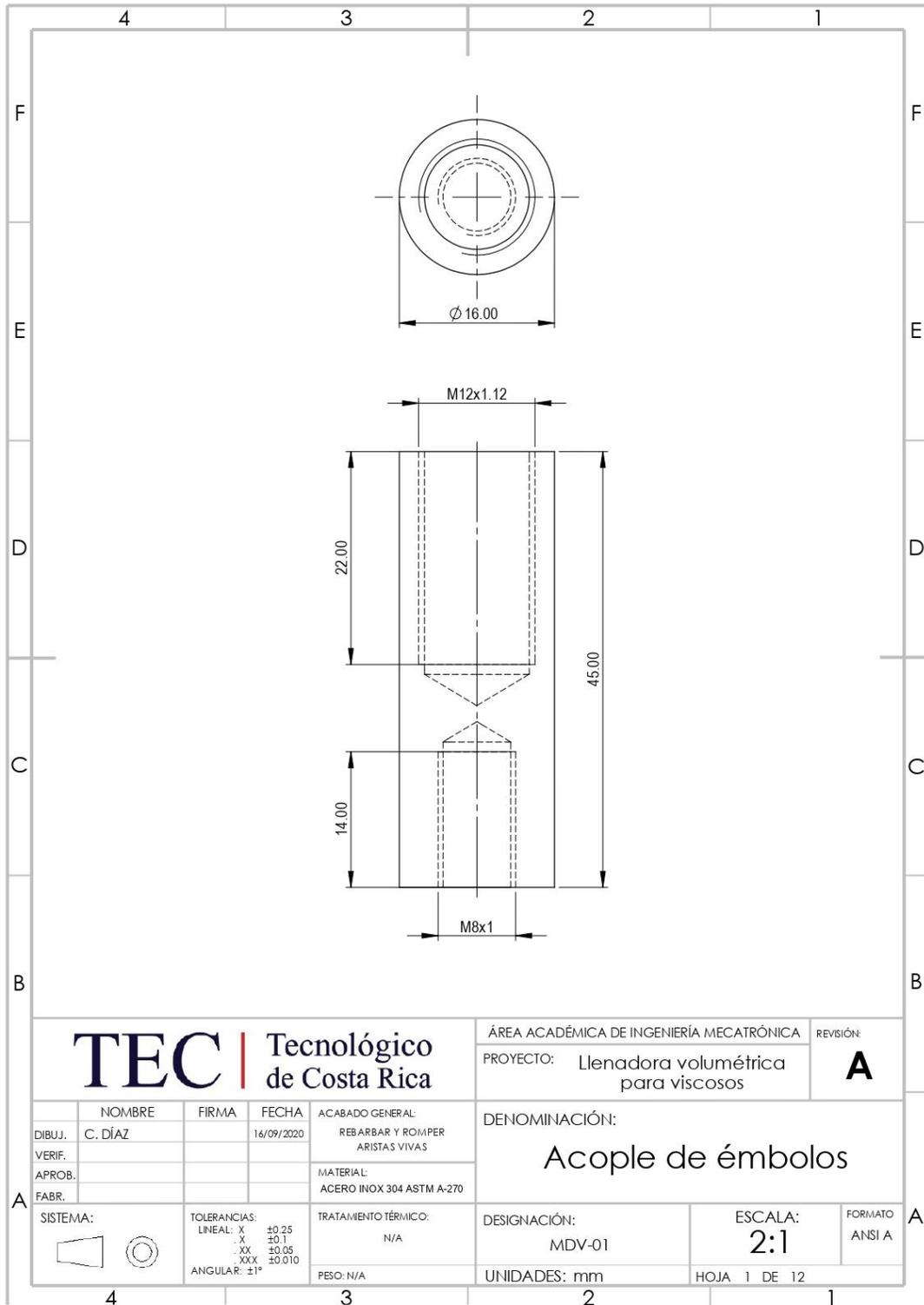
Se recomienda tener repuestos de los elementos de monitoreo y actuación del sistema, para que, en caso de una contingencia, no se vea muy afectada la producción de la empresa.

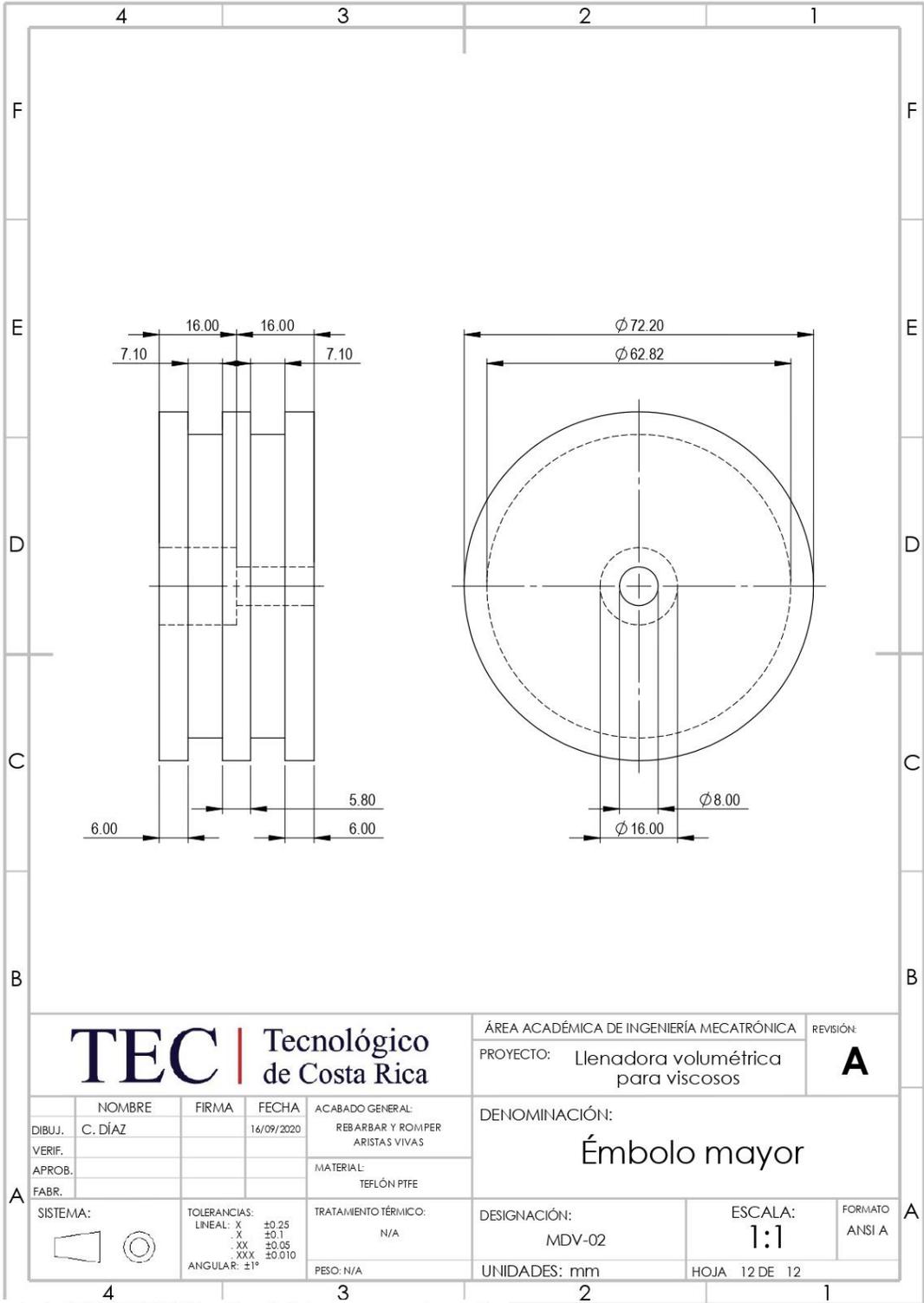
Referencias

- [1] Cosméticos Yambal S.A., Entrevista con Eduardo Sánchez Mantilla. Comunicación personal, 2020.
- [2] M. P. Groover, Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing. 4th. ed. Pearson Educación, 2015.
- [3] MICIITT, Estrategia de Transformación Digital hacia la Costa Rica del Bicentenario 4.0, Costa Rica, 2019.
- [4] K. Ulrich and S. Eppinger. Diseño y desarrollo de productos: quinta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2013. ISBN 9781456240080. URL <http://www.ebooks7-24.com.ezproxy.itcr.ac.cr/?il=281>.
- [5] M. R. Rosen, Harry's Cosmeticology, Volume 3 (9th Edition) - 13.1.4 Filling. Chemical Publishing Company Inc., 2015. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt010X5GIF/harrys-cosmeticology/filling>
- [6] S. Basu, Plant Flow Measurement and Control Handbook - Fluid, Solid, Slurry and Multiphase Flow - 11.7.2 Filling Machines. Elsevier, 2019. Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0120V1US/plant-flow-measurement/filling-machines>
- [7] M. Anderson and P. Whitcomb. DOE Simplified: Practical Tools for Effective Experimentation, Third Edition. CRC Press, 2016. ISBN 9781498730907.
- [8] A. K. Gupta, S. K. Arora, and J. R. Westcott, 12.4 Reasons for Using Automated Assembly Lines. Mercury Learning and Information, 2017. [Online]. Available: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0119K296/industrialautomation/reasons-using-automated>
- [9] R. Mott. Mecánica de fluidos. Pearson Educación, 7a. ed., 2015. Tomado de <http://www.ebooks7-24.com.ezproxy.itcr.ac.cr/?il=3704>

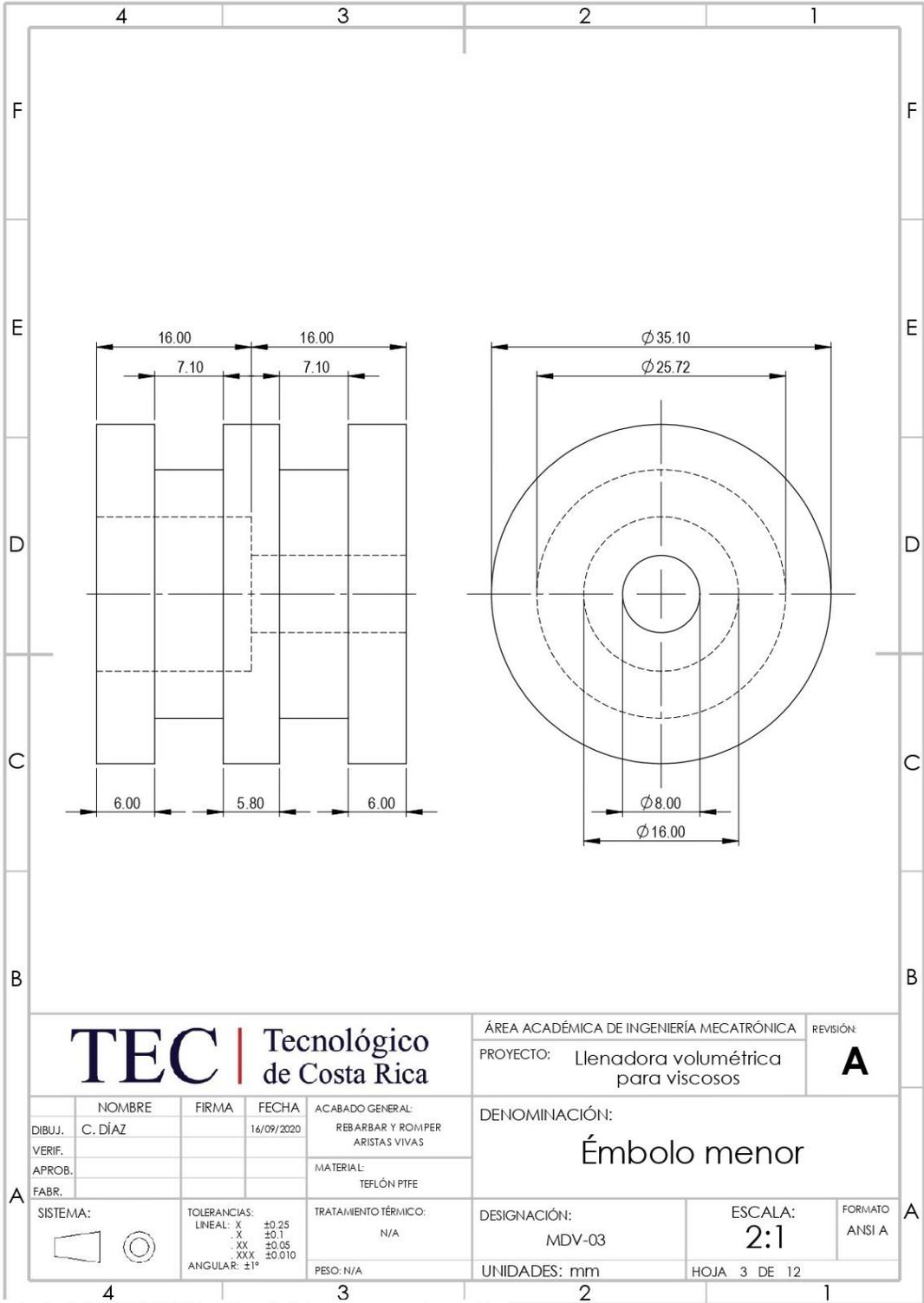
- [10] Y. Cengel, J. Cimbala. Mecánica de fluidos. McGraw-Hill Interamericana, 4a. ed., 2018. Tomado de <http://www.ebooks7-24.com.ezproxy.itcr.ac.cr/?il=7013>
- [11] Parker. Parker O-ring Handbook ORD 5700. PH Corporation, Cleveland, OH, 2018.
- [12] S. Chapman. Máquinas eléctricas: quinta edición. McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2012. ISBN: 978-0-07-352954-7.
- [13] Schneider Electric. Controller M221 16 IO relay Ethernet, TM221CE16R. Tomado de <https://www.se.com/ww/en/product/TM221CE16R/controller-m221-16-io-relay-ethernet/>
- [14] N. S. Chain. Proyectos de inversión: formulación y evaluación: segunda edición. Pearson Educación, 2011.

Apéndice A. Planos mecánicos de la máquina de llenado.

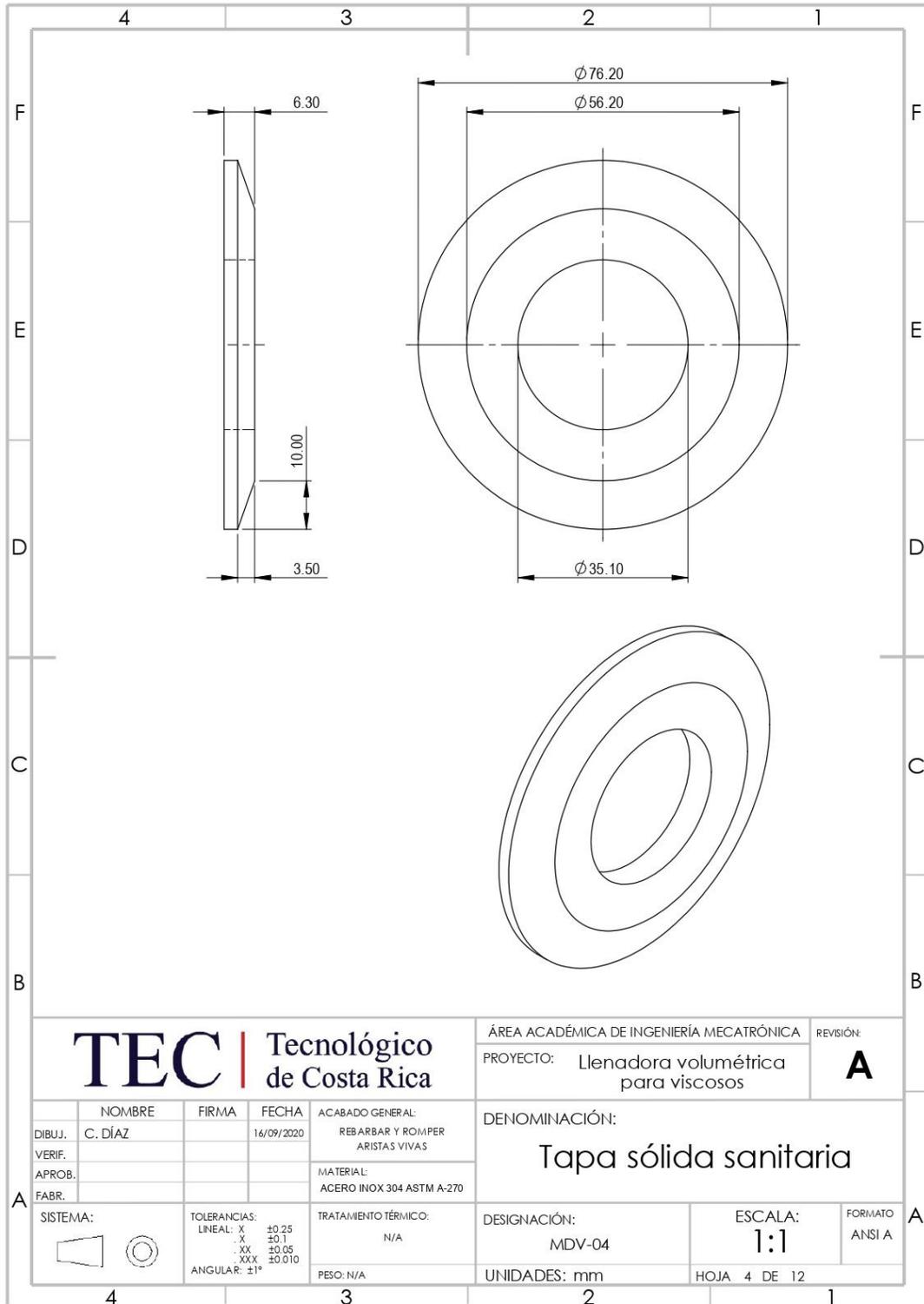




Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA REVISIÓN: **A**
 PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos

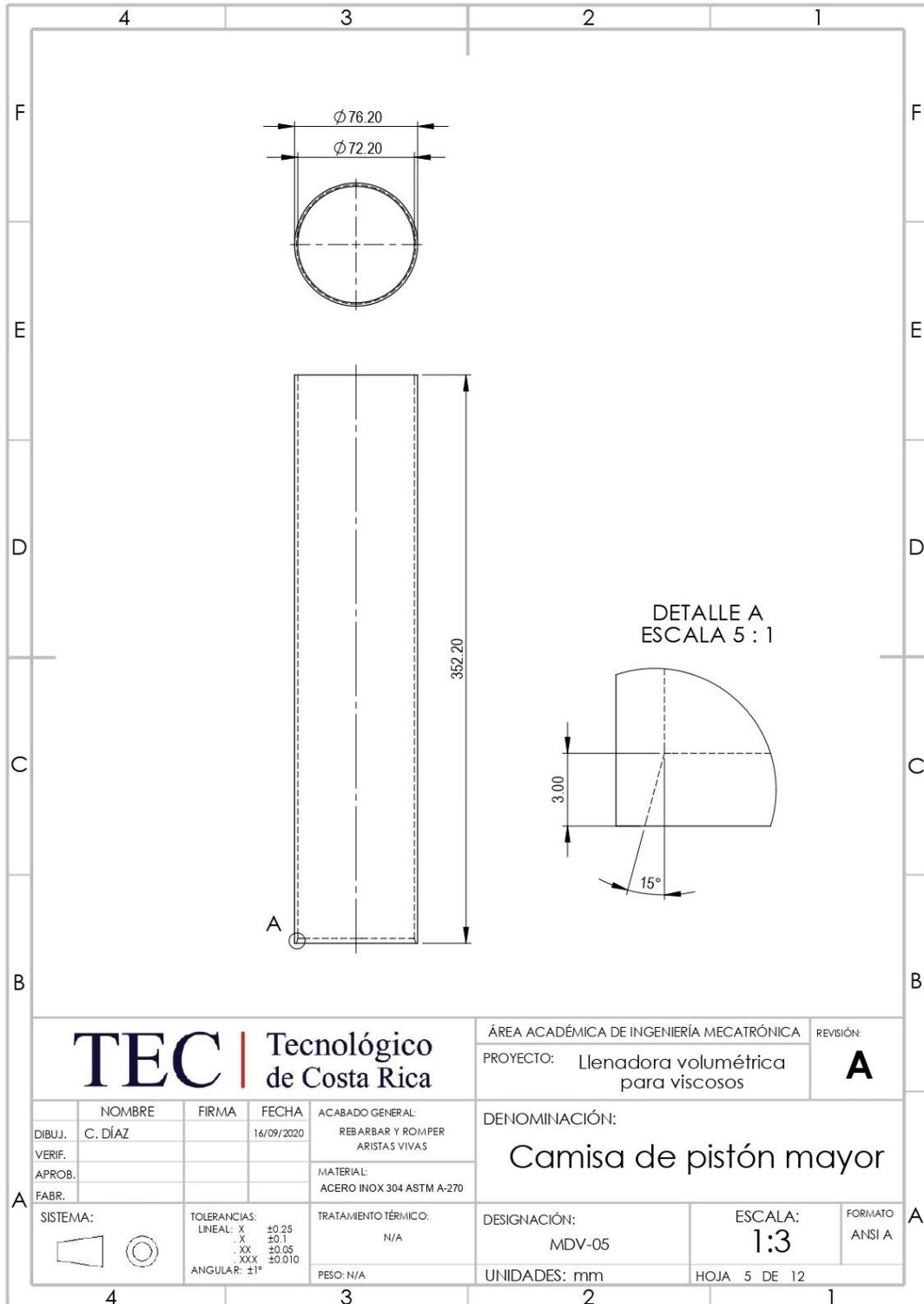
	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	C. DÍAZ		16/09/2020	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ACERO INOX 304 ASTM A-270

DENOMINACIÓN:
Tapa sólida sanitaria

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TRATAMIENTO TÉRMICO:
	LINEAL: X ±0.25 . X ±0.1 . XX ±0.05 . XXX ±0.010 ANGULAR: ±1°	N/A
		PESO: N/A

DESIGNACIÓN: MDV-04 ESCALA: **1:1** FORMATO ANSI A
 UNIDADES: mm HOJA 4 DE 12

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



TEC | Tecnológico de Costa Rica

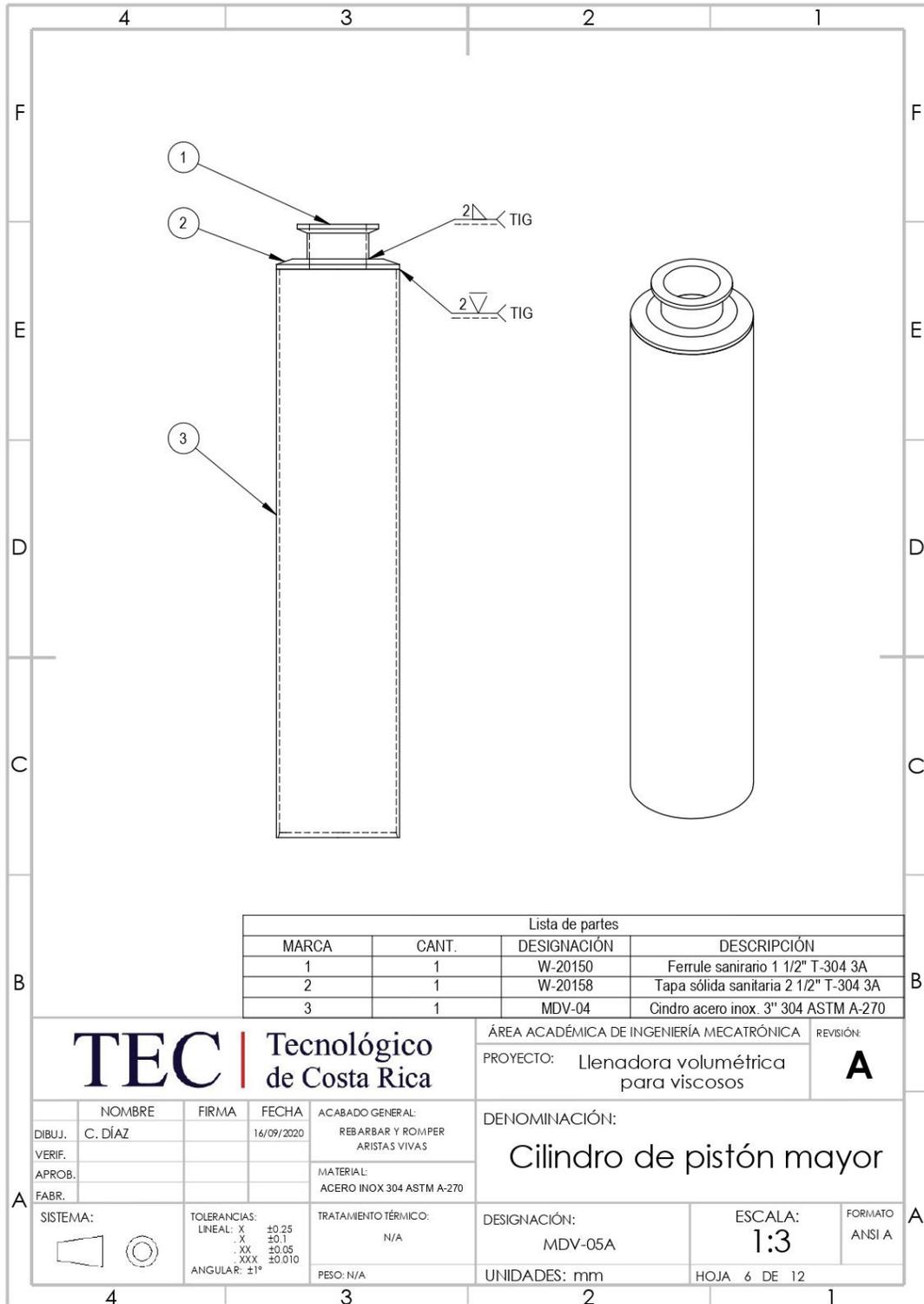
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA REVISIÓN: **A**
 PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
VERIF.	C. DÍAZ		16/09/2020	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ACERO INOX 304 ASTM A-270

DENOMINACIÓN:
Camisa de pistón mayor

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TRATAMIENTO TÉRMICO:	DESIGNACIÓN:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ± 0.25 X ± 0.1 XX ± 0.05 XXX ± 0.010 ANGULAR: $\pm 1^\circ$	N/A	MDV-05	1:3	ANSI A
		PESO: N/A	UNIDADES: mm	HOJA 5 DE 12	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Lista de partes			
MARCA	CANT.	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	1	W-20150	Ferrule sanitario 1 1/2" T-304 3A
2	1	W-20158	Tapa sólida sanitaria 2 1/2" T-304 3A
3	1	MDV-04	Cilindro acero inox. 3" 304 ASTM A-270

TEC | Tecnológico de Costa Rica

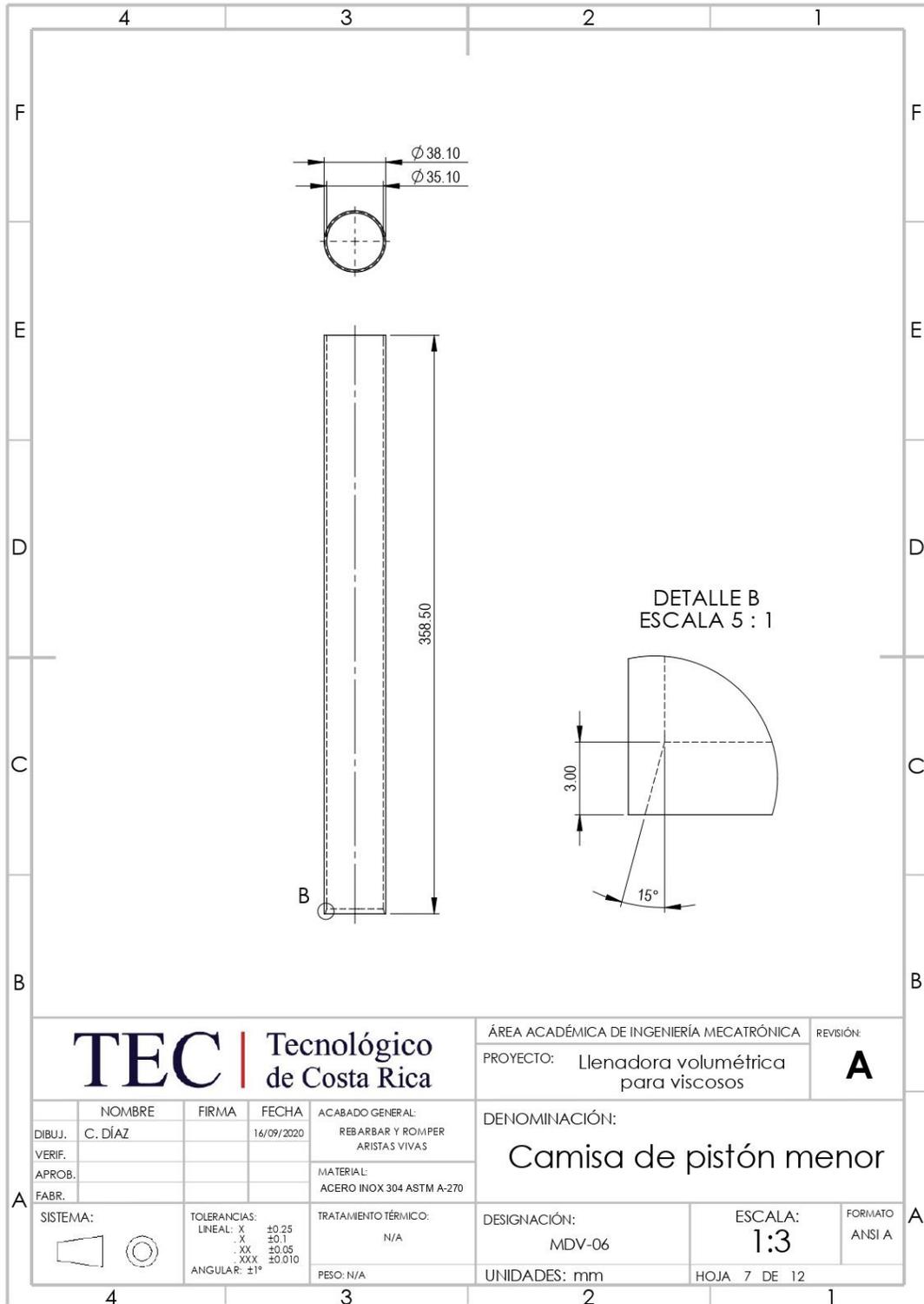
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA REVISIÓN: **A**
 PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
VERIF.	C. DÍAZ		16/09/2020	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ACERO INOX 304 ASTM A-270

DENOMINACIÓN:
Cilindro de pistón mayor

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TRATAMIENTO TÉRMICO:	DESIGNACIÓN:	ESCALA:	FORMATO:
	LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±1°	N/A	MDV-05A	1:3	ANSI A
		PESO: N/A	UNIDADES: mm	HOJA 6 DE 12	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA REVISIÓN: **A**

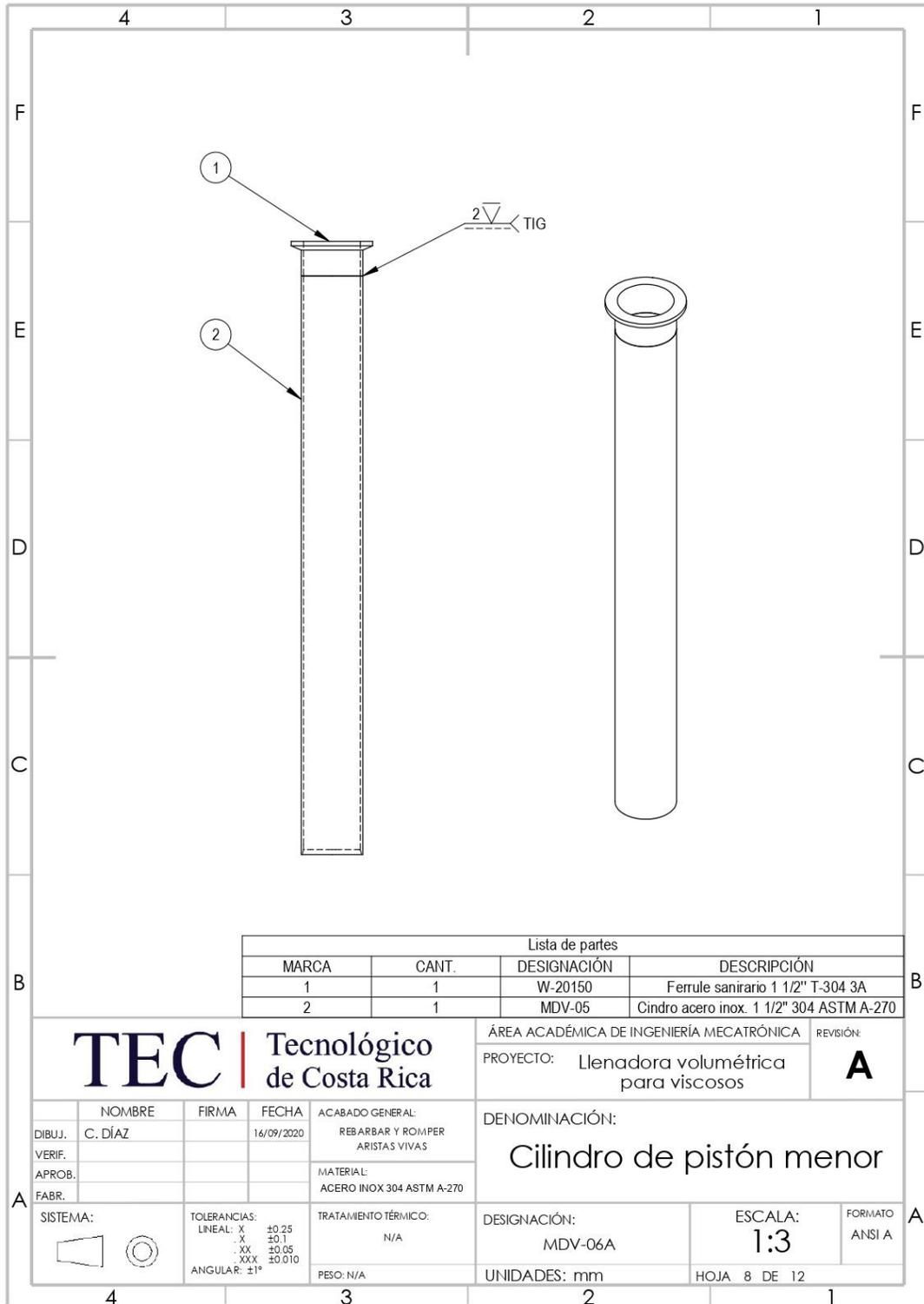
PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos
 DENOMINACIÓN: Camisa de pistón menor

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	C. DÍAZ		16/09/2020	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ACERO INOX 304 ASTM A-270

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TRATAMIENTO TÉRMICO:
	LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±1°	N/A
		PESO: N/A

DESIGNACIÓN:	ESCALA:	FORMATO ANSI A
MDV-06	1:3	
UNIDADES: mm	HOJA 7 DE 12	

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



Lista de partes			
MARCA	CANT.	DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	1	W-20150	Ferrule sanitario 1 1/2" T-304 3A
2	1	MDV-05	Cilindro acero inox. 1 1/2" 304 ASTM A-270

TEC | Tecnológico de Costa Rica

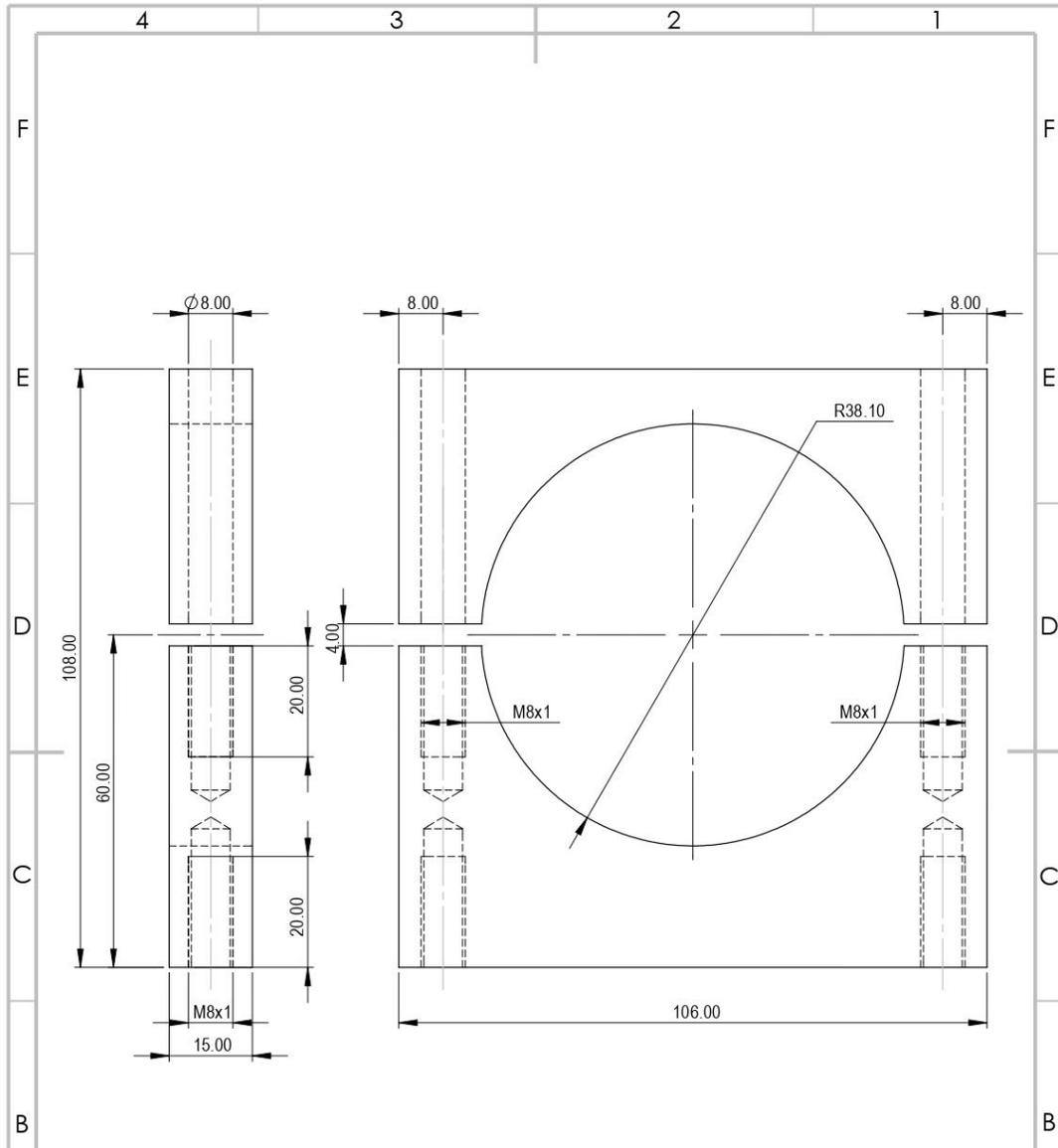
ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA REVISIÓN: **A**
 PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL: REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
DIBUJ.	C. DÍAZ		16/09/2020	
VERIF.				
APROB.				
FABR.				MATERIAL: ACERO INOX 304 ASTM A-270

DENOMINACIÓN:
Cilindro de pistón menor

SISTEMA: 	TOLERANCIAS: LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±1°	TRATAMIENTO TÉRMICO: N/A	DESIGNACIÓN: MDV-06A	ESCALA: 1:3	FORMATO ANSI A
	PESO: N/A	UNIDADES: mm	HOJA 8 DE 12		

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA REVISIÓN: **A**
 PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos

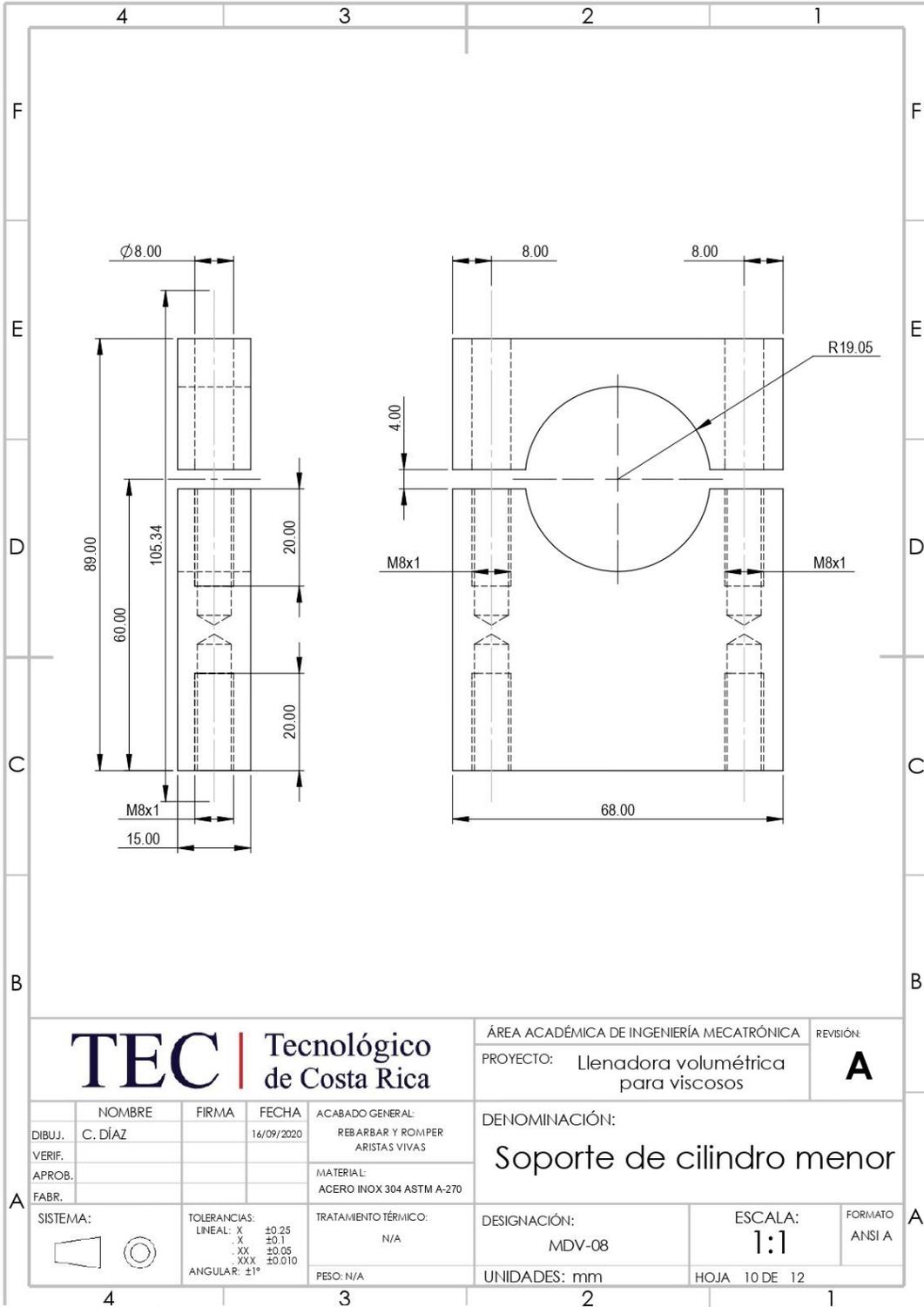
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
VERIF.	C. DÍAZ		16/09/2020	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS
APROB.				MATERIAL:
FABR.				ACERO INOX 304 ASTM A-270

DENOMINACIÓN:
Soporte de cilindro mayor

SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TRATAMIENTO TÉRMICO:
	LINEAL: X ±0.25 X ±0.1 .XX ±0.05 XXX ±0.010 ANGULAR: ±1°	N/A
		PESO: N/A

DESIGNACIÓN: MDV-07 ESCALA: 1:1 FORMATO ANSI A
 UNIDADES: mm HOJA 9 DE 12

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.



TEC | Tecnológico de Costa Rica

ÁREA ACADÉMICA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

REVISIÓN:

PROYECTO: Llenadora volumétrica para viscosos

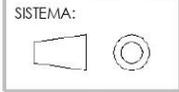
A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	C. DÍAZ		16/09/2020
VERIF.			
APROB.			
FABR.			

ACABADO GENERAL:
REBARBAR Y ROMPER
ARISTAS VIVAS

MATERIAL:
ACERO INOX 304 ASTM A-270

DENOMINACIÓN:
Soporte de cilindro menor



TOLERANCIAS:
LINEAL: X ±0.25
 X ±0.1
 XX ±0.05
 XXX ±0.010
ANGULAR: ±1°

TRATAMIENTO TÉRMICO:
N/A

PESO: N/A

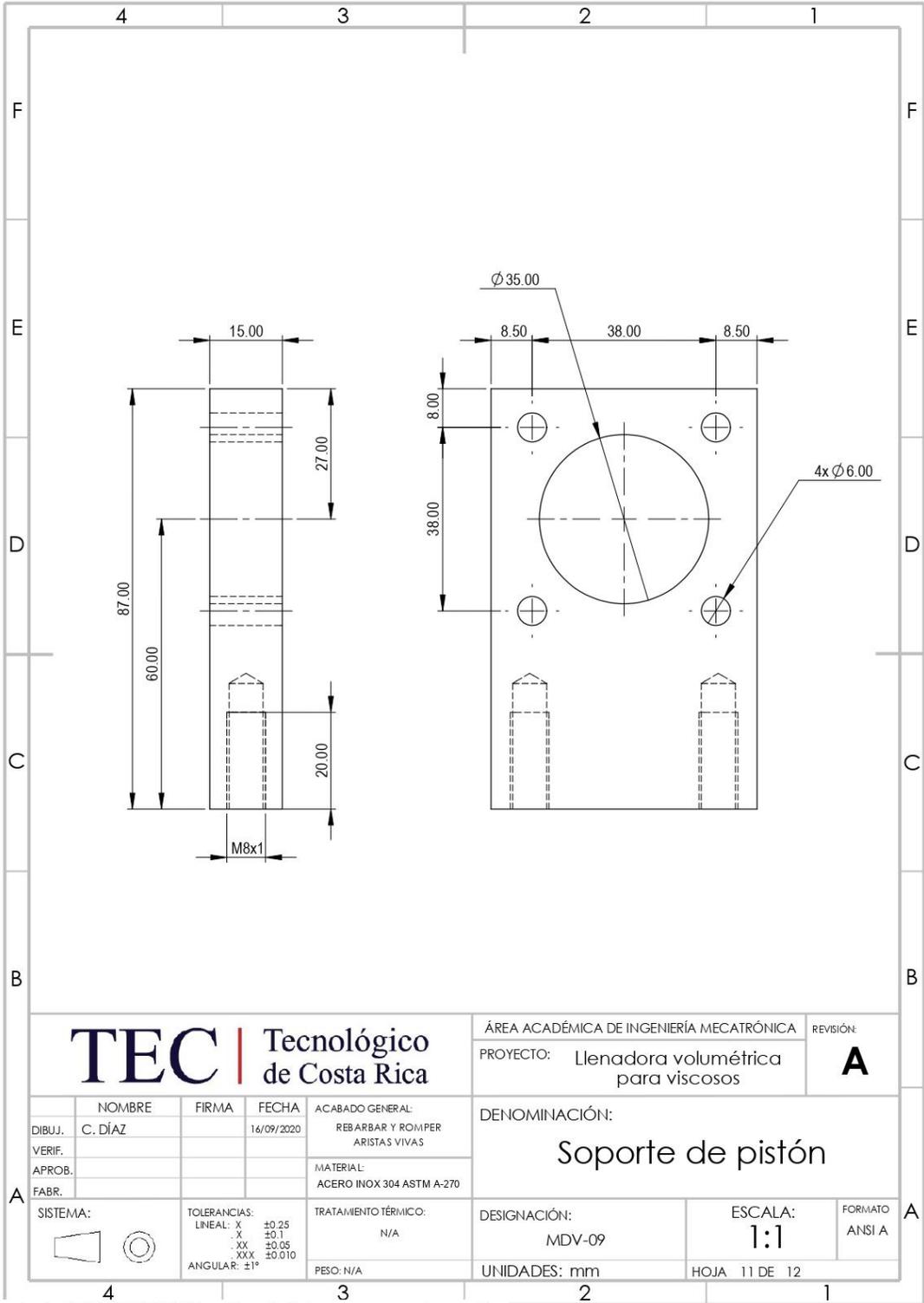
DESIGNACIÓN:
MDV-08

ESCALA:
1:1

FORMATO
ANSI A

UNIDADES: mm

HOJA 10 DE 12



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Apéndice B. Transiciones del diagrama GRAFCET

Pasos Grafcet

Transiciones

Tr1 - Inicio automático



Variables utilizadas:

%I0.3	INICIO
%I0.4	PEDAL
%I0.5	PARO
%I0.6	AUTOMATICO

Tr2 - Inicio manual



Variables utilizadas:

%I0.3	INICIO
%I0.4	PEDAL
%I0.5	PARO
%I0.6	AUTOMATICO

Tr3 - Detección botella



Variables utilizadas:

%I0.2	OPTICO
-------	--------

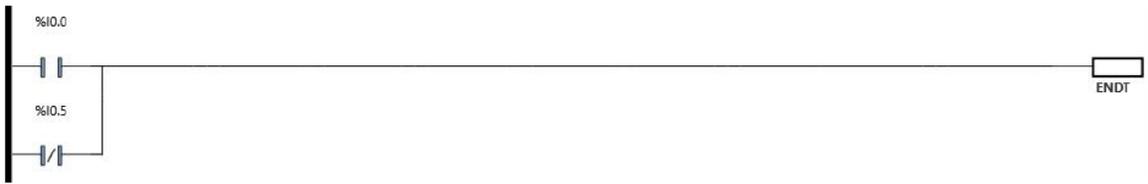
Tr4 - Detección sensor extendido



Variables utilizadas:

%I0.1	EXTENDIDO
-------	-----------

Tr5 - Detección sensor devuelto o paro



Variables utilizadas:

%I0.0 DEVUELTO
%I0.5 PARO

Tr6 - Detección sensor extendido



Variables utilizadas:

%I0.1 EXTENDIDO

Tr7 - Timer o paro



Variables utilizadas:

%I0.5 PARO
%M0 TIMER

Tr8 - Paro de emergencia



Variables utilizadas:

%I0.5 PARO

Tr9 - Paro de emergencia



Variables utilizadas:

%I0.5 PARO

Tr10 - Paro de emergencia



Variables utilizadas:

%I0.5 PARO

Apéndice C. Diagrama de escalera del programa

2 - Acciones POU

Tarea maestra

Rung0 - Pistón succión RESET



Variables utilizadas:

%Q0.0 PISTONSUCCION

%X1

%X5

%X6

Rung1 - Pistón de succión SET



Variables utilizadas:

%Q0.0 PISTONSUCCION

%X3

%X4

Rung2 - Pistón 1 RESET



Variables utilizadas:

%Q0.1 PISTON1

%X1

%X2

Rung3 - Pistón 1 SET



Variables utilizadas:

%Q0.1 PISTON1

%X4

Rung4 - Pistón 2 RESET



Variables utilizadas:

%Q0.2 PISTON2

%X1

%X2

Rung5 - Pistón 2 SET



Variables utilizadas:

%Q0.2 PISTON2

%X6

Rung6 - Motor RESET



Variables utilizadas:

%Q0.3 MOTOR

%X1

Rung7 - Motor SET



Variables utilizadas:

%Q0.3 MOTOR

%X2

Rung8 - Timer



Variables utilizadas:

%M0 TIMER

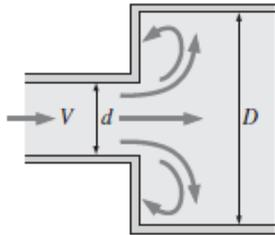
%TM0

%X6

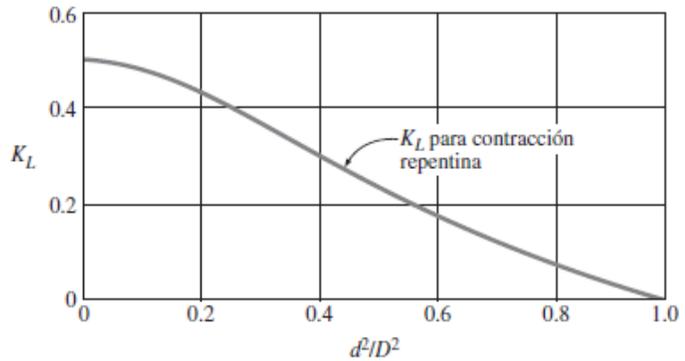
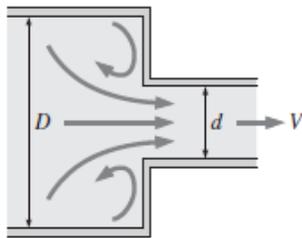
Anexo A. Coeficiente de pérdida KL para expansiones repentinas, contracciones repentinas y accesorios de tuberías

Expansión y contracción repentina (con base en la velocidad en la tubería de diámetro más pequeño)

Expansión repentina: $K_L = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$



Contracción repentina: ver gráfica.

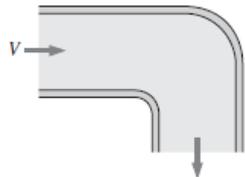


Codos y ramificaciones

Codo suave de 90°:

Embridado: $K_L = 0.3$

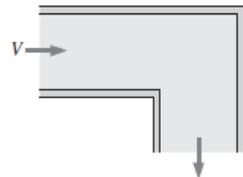
Roscado: $K_L = 0.9$



Codo esquinado de 90°

(sin álabes directores):

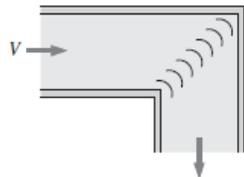
$K_L = 1.1$



Codo esquinado de 90°

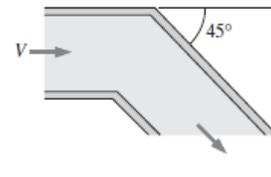
(con álabes directores):

$K_L = 0.2$



Codo roscado de 45°:

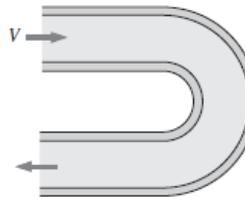
$K_L = 0.4$



Codo de retorno de 180°:

Embridado: $K_L = 0.2$

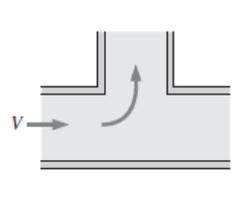
Roscado: $K_L = 1.5$



Conexión en T (flujo deriv.):

Embridado: $K_L = 1.0$

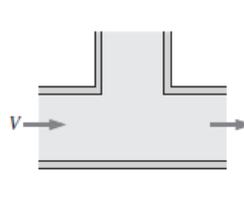
Roscado: $K_L = 2.0$



Conexión en T (flujo en línea):

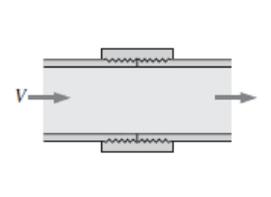
Embridado: $K_L = 0.2$

Roscado: $K_L = 0.9$



Unión roscada:

$K_L = 0.08$



Válvulas

Válvula de globo, totalmente abierta: $K_L = 10$

Válvula de ángulo, totalmente abierta: $K_L = 5$

Válvula de bola, totalmente abierta: $K_L = 0.05$

Válvula de charnela: $K_L = 2$

Válvula de compuerta, totalmente abierta: $K_L = 0.2$

cerrada: $K_L = 0.3$

cerrada: $K_L = 2.1$

cerrada: $K_L = 17$

Anexo B. Densidad y viscosidad de líquidos comunes

TABLA B.1 Unidades del SI [101 kPa (abs) y 25 °C]					
	Gravedad específica sg	Peso específico γ (kN/m ³)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad dinámica η (Pa·s)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)
Acetona	0.787	7.72	787	3.16×10^{-4}	4.02×10^{-7}
Alcohol, etilo	0.787	7.72	787	1.00×10^{-3}	1.27×10^{-6}
Alcohol, metilo	0.789	7.74	789	5.60×10^{-4}	7.10×10^{-7}
Alcohol, propilo	0.802	7.87	802	1.92×10^{-3}	2.39×10^{-6}
Aguamarina amoniaco (25%)	0.910	8.93	910	—	—
Benceno	0.876	8.59	876	6.03×10^{-4}	6.88×10^{-7}
Tetracloruro de carbono	1.590	15.60	1 590	9.10×10^{-4}	5.72×10^{-7}
Aceite de ricino	0.960	9.42	960	6.51×10^{-1}	6.78×10^{-4}
Etilenglicol	1.100	10.79	1 100	1.62×10^{-2}	1.47×10^{-5}
Gasolina	0.68	6.67	680	2.87×10^{-4}	4.22×10^{-7}
Glicerina	1.258	12.34	1 258	9.60×10^{-1}	7.63×10^{-4}
Queroseno	0.823	8.07	823	1.64×10^{-3}	1.99×10^{-6}
Aceite de linaza	0.930	9.12	930	3.31×10^{-2}	3.56×10^{-5}
Mercurio	13.54	132.8	13 540	1.53×10^{-3}	1.13×10^{-7}
Propano	0.495	4.86	495	1.10×10^{-4}	2.22×10^{-7}
Agua de mar	1.030	10.10	1 030	1.03×10^{-3}	1.00×10^{-6}
Trementina	0.870	8.53	870	1.37×10^{-3}	1.57×10^{-6}
Aceite combustible, medio	0.852	8.36	852	2.99×10^{-3}	3.51×10^{-6}
Aceite combustible, pesado	0.906	8.89	906	1.07×10^{-1}	1.18×10^{-4}
Datos aproximados de los fluidos naturales y biológicos seleccionados. Los valores varían significativamente con su composición.					
Aceite de oliva a 68 °F (20 °C)	0.92	9.03	920	0.085	9.24×10^{-5}
Miel a 70 °F (21 °C)	1.42	13.93	1420	10.0	7.04×10^{-3}
Salsa Catsup a 70 °F (21 °C)	1.48	14.52	1480	50.0	3.38×10^{-2}
Mantequilla de maní a 70 °F (21 °C)	1.30	12.75	1300	250	1.92×10^{-1}
Sangre a 50 °F (10 °C)	1.06	10.20	1060	0.01	9.43×10^{-6}
Sangre a 98.6 °F (37 °C)	1.06	10.20	1060	3.5×10^{-3}	3.30×10^{-6}

Anexo C. Tabla de fuerzas de los cilindros doble efecto Camozzi.

Cara empuje		Valores en Newton																								
		SERIE > 16	24	25	27	31	32	QP	QN	QCT	QCB	QCTB	QCTF	40	41	42	50	52	60	61	62	90	92	94	95	97
Ø	Cara empuje	Presión																								
mm	cm ²	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)	MPa (bar)
8	0,50	0,10 (1)	0,20 (2)	0,30 (3)	0,40 (4)	0,50 (5)	0,60 (6)	0,70 (7)	0,80 (8)	0,90 (9)	1 (10)															
10	0,79	4,44	8,9	13,3	17,7	22,2	26,6	31,0	35,5	39,9	44,4															
12	1,13	6,93	13,9	20,8	27,7	34,7	41,6	48,5	55,4	62,4	69,3															
16	2,01	9,98	20,0	29,9	39,9	49,9	59,9	69,9	79,8	89,8	99,8															
20	3,14	17,74	35,5	53,2	71,0	88,7	106,5	124,2	141,9	159,7	177,4															
25	4,91	27,72	55,4	83,2	110,9	138,6	166,3	194,1	221,8	249,5	277,2															
32	8,04	43,32	86,6	130,0	173,3	216,6	259,9	303,2	346,5	389,9	433,2															
40	12,56	70,97	141,9	212,9	283,9	354,9	425,8	496,8	567,8	638,7	709,7															
50	19,63	110,89	221,8	332,7	443,6	554,5	665,4	776,2	887,1	998,0	1108,9															
63	31,16	173,27	346,5	519,8	693,1	866,3	1039,6	1212,9	1386,2	1559,4	1732,7															
80	50,24	275,08	550,2	825,2	1100,3	1375,4	1650,5	1925,6	2200,7	2475,7	2750,8															
100	78,50	443,57	887,1	1330,7	1774,3	2217,8	2661,4	3105,0	3548,6	3992,1	4435,7															
125	122,66	693,08	1386,2	2079,2	2772,3	3465,4	4158,5	4851,5	5544,6	6237,7	6930,8															
160	200,96	1082,93	2165,9	3248,8	4331,7	5414,7	6497,6	7580,5	8663,5	9746,4	10829,3															
200	314,00	1774,28	3548,6	5322,8	7097,1	8871,4	10645,7	12419,9	14194,2	15968,5	17742,8															
250	490,62	2772,31	5544,6	8316,9	11089,2	13861,5	16633,8	19406,1	22178,4	24950,8	27723,1															
320	803,84	4331,73	8663,5	12995,2	17326,9	21658,6	25990,4	30322,1	34653,8	38985,6	43317,3															
		7097,10	14194,2	21291,3	28388,4	35485,5	42582,6	49679,7	56776,8	63873,9	70971,0															

Anexo D. Tabla de juntas tóricas AS-568

Dash	Nominal Size			Actual Size (Inches)				Actual Size (MM)			
	I.D.	O.D.	W	I.D.	+/-	W	+/-	I.D.	+/-	W	+/-
-254	5-1/2	5-3/4	1/8	5.484	.035	.139	.004	139.30	0.89	3.53	0.10
-255	5-5/8	5-7/8	1/8	5.609	.035	.139	.004	142.47	0.89	3.53	0.10
-256	5-3/4	6	1/8	5.734	.035	.139	.004	145.65	0.89	3.53	0.10
-257	5-7/8	6-1/8	1/8	5.859	.035	.139	.004	148.82	0.89	3.53	0.10
-258	6	6-1/4	1/8	5.984	.035	.139	.004	152.00	0.89	3.53	0.10
-259	6-1/4	6-1/2	1/8	6.234	.040	.139	.004	158.36	1.02	3.53	0.10
-260	6-1/2	6-3/4	1/8	6.484	.040	.139	.004	164.70	1.02	3.53	0.10
-261	6-3/4	7	1/8	6.734	.040	.139	.004	171.05	1.02	3.53	0.10
-262	7	7-1/4	1/8	6.984	.040	.139	.004	177.40	1.02	3.53	0.10
-263	7-1/4	7-1/2	1/8	7.234	.045	.139	.004	183.75	1.14	3.53	0.10
-264	7-1/2	7-3/4	1/8	7.484	.045	.139	.004	190.10	1.14	3.53	0.10
-265	7-3/4	8	1/8	7.734	.045	.139	.004	196.45	1.14	3.53	0.10
-266	8	8-1/4	1/8	7.984	.045	.139	.004	202.80	1.14	3.53	0.10
-267	8-1/4	8-1/2	1/8	8.234	.050	.139	.004	209.15	1.25	3.53	0.10
-268	8-1/2	8-3/4	1/8	8.484	.050	.139	.004	215.50	1.25	3.53	0.10
-269	8-3/4	9	1/8	8.734	.050	.139	.004	221.85	1.25	3.53	0.10
-270	9	9-1/4	1/8	8.984	.050	.139	.004	228.20	1.25	3.53	0.10
-271	9-1/4	9-1/2	1/8	9.234	.055	.139	.004	234.55	1.40	3.53	0.10
-272	9-1/2	9-3/4	1/8	9.484	.055	.139	.004	240.90	1.40	3.53	0.10
-273	9-3/4	10	1/8	9.734	.055	.139	.004	247.25	1.40	3.53	0.10
-274	10	10-1/4	1/8	9.984	.055	.139	.004	253.60	1.40	3.53	0.10
-275	10-1/2	10-3/4	1/8	10.484	.055	.139	.004	266.30	1.40	3.53	0.10
-276	11	11-1/4	1/8	10.984	.065	.139	.004	279.00	1.65	3.53	0.10
-277	11-1/2	11-3/4	1/8	11.484	.065	.139	.004	291.70	1.65	3.53	0.10
-278	12	12-1/4	1/8	11.984	.065	.139	.004	304.40	1.65	3.53	0.10
-279	13	13-1/4	1/8	12.984	.065	.139	.004	329.80	1.65	3.53	0.10
-280	14	14-1/4	1/8	13.984	.065	.139	.004	355.20	1.65	3.53	0.10
-283	17	17-1/4	1/8	16.955	.080	.139	.004	430.66	2.05	3.53	0.10
-284	18	18-1/4	1/8	17.955	.085	.139	.004	456.06	2.15	3.53	0.10
-309	7/16	13/16	3/16	.412	.005	.210	.005	10.46	0.12	5.34	0.12
-310	1/2	7/8	3/16	.475	.005	.210	.005	12.07	0.12	5.34	0.12
-311	9/16	15/16	3/16	.537	.007	.210	.005	13.64	0.17	5.34	0.12
-312	5/8	1	3/16	.600	.009	.210	.005	15.24	0.22	5.34	0.12
-313	11/16	1-1/16	3/16	.662	.009	.210	.005	16.81	0.22	5.34	0.12
-314	3/4	1-1/8	3/16	.725	.010	.210	.005	18.42	0.25	5.34	0.12
-315	13/16	1-3/16	3/16	.787	.010	.210	.005	19.99	0.25	5.34	0.12
-316	7/8	1-1/4	3/16	.850	.010	.210	.005	21.59	0.25	5.34	0.12
-317	15/16	1-5/16	3/16	.912	.010	.210	.005	23.16	0.25	5.34	0.12
-318	1	1-3/8	3/16	.975	.010	.210	.005	24.77	0.25	5.34	0.12
-319	1-1/16	1-7/16	3/16	1.037	.010	.210	.005	26.34	0.25	5.34	0.12
-320	1-1/8	1-1/2	3/16	1.100	.012	.210	.005	27.94	0.30	5.34	0.12
-321	1-3/16	1-9/16	3/16	1.162	.012	.210	.005	29.51	0.30	5.34	0.12
-322	1-1/4	1-5/8	3/16	1.225	.012	.210	.005	31.12	0.30	5.34	0.12
-323	1-5/16	1-11/16	3/16	1.287	.012	.210	.005	32.69	0.30	5.34	0.12
-324	1-3/8	1-3/4	3/16	1.350	.012	.210	.005	34.29	0.30	5.34	0.12
-325	1-1/2	1-7/8	3/16	1.475	.015	.210	.005	37.47	0.38	5.34	0.12
-326	1-5/8	2	3/16	1.600	.015	.210	.005	40.65	0.38	5.34	0.12
-327	1-3/4	2-1/8	3/16	1.725	.015	.210	.005	43.82	0.38	5.34	0.12
-328	1-7/8	2-1/4	3/16	1.850	.015	.210	.005	46.99	0.38	5.34	0.12
-329	2	2-3/8	3/16	1.975	.018	.210	.005	50.16	0.46	5.34	0.12
-330	2-1/8	2-1/2	3/16	2.100	.018	.210	.005	53.34	0.46	5.34	0.12
-331	2-1/4	2-5/8	3/16	2.225	.018	.210	.005	56.52	0.46	5.34	0.12
-332	2-3/8	2-3/4	3/16	2.350	.018	.210	.005	59.69	0.46	5.34	0.12
-333	2-1/2	2-7/8	3/16	2.475	.020	.210	.005	62.87	0.50	5.34	0.12
-334	2-5/8	3	3/16	2.600	.020	.210	.005	66.04	0.50	5.34	0.12
-335	2-3/4	3-1/8	3/16	2.725	.020	.210	.005	69.22	0.50	5.34	0.12
-336	2-7/8	3-1/4	3/16	2.850	.020	.210	.005	72.39	0.50	5.34	0.12
-337	3	3-3/8	3/16	2.975	.024	.210	.005	75.57	0.61	5.34	0.12
-338	3-1/8	3-1/2	3/16	3.100	.024	.210	.005	78.74	0.61	5.34	0.12