



Diseño y construcción de un sistema dosificador de aditivos para la fabricación de pinturas látex en la empresa Zatotek S.A. Pinturas Wesco

Galeas Coppiano, Edouard Javier

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Ing. Gómez Reyes, Alejandro Paúl

10 de febrero del 2023

 - Ver los informes				Nombre del informe de originalidad: 10.2.2023 13-18-6 - TESIS_GALEAS (1).pdf.html
				Ubicación del informe de originalidad: C:\Users\eyel\Documents\Plagiarism Detector reports\informe de originalidad 10.2.2023 13-18-6 - TESIS_GALEAS (1).pdf.html

Análisis detallado del cuerpo del documento:

 Tabla de relaciones:

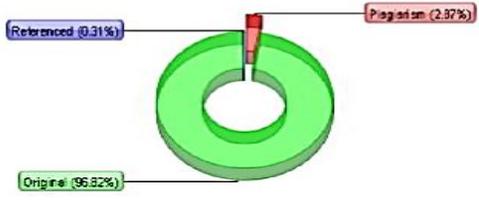
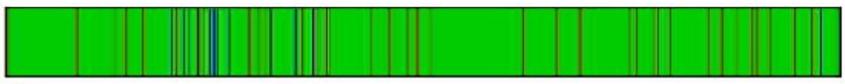


 Gráfico de distribución:



 Principales fuentes de plagio: 25

	→ 2%		830	1	¡La URL estará disponible solo con una licencia! Solicitar una licencia
	→ 0.6%		396	2	¡La URL estará disponible solo con una licencia! Solicitar una licencia
	→ 0.5%		228	3	¡La URL estará disponible solo con una licencia! Solicitar una licencia





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Diseño y construcción de un sistema dosificador de aditivos para la fabricación de pinturas látex en la empresa Zatotek S.A. Pinturas Wesco"** fue realizado por el señor **Galeas Coppiano, Edouard Javier**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 10 de febrero del 2023

Firma:



Ing. Gómez Reyes, Alejandro Paúl

C. C. 1714913637



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Galeas Coppiano, Edouard Javier**, con cédula de ciudadanía N° 1714979349, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un sistema dosificador de aditivos para la fabricación de pinturas látex en la empresa Zatotek S.A. Pinturas Wesco”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de febrero del 2023

Firma

.....
Galeas Coppiano, Edouard Javier

C.C.: 1714979349



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo Galeas Coppiano, Edouard Javier, con cédula de ciudadanía N° 1714979349, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**Diseño y construcción de un sistema dosificador de aditivos para la fabricación de pinturas látex en la empresa Zatotek S.A. Pinturas Wesco**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 10 de febrero del 2023

Firma

Galeas Coppiano, Edouard Javier

C.C.: 1714979349

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a mis padres. Yolanda Coppiano, mi madre, quien siempre ha demostrado preocupación por mi bienestar, crecimiento personal y profesional durante toda mi vida. Ese amor incondicional que una madre puede ofrecer a un hijo sin importar las dificultades, ha sido la razón por la que he podido llegar a alcanzar esta, una de mis metas más importantes en mi vida. A la memoria de mi padre Esgardo Galeas, quien quiso lo mejor para su primogénito en su futuro, y a pesar de no haber tenido la oportunidad de conocerlo cuando yo ya poseía memoria, estoy totalmente convencido de que dio todo por mi familia hasta su último día en vida.

Galeas Coppiano Edouard Javier

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de vivir todo este tiempo, y haberme permitido alcanzar uno de mis logros más significativos de mi vida, anhelando que sean de bendición, y además que los conocimientos adquiridos puedan ser de usados a nivel personal, profesional y colectivo, siendo parte del desarrollo de nuestra sociedad.

Agradezco a mi madre por todo su apoyo, paciencia y sustento que me ha brindado durante todo este tiempo; sus sabios consejos, enseñanzas y ejemplo que me han servido para ser un hombre de buenos principios, y seguir creciendo personalmente con una mentalidad fuerte y escrupulosa.

Agradezco sinceramente a los miembros de Zatotek S.A. Pinturas Wesco: Sebastián Betancourt gerente de mejoramiento continuo, Fabián Aguilar gerente técnico y de operaciones, Andrés Espinosa y Antonio Andrade coordinadores de mantenimiento, y Mishell Narvéez analista de talento humano, quienes me han brindado la confianza y apoyo en la planificación y ejecución de este proyecto con todas las facilidades, recursos, guías y experiencia necesaria.

También agradezco mucho la amistad brindada por mis compañeros de carrera, y de universidad, que a pesar las dificultades que hemos experimentado todos juntos académicamente, de cada uno hemos aprendido lo mejor y les deseo muchos éxitos en sus ideales y propósitos personales.

Finalmente, agradezco a todos mis familiares y amigos que sinceramente me han brindado ánimos y palabras de aliento para seguir esforzándome y no descansar hasta lograr mis objetivos.

Galeas Coppiano Edouard Javier

Índice de contenido

Dedicatoria.....	6
Agradecimientos	7
Resumen	24
Abstract.....	25
CAPÍTULO I.....	26
Introducción	26
Antecedentes	26
Proceso de fabricación de pinturas	26
Descripción del proyecto	27
Justificación e importancia	29
Automatización.....	30
Seguridad.....	31
Alcance del proyecto.....	31
Componente mecánico	33
Componente eléctrico – electrónico	33
Componentes de control	34
Componentes informáticos.....	36
Objetivos.....	37
Objetivo general	37

Objetivos específicos	37
CAPÍTULO II.....	38
Marco teórico	38
Importancia de la industria de la pintura.....	38
Industria de la pintura en Ecuador.....	38
Industria de pintura a base de agua en Ecuador	39
Tipo de pinturas a base de agua	39
Proceso de producción de pinturas líquidas	39
Productos fabricados mediante formulación de aditivos	40
Aditivos	41
Nonil fenol de 10 moles.....	42
Poliacrilato de sodio	43
Monoetilenglicol	44
Antiespumante líquido.....	45
Viscosidad.....	46
Tanques IBC.....	48
Racks.....	49
Acero estructural ASTM A36.....	50
Acero inoxidable AISI 304	50
PLC Siemens S7-1200.....	50
Módulo de señales	51

Módulos de comunicación	52
Celdas de carga	52
Sensores de nivel.....	53
Electroválvulas o válvulas de solenoide	54
Relés de interfaz de salida AC	55
Válvula de bola	56
Válvula de retención.....	57
Tuberías y accesorios	58
Policloruro de vinilo PVC	58
Polipropileno PP.....	60
Válvulas de control.....	60
Rociadores para lavado de tanques	62
Bombas.....	62
Bombas dinámicas	63
Bombas de desplazamiento positivo	65
Sistemas de control por lógica difusa	71
Universo de discurso.....	72
Funciones de membresía	73
Inferencia lógica	78
Conjuntos difusos.....	78
Fusificación	80

Reglas de control	81
Método de inferencia.....	81
Defusificación.....	84
Análisis de resistencia a la fatiga	85
Esfuerzos fluctuantes	89
Criterios de falla por fatiga.....	89
Metodología del modelo V para sistemas mecatrónicos.....	90
CAPÍTULO III.....	92
Diseño y construcción del sistema de dosificación.....	92
Metodología para el diseño e implementación	92
Requerimientos y parámetros de diseño	93
Requisitos de calidad	95
Requisitos para los costos de desarrollo y construcción.....	97
Especificaciones del proyecto	97
Composición física	98
Diagrama funcional	99
Diseño mecánico.....	102
Diseño de la tolva para mezcla de aditivos.....	103
Diseño de ménsulas.....	110
Análisis estático de las placas de empotramiento.....	111
Análisis estático con cartelas laterales	119

Análisis estático de la estructura para montaje de la tolva.....	123
Dimensionamiento de celdas de carga.....	126
Dimensionamiento de bombas	127
Dimensionamiento de tuberías.....	131
Dimensionamiento de la boquilla de aspersión.....	135
Diseño eléctrico.....	136
Requerimientos del sistema eléctrico	136
Dimensionamiento del autómata programable	137
Dimensionamiento de sensores de nivel	143
Dimensionamiento de la válvula proporcional.....	146
Selección de electroválvulas para fluidos líquidos.....	154
Selección de electroválvulas para aire comprimido	156
Selección de regulador de presión de aire	161
Dimensionamiento de fuente de alimentación externa	162
Dimensionamiento de cables	165
Dimensionamiento de relés	171
Dimensionamiento de switch para ampliación de red ethernet	174
Protección a sobre corrientes.....	175
Dimensionamiento del tablero de control.....	177
Elementos adicionales	181
Diseño del sistema de control	185

VARIABLES DEL SISTEMA	186
Universo de discurso	186
Variables lingüísticas	187
Fusificación	190
Defusificación	191
Apertura de la válvula vs. Error	192
DISEÑO DE SOFTWARE	193
Diseño de la interfaz HMI	193
Diseño del sistema SCADA	199
Diseño de data logging	203
Integración de elementos de diseño	204
CAPÍTULO IV	206
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN	206
Componentes mecánicos	206
Tolva para mezcla de aditivos	206
Estructura de la tolva	207
Estructura para tuberías y cables	208
Instalación de bombas de doble diafragma	208
Instalación de tuberías y accesorios	209
Instalación de válvula proporcional	210
Instalación de línea de aire comprimido	210

Componentes eléctricos y electrónicos	211
Preparación del tablero de control.....	211
Montaje y conexión de componentes	212
Instalación de sensores de nivel.....	213
Instalación de celdas de carga	214
Componentes informáticos.....	214
Instalación de interfaz HMI diseñada.....	214
Sistema de control	215
Sistema dosificador de aditivos	215
CAPÍTULO V	217
Pruebas y resultados	217
Pruebas del módulo de dosificación	217
Aditivo WP 64.....	219
Aditivo AM223	223
Aditivo SG606	226
Aditivo AM225	228
Evaluación del módulo de dosificación	230
Pruebas del módulo de alimentación.....	231
Pruebas del módulo de recirculación.....	232
Pruebas del módulo de limpieza	233
Requerimientos resueltos.....	234

Conclusiones	236
Recomendaciones	237
Trabajos futuros	238
CAPÍTULO VI	239
Bibliografía.....	239

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Aditivos de mezcla universal para productos a base de agua Wesco.</i>	42
Tabla 2 <i>Propiedades físicas y químicas del aditivo WP64.</i>	43
Tabla 3 <i>Propiedades físicas y químicas del aditivo dispersante AM225.</i>	44
Tabla 4 <i>Propiedades físicas y químicas del aditivo SG606.</i>	45
Tabla 5 <i>Propiedades físicas y químicas del aditivo dispersante AM223.</i>	46
Tabla 6 <i>Unidades de medida de la viscosidad</i>	48
Tabla 7 <i>Eficiencia de bombas centrífugas según la viscosidad de fluidos</i>	65
Tabla 8 <i>Parámetros para el cálculo de factor de superficie</i>	86
Tabla 9 <i>Factores de confiabilidad.</i>	88
Tabla 10 <i>Requerimientos del sistema de dosificación</i>	93
Tabla 11 <i>Características de calidad para el sistema de dosificación</i>	94
Tabla 12 <i>Simbología de la matriz QFD implementada</i>	94
Tabla 13 <i>Relevancia de las características técnicas del sistema de dosificación</i>	95
Tabla 14 <i>Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 de la tolva.</i>	108
Tabla 15 <i>Especificaciones técnicas de las celdas de carga.</i>	127
Tabla 16 <i>Características técnicas de bombas de doble diafragma Yamada.</i>	128
Tabla 17 <i>Resultados de selección de bomba de doble diafragma.</i>	129
Tabla 18 <i>Características técnicas de las bombas de doble diafragma seleccionadas</i>	130
Tabla 19 <i>Especificaciones técnicas de tuberías roscadas PVC.</i>	131
Tabla 20 <i>Accesorios requeridos en el circuito de tuberías diseñado</i>	134
Tabla 21 <i>Características técnicas de la boquilla de limpieza de tanque seleccionada.</i>	135
Tabla 22 <i>Requerimientos para la ejecución y funcionamiento del sistema</i>	137
Tabla 23 <i>Entradas, salidas analógicas y digitales requeridas en la aplicación.</i>	138
Tabla 24 <i>Selección de PLC Siemens S7-1200</i>	140

Tabla 25 <i>Condiciones de trabajo del PLC en la aplicación</i>	141
Tabla 26 <i>Condiciones ambientales de funcionamiento del PLC</i>	141
Tabla 27 <i>Características técnicas de las salidas digitales del CPU 1215C del PLC</i>	142
Tabla 28 <i>Lista del CPU y módulos del PLC seleccionados</i>	143
Tabla 29 <i>Lista de requerimientos de los sensores de nivel</i>	144
Tabla 30 <i>Características técnicas de los sensores de nivel seleccionados</i>	145
Tabla 31 <i>Características técnicas de los sensores de nivel seleccionados</i>	146
Tabla 32 <i>Lista de requerimientos de los elementos de la válvula proporcional de control</i>	147
Tabla 33 <i>Códigos de actuador giratorio de la válvula proporcional</i>	148
Tabla 34 <i>Características técnicas de actuador giratorio de la válvula proporcional</i>	149
Tabla 35 <i>Códigos del posicionador de la válvula proporcional</i>	150
Tabla 36 <i>Características técnicas del posicionador de la válvula proporcional</i>	151
Tabla 37 <i>Características técnicas de la válvula de bola seleccionada</i>	152
Tabla 38 <i>Lista de requerimientos de las electroválvulas para fluidos líquidos</i>	154
Tabla 39 <i>Características técnicas de las electroválvulas seleccionadas para líquidos</i>	156
Tabla 40 <i>Lista de requerimientos de las electroválvulas para aire comprimido</i>	157
Tabla 41 <i>Características técnicas de electroválvulas seleccionadas para aire comprimido</i> ...	160
Tabla 42 <i>Especificaciones del regulador de presión para aire comprimido seleccionado</i>	161
Tabla 43 <i>Corriente consumida por el PLC y los módulos requeridos</i>	162
Tabla 44 <i>Especificaciones técnicas de la fuente seleccionada</i>	164
Tabla 45 <i>Categorías de caída de tensión máxima admisible</i>	165
Tabla 46 <i>Diámetros y áreas de sección AWG para conductores a 20 °C</i>	168
Tabla 47 <i>Conductor de cobre flexible con aislamiento de policloruro de vinilo</i>	169
Tabla 48 <i>Características técnica de cables seleccionados</i>	170
Tabla 49 <i>Lista de requerimientos de los relés</i>	171

Tabla 50 <i>Características técnicas de relé de interface seleccionado.</i>	173
Tabla 51 <i>Características técnica de switch para conexiones ethernet.</i>	174
Tabla 52 <i>Características técnicas del interruptor termomagnético.</i>	176
Tabla 53 <i>Lista de elementos del tablero de control.</i>	178
Tabla 54 <i>Conjuntos difusos de entrada del controlador.</i>	187
Tabla 55 <i>Conjuntos difusos de salida del controlador.</i>	188
Tabla 56 <i>Reglas de control del sistema dosificador de aditivos.</i>	189
Tabla 57 <i>Simbología de los objetos en la interfaz HMI.</i>	194
Tabla 58 <i>Factores y niveles para aplicación de metodología DOE de Taguchi.</i>	218
Tabla 59 <i>Orden de ejecución de experimentos.</i>	219
Tabla 60 <i>Resultados de los experimentos con aditivo WP64.</i>	219
Tabla 61 <i>Resultados de los experimentos con aditivo AM223.</i>	223
Tabla 62 <i>Resultados de los experimentos con aditivo SG606.</i>	225
Tabla 63 <i>Resultados de los experimentos con aditivo AM225.</i>	228
Tabla 64 <i>Evaluación de la automatización del proceso de dosificación.</i>	230
Tabla 65 <i>Evaluación de alimentación a tanques IBC.</i>	231
Tabla 66 <i>Evaluación de la automatización de alimentación a tanques IBC.</i>	232
Tabla 67 <i>Evaluación de la automatización de recirculación en tanques IBC.</i>	232
Tabla 68 <i>Evaluación de proceso de limpieza de la tolva de dosificación.</i>	234
Tabla 69 <i>Verificación de características de calidad del sistema dosificador de aditivos.</i>	234
Tabla 70 <i>Verificación de los requerimientos del sistema dosificador.</i>	235

Índice de figuras

Figura 1 <i>Medición manual del peso de materia prima en una balanza industrial.</i>	28
Figura 2 <i>Materia prima adquirida en canecas de 20 litros.</i>	30
Figura 3 <i>Esquema del sistema dosificador de aditivos propuesto.</i>	34
Figura 4 <i>Diagrama de bloques del sistema de control propuesto</i>	35
Figura 5 <i>Esquema del sistema SCADA propuesto.</i>	36
Figura 6 <i>Productos a base de agua fabricados mediante mezcla de aditivos.</i>	41
Figura 7 <i>Viscosidad absoluta.</i>	47
Figura 8 <i>Contenedor IBC.</i>	49
Figura 9 <i>Racks selectivos estructurales.</i>	49
Figura 10 <i>Partes de un PLC Siemens S7-1200.</i>	51
Figura 11 <i>Instalación de un módulo de señal SM en un PLC Siemens S7-1200.</i>	51
Figura 12 <i>Instalación de un módulo de comunicación en un PLC Siemens S7-1200.</i>	52
Figura 13 <i>Celdas de carga.</i>	53
Figura 14 <i>Sensores de nivel.</i>	54
Figura 15 <i>Válvula solenoide, diagramas esquemáticos y sus partes.</i>	55
Figura 16 <i>Relé de interfaz.</i>	56
Figura 17 <i>Válvula de bola.</i>	57
Figura 18 <i>Válvula de retención de charnela y pistón.</i>	58
Figura 19 <i>Estructura molecular del PVC.</i>	59
Figura 20 <i>Estructura molecular del PP.</i>	60
Figura 21 <i>Válvulas de control.</i>	61
Figura 22 <i>Rociadores para tanques.</i>	62
Figura 23 <i>Clasificación de bombas.</i>	63
Figura 24 <i>Esquema del funcionamiento de una bomba centrífuga.</i>	64

Figura 25 <i>Efecto de la viscosidad en bombas centrífugas.</i>	66
Figura 26 <i>Diseño esquemático de bombas de desplazamiento positivo.</i>	67
Figura 27 <i>Pulsaciones de una bomba de doble diafragma.</i>	68
Figura 28 <i>Funcionamiento de una bomba de doble diafragma.</i>	70
Figura 29 <i>Diagrama de bloques de un sistema de control convencional.</i>	71
Figura 30 <i>Partes de una función de membresía.</i>	74
Figura 31 <i>Función de membresía singleton.</i>	75
Figura 32 <i>Función de membresía triangular.</i>	75
Figura 33 <i>Función de membresía trapezoidal.</i>	76
Figura 34 <i>Función de membresía campana de Gauss.</i>	77
Figura 35 <i>Función de membresía Gaussiana.</i>	78
Figura 36 <i>Representación gráfica de conjuntos difusos y variables lingüísticas.</i>	80
Figura 37 <i>Método de inferencia de Mamdani.</i>	84
Figura 38 <i>Áreas al 95% de perfiles estructurales no rotativos.</i>	87
Figura 39 <i>Modelo V como un macro-ciclo.</i>	90
Figura 40 <i>Modelo V como metodología para el sistema dosificador de aditivos.</i>	92
Figura 41 <i>Matriz de la casa de la calidad aplicado al sistema dosificador de aditivos.</i>	96
Figura 42 <i>Composición física del sistema dosificador de aditivos.</i>	98
Figura 43 <i>Diagrama funcional del sistema dosificador de aditivos.</i>	100
Figura 44 <i>Dimensiones principales de un tanque IBC.</i>	102
Figura 45 <i>Dimensiones principales de los racks para cuatro tanques IBC.</i>	103
Figura 46 <i>Dimensiones geométricas principales de la tolva</i>	104
Figura 47 <i>Esquema de un contenedor cónico.</i>	106
Figura 48 <i>Esfuerzos y deflexión en la tolva de dosificación a distintos espesores.</i>	110
Figura 49 <i>Dimensiones generales de la placa base para empotrar la tolva.</i>	112

Figura 50	<i>Cortante, momento y deflexión de una viga en voladizo.....</i>	113
Figura 51	<i>Gráficas de carga cortante y momento flector de las placas al 25%.....</i>	116
Figura 52	<i>Gráficas de carga cortante y momento flector de las placas al 50%.....</i>	117
Figura 53	<i>Vista isométrica de un apoyo de la tolva y sus dimensiones</i>	118
Figura 54	<i>Cortante, momento y deflexión de viga con doble empotramiento y carga central.</i>	120
Figura 55	<i>Coeficiente de concentración de esfuerzos en barra rectangular a flexión</i>	121
Figura 56	<i>Simulaciones de carga estática en ménsulas de distintos espesores y carga.</i>	123
Figura 57	<i>Dimensiones de la estructura de apoyo para la tolva.</i>	124
Figura 58	<i>Resultados de simulación CAE de la estructura de apoyo de la tolva.....</i>	125
Figura 59	<i>Equipos y accesorios para mediación de masa.....</i>	126
Figura 60	<i>Vista isométrica del circuito de tuberías.</i>	133
Figura 61	<i>Vista explotada de válvula proporcional</i>	153
Figura 62	<i>Válvula proporcional ensamblada.....</i>	154
Figura 63	<i>Selección de la electroválvula según la presión del aire y coeficiente de válvula...158</i>	
Figura 64	<i>Características técnicas de electroválvulas solenoides.</i>	159
Figura 65	<i>Dimensiones del relé de interface seleccionado.....</i>	172
Figura 66	<i>Esquema del tablero de control.</i>	177
Figura 67	<i>Gabinete Beaucoup seleccionado.....</i>	179
Figura 68	<i>Indicadores luminosos.....</i>	180
Figura 69	<i>Interruptor de cuatro polos para paneles de control.....</i>	180
Figura 70	<i>Pulsador de emergencia tipo hongo.</i>	181
Figura 71	<i>Dimensiones de las estructuras para tuberías.....</i>	182
Figura 72	<i>Simulación de estructura a cargas estáticas.....</i>	183
Figura 73	<i>Bandejas seleccionadas.....</i>	184
Figura 74	<i>Diagrama de bloques del sistema de control implementado.....</i>	186

Figura 75 <i>Funciones de membresía de la variable de entrada.</i>	188
Figura 76 <i>Funciones de membresía de la variable de salida.</i>	189
Figura 77 <i>Fusificación de la entrada al controlador.</i>	190
Figura 78 <i>Diagramas de flujo del algoritmo de fusificación.</i>	191
Figura 79 <i>Defusificación de la función de membresía de salida tratada.</i>	192
Figura 80 <i>Respuesta del controlador con el método del centroide.</i>	192
Figura 81 <i>Pantalla principal de la interfaz HMI.</i>	193
Figura 82 <i>Pantalla de la operación de dosificación en la interfaz HMI.</i>	195
Figura 83 <i>Pantalla de la operación de alimentación en la interfaz HMI.</i>	196
Figura 84 <i>Pantalla de la operación de recirculación en la interfaz HMI.</i>	197
Figura 85 <i>Pantalla de la operación de limpieza de la tolva en la interfaz HMI.</i>	198
Figura 86 <i>Pantalla principal del sistema SCADA.</i>	199
Figura 87 <i>Pantalla de la operación de dosificación en el sistema SCADA.</i>	200
Figura 88 <i>Pantalla de la operación de alimentación en el sistema SCADA.</i>	201
Figura 89 <i>Pantalla de la operación de recirculación en el sistema SCADA.</i>	202
Figura 90 <i>Pantalla de la operación de limpieza de la tolva en la interfaz HMI.</i>	202
Figura 91 <i>Registro de datos en el PLC.</i>	203
Figura 92 <i>Diseño CAD del sistema dosificador de aditivos.</i>	204
Figura 93 <i>Diagrama de flujo del sistema dosificador de aditivos.</i>	205
Figura 94 <i>Tolva para mezcla de aditivos construida.</i>	207
Figura 95 <i>Estructura construida para montaje de la tolva.</i>	207
Figura 96 <i>Estructura construida para instalación de tuberías y cables.</i>	208
Figura 97 <i>Bombas de doble diafragma del sistema dosificador.</i>	209
Figura 98 <i>Instalación de tuberías.</i>	209
Figura 99 <i>Válvula proporcional instalada.</i>	210

Figura 100	<i>Válvula de retención y válvula reguladora de caudal de aire comprimido.</i>	211
Figura 101	<i>Gabinete para circuitos del sistema.</i>	212
Figura 102	<i>Circuitos eléctricos del tablero de control.</i>	212
Figura 103	<i>Sensores de nivel instalados.</i>	213
Figura 104	<i>Instalación de celdas de carga.</i>	214
Figura 105	<i>Interfaz HMI en funcionamiento.</i>	215
Figura 106	<i>Sistema dosificador de aditivos construido.</i>	216
Figura 107	<i>Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de WP64.</i>	222
Figura 108	<i>Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de WP64.</i>	223
Figura 109	<i>Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de AM223.</i>	224
Figura 110	<i>Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de AM223.</i>	225
Figura 111	<i>Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de SG606.</i>	226
Figura 112	<i>Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de SG606.</i>	227
Figura 113	<i>Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de AM225.</i>	229
Figura 114	<i>Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de AM225.</i>	230
Figura 115	<i>Barriles de 200 litros de aditivos.</i>	233

Resumen

La fabricación de pinturas a base de agua empieza con la mezcla de aditivos que son proporcionados según la formulación correspondiente y la cantidad necesaria para producir cada lote. En Zatotek S.A. Pinturas Wesco se realizaba este proceso manualmente, en el cual se utilizaba una balanza digital para medir la masa de cada componente que se deseaba dosificar y mezclar, esto provocaba problemas de fiabilidad, compostura y mal manejo del tiempo productivo, es por esto, que el presente trabajo consiste en el diseño y construcción de un sistema dosificador de aditivos para mezclas universales según los requerimientos de producción preestablecidos por la empresa beneficiaria. Este sistema automatiza el proceso mencionado para reducir tiempos de producción, optimizar el espacio de almacenamiento de materia prima, obtener fiabilidad en la medición de cada lote, registrar cada lote realizado y permitir la monitorización de la cantidad de materia prima disponible.

El sistema dosificador de aditivos realizado posee cuatro funciones: dosificación de 1 a 4 aditivos que están almacenados en tanques IBC correspondientemente, alimentación de los tanques IBC para el reabastecimiento del aditivo proporcionado, recirculación del contenido de cada tanque y limpieza de la tolva en la que se dosifican y mezclan los aditivos. La función principal es la dosificación la cual permite obtener la cantidad de cada aditivo por unidad de masa en kilogramos mediante un sistema de control de lógica difusa. El volumen máximo disponible en el contenido de la tolva es de 500 Litros, cada aditivo puede ser dosificado desde 10 hasta 250 kilogramos, considerando el volumen máximo permitido, el flujo de líquidos depende de las propiedades físicas de cada aditivo.

Palabras clave: aditivos, dosificación, lógica difusa, flujo de líquidos.

Abstract

The manufacture of water-based paints begins with the mixture of additives that are provided according to the corresponding formulation and the quantity necessary to produce each batch. At Zatotek S.A. Pinturas Wesco carried out this process manually, in which a digital scale was used to measure the mass of each component that was to be dosed and mixed, this caused reliability problems, composure and mismanagement of productive time, which is why the This work consists of the design and construction of an additive dosing system for universal mixtures according to the production requirements pre-established by the beneficiary company. This system automates the aforementioned process to reduce production times, optimize raw material storage space, obtain reliability in the measurement of each batch, record each batch made and allow monitoring of the amount of raw material available.

The additive dosing system carried out has four functions: dosing of 1 to 4 additives that are stored correspondingly in IBC tanks, feeding of the IBC tanks for the replenishment of the additive provided, recirculation of the contents of each tank and cleaning of the hopper in which the additives are dosed and mixed. The main function is the dosage which allows obtaining the amount of each additive per unit of mass in kilograms through a fuzzy logic control system. The maximum volume available in the hopper content is 500 Liters, each additive can be dosed from 10 to 250 kilograms, considering the maximum volume allowed, the flow of liquids depends on the physical properties of each additive.

Keywords: additives, dosage, fuzzy logic, liquid flow.

CAPÍTULO I

Introducción

Antecedentes

La empresa Wesco se convirtió en la primera empresa fabricante de pintura al agua en Ecuador en 1952, está ubicada en la ciudad de Quito y ha desarrollado una variedad de productos, sin embargo, es en el año 2013 cuando la empresa Zatotek S.A. adquiere dicha empresa, siendo una entidad que realiza su actividad en el ámbito de fabricación de pinturas y productos similares, así como, la comercialización de pinturas, barnices, lacas y otros, y también, actividades de alquiler de bienes inmuebles para locales comerciales (Zatotek S.A., 2021). Dentro de la reformulación de los productos, las pinturas Wesco se fabrican con materia prima italiana y europea, el principal objetivo para el cambio de fórmula se enfocó en los cambios ambientales y en las nuevas políticas de gobierno, en relación con la mejor calidad (García, 2013). Al tratarse del tema de producción, la adquisición de materia prima y el proceso de fabricación cuentan con una supervisión y control durante la mezcla de materia, para luego realizar una prueba de control de calidad mediante una muestra del producto obtenido el cual será entregado al cliente final siempre y cuando el producto cumpla con los requerimientos.

Proceso de fabricación de pinturas

El proceso de fabricación de pinturas a base de agua Wesco, se realiza generalmente en 4 etapas: dosificación de aditivos, dispersión, complementación y envasado, y se detallan a continuación:

Dosificación de aditivos. Según la fórmula establecida por el departamento de investigación y desarrollo, el producto objetivo requerirá de una mezcla de 4 aditivos y el peso total de la mezcla será proporcional a la cantidad de cada aditivo.

Dispersión. En esta etapa, se adiciona un aditivo en el tanque móvil en la que el dispersor homogeniza la mezcla, con cierta cantidad de agua.

Complementación. La mezcla homogenizada es transportada a tanques de complementación en la que se agregan químicos adicionales y se diluye con cierta cantidad de agua, este tanque cuenta con un agitador y la tubería de salida de este tanque conduce el producto final a el área de envasado.

Envasado. Según el producto que se haya realizado, se deposita el producto en envases de medio litro, 1 galón, o canecas. Finalmente se empacan en cajas y/o pallets, que se almacenan en el área de producto terminado.

La primera etapa, correspondiente a la dosificación de aditivos, era realizada de forma manual como se muestra en la Figura 1, en la que se entregaba al operador, la fórmula requerida para el lote deseado, para que a continuación realizara la dosificación de cada componente a partir de barriles de 200 litros. El operador utilizaba una báscula y canecas de 5 galones para controlar el peso deseado. Sin embargo, debido al movimiento del fluido dentro de los barriles y el desbalance de los recipientes, la medición era deficiente y este proceso requería desde 20 hasta 100 minutos en completar esta operación por cada lote de la mezcla de aditivos para 1 hasta 4, porque se debía buscar el tanque contenedor del aditivo correspondiente, transportarlo por montacargas uno por uno para poder realizar la mezcla requerida y además se producía desperdicio y suciedad en el área de producción por los residuos y líquidos sobrantes de los recipientes. La manipulación de químicos a largo plazo podrían afectar la salud del operario a pesar de que se ocupen equipos de protección personal.

Descripción del proyecto

El proyecto consistió en diseñar y construir un sistema de dosificación de aditivos para la mezcla universal de 4 componentes para la fabricación de distintos productos de pintura a base de agua, considerando la cantidad de cada componente según la fórmula de cada producto objetivo. El proceso requiere que las sustancias sean proporcionadas según su masa, para su medición fue necesario la implementación de sensores de carga con una resolución de

0.2 kilogramos. Cada componente es vertido mediante bombas neumáticas de doble diafragma, la activación de electroválvulas y una válvula proporcional que controlará el caudal de aire comprimido, la adquisición de datos de la masa se realiza mediante comunicación RS232 entre el indicador de las celdas de carga y el PLC, siendo información para el controlador. Para la monitorización de contenido de materia prima se implementaron sensores de nivel en los tanques IBC, para mostrar al operador la cantidad disponible de aditivo en tiempo real, esto será útil en el momento de ingresar datos por pantalla y para verificación mediante una HMI integrada en el tablero de control industrial o mediante un sistema SCADA, en el cual también se registrará en un archivo de valores separados por comas (.csv) la cantidad de cada aditivo dosificado, para evaluar la mezcla y supervisar el proceso.

Figura 1

Medición manual del peso de materia prima en una balanza industrial.



Nota. Se muestra además una ampliación de la pantalla digital indicadora de la masa de aditivos medida en barriles plásticos.

Además, se implementó un sistema de limpieza del contenedor de la mezcla mediante un rociador giratorio. La aplicación de este proyecto está orientada a optimizar el tiempo de producción, mejorar la fiabilidad en la medición de masa de cada aditivo, optimizar la materia prima, mejorar la calidad de los productos, reducir costos de logística, y mantener la seguridad de los operadores reduciendo su exposición a sustancias químicas. A continuación, se detalla de mejor manera las etapas y sistemas implicados en el uso del proyecto realizado.

Justificación e importancia

En la bodega de pinturas Wesco se almacena toda la materia prima, antes de empezar la producción, el operador tiene la responsabilidad de pesar los ingredientes con una precisión de 0.2 kilogramos. Para que el operador tenga la facilidad de manipular, transportar y verter los líquidos, la empresa adquiere la materia prima en canecas de 20 litros cada uno como se muestra en la Figura 2, considerando que la compra mínima es de 2000 litros solamente de un componente, 100 canecas ocupan un espacio de $0.4 \text{ m} \times 0.5 \text{ m} \times 100 = 20 \text{ m}^2$. Las consecuencias de utilizar canecas son: el desperdicio de materia prima residual en cada envase y que la continua adquisición de estos envases a largo plazo no sería parte de un proceso de desarrollo sostenible.

El control de calidad de cada lote de pintura fabricado ha permitido a la empresa mantener un mercado competitivo. Las pinturas deben mantener las propiedades establecidas por el departamento de investigación y desarrollo en el cual se rigen bajo la norma NTE INEN 1544, para pinturas látex. Para esto es estrictamente necesario que el operador a cargo pese en una báscula cada componente de la fórmula para la mezcla, según la cantidad total de producto a fabricar y los porcentajes de cada componente.

En la planta de producción de pinturas látex Wesco, existe la necesidad de mejorar el proceso de fabricación de pinturas desde el primer paso el cual consiste en dosificar adecuadamente componentes en común para cada fórmula, debido a que al realizarlo de forma

manual en un día de trabajo se requiere de un tiempo total de hasta 1 hora y 40 minutos para la manipulación de envases de materia prima, medición de masa y dosificación. Además, al ser líquidos, constantemente suele desperdiciarse al momento de verter en el tanque, lo descrito provoca imprecisión y pérdida de hasta el 5% en peso de cada componente, eso a largo plazo representa mayores gastos en materia prima y también la obligación de adquirir dicha materia prima en envases plásticos de 20 litros y barriles de 200 litros.

Figura 2

Materia prima adquirida en canecas de 20 litros.



Nota. Se muestra además un tanque IBC que contiene la misma cantidad de materia prima almacenada.

Automatización

El proceso de mezcla de materia prima, como se mencionó en los antecedentes, era de forma manual, utilizando una balanza y vertiendo los ingredientes en los tanques de los dispersores, por lo que fue necesario aumentar el grado de automatización para la mezcla de aditivos durante la fabricación de pinturas a base de agua, lo cual implicó que se dosificara

cada componente según el peso del mismo y el peso total del producto con sus respectivos actuadores. Además, fue necesario un sistema de limpieza de la tolva en donde se realizó la mezcla, con el objetivo de mejorar la productividad y obtener productos de calidad deseada. Para el control de actuadores y lectura de sensores fue necesario la implementación de un controlador lógico programable en el cual se organizó y programó cada proceso requerido.

Seguridad

Las actividades del operador implican la carga de objetos pesados, y estar expuesto a químicos durante más de una hora. El equipo de protección personal y mascarillas no garantizan que su salud este completamente protegida, tanto para sus vías respiratorias, posibles lesiones debido a cargas excesivas o manipulación incorrecta de estas cargas. En el sistema automatizado, se consideraron aspectos de seguridad según la capacidad de la tolva para la mezcla, la cantidad disponible de materia prima en cada tanque, pulsadores de emergencia en caso de que algún componente de control llegase a fallar por haber terminado su tiempo de vida útil, y luces indicadoras de funcionamiento y estado del sistema.

Alcance del proyecto

El alcance de este proyecto contempla todas las estructuras, dispositivos, elementos y algoritmos necesarios para la ejecución de cuatro procesos: dosificación, alimentación, recirculación y limpieza.

1. Diseño y construcción de estructuras metálicas.
 - a. Diseño mecánico de la tolva y estructuras de montaje.
 - b. Diseño CAD de la tolva y estructuras de montaje.
 - c. Simulación en software CAE de la tolva a su máxima capacidad sobre su estructura de montaje.
 - d. Construcción de la tolva y estructuras de montaje.
 - e. Ensamblaje de tolva y estructuras metálicas.

2. Dimensionamiento y selección de sensores y actuadores
 - a. Diseño de instrumentación y tuberías.
 - b. Dimensionamiento de bombas.
 - c. Dimensionamiento de electroválvulas para fluidos líquidos y aire comprimido.
 - d. Dimensionamiento de válvula proporcional.
 - e. Dimensionamiento y selección de celdas de cargas y accesorios.
 - f. Selección de sensores de nivel para tanques.
3. Diseño eléctrico
 - a. Diseño de circuitos de control y potencia.
 - b. Diseño de redes de comunicación.
 - c. Selección del controlador lógico programable y HMI.
 - d. Selección de módulos digitales, analógicos y de comunicación.
 - e. Dimensionamiento de fuentes de alimentación.
 - f. Selección de elementos de protección de circuitos y accesorios.
 - g. Dimensionamiento de tablero de control.
4. Diseño de software
 - a. Diseño de interfaz HMI mediante software del fabricante.
 - b. Implementación de la interfaz HMI en el sistema.
 - c. Diseño e implementación de sistema SCADA.
 - d. Programación de registro de datos de dosificación.
5. Diseño del sistema de control
 - a. Selección del tipo de controlador para el sistema de masa.
 - b. Determinación de variables y funciones del sistema.
 - c. Programación de la dosificación de aditivos.
 - d. Implementación del algoritmo de control en la planta del sistema.

Componente mecánico

El sistema cuenta con estructuras para los tanques IBC y principalmente para la tolva de mezcla, porque esta estructura deberá soportar el peso del contenido máximo de la tolva que será de una tonelada según la capacidad de celdas de carga instaladas (ver Figura 3). El diseño de la tolva requirió de tapas abatibles y cuatro ménsulas de apoyo para tener contacto directo con las cuatro celdas de carga implementadas. Para ello fue necesario calcular la resistencia mecánica de estos elementos y a su vez utilizar teorías de falla estáticas y por fatiga según el caso.

Además, se requirió de la instalación de tuberías con reducciones en la salida de los tanques IBC, según el dimensionamiento de las bombas se estableció el diámetro de las tuberías para flujo de líquidos, sin embargo, fue necesario realizar cálculos de esfuerzos tangenciales inducidos para validar la selección del diámetro, material y accesorios complementarios para el flujo de aditivos, aire comprimido y agua potable.

Componente eléctrico – electrónico

El suministro de energía eléctrica disponible y los elementos de maniobra de control industrial fueron importantes para poder controlar y realizar el encendido y apagado de todo el sistema. En este proyecto los componentes eléctricos y electrónicos se instalaron en el gabinete de servicio pesado como panel de control, que además posee los dispositivos de comunicación, así como luces indicadoras de estado, PLC, monitor HMI, fuentes de corriente continua, montaje en riel DIN y el cableado respectivo según los cálculos de sección del mismo.

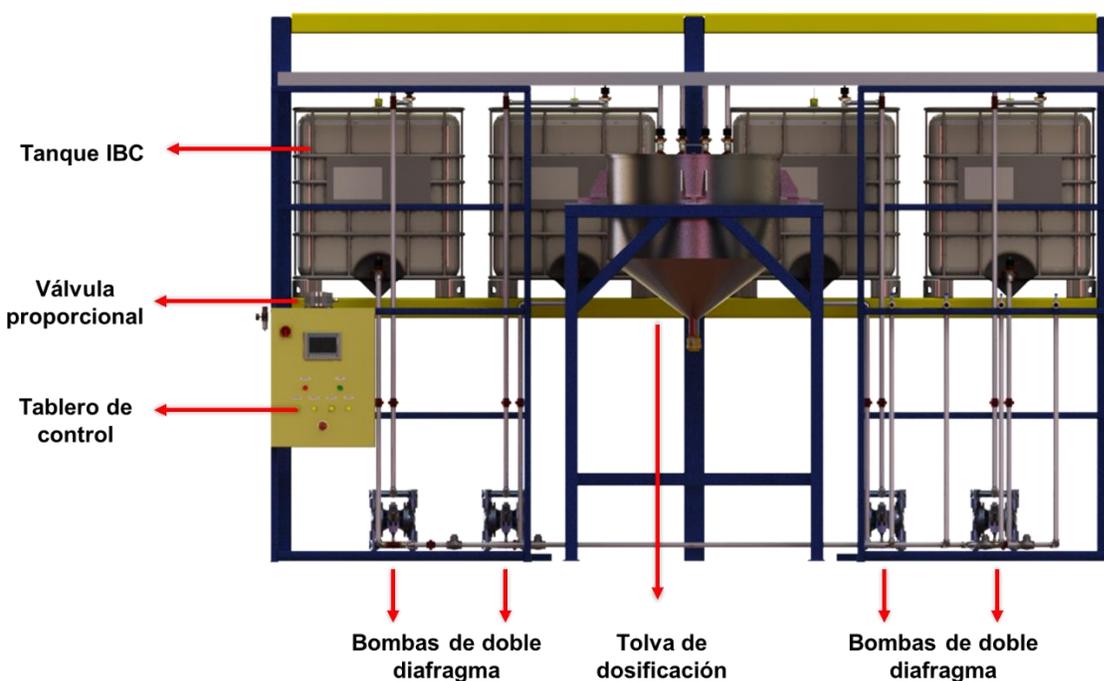
Alimentación. Se alimentó el sistema con dos fases de una red trifásica a 127 VAC, de donde se alimentó una fuente de 24 VDC para los dispositivos de instrumentación electrónica y otros componentes según sus especificaciones.

Conexión de celdas de carga. Las celdas de carga fueron colocadas y calibradas debajo de cada ménsula del tanque de mezcla.

Tarjeta de adquisición de datos. Elemento utilizado para recibir la información de la celda de carga y mediante el sistema de control mediante retroalimentación, compensará las perturbaciones mediante el control de la válvula proporcional, el registro de datos se realizará mediante la lectura de los sensores desde el PLC y se almacenará en un archivo “.csv”.

Figura 3

Esquema del sistema dosificador de aditivos propuesto.



Nota. Vista frontal del sistema dosificador de aditivos propuesto, a cada tanque IBC le corresponde una bomba de doble diafragma, la válvula proporcional estará ubicada detrás del tablero de control ubicado en la zona izquierda.

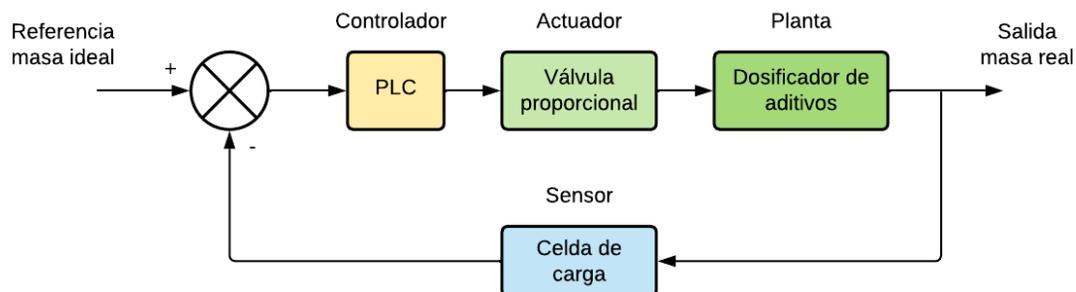
Componentes de control

Para el sistema de control se planteó la implementación de un PLC y una pantalla HMI para gestionar las señales provenientes de mandos manuales y los sensores correspondientes que son: pulsadores, botones digitales que fueron instalados para el operador, sensores de nivel y celdas de carga para la monitorización y control de los procesos que fueron

programados mediante el software del fabricante del PLC. Inclusive, con este dispositivo se podrá configurar tiempos y manejar sentencias para activación o desactivación de actuadores como las electroválvulas o aspersor según la necesidad. Se diseñó e implementó un sistema de control por lógica difusa FLC, que brindó una mayor facilidad de configuración para controlar el flujo de cada aditivo en la dosificación según la masa deseada u objetiva de cada sustancia, lo cual fue determinante para la precisión de dosificación.

Figura 4

Diagrama de bloques del sistema de control propuesto



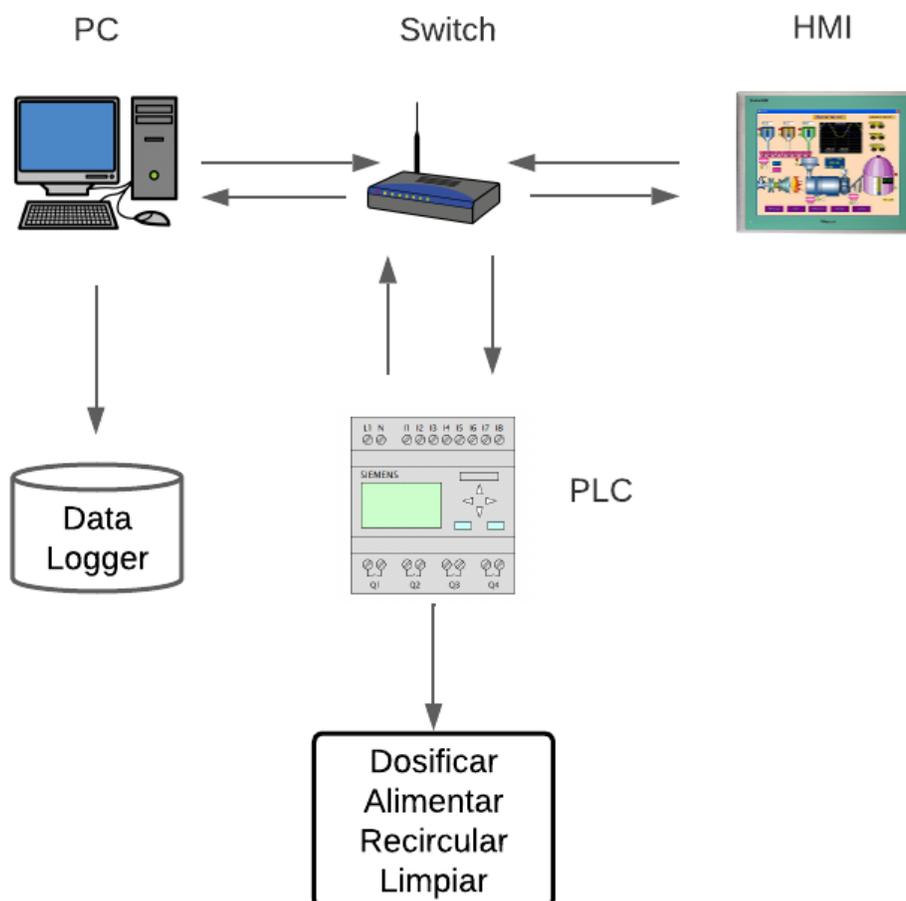
Nota. Se muestra además un tanque IBC con la misma materia prima en su contenido.

Inicialmente se requirió realizar la medición de la estructura en donde se ubicaron los tanques IBC, así como el dimensionamiento de las tuberías y la tolva de la mezcla, considerando el espacio disponible y espacio de maniobra para los montacargas que retirarán los tanques IBC ya sea por limpieza o reemplazo. Previamente a la etapa de control se requirió poner a prueba la planta, luego de verificar su correcto funcionamiento, se realizó el diseño del controlador de nivel para el sistema como se muestra en la Figura 4, mediante la programación del PLC.

El sistema de control una vez ya integrado al sistema, se diseñó e implementó el sistema SCADA como se muestra en la Figura 5, y el proyecto finaliza con la prueba de todo el sistema puesto en marcha.

Figura 5

Esquema del sistema SCADA propuesto.



Nota. El sistema contará con más de 6 actuadores, lo cual requeriría de un módulo adicional.

Componentes informáticos

En este proyecto la función de tecnologías de la información es una de las más importantes porque el proyecto requiere del uso de herramientas software para realizar el diseño CAD-CAE de las estructuras de la máquina, diseño y documentación del sistema eléctrico y electrónico, programación e implementación de la lógica de control.

Objetivos

En este apartado se plantea el objetivo general y los objetivos específicos para la ejecución del presente trabajo de titulación, que permitieron concretar las ideas para la solución a la problemática explorada en la empresa.

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de dosificación de aditivos para la fabricación de pinturas látex en la empresa Zatotek S.A. mediante una metodología de desarrollo para productos mecatrónicos.

Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de masa que permita medir la cantidad de líquido vertido dentro de un recipiente de material adecuado para la dosificación y mezcla de hasta cuatro aditivos.
- Dimensionar y seleccionar los actuadores que permitan un flujo de líquidos adecuado considerando las propiedades físicas de los aditivos para mantener una eficiencia óptima y abaratar costos de instalación y mantenimiento.
- Diseñar e implementar un sistema automatizado con interfaces de usuario de operación y monitorización para los procesos de dosificación, reabastecimiento, recirculación y limpieza.
- Diseñar un sistema de control versátil de fácil configuración para obtener una calibración eficaz en la dosificación de aditivos con propiedades físicas diferentes.
- Realizar pruebas experimentales del sistema dosificador para determinar los parámetros de funcionamiento óptimos que minimicen los errores en la dosificación de cada aditivo.

CAPÍTULO II

Marco teórico

En este capítulo se detallan los conceptos que fueron necesarios para el desarrollo del proyecto, partiendo desde la descripción de los productos que serán elaborados mediante el sistema mecatrónico desarrollado, hasta los fundamentos técnicos que se integraron en el diseño del proyecto.

Importancia de la industria de la pintura

Según el Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recursos (CEER, 2020), a nivel mundial, el mercado de pinturas y recubrimientos tiene un crecimiento que ha sido provocado por el incremento de la demanda en la industria de la construcción debida a la urbanización de ciudades, ensamble de vehículos, aplicaciones residenciales e industriales, lo cual aumenta el consumo de aquellos productos (pp. 36). La “aplicación y utilización de toda pintura y revestimiento influyen de forma directa en la sociedad por medio de la economía ya que pueden optimizar recursos y tiempos de durabilidad, interviniendo directamente en el factor costo” (Parrilla, 2011). Lo cual exige que los recursos tecnológicos, naturales y financieros sean manejados adecuadamente, para que se desarrolle eficazmente la calidad, el rendimiento y la durabilidad de los productos arquitectónicos.

Industria de la pintura en Ecuador

En el país se comercializan varios tipos de pinturas, según la necesidad de la aplicación que el consumidor requiere, la Norma Técnica Ecuatoriana (INEN, 1998) define la clasificación según varios criterios como: el tipo de ligante, el ambiente al que se va a aplicar, el brillo, condiciones de secado, etc. Sin embargo, (CEER, 2020) menciona que, según al tipo de resina, se clasifican en: vinílicas, acrílicas, alquídicas, epóxica catalizadas, poliuretánicas, poliéster; y también según la tecnología: pinturas a base de agua, a base de solvente o en polvo.

Según Benavides (2018) menciona que, el consumo per cápita en Ecuador fue de 1.5 galones en 2018, siendo superado por México (1.8), Brasil (2.5) y Chile (2.6); esto equivale a 5.68 kg por persona, siendo la población en dicho año de 17.08 millones, corresponde a una demanda de cerca de 96.5 millones de kg de consumo, lo cual representa un aumento de casi el doble en 6 años con un consumo de 3 kg per cápita en 2012; mostrando una marcada demanda en aumento; donde se estima que la pintura a base de polímeros acrílicos o vinílicos constituye cerca de un 21%, es decir 20.27 millones de kg estimados de consumo.

Industria de pintura a base de agua en Ecuador

Según la norma INEN (2015) establece que, “la pintura látex es un tipo de recubrimiento que tiene como base una emulsión pigmentada de resinas sintéticas, que se diluye con agua y que se seca por evaporación o coalescencia”. Estas permiten obtener acabados mate, satinados y brillantes, además, poseen alta resistencia al exterior y su secado es rápido. Los productos con estas características pueden ser usados como: selladores, impermeabilizantes, acabados y anticorrosivos.

Tipo de pinturas a base de agua

Los tipos de pinturas en emulsión base agua establecidos según las normas INEN (2015) son cuatro: Los de tipo 1 son para exteriores e interiores con alta resistencia al restregado y de fácil remoción, los de tipo 2 son para exteriores e interiores con media resistencia al restregado y dificultad de remoción media, los de tipo 3 para interiores con baja resistencia al restregado y no lavable, y los de tipo 4, son para cielos rasos e interiores con mínima resistencia al restregado.

Proceso de producción de pinturas líquidas

El proceso productivo para pinturas líquidas se divide en 2 áreas: pintura base agua y pintura base solvente. El proceso general para la fabricación de pintura base agua es el siguiente:

1. Solicitar formulación de producto.
2. Solicitar en almacén la materia prima.
3. Preparar el recipiente considerando el material a fabricar y la cantidad.
4. Verificar que la materia prima esté completa y en buenas condiciones.
5. Analizar el proceso según el producto a fabricar verificando los pasos a seguir.
6. Agregar la materia prima en el orden que se indica, según el tipo y línea de pintura: agua, dispersante, antiespumante, pigmento, amoníaco, espesante celulósico, resina y espesante acrílico.
7. Enviar muestra al laboratorio.
8. En su caso hacer ajustes necesarios.
9. Una vez que el producto cumple con sus especificaciones, se procede al envasado.
10. Enviar el producto al almacén.

Productos fabricados mediante formulación de aditivos

Mediante la norma NTE INEN 1544 se ha establecido en el departamento de desarrollo e investigación de Pinturas Wesco, una formulación principal y común para la fabricación de productos como (Zatotek S.A., 2022):

- *Tersil Satín*, pintura acrílica látex tipo 1.
- *Duratex Satín*, pintura arquitectónica de emulsión acrílica.
- *Royal*, pintura base para preparar colores vivos.
- *Master Látex*, pintura arquitectónica vinil acrílica, látex tipo 3.
- *Covertone*, pintura arquitectónica vinil acrílica, látex tipo 2.
- *Pinternit*, recubrimiento arquitectónico, látex tipo 1.
- *Casa Sana*, pintura arquitectónica de emulsión acrílica modificada con aditivos.

Los productos mencionados se muestran en la Figura 6, la formulación de aditivos consta de 5 componentes como se indica en la Tabla 1, con la cual se realizan los cálculos

según la cantidad del lote a fabricar. Cuatro de estos aditivos se mezclan en la primera etapa de mezclado. El quinto elemento corresponde al texanol, codificado como SG608 que se utiliza durante la etapa de dispersión, por lo cual no se consideró en desarrollo de este proyecto.

Cabe mencionar que para la fabricación de pinturas a base de agua están habilitados 9 tanques de 5000 litros de capacidad, y en cada tanque están instalados motores acoplados a unas aspas que permitirán realizar la complementación del producto.

Figura 6

Productos a base de agua fabricados mediante mezcla de aditivos.



Nota. Adaptado de *Productos*[fotografías], por Zatotek S.A., 2022, Pinturas Wesco (<https://www.pinturaswesco.com/productos>).

Aditivos

Los aditivos se definen como “productos que se dosifican en pequeñas cantidades para facilitar el proceso de fabricación de la pintura, aportar unas características concretas a la película de pintura seca, crear las condiciones adecuadas para que el secado se produzca de

forma correcta” (Alonso, 2020, pp.6). Esto permite que la pintura logre estabilizarse principalmente mientras permanece almacenada y además le facilita propiedades beneficiosas antes y después de su aplicación.

Tabla 1

Aditivos de mezcla universal para productos a base de agua Wesco.

Aditivo	Porcentaje [%]	Densidad [kg/L]	Masa [kg]	Volumen [L]
WP 64	11	0.945	31.88	33.74
AM 225	28	1.24	84.17	67.88
SG 606	16	1.11	46.55	41.94
AM 223	24	0.86	72.69	84.52
SG 608	22	0.946	64.72	68.41
Total	100		300.00	296.49

Nota. Información brindada de los registros del departamento de control de calidad. Los porcentajes servirán para realizar el cálculo en peso total de la mezcla, el valor máximo de entre todas las formulaciones que se realiza en una mezcla de aditivos es de 300 kg.

Nonil fenol de 10 moles

Según Jebsen & Jessen Chemicals (2018) establecen que está compuesto por Neonol AF 9-10 al 98.5% y Polietilenglicol al 1.5%, tiene reactividad con oxidantes, ácidos y álcalis, los cuales son materiales que se deben evitar almacenar junto a este tipo de aditivo. No puede ser utilizado como sustancia o componente de preparados en concentraciones iguales o superiores al 0,1 % en masa para productos cosméticos y entre otros según la hoja técnica. El producto es muy estable en condiciones normales, no se presenta polimerizaciones ni descomposición peligrosa, sin embargo, es importante impedir que se caliente a más de 200 °C.

En la Tabla 2 se detalla las propiedades físicas y químicas más relevantes del Nonil fenol de 10 moles que se utiliza en el proceso de obtención del aditivo universal para fabricación de pinturas en la empresa, que ha sido asignado con el código WP64.

Tabla 2

Propiedades físicas y químicas del aditivo WP64.

Propiedad	Valor o denominación
Apariencia	Líquido aceitoso transparente incoloro a amarillento
Olor	Débil
Índice de hidrógeno (pH)	7.0 ± 1.0 [unidades]
Temperatura de solidificación	6.0 – 10.0 [°C]
Punto de flamabilidad	Max. 245 [°C]
Temperatura de ignición	Min. 245 [°C]
Temperatura de auto-ignición	Min. 395 [°C]
Peso molecular	660
Densidad a 50 °C	1040 ± 3 [kg/m ³]
Solubilidad en agua	Soluble

Nota. Adaptado de *Basic physical and chemicals properties* (p.6), por Jebsen & Jessen Chemicals, 2018, *Nonylphenol ethoxylated 10 mol*, 2(3).

Poliacrilato de sodio

El aditivo dispersante AM225 definido como Poliácrlato de sodio, establece Nopco Colombiana S.A. (2014) que es un producto que no sufre polimerización, su estabilidad química es desconocida, no es inflamable, no es corrosiva y tampoco reactiva; los agentes oxidantes fuertes son incompatibles con este producto, y su descomposición térmica puede producir monómeros acrílicos. Los recipientes de este aditivo se deben mantener cerrados y guardados en lugar ventilado y fresco a una temperatura entre 15 a 35°C, se debe evitar la congelación, ya que afecta a la estabilidad del producto. En la Tabla 3 se muestra las propiedades físicas y químicas correspondientes.

Tabla 3

Propiedades físicas y químicas del aditivo dispersante AM225.

Propiedad	Valor o denominación
Apariencia	Líquido viscoso brillante
Olor	Característico
Índice de hidrógeno (pH)	7.6 - 8.0
Porcentaje de humedad	64 – 66 [%]
Porcentaje de sólidos	34 – 36 [%]
Punto de solidificación / fusión	No disponible
Punto inicial de ebullición	100 [°C]
Punto de inflamación	No aplica
Temperatura de ignición	No aplica
Temperatura de ignición espontánea	No aplica
Presión de vapor a 20 °C	22.6648 [Pa] (Agua)
Densidad a 25 °C	1238 - 1243 [g/cm ³]
Viscosidad	Max. 380 [cP]
Solubilidad al 10 % en agua	Completamente soluble

Nota. Adaptado de “Indol RM” (p.5), por Nopco Colombiana S.A., 2014, *Ficha de datos de seguridad*, 15(9).

Monoetilenglicol

El aditivo SG606 definido como monoetilenglicol, es una mezcla de etilenglicol al 99.9%, dietilenglicol al 0.05% y agua al 0.05%, según (GTM, 2017) menciona que es importante evitar las altas temperaturas y el congelamiento, es decir, manteniendo la temperatura entre 5 °C hasta 40 °C, así el producto puede ser usado en productos cosméticos y tintas de imprenta, químicamente estable y sin requerir de estabilizantes, ya que, en caso de calentamiento puede desprender vapores irritantes y tóxicos. No presenta reacciones al contacto con agua, tampoco produce corrosividad a los metales y es útil como fluido plastificante, solvente, humectante y anticongelante. En la Tabla 4 se detallan las propiedades físicas y químicas correspondientes.

Tabla 4

Propiedades físicas y químicas del aditivo SG606.

Propiedad	Valor o denominación
Apariencia	Líquido viscoso e higroscópico incoloro
Olor	Suave o inodoro
Índice de hidrógeno (pH)	No definido
Porcentaje de humedad	64 – 66 [%]
Porcentaje de sólidos	34 – 36 [%]
Punto de solidificación / fusión	-13 [°C]
Punto inicial de ebullición	198 [°C]
Punto de inflamación	111 [°C]
Temperatura de ignición	No aplica
Temperatura de auto-ignición	398 [°C]
Peso molecular	62.07 [g/mol]
Presión de vapor a 20 °C	7 [Pa] (Agua)
Densidad a 20 °C	1.10 [g/cm ³]
Viscosidad cinemática a 20 °C	21 [cP]
Solubilidad a 20 °C	1000 g/l soluble en agua, alcoholes alifáticos y acetona. Poca solubilidad en benceno.

Nota. Adaptado de “Monoetilenglicol” (p.5), por GTM, 2017, *Ficha de datos de seguridad*.

Antiespumante líquido

El aditivo registrado como AM223, según el fabricante Elementis Specialities (2015) lo denomina como DAPRO DF 7010, que es un antiespumante líquido para aplicaciones universales a base de agua de uso económico, está especialmente recomendado para mezclas estabilizadas con surfactantes y pinturas de disolución que poseen buenas propiedades emulsionantes. En la Tabla 5 se muestran las propiedades físicas más relevantes de este aditivo, se basa en componentes de aceite y cera con un pequeño aditamento de silicona especial, lo cual permite que se pueda almacenar durante muchos meses sin riesgo de separación o sedimentación.

Tabla 5

Propiedades físicas y químicas del aditivo dispersante AM223.

Propiedad	Valor o denominación
Apariencia	Líquido viscoso brillante
Contenido activo	Característico
Densidad a 25 °C	840 - 880 [kg/m ³]
Viscosidad a 25 °C	600 - 4000 [mPa.s]
Solubilidad	Emulsionable en agua, lo que da como resultado una emulsión inestable, que se convierte en crema rápidamente
Composición	Dispersión ultrafina de cera en aceite mineral

Nota. Este aditivo es crítico en la aplicación del sistema dosificador, ya que posee viscosidad alta y se debe considerar esta propiedad al momento de dimensionar elementos actuadores.

Adaptado de “DAPRO DF 7010” (p.1), por Elementis Specialities, 2015, *Ficha técnica del producto.*

Viscosidad

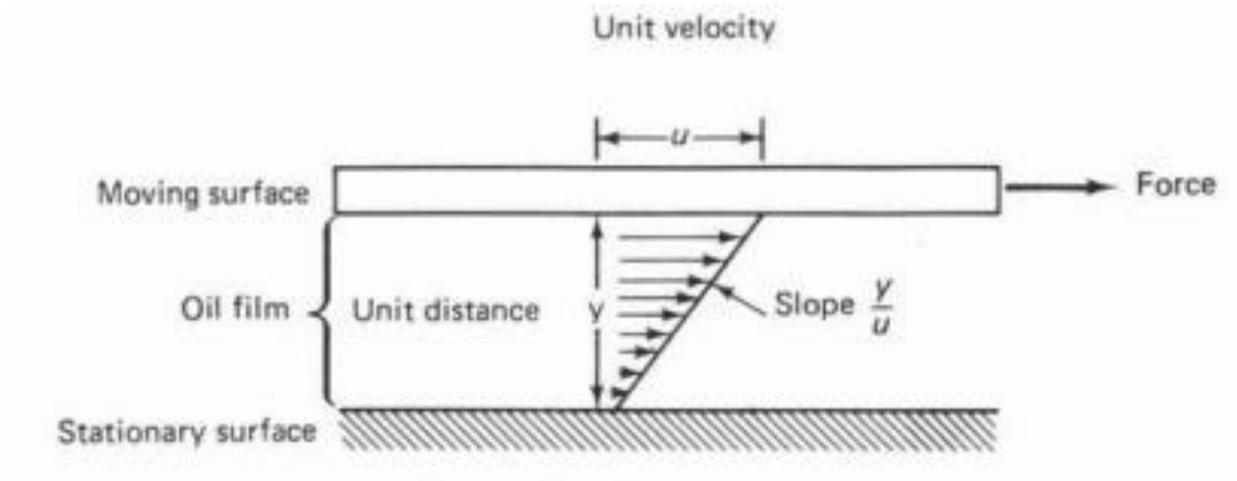
Según Sullivan (1989) define la viscosidad como una medida de resistencia interna de un fluido al corte y está relacionada con la fricción interna del fluido, el valor de viscosidad se asigna para diferenciar relativamente la capacidad de una sustancia que fluya en comparación con otros. Cuando un fluido espeso presenta un flujo más tardío que un fluido delgado es porque tiene mayor fricción interna, es decir que, los valores más altos de viscosidad se asignarán a fluidos más espesos y los más bajos a fluidos más delgados, por tanto, esta propiedad determina la facilidad con la que una sustancia fluirá. Existen dos formas de describir la viscosidad de un fluido: la viscosidad absoluta o dinámica designada por μ , y la viscosidad cinemática designada por ν .

La viscosidad cinemática, definida en (1) se utiliza con frecuencia en los cálculos hidráulicos, esta es igual a la viscosidad absoluta dividida por la densidad de masa del fluido.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1)$$

Figura 7

Viscosidad absoluta.



Nota. Adaptado de *Absolute viscosity* (p.61), por J. Sullivan, 1989, Prentice Hall.

La viscosidad absoluta es igual a la fuerza requerida para mover una superficie plana con un área de una unidad a una velocidad de una unidad, cuando los dos están separados por una película de aceite de una unidad de espesor, como se muestra en la Figura 7 (Sullivan, 1989, pp. 60-61).

En la Tabla 6 se muestran las unidades de medida de viscosidad, con la cual se revisaron las hojas técnicas de los aditivos para el dimensionamiento de las bombas seleccionadas.

Tabla 6

Unidades de medida de la viscosidad

Sistema	Viscosidad absoluta	Viscosidad cinemática
	$\frac{lb \cdot s}{ft^2}$	$\frac{ft^2}{s}$
Unidades Inglesas	$\frac{lb \cdot s}{in^2} = [reyn]$	$\frac{in^2}{s} = [Newts]$
	Saybolt Seconds Universal: [SSU]	
Unidad métrica tradicional	$\frac{dyne \cdot s}{cm^2} = 0.1 \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right] = [poise] = [P]$	$\frac{in^2}{s} = [Stokes] = [St]$
	$poise \cdot 10^{-2} = [cP]$	$Stokes \cdot 10^{-2} = [cSt]$
Unidades del Sistema métrico internacional	$\frac{N \cdot s}{m^2}$	$\frac{m^2}{s}$

Nota. Adaptado de *Viscosity units* (p.61), por J. Sullivan, 1989, Prentice Hall.

Tanques IBC

Son contenedores hechos de polietileno de alta densidad que sirven para el almacenamiento de diversos fluidos líquidos, poseen válvulas de mariposa en diversas medidas estandarizadas, y están montadas en una jaula metálica con bandejas de: madera, plásticas o metálicas.

En el mercado existen tanques de capacidades desde 640 litros hasta 1200 litros, en este proyecto la rosca DN50, capacidad de 1000 litros y fue considerada para los tanques IBC implementados.

Según PetroDerivados (s. f.) establece que las dimensiones del tanque de 1000 litros de capacidad son: 1200 mm x 1000 mm x 1160 mm, y la densidad máxima admisible es de 1.9 g/ml, el tanque se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Contenedor IBC.



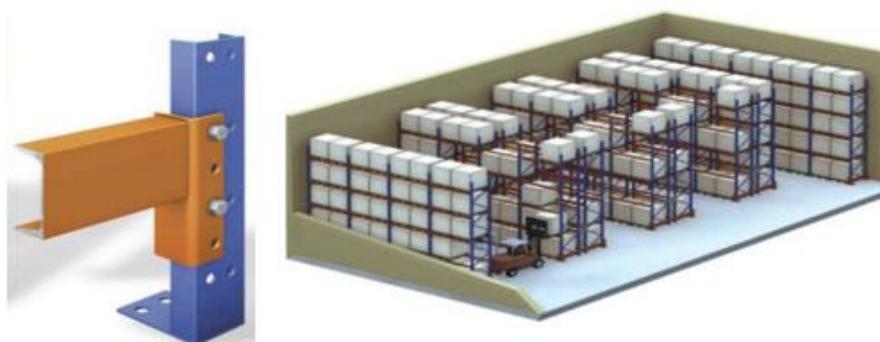
Nota. Adaptado de *PDC Contenedores IBC* (p.2), por PetroDerivados.

Racks

Son estructuras metálicas que permiten organizar lotes de almacenaje, según Metálicos del Bajío (s. f.) menciona que estas estructuras permiten la rápida localización y el acceso directo e inmediato a cada tarima, también su fácil regulación de niveles de carga para ajustar a volúmenes precisos permite optimizar el espacio. En este proyecto se usaron racks selectivos estructurales, los cuales están compuestos por perfiles estructurales de alta resistencia y su montaje es mediante pernos y tuercas, como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Racks selectivos estructurales.



Nota. Adaptado de *Rack Selectivo* (p.3-5), por Metálicos del Bajío.

Acero estructural ASTM A36

Según la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, 2005) establece que el acero estructural ASTM A36 es una aleación de hierro que en su composición química contiene carbono hasta el 0.29 [%], manganeso de 0.8 hasta 1.2 [%], silicio 0.15 a 0.40 [%], fósforo hasta 0.4 [%] y azufre hasta 0.5 [%], lo cual mejoran su soldabilidad, la resistencia a la tracción desde 400 hasta 550 [MPa] con un límite de fluencia de 250 [MPa].

Acero inoxidable AISI 304

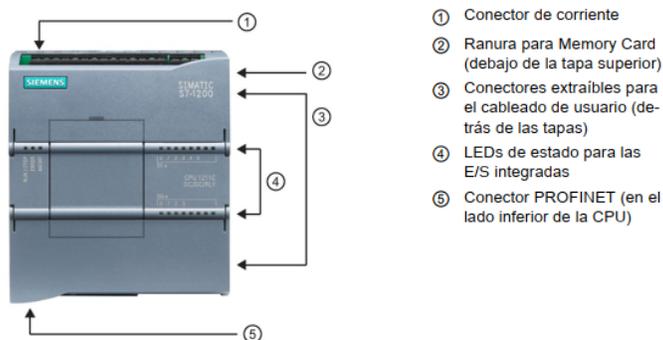
Según Sandmeyer Steel Company (2014) establece que la aleación 304/304L es el acero inoxidable austenítico de cromo-níquel “18-8” económica, resistente a la corrosión, ideal para una amplia gama de aplicaciones como: procesamientos químico y petroquímico: recipientes a presión, tanques, sistemas de tuberías, bridas, accesorios, válvulas y bombas. Su composición química consta de Cromo desde 18.0 a 20.0 [%], Níquel al 8.0 hasta 10.5 [%], Carbono al 0.08 [%], Manganeso al 2.0[%], Fósforo al 0.045 [%], Azufre al 0.03 [%], Silicio al 0.75 [%], nitrógeno al 0.10 [%] y el resto del balance correspondería a Hierro, lo que brindará propiedades mecánicas como: resistencia a la tracción mínimo de 517.11 [MPa] y límite de fluencia mínimo de 206.84 [MPa].

PLC Siemens S7-1200

El controlador lógico programable S7-1200 según el fabricante Siemens (2018) establece que, es un dispositivo potente con flexibilidad para automatizar y controlar varios dispositivos según la aplicación mediante: un microprocesador, una fuente de alimentación integrada, circuitos de entrada y salida, conexión PROFINET, entradas y salidas de Motion Control rápidas. En la Figura 10 se muestran las partes principales de un controlador S7-1200.

Figura 10

Partes de un PLC Siemens S7-1200.



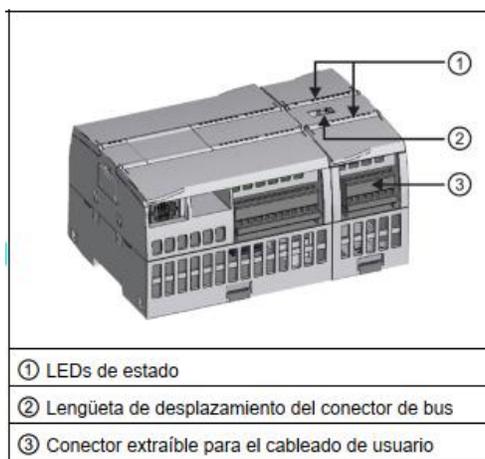
Nota. Adaptado de *Introducción al PLC S7-1200* (p.28), por Siemens, 2018.

Módulo de señales

En la Figura 11 se muestra un esquema de ensamble de un módulo de señal (SM), y sus partes principales a considerar. Estos módulos agregan funciones al PLC conectándolos al lado derecho de la CPU para el manejo de: entrada y/o salidas digitales, entradas o salidas analógicas, sensores RTD o termopar, maestro SM 1278 IO-Link y SM 1238 Energy Meter (Siemens, 2018).

Figura 11

Instalación de un módulo de señal SM en un PLC Siemens S7-1200.



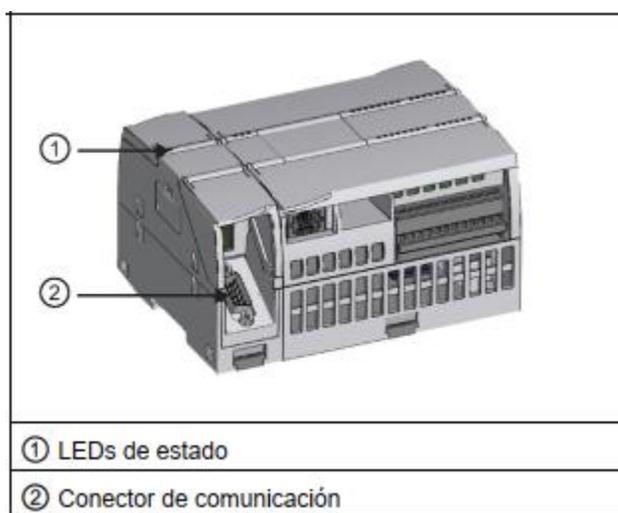
Nota. Adaptado de *Introducción al PLC S7-1200* (p.32), por Siemens, 2018.

Módulos de comunicación

El PLC soporta hasta tres módulos conectados al lado izquierdo (ver Figura 12), módulos de comunicación (CM) y procesadores de comunicaciones (CP) permiten comunicación por redes y protocolos: PROFIBUS, GPRS, LTE, WAN, RS485, RS232, RS422, CEI, DNP3, USS y MODBUS (Siemens, 2018).

Figura 12

Instalación de un módulo de comunicación en un PLC Siemens S7-1200.



Nota. Adaptado de Introducción al PLC S7-1200 (p.32), por Siemens, 2018.

Celdas de carga

Uno de los dispositivos de instrumentación para medir masa, son los sensores de medición de fuerza se denominan celdas de carga, según PCB Load & Torque Inc. (2014) establece en su manual que:

Son dispositivos que convierten una fuerza o carga en una salida medible, existen varios tipos como: hidráulicos, neumáticos, de galgas extensométricas, piezoeléctricos y de capacitancia, sin embargo, las de galgas extensiométricas son las más comunes y están definidas como dispositivos que transforman la fuerza o carga en una señal eléctrica equivalente para medir con precisión un peso estático o una fuerza cuasi

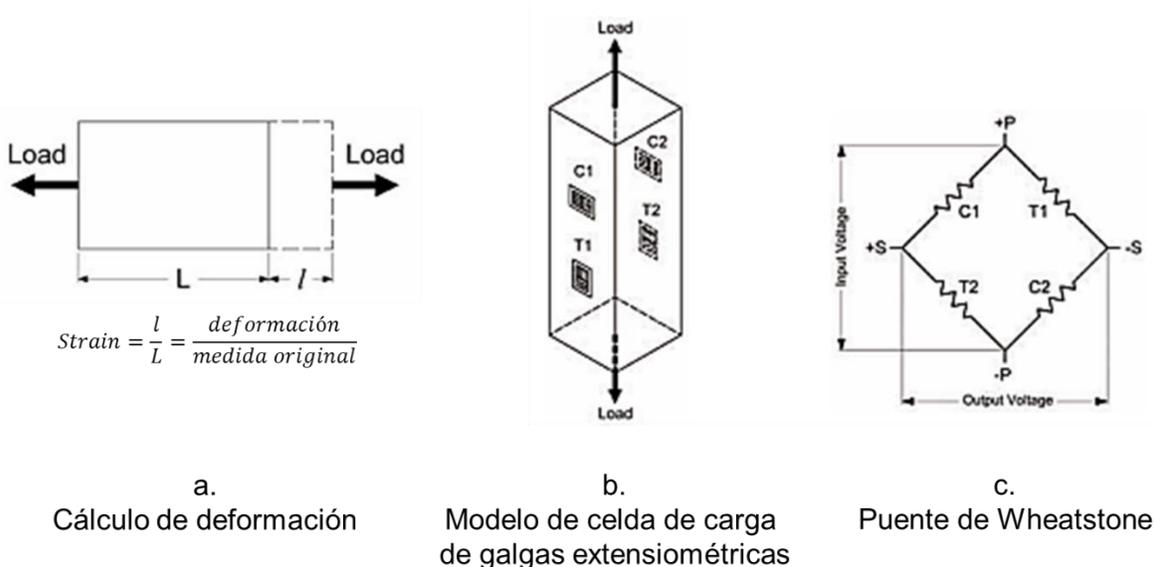
dinámica. La fuerza aplicada se traduce en voltaje por el cambio de resistencia en las galgas extensométricas, que están íntimamente unidas a la estructura del transductor.

(p. 4)

Como se muestra en la Figura 13, esa cantidad de cambio en la resistencia está correlacionada con la deformación de la estructura del transductor y, por lo tanto, con la carga aplicada, para ello usualmente se implementa un puente de Wheatstone con una fuente DC de 5 a 20 [V] (PCB Load & Torque Inc., 2014, pp.5).

Figura 13

Celdas de carga.



Nota. Adaptado de *Overview of load cell technology* (p.4-5), por PCB Load & Torque INC., 2014.

Sensores de nivel

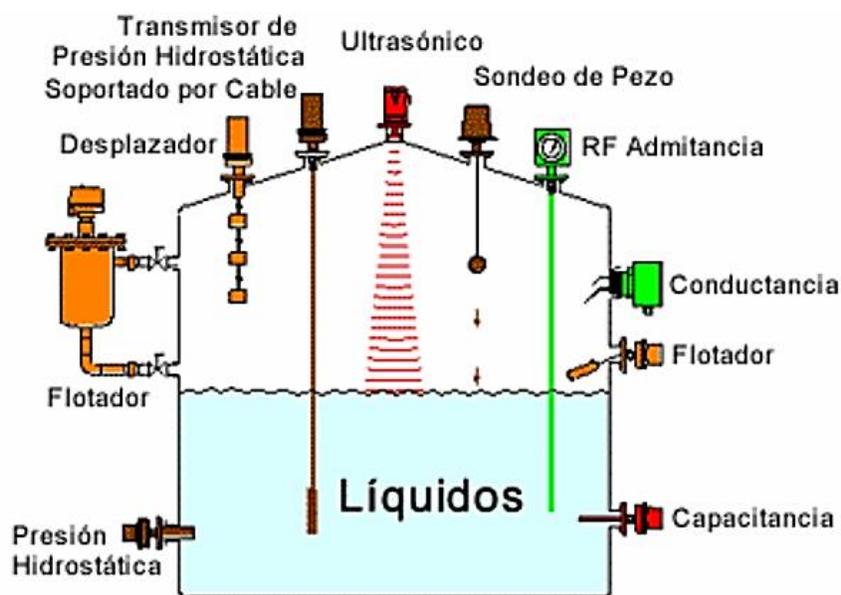
Estos sensores se encargan de medir la altura a la que se encuentra la superficie libre de algún líquido u objeto según un punto de referencia preestablecido. Se puede medir el nivel directamente por observación visual de la altura sobre una escala graduada con medidor de

vara y tubo de vidrio, o determinando la posición de un flotador que descansa sobre la superficie libre especialmente en líquidos (Dulhoste, s. f.).

El segundo método de medición puede ser indirecto con un error congénito debido a depender de otras variables como: la medición de presión hidrostática o presión diferencial, radiación nuclear, fuerza de empuje, capacitancia eléctrica, reflexión de ondas de radio, de radar o sónicas desde la superficie libre. En la Figura 14 se muestra un esquema de instalación de sensores de nivel.

Figura 14

Sensores de nivel.



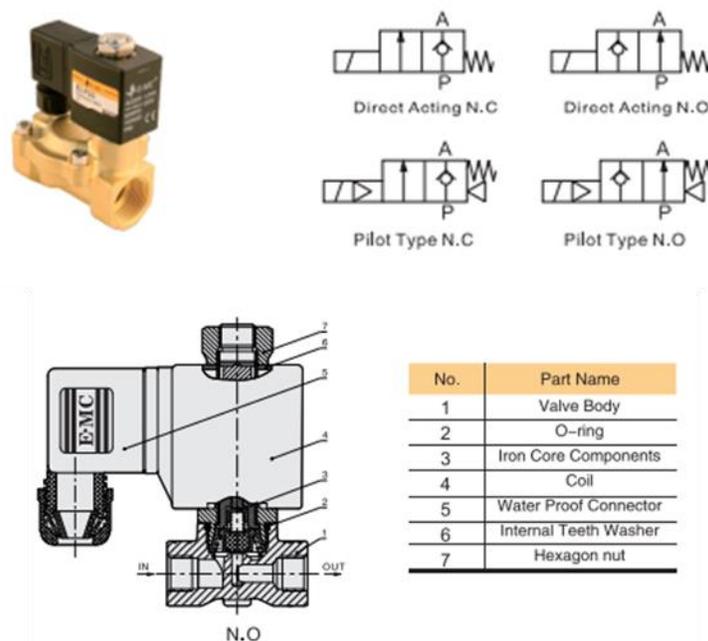
Nota. Adaptado de *Instrumentos para medición y control de nivel* (p.4-5), por C. Beltrán, s.f.

Electroválvulas o válvulas de solenoide

La válvula solenoide es la combinación de dos unidades funcionales que son: el paquete electromagnético, compuesto por un solenoide y su correspondiente tragante o núcleo móvil, y un cuerpo de válvula conteniendo los orificios de entrada, pasajes y salidas (Jefferson Sudamericana S.A., 2015). En la Figura 15 se muestra un ejemplo de válvula de solenoide.

Figura 15

Válvula solenoide, diagramas esquemáticos y sus partes.



Nota. Adaptado de *ELP solenoid valve* (p.3-4), por E-MC, 2018.

Relés de interfaz de salida AC

Un elemento que sirve para separar el circuito de control con el de potencia son los relés, sin embargo, cuando se trabaja con varios actuadores, la cantidad de relés también aumenta, con lo cual surge la necesidad de optimizar el uso de relés, para ello existen los relés de interfaz (ver Figura 16) que pueden ser tanto para corriente continua o alterna, según Contaval Automatismos y Componentes Electrónicos (s. f.) menciona que los relés de salida AC:

Son usados como interfaz entre los sistemas de control y las cargas AC. Pueden conmutar cargas inductivas sin reducción de corriente, lo que les hace muy adecuados para ser conectados a, por ejemplo, válvulas o contactores. Estos relés no tienen partes mecánicas, lo que garantiza un funcionamiento fiable. La protección de interferencias

integrada permite un funcionamiento fiable ante cualquier ambiente eléctrico. Gracias a esta protección, los cables de señal pueden ir paralelos a los de potencia hasta 1.5 km sin efectos capacitivos. (p.8)

Figura 16

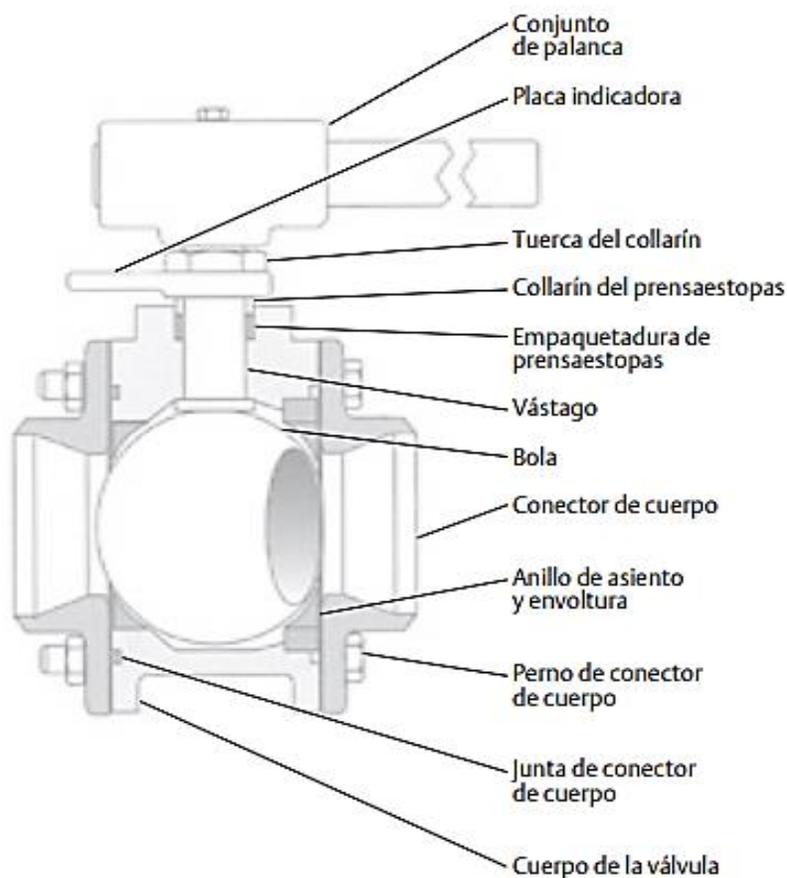
Relé de interfaz.



Nota. Adaptado de *Relé de interfaz BTWR P16E29*, por WEG, 2022, WEG (<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Automatizaci%C3%B3n-Industrial/Controls/Bornes%2C-Enchufes-y-Z%C3%B3calos-Industriales/Bornes/Bornes-Rel%C3%A9-de-Interfaz-BTWR/RELE-INTERFAZ-BTWR-P16E26/p/12604116>)

Válvula de bola

Esta válvula posee un cierre de forma esférica dentro del cuerpo de la válvula que permite regular el caudal de fluidos (ver Figura 17), según Emerson Automation Solution (2019) establece que, presenta un orificio circular denominado paso de flujo por su centro, cuando gira un cuarto de vuelta, el flujo se detiene según los patrones de: paso Venturi, paso total o paso reducido a veces denominado paso normal.

Figura 17*Válvula de bola.*

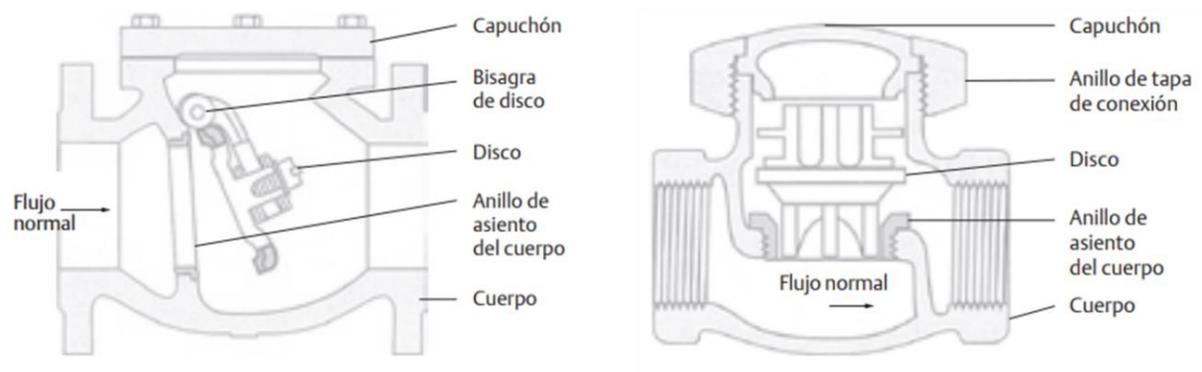
Nota. Adaptado de *Válvula de bola de paso reducido* (p.194), por Emerson Automation Solution, 2019, Emerson.

Válvula de retención

Las válvulas de retención permiten evitar la inversión de flujo en los sistemas de canalización y el equipo conectado, los diseños de válvula de retención más comunes son: retención de charnela y pistón y se muestran en la Figura 18 (Emerson Automation Solution, 2019). Estas válvulas también son conocidas como válvulas check y su aplicación está mayormente enfocada en la descarga de bombas.

Figura 18

Válvula de retención de charnela y pistón.



a.

Válvula de retención de charnela

b.

Válvula de retención de pistón horizontal

Nota. Adaptado de *Válvula de retención de charnela y válvula de retención de pistón horizontal* (p.191-192), por Emerson Automation Solution, 2019, Emerson.

Tuberías y accesorios

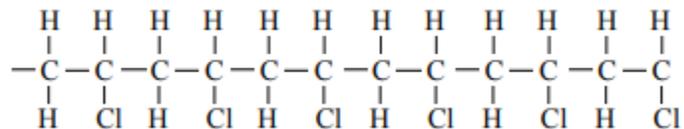
Según ASTM (2000) establece que un tubo es un cilindro hueco cuyo espesor de las paredes suelen ser pequeños en comparación con el diámetro y en el que las paredes interior y exterior son esencialmente concéntricas.

Policloruro de vinilo PVC

Según The European Council of Vinyl Manufacturers y Plastics Europe (ECVM & Plastics Europe, 2005) establece que, el PVC es un polímero de hidrocarburo clorado cuya estructura es similar a la del polietileno, con la diferencia de que los átomos de carbono alternos en la cadena principal tienen uno de sus átomos de hidrógeno reemplazado por un átomo de cloro como se indica en la Figura 19. Según la norma ASTM (2000) es un polímero resultante de la polimerización de cloruro de vinilo como único monómero y el contenido de cloruro de vinilo en el monómero no debe ser menor al 99 %.

Figura 19

Estructura molecular del PVC.



Nota. Adaptado de *Structure of polyvinyl chloride* (p.4), por ECVM & Plastics Europe, 2005.

Existen varios fabricantes de tuberías PVC a nivel mundial, en Ecuador la empresa Mexichem Ecuador S.A. (2018) establece que los tubos de PVC son de pared gruesa con alta resistencia a la presión hidrostática, poseen baja conductividad eléctrica, no adquieren corrosión galvánica ni electrolítica, ni formación de incrustaciones en las paredes interiores lo cual favorece a la preservación de la sección hidráulica, alta resistencia al golpe de ariete y además, al poseer un bajo coeficiente de fricción asegura una mayor capacidad de conducción.

Las tuberías de PVC de pared gruesa son fabricadas y comercializadas generalmente para instalaciones de agua potable, sin embargo, en la norma INEN (2015b) se establece que se puede utilizar las tuberías para líquidos presurizados, con un esfuerzo hidrostático de diseño de 13.83 [MPa] sin embargo, para gases, su uso es muy limitado. La ecuación (2) relaciona el esfuerzo inducido, presión nominal y dimensiones geométricas del tubo, con la cual mediante los datos proporcionados por el fabricante se pudo validar el uso de este material para el proyecto.

$$\sigma_p = \frac{P}{2} \left(\frac{D}{e} - 1 \right) \quad (2)$$

Donde:

σ_p : Esfuerzo tangencial inducido [MPa].

P : Presión nominal interna [MPa].

D : Diámetro exterior promedio [mm].

e : espesor mínimo de la pared [mm].

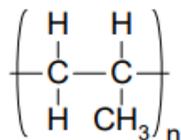
Polipropileno PP

Según (Corso et al., 2016) establecen que el polipropileno $(C_3H_6)_n$ es el resultado de la polimerización de propileno (C_3H_6) , (ver Figura 20) tiene baja densidad y posee propiedades mecánicas muy importantes como: alta resistencia, alta ductilidad y alta tenacidad, con una apariencia opaca y gran resistencia al calor, con la que empieza a ablandarse a temperaturas superiores a los 150 °C. Es resistente a productos corrosivos, por lo tanto, se puede aplicar para el uso de tanques y revestimientos resistentes a productos químicos.

En la norma INEN (2017) se recomienda que la elección de accesorios para tuberías se fundamente con cálculos con una presión de diseño entre 1 y 1.6 [MPa], el valor de presión si puede variar, pero nunca debe ser menor a 1 [MPa].

Figura 20

Estructura molecular del PP.



Nota. Esta composición es repetitiva.

Válvulas de control

Según Emerson Automation Solution (2019) menciona que la válvula de control es aquella que dentro de un sistema automatizado manipula el flujo de gas, vapor, agua o compuestos químicos para compensar las perturbaciones con el fin de mantener la variable de proceso regulada lo más cercana posible al valor preestablecido. La válvula de control está compuesta de varios componentes que consisten en el cuerpo de la válvula con sus piezas correspondientes, un actuador lineal o giratorio encargada de generar fuerza motriz para operar la válvula, y una variedad de accesorios adicionales de válvula, que pueden ser posicionadores, transductores, reguladores de presión, operadores manuales, amortiguadores

o disyuntores. Existen dos tipos de válvula de control, que se diferencian por su elemento de cierre que puede ser de: vástago deslizante o rotativo.

Las válvulas de vástago deslizante, desplazan linealmente el elemento de cierre para regular el flujo, como se muestra en la Figura 21 a. Las válvulas rotativas, en cambio realizan movimientos giratorios para desplazar angularmente el elemento de cierre de la superficie de asiento como se puede apreciar en la Figura 21 b.

Las válvulas de control pueden ser accionadas de manera digital (ON-OFF), o mediante señal analógica de corriente de 0 a 20 [mA], 4 a 20 [mA], o por señales de tensión continua de 0 a 10 [V] y los actuadores pueden ser accionados mediante fuentes eléctricas, neumáticas, hidráulicas, entre otros, con los que se transformará la energía inicial en energía mecánica.

Figura 21

Válvulas de control.



a.

Válvula de control de vástago
deslizante

b.

Válvula de control rotativa

Nota. Adaptado de *Válvula de control de vástago deslizante y válvula de control rotativa* (p.16-21), por Emerson Automation Solution, 2019, Emerson.

Rociadores para lavado de tanques

Según Spraying Systems Co. (s. f.) establece que, existen boquillas y lavadoras para sistemas automáticos que ayudan a operaciones de enjuague, sanitizado, desinfección y esterilización de tanques con diámetros de hasta 24.4[m], en la Figura 22 se muestra la variedad de boquillas de limpieza disponibles en el mercado. Las boquillas pueden ser accionadas por líquido con rotación libre o estacionarias, y las lavadoras pueden ser accionadas mediante un líquido con rotación libre o estacionarias, y las lavadoras pueden ser accionadas mediante un motor externo, o mediante control y monitoreo automatizado.

Figura 22

Rociadores para tanques.



Nota. Adaptado de *Productos para lavado de tanques* (p.1), por Spraying Systems Co., s.f.

Bombas

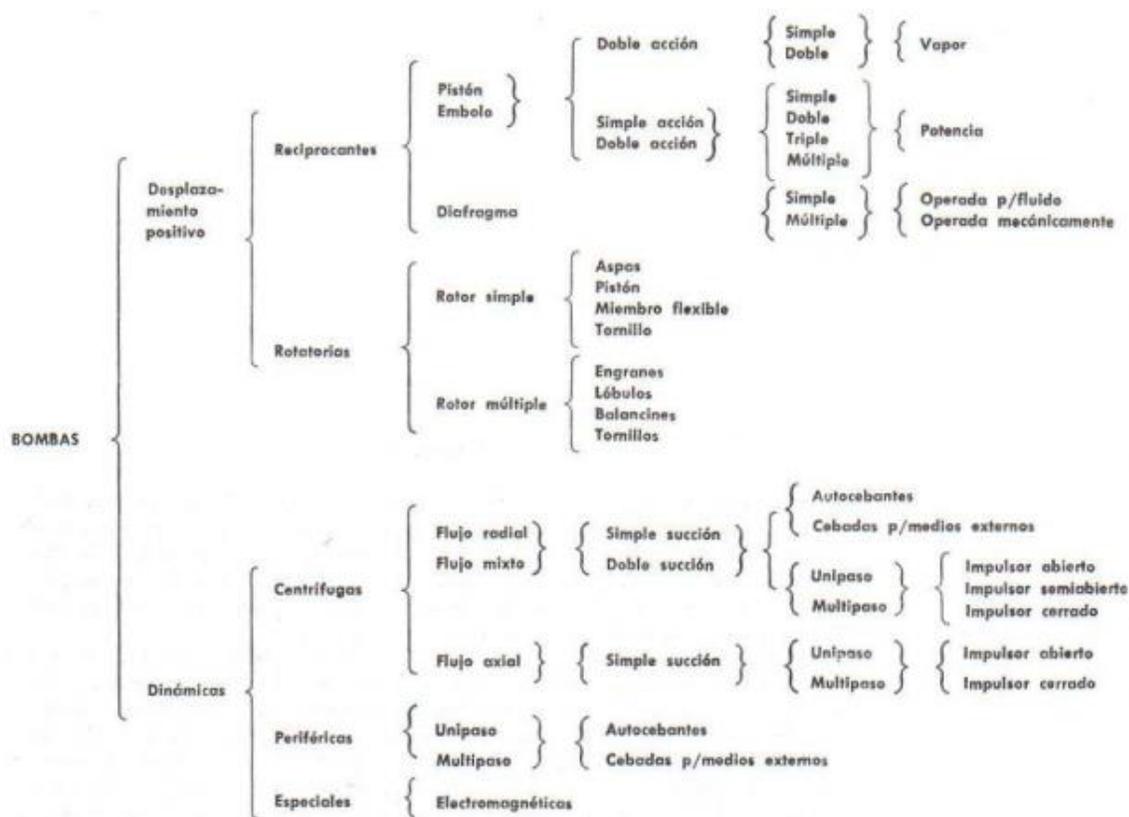
Según Viejo (2000) establece que, un equipo de bombeo es un transformador de energía que, convierte energía mecánica que puede ser proveniente de un motor eléctrico, térmico o de distintas fuentes, y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, posición o velocidad que se utilizará para desplazar fluidos, de esta manera un fluido es bombeado cuando su volumen es desplazado y trasladado de un lugar a otro.

La acción de bombeo puede ser positiva como cuando se desplaza una cantidad exacta de fluido por cada revolución o ciclo de la bomba, o se puede desplazar y transferir usando la inercia del fluido en movimiento (Sullivan, 1989).

Las bombas se clasifican generalmente en dos tipos: dinámicas y de desplazamiento positivo, en la Figura 23 se muestra una clasificación general con la cual se pudo partir en la selección de la bomba más adecuada para la aplicación de este proyecto, considerando sus características, ventajas y desventajas.

Figura 23

Clasificación de bombas.



Nota. Tomado de *Clasificación de bombas* (p.14), por M. Viejo, 2000, Limusa.

Bombas dinámicas

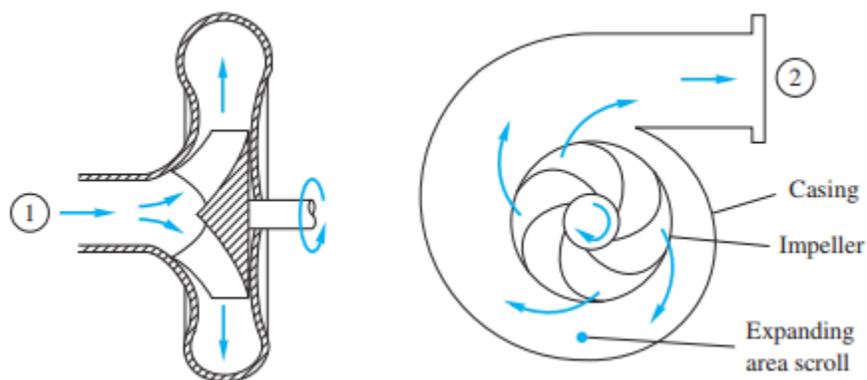
Según White (2016) menciona que, las bombas dinámicas suelen brindar una tasa de flujo más alta que las bombas de desplazamiento positivo y una descarga mucho más constante sin pulsaciones, pero no son efectivas para manejar líquidos de alta viscosidad. Las bombas dinámicas necesitan cebado, es decir que, si en la entrada de la bomba no hay fluido

líquido, no podrá aspirar desde su entrada, esto suele afectar el funcionamiento de algunos de sus componentes, en cambio, las bombas de desplazamiento positivo son autocebantes en la mayoría de casos. Una bomba dinámica es capaz de generar velocidades de flujo de hasta 300,000 [gpm], pero para ello generalmente se debería aumentar la presión moderadamente.

Bombas Centrífugas. Según Karassik et al. (2001) manifiestan que, la bomba centrífuga es una máquina rotativa en la que el caudal y la presión se generan dinámicamente, sin dejar la entrada de fluido separada de la salida en comparación con las bombas de desplazamiento positivo, este tipo de bombas entrega energía útil al fluido a través de los cambios de velocidad que suceden cuando fluye a través del impulsor y los pasos asociados de la bomba, como se indica en la Figura 24. Las bombas de impulsor son bombas rotodinámicas, incluidas aquellas con impulsores de flujo radial, de flujo mixto y de flujo axial. El término "bomba centrífuga" suele abarcar a todas las bombas rotodinámicas.

Figura 24

Esquema del funcionamiento de una bomba centrífuga.



Nota. En el punto 1 se muestra un corte por el centro del eje del impulsor, y el punto 2 la vista lateral de la bomba y sus partes más relevantes. Tomado de *Cutaway schematic of a typical centrifugal pump* (p.745), por F. White, 2016, McGraw-Hill.

Además, White (2016) menciona que, las bombas centrífugas se utilizan a menudo para bombear aceites y líquidos de alta viscosidad de hasta 1000 veces la viscosidad del agua, sin embargo, los números de Reynolds indicarán que el fluido será poco turbulento o incluso laminar, lo cual afectará críticamente al rendimiento de la bomba. La Figura 25 muestra las curvas de prueba típicas de potencia de la bomba en caballos de fuerza [bhp] versus la descarga o caudal Q , con esto se puede observar que la alta viscosidad causa una caída crítica en la descarga y aumenta los requerimientos de potencia. La eficiencia también cae sustancialmente de acuerdo con los valores típicos de la Tabla 7, a un valor más elevado que 300 centipoises, la depreciación del rendimiento es tan grande que se recomienda el uso de una bomba de desplazamiento positivo.

La bomba centrífuga moderna es un dispositivo formidable, capaz de entregar cabezas muy altas y caudales razonables con excelente eficiencia. Puede coincidir con muchos requisitos del sistema. Pero, básicamente, la bomba centrífuga es una máquina de alto cabezal y bajo flujo, mientras que hay muchas aplicaciones que requieren un cabezal bajo y una descarga alta. Para ver que el diseño centrífugo no es conveniente para tales sistemas.

Tabla 7

Eficiencia de bombas centrífugas según la viscosidad de fluidos.

Propiedad	Símbolo	Unidad	Valores			
Viscosidad	μ	[cP]	1.0	10.0	100.0	1000.0
Eficiencia	η_{max}	[%]	85	76	52	11

Nota. Adaptado de *Effect of viscosity* (p.759), por F. White, 2016, McGraw-Hill.

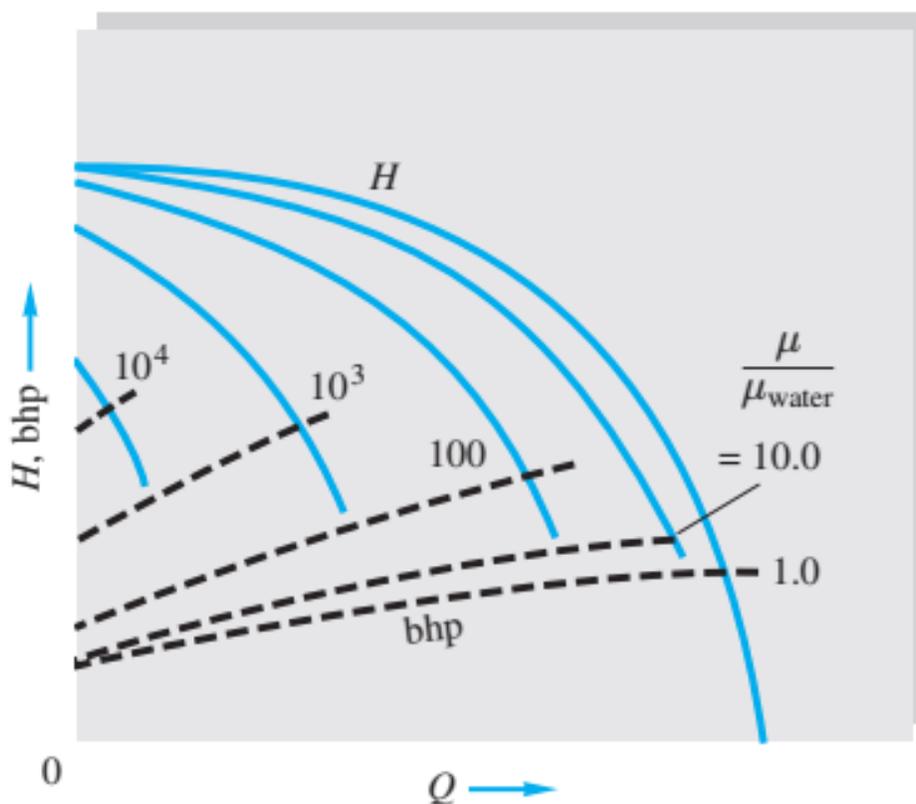
Bombas de desplazamiento positivo

Según White (2016) establece que, las bombas de desplazamiento positivo impulsan el fluido cambiando su volumen, para ello se abre una cavidad de entrada por donde el fluido es recibido, luego esta cavidad se cierra y el fluido se comprime y se lo guía hasta una salida.

Todas las bombas de este tipo dan como resultado un flujo pulsante o periódico a medida que el volumen de la cavidad se abre, encierra y comprime el fluido.

Figura 25

Efecto de la viscosidad en bombas centrífugas.

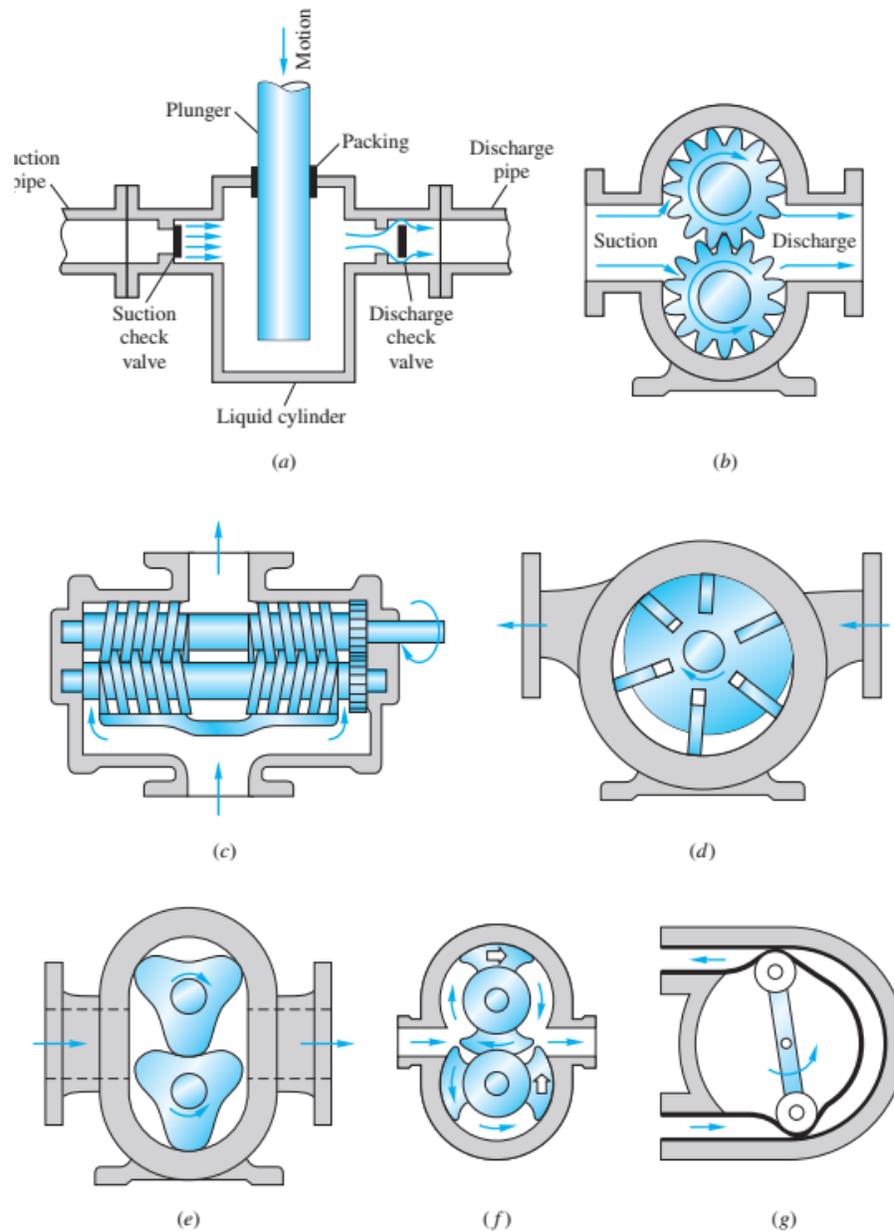


Nota. Mientras más alta sea la viscosidad del líquido, más lento fluirá y más potencia requerirá la bomba para desplazar el fluido. Tomado de *Comparison of performance curves of typical dynamic and positive-displacement pumps at constant speed* (p.760), por F. White, 2016, McGraw-Hill.

La Figura 26 muestra esquemas de los principios operativos de algunas de estas bombas, y su gran ventaja es la entrega de cualquier fluido independientemente de su viscosidad (pp. 741-742).

Figura 26

Diseño esquemático de bombas de desplazamiento positivo.

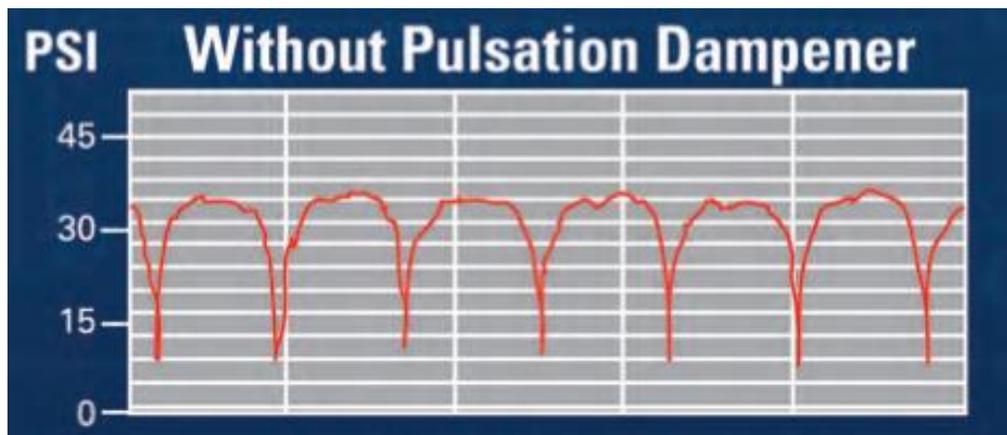


Nota. Tipos de bomba: (a) pistón alternativo o émbolo, (b) bomba de engranajes externos, (c) bomba de doble tornillo, (d) paleta deslizante, (e) bomba de tres lóbulos, (f) doble pistón circunferencia, y (g) bomba peristáltica. Tomado de *Schematic design of positive-displacement pump* (p.743), por F. White, 2016, McGraw-Hill.

Bombas reciprocantes. Según Hicks (1988) menciona que, estas bombas pueden descargar una determinada cantidad de líquido durante el movimiento ya sea de diafragma, pistón o émbolo a través del recorrido de su flujo. Debido al rozamiento, escapes o pasos de alivio que se produce entre el líquido y las paredes, el fluido no llega completamente al tubo de descarga. A comparación de las bombas rotodinámicas que tienen un flujo continuo, las reciprocantes producen pulsaciones (ver Figura 27) que dependen y varían según la estructura de la bomba.

Figura 27

Pulsaciones de una bomba de doble diafragma.



Nota. Tomado de *Pulsation dampeners* (p.30), por, Yamada America Inc, 2018, Yamada.

Bombas rotatorias. Según (Kutz, 2006) establece que, en estas bombas la energía cinética juega, un papel importante en el funcionamiento de estos dispositivos, En la mayoría de casos se usan principalmente para mover líquidos altamente viscosos, donde se complica obtener energía cinética.

Otros se usan para desarrollar alta presión, lo que requeriría poner en marcha un accionamiento cinemático. También se utilizan para lograr una alta precisión de la tasa de suministro de líquido sin necesidad de un medidor de flujo para monitorear el caudal.

Bombas de diafragma operadas por aire. Según Karassik et al. (2001) mencionan que, las bombas de diafragma de todos los tipos no tienen sellos, ni empaques dinámicos, son autocebantes, es decir que, también pueden funcionar en seco continuamente, y la descarga puede reducirse a flujo cero sin problemas.

Tienen un caudal y un índice de presión variables dentro rangos establecidos por el fabricante, los más comunes en el mercado son las bombas de doble diafragma que son bombas dúplex, estos contienen dos cámaras de diafragma y dos diafragmas flexibles que están conectados entre sí a través de una biela y están sujetos en los bordes exteriores del diafragma, estos están unidos al eje y se mueven en la misma dirección lineal simultáneamente, como se muestra en la Figura 28 c.

El aire comprimido dirigido a la parte posterior del diafragma izquierdo mueve ambos diafragmas hacia la izquierda, mientras que el aire sale a la atmósfera desde la parte posterior del diafragma derecho, después de haber completado un ciclo, mediante una válvula de distribución de aire dirige el aire comprimido desde el suministro hasta el lado posterior del diafragma derecho y expulsa el aire a la atmósfera desde la cámara izquierda.

Este movimiento alternativo continuo, junto con las válvulas de retención internas, crea una carga y descarga alternas de líquido bombeado dentro y fuera de cada cámara que da como resultado una acción de bombeo pulsante casi constante desde las cámaras combinadas. Estas bombas son relativamente más económicas y de fácil mantenimiento en comparación a otros tipos de bombas de desplazamiento positivo.

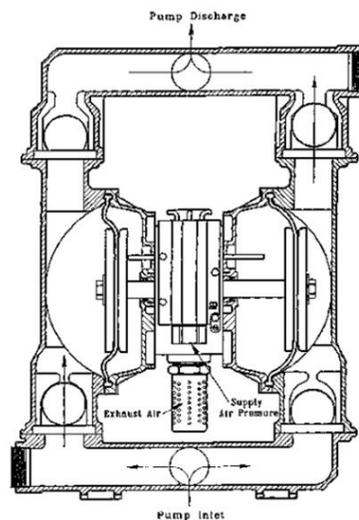
Figura 28

Funcionamiento de una bomba de doble diafragma.



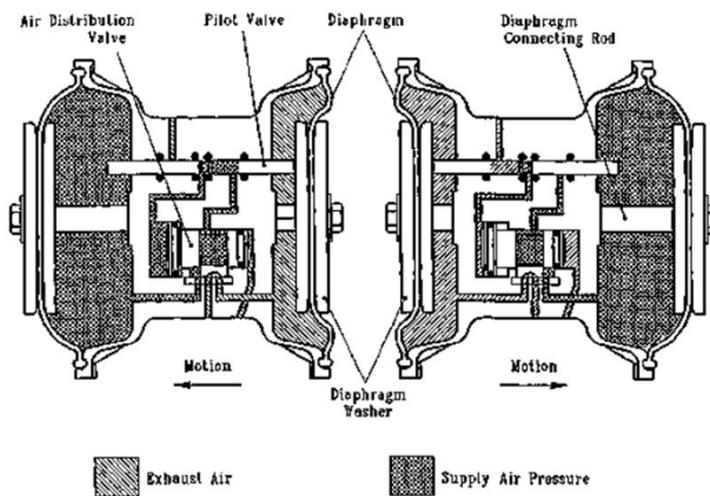
a.

Bomba de doble diafragma



b.

Vista interna



c.

Funcionamiento de la bomba

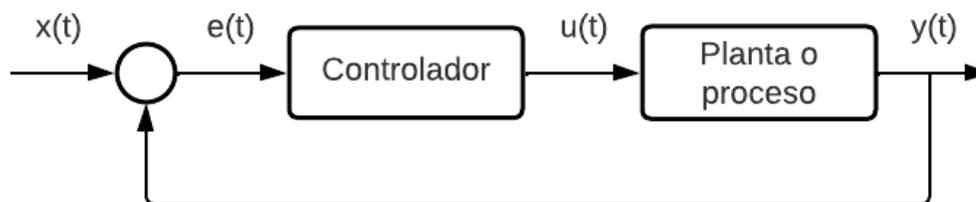
Nota. Tomado de *Cross-section of an air-operated double-diaphragm pump air motor operation* (p.3.94), por Karassik et al., 2001, McGraw-Hill.

Sistemas de control por lógica difusa

Según Fuller (1995) establece que, los controladores convencionales funcionan mediante técnicas de teoría de control basadas en modelos matemáticos de una planta de proceso en lazo abierto, al cual se lo denomina sistema a controlar. El objetivo del controlador de realimentación es garantizar una respuesta deseada de la salida $y(t)$, como se muestra en la Figura 29, a pesar de la presencia de perturbaciones en los parámetros del sistema y mediciones de ruido. Para ello se sigue un proceso de regulación de la salida con el punto de ajuste o entrada de referencia $x(t)$, la señal de salida del controlador $u(t)$ actuará en la planta como una función de entrada del sistema con lo cual se realiza la acción de control y estará en función de $e(t)$ que representa el error entre el punto de ajuste deseado $x(t)$ y la salida del sistema $y(t)$, de esta forma existen diferentes algoritmos de control como: proporcional, integral y/o derivativo.

Figura 29

Diagrama de bloques de un sistema de control convencional.



Los sistemas de control PID son los más utilizados, sin embargo, requieren de un modelo matemático del sistema a controlar, y es muy común que sea complejo determinar dicho modelo, ya que existirán varios factores que se involucren en la dinámica del sistema, y en la mayoría de veces es casi imposible determinarlos con exactitud, es por ello que se decide en estos casos implementar otro tipo de herramientas de control que permitan obtener una solución más rápida, efectiva y adecuada; una de estas herramientas es el controlador por

lógica difusa FLC, por sus siglas en inglés. Según (Zhang, 2010) señala que, el término "difuso" se refiere a la capacidad de manejar entradas imprecisas o vagas, y en lugar de utilizar ecuaciones matemáticas complejas, la lógica difusa utiliza descripciones lingüísticas para definir la relación entre la información de entrada y la acción de salida. En los sistemas de ingeniería, la lógica difusa proporciona una interfaz conveniente y fácil de usar para desarrollar programas de control, lo que ayuda a los diseñadores a concentrarse en los objetivos funcionales y no en los modelos matemáticos.

En base a estos criterios, para diseñar un controlador por lógica difusa se toma en consideración cuatro puntos importantes que son: la inferencia lógica, conjuntos difusos, fusificación y defusificación.

Universo de discurso

Según Camacho et al. (2021), definen al universo de discurso como, un conjunto de valores que puede tomar una variable, es equivalente a la noción de "dominio" de una función algebraica.

Puede definirse con el método de la lista que enumera todos sus miembros o preferiblemente mediante el método de la regla con la que se especifican las propiedades que deben satisfacer los miembros del conjunto (Wang Li-Xing, 1997). Usualmente, el universo del discurso se denota como X , donde se establecen los límites del dominio del problema que se desea tratar, valores con los cuales se definirán los conjuntos difusos y las funciones de membresía, en la ecuación (3) se define un conjunto A mediante el método de la regla.

$$A = \{x \in X | x \text{ cumple algunas condiciones}\} \quad (3)$$

Donde:

A : Conjunto difuso.

x : Valor del conjunto A .

X : Conjunto universo de discurso.

Funciones de membresía

Según Camacho et al. (2021) establecen que, las funciones de membresía son curvas que permiten determinar el grado de pertenencia de un elemento x a un conjunto difuso A . Normalmente se denotan por $\mu(x)$, como se define en la ecuación (4) y su valor siempre está entre 0 y 1.

La función de membresía mapea los elementos del universo en valores numéricos entre 0 y 1. Un valor de cero implica que el elemento correspondiente definitivamente no es un elemento del conjunto difuso y corresponde al valor booleano, 0, mientras que un valor de unidad significa que el elemento pertenece totalmente al conjunto y corresponde al valor booleano de 1.

Un valor de pertenencia entre cero y la unidad corresponde a una pertenencia parcial o parcial del conjunto, (Camacho et al., 2021).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & SI \quad x \in A \\ 0 & SI \quad x \notin A \end{cases} \quad (4)$$

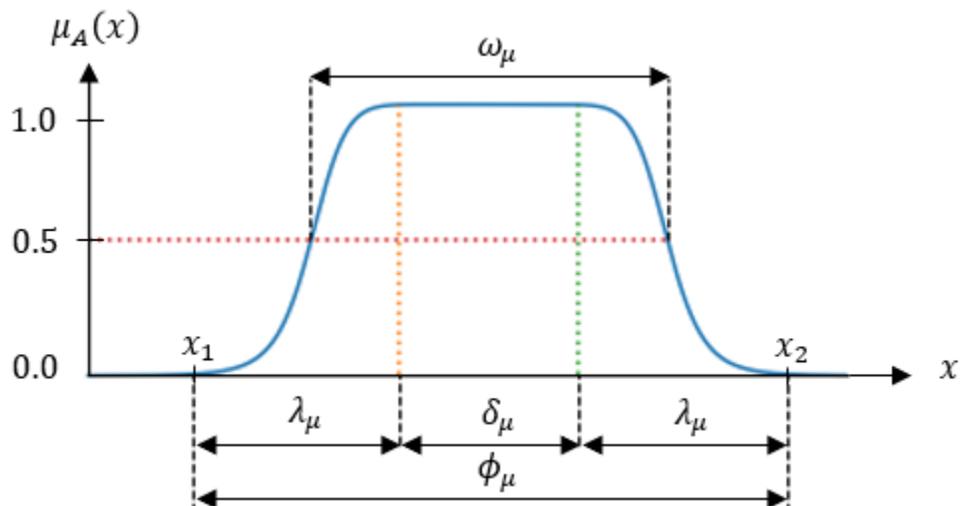
Donde:

$\mu_A(x)$: Función de membresía del conjunto difuso A .

Existen varios modelos de funciones de membresía que pueden ser aplicados para un controlador difuso, en la Figura 30 se muestra las partes de una función de membresía. Los tipos de funciones de membresía más utilizados son de tipo: singleton, triangular, trapezoidal, gaussiana y campana de Gauss.

Figura 30

Partes de una función de membresía.



$$\omega_\mu = |x_2 - x_1| \quad (5)$$

$$\lambda_\mu = \{x \mid 0 < \mu_A(x) < 1\} \quad (6)$$

$$\delta_\mu = \{x \mid \mu_A(x) = 1\} \quad (7)$$

$$\phi_\mu = \{x \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (8)$$

Donde:

ω_μ : Ancho de banda.

λ_μ : Frontera.

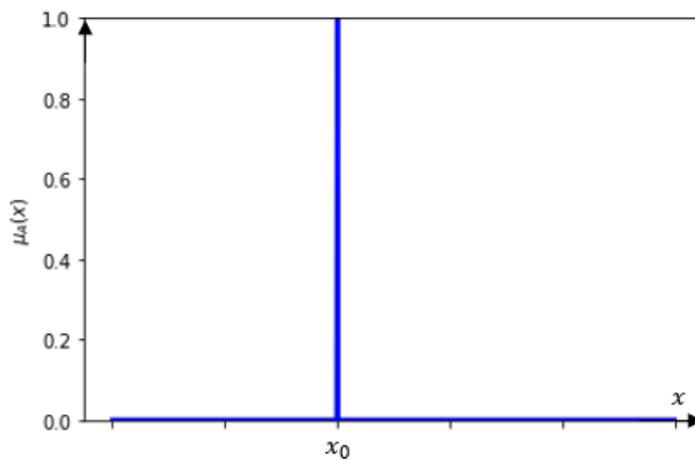
δ_μ : Núcleo

ϕ_μ : Soporte

La función singleton está definida en la ecuación (9) y se la representa gráficamente en la Figura 31.

Figura 31

Función de membresía singleton.

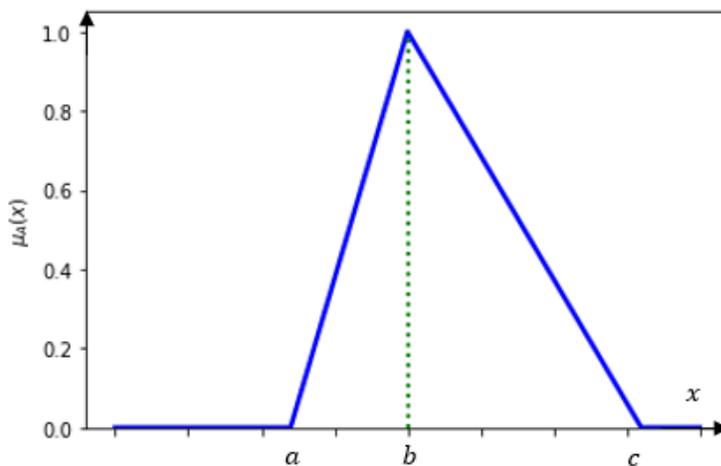


$$\mu_A(x_0) = \begin{cases} 1 & x = x_0 \\ 0 & x \neq x_0 \end{cases} \quad (9)$$

La función triangular está definida en la ecuación (10) y se la representa gráficamente en la Figura 32.

Figura 32

Función de membresía triangular.



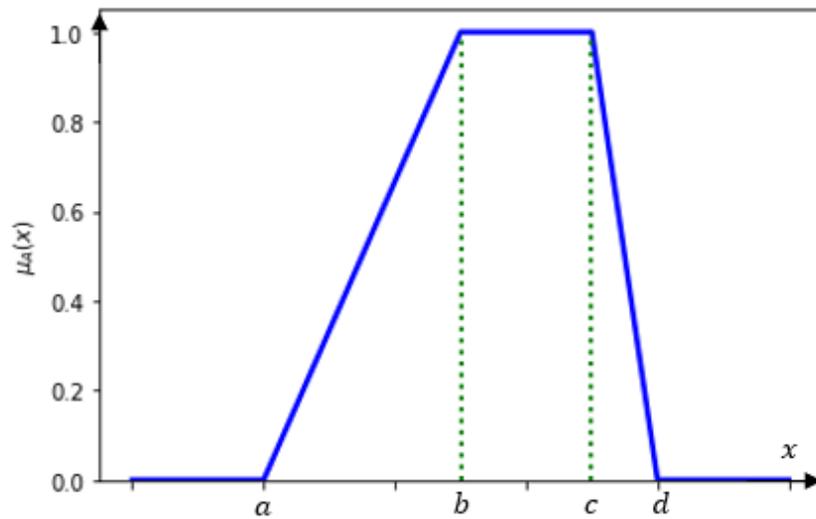
$$\mu_A(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (10)$$

$$a \leq b \leq c$$

La función trapezoidal está definida en la ecuación (11) y se la representa gráficamente en la Figura 33.

Figura 33

Función de membresía trapezoidal.



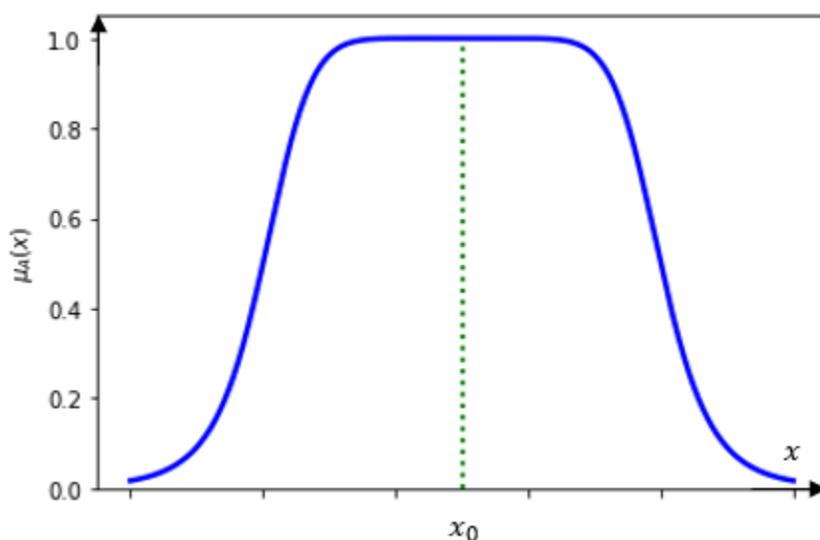
$$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad (11)$$

$$a \leq b \leq c \leq d$$

La función campana de Gauss está definida en la ecuación (12) y se la representa gráficamente en la Figura 34. Este tipo de funciones brindan una mejor respuesta en la lógica difusa, sin embargo, la desventaja es que computacionalmente, el proceso requerirá de mayores recursos, por lo tanto, este tipo de funciones se utilizaría para aplicaciones prioritarias, en las que una función triangular o trapezoidal no se adapten adecuadamente.

Figura 34

Función de membresía campana de Gauss.



$$\mu_A(x; a_g, b_g, x_0) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - x_0}{a_g} \right|^{2b_g}} \quad (12)$$

Donde:

a_g : Ancho de la función.

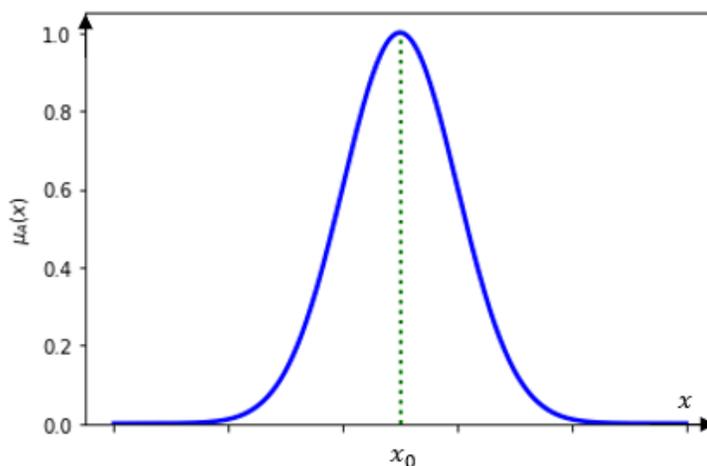
b_g : Pendiente.

x_0 : Centro

La función gaussiana está definida en la ecuación (13) y se la representa gráficamente en la Figura 35.

Figura 35

Función de membresía Gaussiana.



$$\mu_A(x; \sigma_g, x_0) = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-x_0}{\sigma_g} \right)^2} \quad (13)$$

Donde:

σ_g : Ancho de la función.

x_0 : Centro de la función

Inferencia lógica

Para convertir un término lingüístico en un marco computacional, es necesario utilizar los fundamentos de la teoría de conjuntos, con el objetivo de que la experiencia de control pueda ser interpretada en otro lenguaje. El razonamiento establece una conexión entre causa y efecto, o una condición y una consecuencia. El razonamiento se puede expresar mediante una inferencia lógica o mediante la evaluación de entradas para llegar a una conclusión.

Usualmente seguimos reglas de inferencia que tienen la forma: Si $Causa_1 = A$ y $Causa_2 = B$, entonces $Efecto = C$, donde A , B y C son variables lingüísticas (Zhang, 2010).

Conjuntos difusos

Según Zadeh (1965) establece que, un conjunto difuso está representado por una función de membresía que se define en el universo del discurso y da el grado de pertenencia

dentro del conjunto de cualquier elemento dado, y se establecen a tales conjuntos las propiedades de unión, intersección, complemento, relación, convexidad, etc.

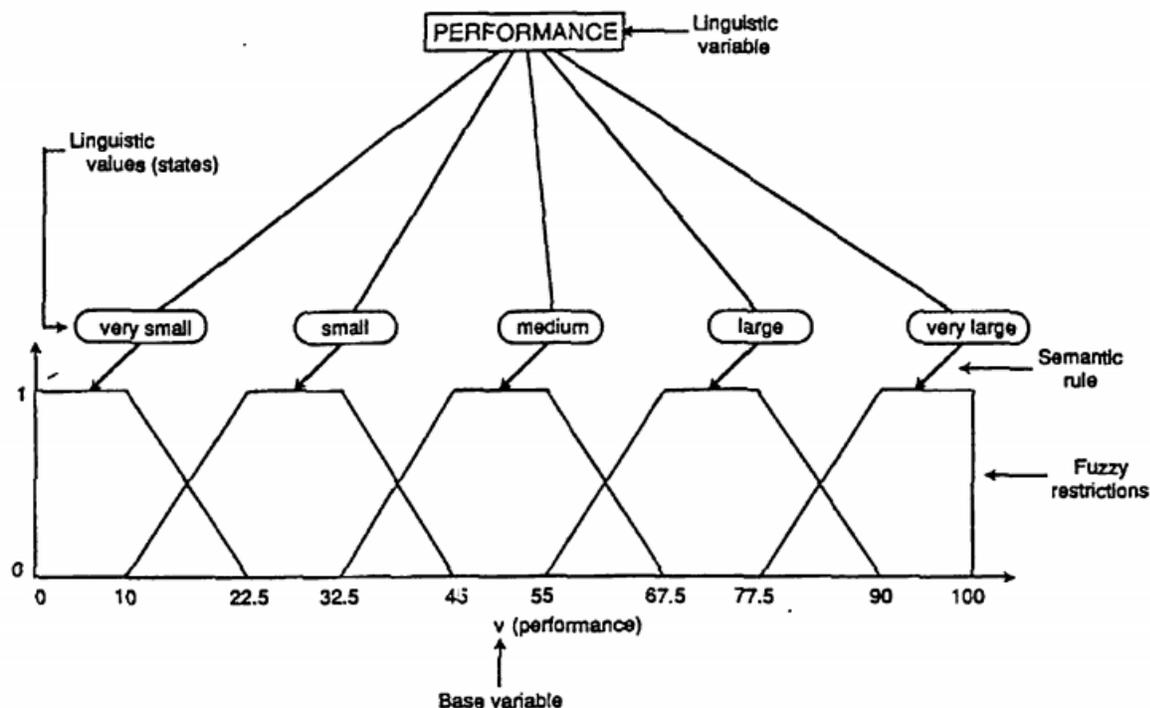
Variable lingüística. Según Fuller (1995) menciona que una variable lingüística puede considerarse como una variable cuyo valor es un número difuso o como una variable cuyos valores se definen en términos lingüísticos. Cuando definimos los conjuntos difusos de variables lingüísticas, el objetivo no es definir exhaustivamente las variables lingüísticas, solo se definen algunos subconjuntos difusos que serán útiles más adelante en la definición de las reglas que se aplican.

Según Klir & Yuan (1995) establecen que, una variable lingüística se caracteriza completamente por un quintuple (v, T, X, g, m) en el cual v es el nombre de la variable, T es el conjunto de términos lingüísticos de v que se refieren a una variable base cuyos valores oscilan entre un conjunto de discurso X , g es una regla sintáctica (una gramática) para generar términos lingüísticos, y m es una regla semántica que asigna a cada término lingüístico $t \in T$ su significado, $m(t)$, que es un conjunto difuso en X (pp.102).

En la Figura 36 se muestra un ejemplo de una variable lingüística, su nombre v es “rendimiento” de una entidad orientada a un objetivo (una persona, una máquina, una organización, un método, etc.) en un contexto dado mediante cinco términos lingüísticos básicos T : muy pequeño, pequeño, mediano, grande, muy grande, así como otros términos lingüísticos generados por una regla sintáctica g , como no muy pequeño, grande o muy grande, etc. A cada uno de los términos lingüísticos básicos se le asigna uno de cinco números difusos mediante una regla semántica m . Los números difusos, cuyas funciones de membresía tienen las formas trapezoidales habituales, se define el universo de discurso X en el intervalo $[0, 100]$ y cada uno de ellos expresa una restricción difusa en este rango (Klir & Yuan, 1995).

Figura 36

Representación gráfica de conjuntos difusos y variables lingüísticas.



Nota. Adaptado de *An example of a linguistic variable* (p.101), por G. Klir & B. Yuan, 1995, Prentice Hall.

Fusificación

La fusificación es el proceso de descomposición de una entrada y/o salida del sistema en uno o más conjuntos difusos. Se pueden utilizar muchos tipos de curvas y tablas, pero las funciones de membresía de forma triangular o trapezoidal son las más comunes, ya que son más fáciles de representar en los controladores integrados. Las funciones de membresía deben superponerse para permitir un mapeo fluido del sistema.

Este proceso permite que las entradas y salidas del sistema se expresen en términos lingüísticos para permitir que las reglas se apliquen de manera simple para expresar un sistema complejo.

Reglas de control

Son un conjunto de reglas lingüísticas basadas en la inferencia lógica de si-entonces, que definen como se debe controlar el sistema. Las operaciones de lógica booleana se aplican en lógica difusa para manejar la noción de valores de verdad parcial entre "completamente verdadero" y "completamente falso" (Zhang, 2010).

Sistema conjuntivo. En el caso de un sistema de reglas que deben cumplirse conjuntamente, las reglas están conectadas por conectivos "y", se definen mediante la función de pertenencia de la ecuación (14).

$$\mu_y(y) = \min\{\mu_{y_1}(y), \mu_{y_2}(y), \dots, \mu_{y_r}(y)\} \quad y \in Y \quad (14)$$

Sistema disyuntivo. Para el caso de un sistema disyuntivo de reglas donde se requiere la satisfacción de al menos una regla, las reglas están conectadas por los conectivos "o". En este caso, la salida agregada se encuentra mediante la unión difusa de todas las contribuciones de reglas individuales, así la función de membresía queda definida como se indica en la ecuación (15) establecida (Ross, 2004).

$$\mu_y(y) = \max\{\mu_{y_1}(y), \mu_{y_2}(y), \dots, \mu_{y_r}(y)\} \quad y \in Y \quad (15)$$

Método de inferencia

Es el algoritmo que seguirá la computadora para inferir la conclusión a partir de las premisas, es decir, a partir de las señales entrantes y las reglas de control.

Regla de inferencia Modus Ponens. Wang Li-Xing (1997) menciona que, es una regla de inferencia la cual establece que dadas dos proposiciones p y $p \rightarrow q$ (llamadas premisas), se debe inferir la verdad de la proposición q (llamada conclusión). Simbólicamente, se representa como en la ecuación (16). Por lo tanto, dadas dos proposiciones difusas x es A' y SI x es A ENTONCES y es B , debemos inferir una nueva proposición difusa y es B' tal que, cuanto más cerca A' de A , más cerca B' de B , donde A , A' , B y B' son conjuntos difusos (pp.76).

$$(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q \quad (16)$$

Premisa 1: x es A'

Premisa 2: *SI* x es A *ENTONCES* y es B

Conclusión: y es B'

Operador de implicación difusa. Se utiliza el operador de implicación de Mamdani para modelar la relación causal entre variables difusas. Como se indica en la ecuación (17), este operador simplemente toma el mínimo de valores de verdad de predicciones difusas (Fuller, 1995).

$$\mu_A(x) \rightarrow \mu_B(y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad (17)$$

Según Ross (2004) manifiesta que, para ilustrar la idea general de implicación difusa, se considera un sistema simple de dos reglas donde cada regla comprende dos premisas o antecedentes y un consecuente, lo que nos da a entender que es un sistema difuso de dos entradas y una salida. Un sistema difuso con dos entradas no interactivas x_1 y x_2 (premisas) y una sola salida (conclusión) se describe mediante una colección de r proposiciones lingüísticas SI-ENTONCES en la forma Mamdani como se define en la ecuación (18):

$$SI \ x_1 \text{ es } A_{1,k} \wedge \ x_2 \text{ es } A_{2,k} \ \text{ENTONCES} \ y_k \text{ es } B_k \quad (18)$$

Para: $k = 1, 2, \dots, r$

Donde:

$A_{1,k}$ y $A_{2,k}$: Conjuntos difusos que representan los k -ésimos pares de premisas o antecedentes.

B_k : Conjunto difuso que representa el k -ésimo consecuente.

Las entradas al sistema son valores escalares de una función singleton y el método de inferencia será de máximo-mínimo. Las entradas x_1 y x_2 son valores nítidos, es decir, funciones

delta. El sistema basado en reglas se describe mediante la ecuación. (18), por lo que la pertenencia de las entradas x_1 y x_2 será descrita por las ecuaciones (19) y (20).

$$\mu(x_1) = \delta(x_1 - input(i)) = \begin{cases} 1 & , \quad x_1 = input(i) \\ 0 & , \quad x_1 \neq input(i) \end{cases} \quad (19)$$

$$\mu(x_2) = \delta(x_2 - input(j)) = \begin{cases} 1 & , \quad x_2 = input(j) \\ 0 & , \quad x_2 \neq input(j) \end{cases} \quad (20)$$

Basado en el método de inferencia de implicación de Mamdani de la ecuación (17), y para un conjunto de reglas disyuntivas, la función de salida agregada para las reglas r estará dada por la ecuación (21).

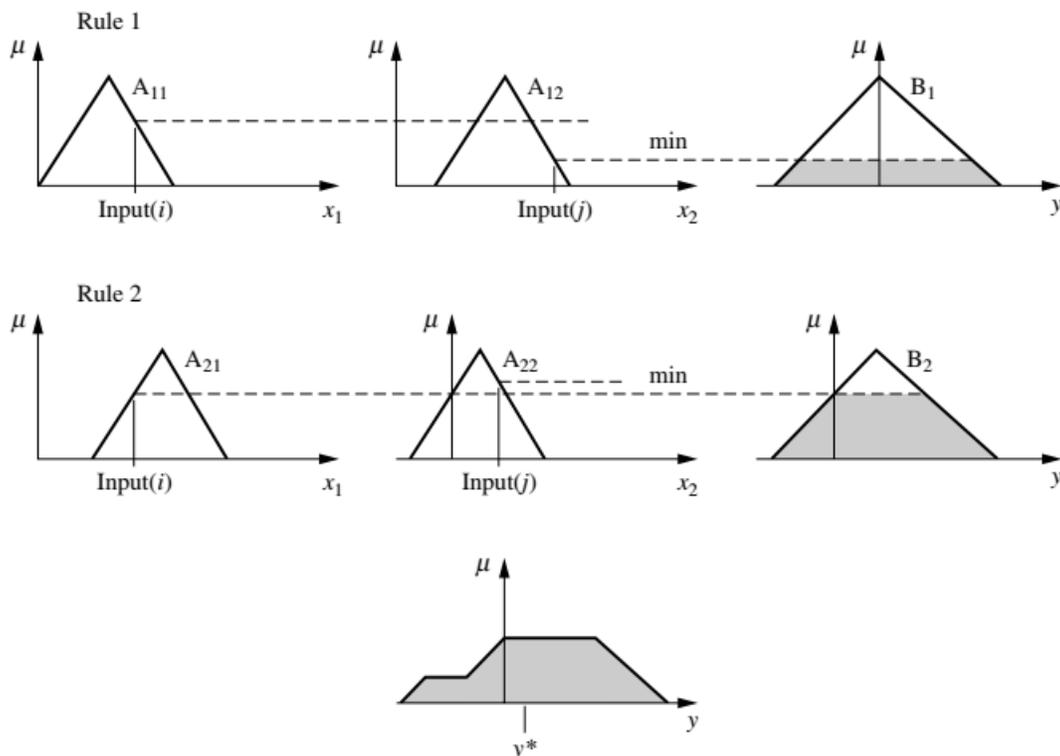
$$\mu_{B_k}(y) = \max\{\min\{\mu_{A_{1,k}}(input(i)), \mu_{A_{2,k}}(input(j))\}\} \quad (21)$$

Para: $k = 1, 2, \dots, r$

En la explicación de Ross (2004) se menciona que, en el análisis gráfico de dos reglas, mostrado en la Figura 37 donde los símbolos $A_{1,1}$ y $A_{1,2}$ se refieren a la primera y segunda premisa difusa de la primera regla, respectivamente, y el símbolo B_1 se refiere a la conclusión difusa de la primera regla; los símbolos $A_{2,1}$ y $A_{2,2}$ se refieren a la primera y segunda premisa difusa de la segunda regla, respectivamente, y el símbolo B_2 se refiere a la conclusión difusa de la segunda regla. Los valores mínimos obtenidos de la ecuación (21) surgen debido a que los pares de premisas dadas en la estructura de la regla general para este sistema están conectados por un conector lógico "y", como se ve en la ecuación (18) el valor de membresía mínimo para las premisas se propaga al consecuente y trunca la función de membresía para la conclusión de cada regla. Luego se agregan las funciones de membresía truncadas para cada regla, utilizando el equivalente gráfico obtenido por la ecuación (14), para reglas de conjunción, o (15), para reglas disyuntivas; como se muestra en la Figura 37 las reglas son disyuntivas, por lo que la operación de agregación máxima da como resultado una función de membresía compuesta por la unión de los cortes obtenidos de cada regla, y para obtener el valor y^* que se muestra en la figura 5.10, se deberá aplicar un método de defusificación.

Figura 37

Método de inferencia de Mamdani.



Nota. Adaptado de *Graphical Mamdani (max-min) inference method with crisp inputs* (p.152), por T. Ross, 2004 , Prentice Hall.

Defusificación

Para poder controlar el sistema se requiere una acción de control no difusa, es decir, un valor nítido. Según Fuller (1995) menciona que, la defusificación es un proceso para seleccionar un elemento representativo del conjunto difuso de salida que se obtuvo del algoritmo de fusificación.

(Zhang, 2010) establece que, en esta etapa se mapea la salida del dominio difuso de vuelta al dominio nítido. Algunos métodos de defusificación tienden a producir una salida integral, al considerar todos los elementos del conjunto difuso resultante con sus magnitudes correspondientes. Otros métodos tienen en cuenta solo los elementos correspondientes a los

puntos máximos de las funciones de pertenencia resultantes. Los métodos más utilizados son: centroide, máximo central (MOM), máximo más pequeño (SOM), máximo más grande (LOM).

El cálculo del centroide del área del conjunto difuso de salida está definido en la ecuación (22).

$$y_o = \frac{\sum y\mu(y)}{\sum \mu(y)} \quad (22)$$

Donde:

y_o : Valor nítido de salida.

$\mu(y)$: Conjunto difuso agregado de salida

Las estrategias de control difuso se derivan de la experiencia y el experimento en lugar de modelos matemáticos y, por lo tanto, las implementaciones lingüísticas se logran mucho más rápido, implican una gran cantidad de entradas, la mayoría de las cuales son relevantes solo para algunas condiciones especiales. Dichas entradas se activan solo cuando prevalece la condición relacionada, de esta manera, se requiere poca sobrecarga computacional adicional para agregar reglas adicionales, y la estructura basada en reglas resultante sigue siendo comprensible, lo que lleva a una codificación y documentación del sistema eficientes. En las industrias modernas, el control difuso adaptativo y el control de supervisión difuso se aplican ampliamente tanto en el control de procesos como en la automatización de la producción (Zhang, 2010).

Análisis de resistencia a la fatiga

La falla por fatiga en los materiales es un fenómeno que ocurre cuando dicho elemento está sometido a cargas cíclicas, provocando que el material se debilite y su resistencia sea mucho menor que su resistencia a tracción que comúnmente se encuentra en las tablas de las propiedades de algún material. Existen varios factores a considerar en el análisis de fatiga de componentes mecánicos, según Budynas & Nisbett (2018) establecen que, la ecuación de Marin considera factores de condición superficial, tamaño, carga, temperatura, confiabilidad y otros que permiten calcular la resistencia a la fatiga de un material, en la ecuación (23) se

define la fórmula de Marin, esta ecuación depende del límite de resistencia a la fatiga que está definido en la ecuación (24).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \quad (23)$$

$$S_e' = \begin{cases} 0.5 \cdot S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ [ksi] o } 1400 \text{ [MPa]} \\ 100 \text{ [ksi]} & S_{ut} > 200 \text{ [ksi]} \\ 700 \text{ [MPa]} & S_{ut} > 1400 \text{ [MPa]} \end{cases} \quad (24)$$

Donde:

S_e : Es la ecuación de Marin para el cálculo de resistencia a la fatiga de un material.

S_e' : Es el límite de resistencia a la fatiga de un material.

k_a : Es el factor de superficie.

k_b : Es el factor de tamaño.

k_c : Es el factor de carga.

k_d : Es el factor de temperatura.

k_e : Es el factor de confiabilidad.

El factor de superficie k_a se calcula mediante la ecuación (25), cuyos parámetros de a y b están establecidos en la Tabla 8.

$$k_a = a \cdot (S_{ut})^b \quad (25)$$

Tabla 8

Parámetros para el cálculo de factor de superficie.

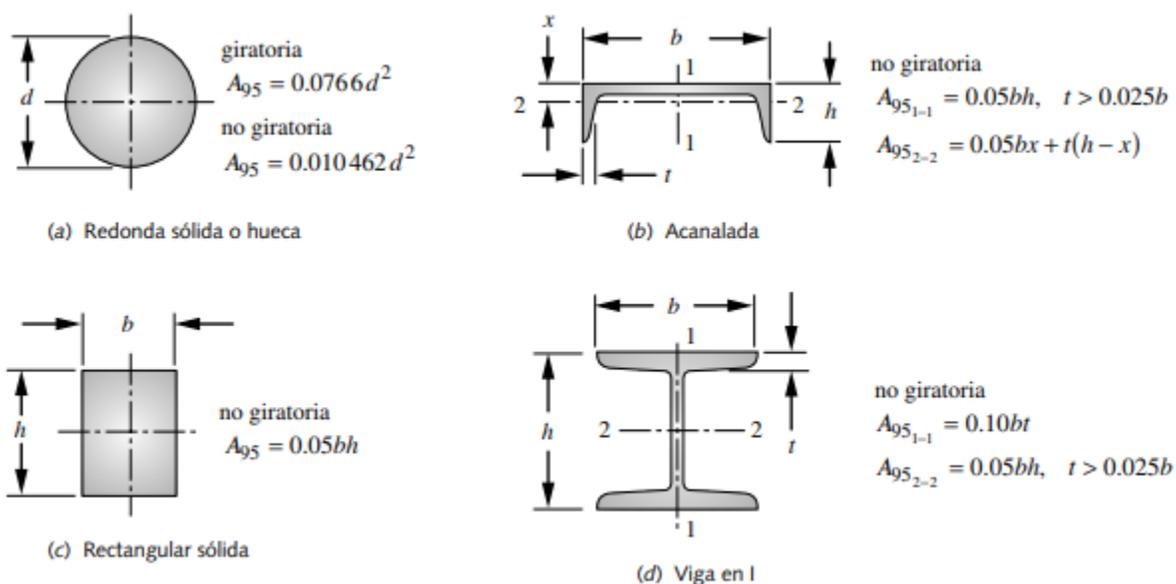
Acabado superficial	Factor a (S_{ut} [MPa])	Exponente b
Esmerilado	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Como sale de la forja	272.0	-0.995

Nota. Tomado de *Parámetros en el factor de la condición superficial de Marin* (p.282), por R. Budynas & J.K. Nisbett, 2018, McGraw-Hill.

Para el cálculo del factor de tamaño k_b , usualmente se considera una viga rotativa circular, pero como en este caso, se realizará el cálculo de fatiga con materiales que poseen otras formas geométricas. Norton (2011) establece que, para secciones no circulares se considera un diámetro equivalente definido en la ecuación (27), con la cual se obtendrá el diámetro para el cálculo del factor de tamaño mediante la ecuación (40), en la Figura 38 se muestra el valor de secciones al 95% del esfuerzo máximo de la viga rotativa para perfiles estructurales no rotatorios. Si la carga es axial, el factor $k_b = 1$ por no tener efecto de tamaño.

Figura 38

Áreas al 95% de perfiles estructurales no rotativos.



Nota. Adaptado de *Fórmulas de áreas sometidas al 95% de esfuerzo de varias secciones cargadas a flexión* (p.262), por R. Norton, 2011, Pearson Education.

$$k_b = \begin{cases} 1.24 \cdot d^{-0.107} & 2.79 \leq d \leq 51 \text{ [mm]} \\ 1.51 \cdot d^{-0.157} & 51 \leq d \leq 254 \text{ [mm]} \end{cases} \quad (26)$$

$$d_e = \sqrt{\frac{A_{95}}{0.0766}} \quad (27)$$

Según Budynas & Nisbett (2018) establecen que, el factor de carga k_c es una función de la resistencia última del material, por lo cual se han establecido valores del factor para tres tipos de carga como se muestra en la ecuación (28), y en el caso de cargas combinadas, se considera un valor $k_c = 1$. La temperatura afecta cuando se trabaja a menos de la temperatura ambiente, provocando fragilidad en los metales, y a mayores temperaturas la fluencia cambia. Para condiciones normales a 20 [°C], el factor de temperatura k_d es 1, como se define en la ecuación (43).

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases} \quad (28)$$

$$k_d = 1 \quad a \quad 20[^\circ\text{C}] \quad (29)$$

$$k_e = 1 - 0.08 \cdot z_a \quad (30)$$

Tabla 9

Factores de confiabilidad.

Acabado superficial	z_a	k_e
50	0.000	1.000
90	1.288	0.897
95	1.645	0.868
99	2.345	0.814
99.9	3.091	0.753
99.99	3.719	0.702
99.999	4.265	0.659
99.9999	4.753	0.620

Nota. Tomado de *Factores de confiabilidad ke correspondientes a 8 desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga* (p.287), por R. Budynas & J.K. Nisbett, 2018, McGraw-Hill.

Según (Budynas & Nisbett, 2018) establecen que, el factor de confiabilidad k_e se puede calcular mediante la ecuación (30), la variación de transformación z_a está establecida según el porcentaje de confiabilidad que se indica en la Tabla 9.

Esfuerzos fluctuantes

Budynas & Nisbett (2018) manifiestan que, las cargas a las que suelen estar sometidos los componentes mecánicos suelen ser de patrones periódicos, y esto hace que los esfuerzos estáticos tengan un valor distinto al promedio entre el esfuerzo máximo o mínimo que se denomina esfuerzo medio, también existe el esfuerzo alternante, en las ecuaciones (31) y (32) se definen la manera de calcular dichos valores. Sin embargo, estos son esfuerzos nominales, cuando la geometría del elemento mecánico presenta zonas en las que se puede generar una concentración de esfuerzos K_f , así los esfuerzos medios y alternante reales, se definen en las ecuaciones (33) y (34).

$$\sigma_{mo} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (31)$$

$$\sigma_{ao} = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (32)$$

$$\sigma_m = K_f \sigma_{mo} \quad (33)$$

$$\sigma_a = K_f \sigma_{ao} \quad (34)$$

Criterios de falla por fatiga

El criterio de falla por fluencia es conocido como criterio de Soderberg, que se utiliza la resistencia a la cedencia del material S_y , y se define en la ecuación (49). El criterio de falla de Goodman considera la resistencia última del material S_{ut} , y queda establecida en la ecuación (50). Ambas ecuaciones tendrán un factor de seguridad.

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n} \quad (35)$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad (36)$$

Donde:

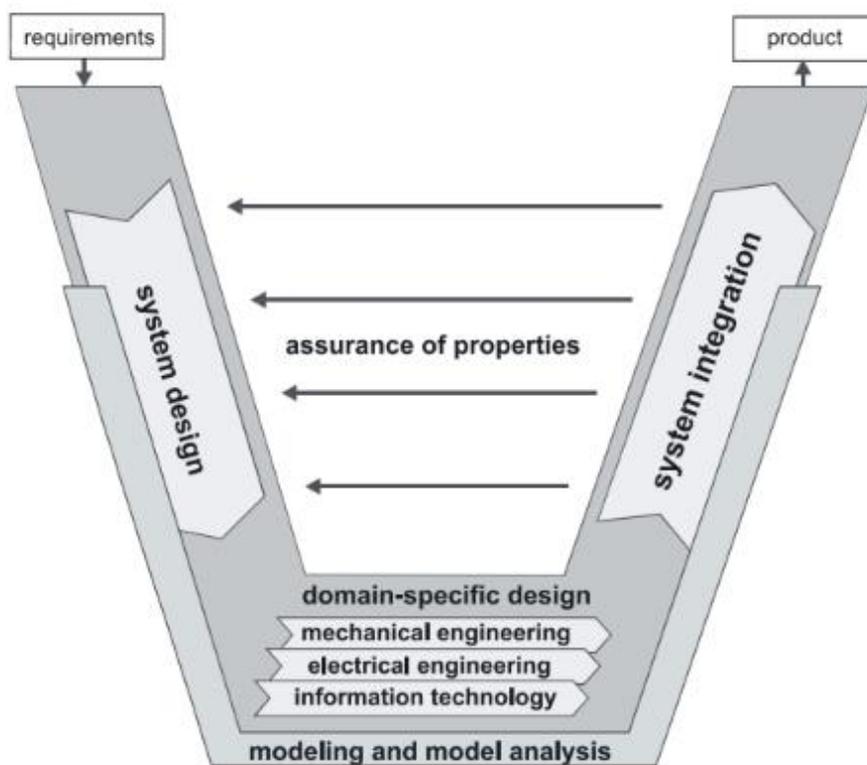
n : Es el factor de seguridad.

Metodología del modelo V para sistemas mecatrónicos

Según la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI, 2004), manifiestan que, el modelo V describe el procedimiento genérico para diseñar sistemas mecatrónicos, que son: los requerimientos, diseño del sistema, diseño de dominio específico, integración del sistema, verificación de propiedades, modelamiento y análisis, y el producto, como se muestra en la Figura 39.

Figura 39

Modelo V como un macro-ciclo.



Nota. Tomado de *V model as a macro-cycle* (p.30), por VDI, 2004.

Los requerimientos son el punto de partida con lo que se evaluará el producto posterior, el diseño del sistema establece un concepto de solución describiendo las características principales de operación del producto, en el diseño de dominio específico se llevan a cabo los dominios por separado para garantizar el desempeño de cada función, en la integración del sistema se juntan todos los dominios individuales, para que en la verificación se evalúe el trabajo realizado y se comparen con los requerimientos y características preestablecidas, que podrán ser modeladas y simuladas para finalmente validar los resultados en un producto final.

CAPÍTULO III

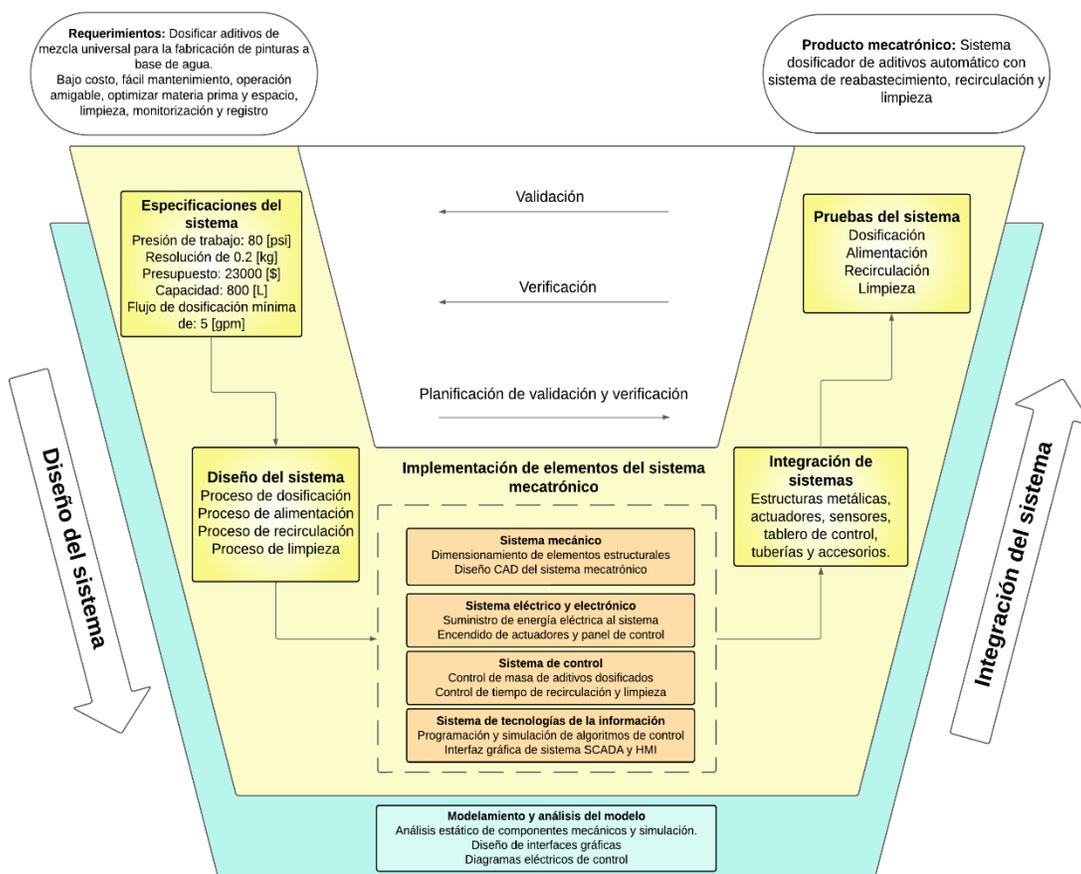
Diseño y construcción del sistema de dosificación

Metodología para el diseño e implementación

El desarrollo de este sistema se fundamentó en la metodología VDI 2206 realizada por la Asociación de Ingenieros Alemanes para el diseño de sistemas mecatrónicos, en la Figura 40 se puede apreciar de forma gráfica la metodología a emplearse y la descripción de las respectivas fases que la constituyen.

Figura 40

Modelo V como metodología para el sistema dosificador de aditivos.



Requerimientos y parámetros de diseño

Según Dieter & Schmidt (2013) manifiestan que, la metodología de despliegue de la función de calidad (QFD) es un procedimiento ideado para identificar las necesidades del cliente y canalizarla a lo largo de todo el proceso de desarrollo de un producto determinando el conjunto importante de requisitos para identificar el conjunto de características técnicas de cada fase que más contribuyen a satisfacer dichos requisitos. La herramienta más usada es la casa de la calidad (HOQ), un método gráfico que ayuda a un equipo de diseño a identificar sistemáticamente todos los elementos que intervienen en el proceso de desarrollo del producto y crear matrices de relaciones entre parámetros clave en cada paso del proceso.

El proceso de dosificación de aditivos que se realizaba en la empresa, demostró que existía la necesidad de desarrollar y automatizar el procedimiento para mejorar la calidad de la producción de pinturas a base de agua. Para comenzar, fue necesario identificar los requerimientos del cliente, para ello se utilizó la metodología QFD, en la Tabla 10 se enlista los requerimientos identificados y en la Tabla 11 se muestran las características de calidad.

Tabla 10

Requerimientos del sistema de dosificación

N.º	Requerimiento
1	Bajo costo de construcción
2	Fácil mantenimiento
3	Operación sencilla
4	Optimizar consumo de materia prima
5	Reducir espacio para almacenamiento
6	Limpieza autónoma del sistema
7	Monitorización de sistema a distancia
8	Registrar cantidad de materia prima consumida
9	Capacidad de expansión de tanques IBC.
10	Disponibilidad de interfaz HMI y tablero de control

Nota. Los requerimientos han sido identificados mediante criterios del personal de empresa.

Tabla 11

Características de calidad para el sistema de dosificación

N.º	Característica de calidad
1	Precio de componentes [\$]
2	Presión de trabajo óptima de aire comprimido para la operación de bombas y actuadores [psi]
3	Tiempo de capacitación de operarios [horas]
4	Resolución de celdas de carga [kg]
5	Cantidad de barriles por tanque IBC
6	Presión de agua y radio de alcance del limpiador [psi]
7	Tiempo de respuesta de sensores de nivel y carga [ms]
8	Cantidad de datos y registros por lote
9	Flujo de aditivos [kg/min]
10	Operaciones disponibles en pantalla
11	Cantidad de tanques IBC disponibles

Nota. Las características han sido identificadas mediante criterios del grupo técnico de la empresa.

Para relacionar la Tabla 10 y Tabla 11 se implementó la matriz QFD de la casa de la calidad HOQ (ver Figura 41), la simbología de dicha matriz se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12

Simbología de la matriz QFD implementada

Símbolo	Denominación
	Alta relación
	Moderada relación
	Débil relación
	Fuerte correlación positiva
	Correlación positiva
	Correlación negativa

Nota. Cada símbolo es usado según el valor que se considera adecuado según el grado de relación.

Requisitos de calidad

El proceso de dosificación de aditivos es la primera etapa para la elaboración de productos a base de agua, es por ello que requieren la construcción de esta máquina para lotes grandes que superan los 1000 litros de producción, para ello la dosificación de aditivos será directamente proporcional a la cantidad objetivo, y se ha establecido que el error permitido no debe salir del rango de -0.4 hasta 0.4 kg, en la dosificación de cada aditivo. Según las correlaciones identificadas en la casa de la calidad se ordenó por ponderaciones las características técnicas en la Tabla 13.

Tabla 13

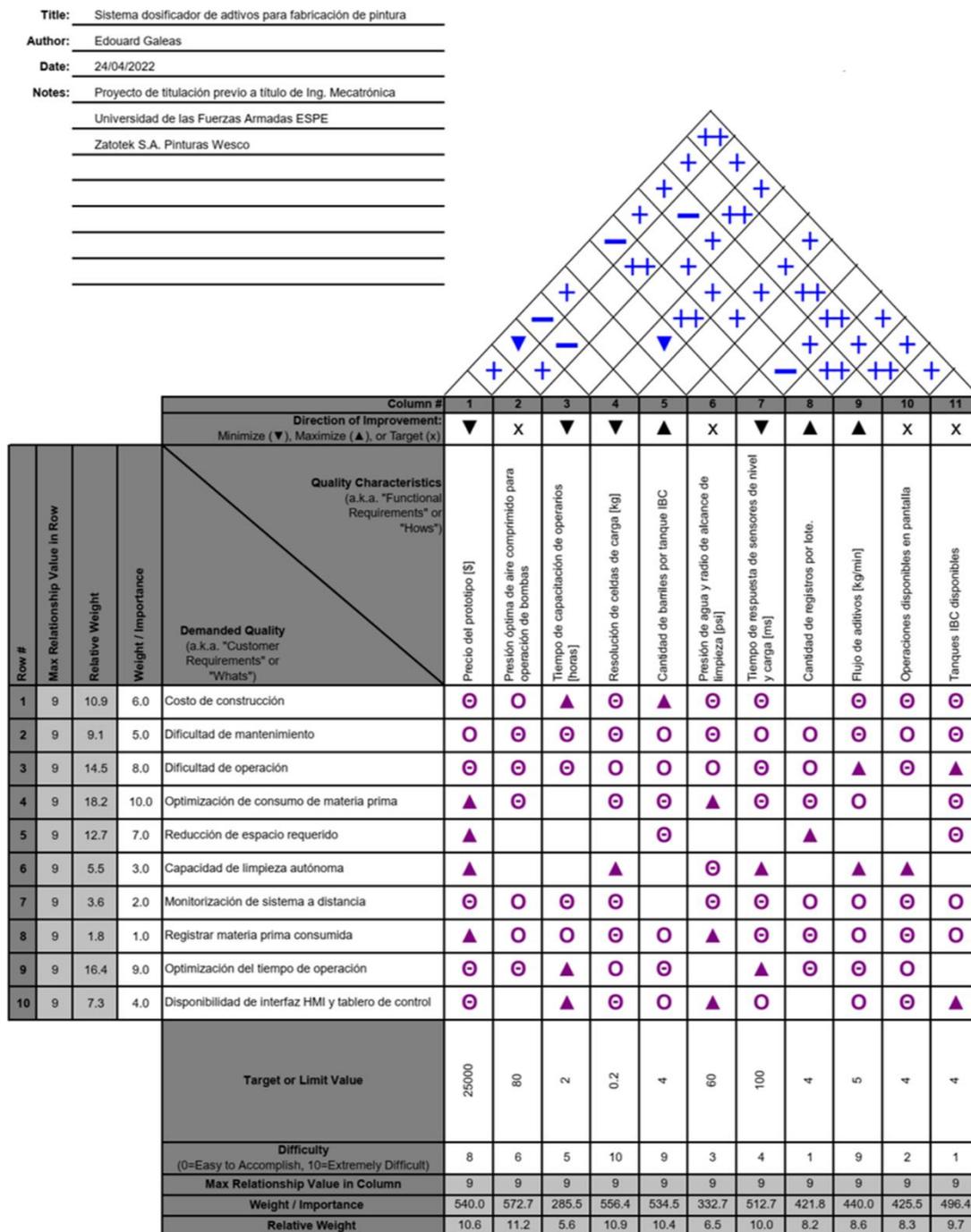
Relevancia de las características técnicas del sistema de dosificación

N.º	Característica de calidad	Ponderación
1	Presión de trabajo óptima de aire comprimido para la operación de bombas y actuadores [psi]	11.2
2	Resolución de celdas de carga [kg]	10.9
3	Precio del prototipo [\$]	10.6
4	Cantidad de barriles por tanque IBC	10.4
5	Tiempo de respuesta de sensores de nivel y carga [ms]	10.0
6	Tanques IBC disponibles	9.7
7	Flujo de dosificación [kg/min] a condiciones ambientales	8.6
8	Operaciones disponibles en pantalla	8.3
9	Cantidad de datos y registros por lote	8.2
10	Presión de agua y radio de alcance del limpiador [psi]	6.5
11	Tiempo de capacitación de operarios [horas]	5.6

Nota. Se ordenó de forma descendente cada característica, la suma de ponderaciones total es de 100.

Figura 41

Matriz de la casa de la calidad aplicado al sistema dosificador de aditivos



Nota: Se realizaron las correlaciones según criterios de los miembros técnicos de la empresa.

Requisitos para los costos de desarrollo y construcción

Este proyecto se realizó con el auspicio de la empresa Zatotek S.A., la cual después del análisis de requerimientos y de presupuesto, se aprobó la cantidad de \$ 22961.74 dólares americanos, valor que fue justificado mediante cotizaciones de proveedores nacionales, en los que se detallaron los materiales, equipos y servicios necesarios para la construcción del sistema.

Especificaciones del proyecto

El proceso del sistema dosificador comenzará con la selección de la materia prima deseada, el ingreso de la masa correspondiente por pantalla, considerando los valores mínimos y máximos permitidos de 10 a 250 kilogramos, así como el peso del contenido actual en la tolva de dosificación. Una vez cumplidas las condiciones iniciales, comenzará la secuencia de dosificación en orden ascendente desde el menor hasta el mayor, es decir, que las opciones varían desde el tanque IBC 1 hasta el tanque IBC 4, que serán controladas por PLC que enviará señales analógicas a una válvula proporcional que conducirá el flujo de aire de bombas. La tolva estará montada sobre cuatro celdas de carga, las cuales serán las encargadas de medir la masa del su contenido, esta información será enviada mediante comunicación RS232 al PLC.

Cuando el contenido del tanque IBC es insuficiente no será posible realizar la operación de dosificación, por lo tanto, se deberá usar la opción de alimentación, en la que el operador conectará la manguera correspondiente a los tambores o barriles adquiridos de los proveedores de materia prima para reabastecer el tanque IBC correspondiente, el proceso se detendrá automáticamente al alcanzar la altura de seguridad, que será medida mediante sensores de nivel ultrasónicos. Finalmente, se dispondrá la opción de limpieza para la tolva con opciones de tiempo, las cuales estarán disponibles cuando el contenido de la tolva sea menor a un kilogramo.

Composición física

Para comprender la arquitectura del sistema dosificador de este proyecto, se utilizan herramientas esquemáticas, la descomposición física de un sistema mecatrónico según Dieter & Schmidt (2013) establecen que, significa separar el producto o subensamblaje directamente en sus subensamblajes y componentes subsidiarios y describir con precisión cómo se unen estas partes para crear el comportamiento del producto. En la Figura 42 se muestra la composición física del sistema dosificador de aditivos desarrollado.

Figura 42

Composición física del sistema dosificador de aditivos.

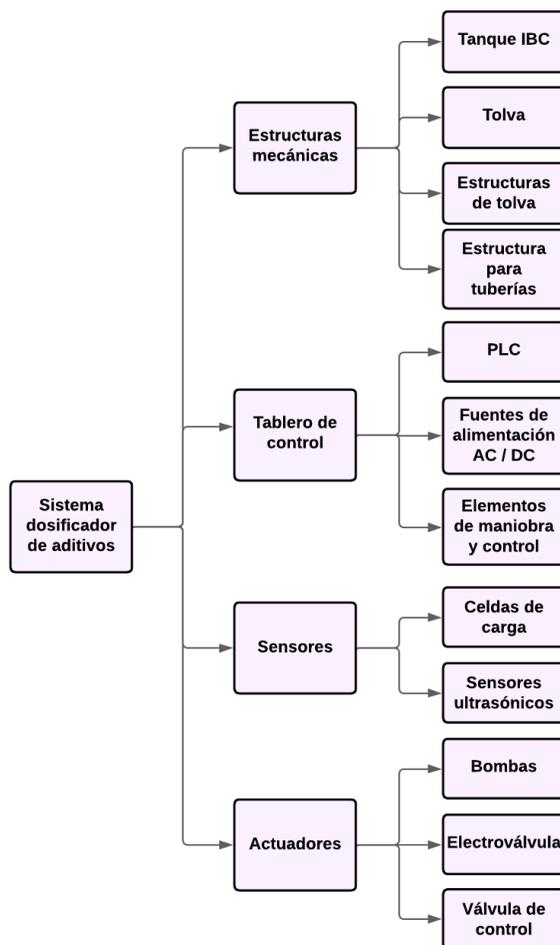


Diagrama funcional

Los sistemas mecatrónicos complejos generalmente comprenden la integración sinérgica de varios módulos mecatrónicos, que se combinan para formar un grupo de una función específica, cada módulo comprende y representa su función, y se deben organizar jerárquicamente (VDI, 2004).

Según Dieter & Schmidt (2013) mencionan que, una estructura de función es un diagrama de bloques que representa flujos de energía, material y señales como flechas etiquetadas que toman caminos entre bloques de funciones. Se utilizan para representar las transformaciones realizadas por el sistema, ensamblaje o componente, y etiquetan cada bloque seleccionando nombres de funciones de un conjunto predefinido de verbos transformacionales. La estructura de la función es muy diferente de la descomposición física de un producto porque una función es el comportamiento combinado de los componentes mecánicos y su disposición física (pp.222).

Descripción de procesos del sistema. El sistema dosificador de aditivos permitirá realizar cuatro tipos de operaciones: dosificación, alimentación, recirculación y limpieza de la tolva. Las funciones de cada operación están fundamentadas en el diagrama funcional de la Figura 43, y se detallan a continuación.

Selección de operación. Mediante una interfaz HMI o sistema SCADA el usuario podrá iniciar cualquier proceso, seleccionando por pantalla el proceso requerido, para ello se mostrarán botones e íconos que permitirán acceder fácilmente a una nueva ventana para la función necesaria.

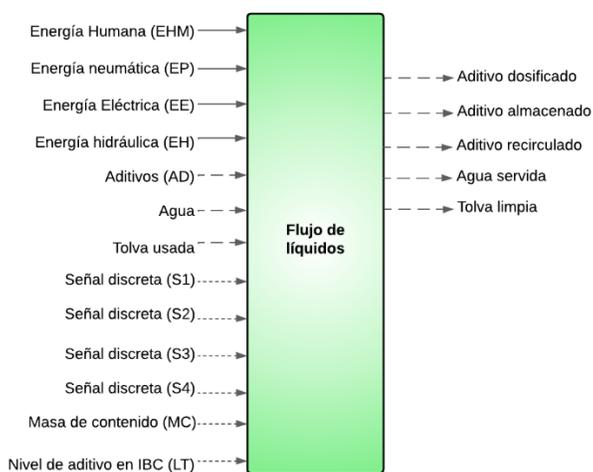
Dosificación de aditivos. La función dosificar permite elegir entre cuatro opciones de aditivos, una columna en la que se muestra la cantidad disponible de cada uno, el peso deseado y, el peso actual en la tolva. Al seleccionar un aditivo se activa un cuadro de texto para poder ingresar el valor deseado, las condiciones para poder habilitar la opción de inicio de

dosificación son: elegir uno o más componentes, el peso deseado debe ser mayor a 10 kg y menor a 250 kg, el peso deseado debe ser menor al peso disponible en el tanque IBC, la sumatoria de volumen deseado no debe ser mayor a 460 litros y el contenido de la tolva debe ser menor a 0.2 kg.

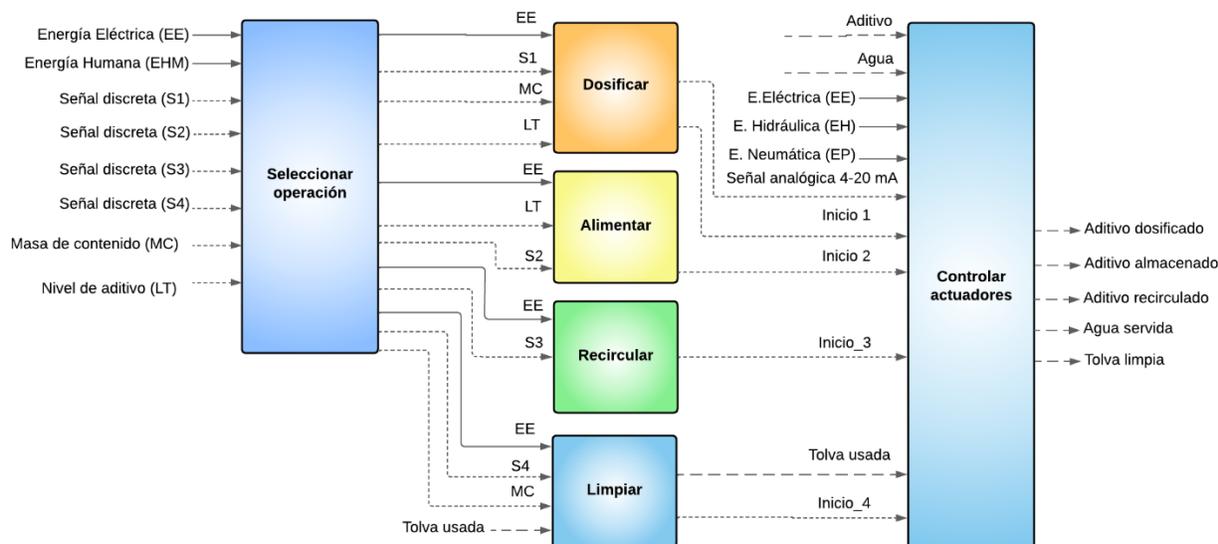
Figura 43

Diagrama funcional del sistema dosificador de aditivos.

NIVEL 0



NIVEL 1



El proceso de dosificación será secuencial según el orden de los tanques de forma ascendente. Los controladores de lógica difusa serán los encargados de establecer los valores de porcentaje de apertura de la válvula proporcional. Los parámetros establecidos en cada controlador, funcionan a una presión de aire constante de 80 psi.

Alimentación en tanques IBC. Esta función requiere de la selección del tanque del aditivo que se desea reabastecer en el tanque IBC correspondiente, este es un proceso semiautomático, ya que el usuario deberá conectar la manguera correspondiente al barril de donde se transportará el fluido hacia el contenedor, y a su vez abrir o cerrar las válvulas de bola manuales, antes de dar inicio al proceso, en el diagrama funcional, se muestra que la señal requerida para iniciar el proceso será digital.

Recirculación de aditivos en tanques IBC. Esta función requiere de la selección de uno de los cuatro tanques IBC y también de la selección del tiempo en segundos, las opciones serán de: 30, 60, 90 y 120 segundos, las condiciones de habilitación del botón de inicio será la selección de los dos ítems mencionados, con esto bastará para dar inicio al funcionamiento de los actuadores correspondientes.

Limpieza de la tolva. Esta función estará disponible solo cuando el contenido interno sea menor a 1 kg, debido a que será imposible limpiar el tanque si existe mezcla de aditivos en el interior de la tolva. Además de esta condición, también se debe elegir el tiempo, las opciones preestablecidas son de: 15, 25, 45 y 60 segundos, y con esto el botón de inicio de la operación estará habilitada.

Control de actuadores. Para dosificar se controlará la válvula proporcional mediante señales analógicas de 4 a 20 mA enviadas desde el PLC según las condiciones en tiempo real del controlador de lógica difusa, y se activarán las electroválvulas de salida del tanque IBC y entrada a la tolva. En la alimentación únicamente se activará la electroválvula de entrada a IBC, en la recirculación la entrada y salida del tanque IBC, y en la limpieza la electroválvula de agua.

Diseño mecánico

El proceso de dosificación consiste en depositar cierta cantidad de líquido desde cada tanque IBC en un recipiente donde se podrán mezclar hasta cuatro aditivos, este recipiente será una tolva metálica, los tanques IBC estarán ubicados en racks, en la Figura 44 se muestran las dimensiones de los tanques IBC y en la Figura 45 se muestra las dimensiones del rack correspondiente para los cuatro tanques.

Debido a que los racks son estructuras ya adquiridas con anterioridad en la empresa, no fue necesario su análisis estático. El sistema requerirá de estructuras tanto para la tolva de la mezcla, la instalación de bombas, tuberías, actuadores y accesorios, en este apartado se realizó el diseño de dichos componentes con su respectivo análisis.

El diseño mecánico comenzó estableciendo los datos disponibles para los cálculos necesarios, estableciendo los límites y características mínimas necesarias de cada elemento metálico, para que brinden un óptimo desempeño durante la operación del sistema.

Figura 44

Dimensiones principales en mm de un tanque IBC.

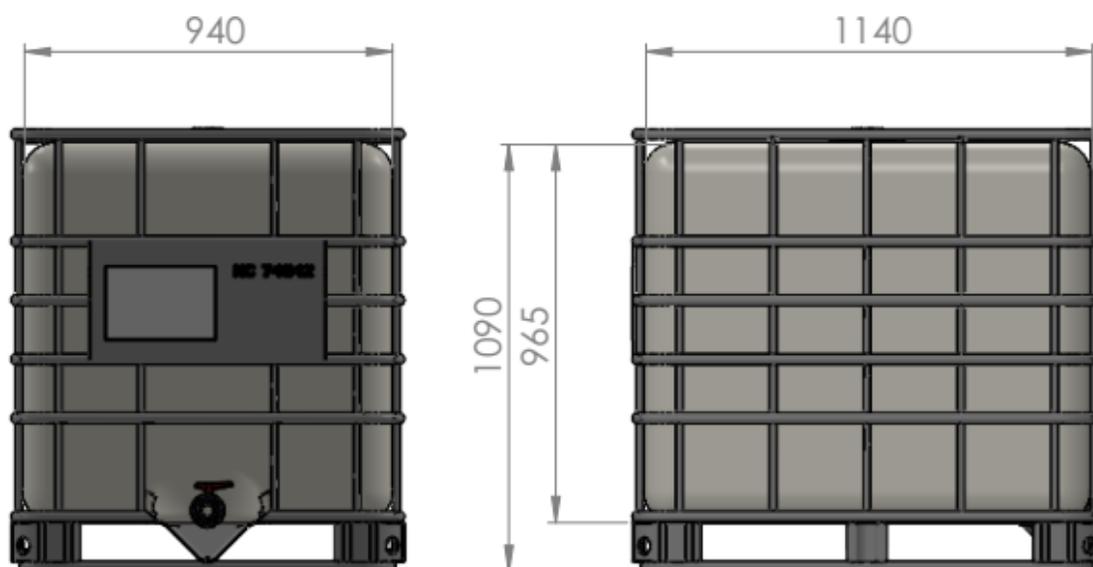
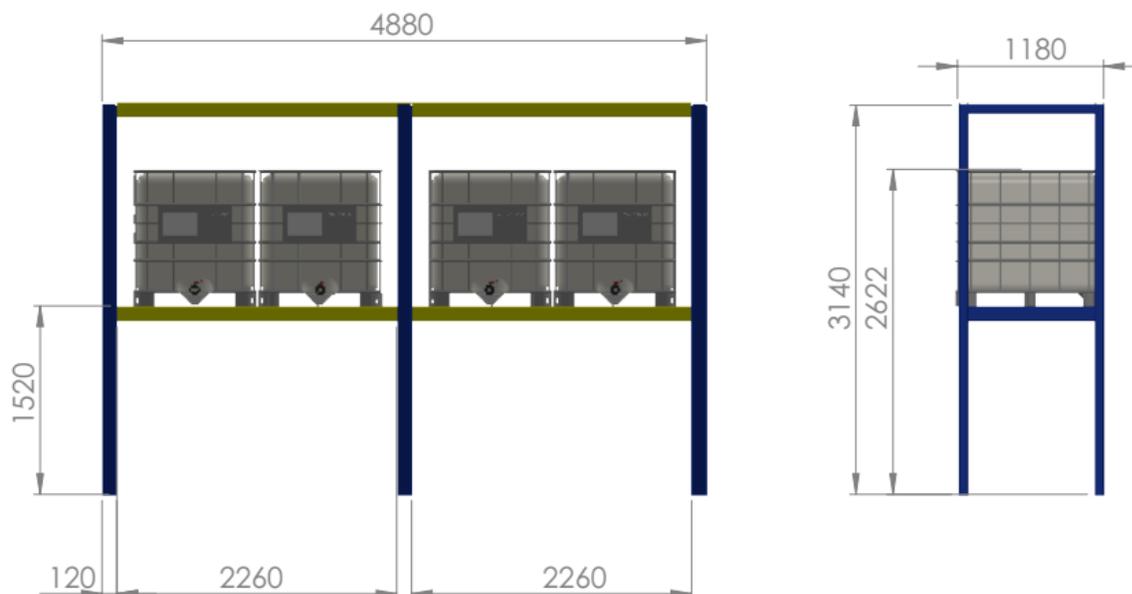


Figura 45

Dimensiones principales en mm de los racks para cuatro tanques IBC.



Diseño de la tolva para mezcla de aditivos

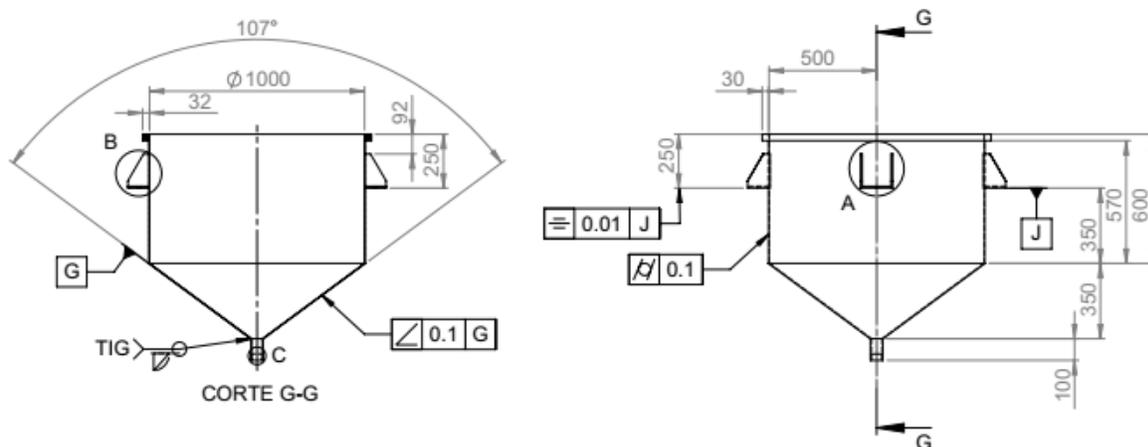
El espacio frontal ocupado por el rack de los tanques IBC es de 4880 [mm], se decidió ubicar la tolva de dosificación en el centro del rack, con el objetivo de reducir la distancia que los cuatro fluidos tengan que recorrer en las tuberías para ser depositados. El volumen máximo de la tolva se lo consideró según el volumen de la mezcla de la Tabla 1 en la que se muestra que el volumen total es de 296.49 [L].

Sin embargo, fue importante considerar el espacio que ocuparán las tuberías de descarga de cada aditivo y a su vez el espacio que requiere el rociador que limpiará el interior de la tolva, con estas consideraciones, las dimensiones de la tolva se muestran en la Figura 46, y el plano detallado se muestra en el anexo C.

La tolva tendrá cuatro ménsulas soldadas alrededor simétricamente, las cuales sirven de apoyo en la estructura y para la instalación de las celdas de carga que serán las encargadas de medir la cantidad de líquido dentro del recipiente metálico.

Figura 46

Dimensiones geométricas principales en mm de la tolva



Nota. La figura muestra un fragmento del plano de la tolva que se muestra en el anexo C.

Densidad de los aditivos. Para establecer los parámetros mínimos de diseño se consideraron las propiedades físicas de los líquidos con los que se va a trabajar: su densidad, peso específico y volumen. La densidad de los aditivos se adquirió de los registros del laboratorio de investigación y desarrollo de la empresa. Para los aditivos WP64, AM223, SG606 y AM225 sus valores de densidad se muestran en las ecuaciones (37), (38), (39) y (40) respectivamente. Para los cálculos de peso específico se define la aceleración de la gravedad en la ecuación (41).

$$\rho_{WP64} = 0.945 \left[\frac{kg}{L} \right] = 945.0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (37)$$

$$\rho_{AM223} = 0.86 \left[\frac{kg}{L} \right] = 860.0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (38)$$

$$\rho_{SG606} = 1.11 \left[\frac{kg}{L} \right] = 1110.0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (39)$$

$$\rho_{AM225} = 1.24 \left[\frac{kg}{L} \right] = 1240.0 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (40)$$

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad (41)$$

La gravedad específica de cada aditivo en el mismo orden se definió en las ecuaciones (42), (43), (44) y (45). Según las dimensiones de la tolva mostrada en las figuras anteriores, se procedió con un análisis del espesor mínimo, para ello se tuvo que analizar la parte cónica y cilíndrica del contenedor.

$$\gamma_{WP64} = \rho_{WP64} \cdot g = 9.27 \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (42)$$

$$\gamma_{AM223} = \rho_{AM223} \cdot g = 8.43 \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (43)$$

$$\gamma_{SG606} = \rho_{SG606} \cdot g = 10.89 \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (44)$$

$$\gamma_{AM225} = \rho_{AM225} \cdot g = 12.16 \left[\frac{kN}{m^3} \right] \quad (45)$$

Análisis de tanque cónico. El diseño de un contenedor cónico para líquidos de cierto peso específico, según Ugural (2015) establece que, dependerá del esfuerzo tangencial σ_θ y esfuerzo meridional σ_ϕ . En la Figura 47 se muestra un esquema con los parámetros de diseño de un tanque cónico y para el diseño de la tolva, se establecen los valores de dichos parámetros en las ecuaciones (46), (47) y (48).

$$h_c = 350[mm] \quad (46)$$

$$r_t = 500[mm] \quad (47)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{r_t}{h_c} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{500}{350} \right) = 55.0^\circ \quad (48)$$

Donde:

h_c : Es la altura del líquido en la parte cónica.

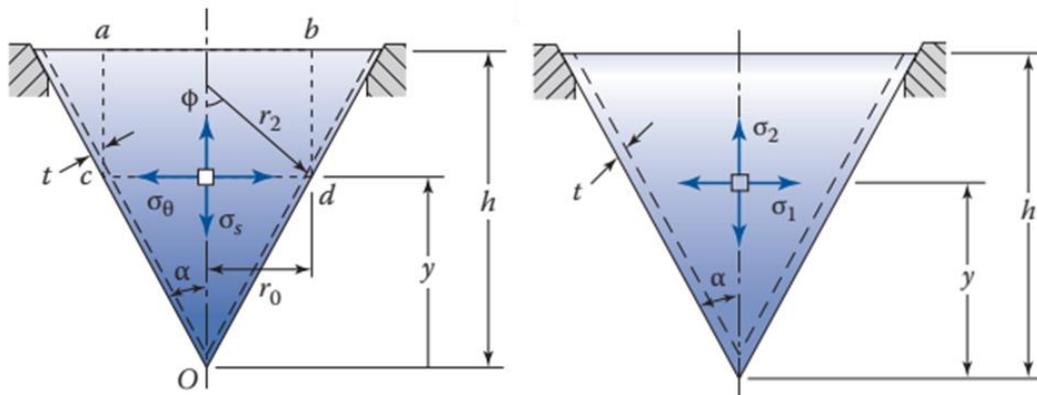
r_t : Es el radio de la tolva.

α : Es la mitad del ángulo de vértice del cono.

γ : Es el peso específico del líquido.

Figura 47

Esquema de un contenedor cónico.



Nota. Tomado de *Conical tank* (p.798), por A. Ugural, 2015, Taylor & Francis Group.

La presión del líquido dentro del contenedor cónico se calcula mediante la ecuación (49). Los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 , corresponden al esfuerzo tangencial y meridional definidos en las ecuaciones (50) y (51).

$$p_1 = \gamma(h_c - y_c) \quad (49)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_1 = \gamma(h_c - y_c)y_c \cdot \frac{\tan(\alpha)}{t \cdot \cos(\alpha)} \quad (50)$$

$$\sigma_\phi = \sigma_2 = \gamma \left(h - \frac{2}{3}y_c \right) y_c \cdot \frac{\tan(\alpha)}{2t_c \cdot \cos(\alpha)} \quad (51)$$

Donde:

p_1 : Es la presión manométrica del líquido.

σ_θ : Es el esfuerzo tangencial.

σ_ϕ : Es el esfuerzo meridional.

h_c : Es la altura del líquido en la parte cónica.

y_c : Es el nivel de líquido.

γ : Es el peso específico del líquido.

t_c : Es el espesor del tanque.

El esfuerzo tangencial máximo se da cuando $y_c = h_c/2$, con lo cual los esfuerzos principales quedan definidos en las ecuaciones (52) y (53). El esfuerzo meridional máximo se obtiene cuando $y_c = 3h_c/4$ y los esfuerzos principales quedan definidos como se indica en las ecuaciones (54) y (55). Según Ugural (2015) establece que, el esfuerzo crítico en un contenedor cónico será el esfuerzo tangencial máximo. Con este esfuerzo se puede aplicar un criterio de fallas de manera estática.

$$\sigma_{1,max} = \frac{\gamma(h_c)^2 \cdot \tan(\alpha)}{4t \cdot \cos(\alpha)} \quad (52)$$

$$\sigma_2 = \frac{\gamma(h_c)^2 \cdot \tan(\alpha)}{12t \cdot \cos(\alpha)} \quad (53)$$

$$\sigma_{2,max} = \frac{3 \cdot \gamma(h_c)^2 \cdot \tan(\alpha)}{16t \cdot \cos(\alpha)} \quad (54)$$

$$\sigma_1 = \frac{\gamma(h_c)^2 \cdot \tan(\alpha)}{4t \cdot \cos(\alpha)} \quad (55)$$

Análisis de tanque cilíndrico. El diseño de un contenedor cilíndrico para líquidos, según Ugural (2015) establece que, se calcula mediante la presión del líquido y la geometría del tanque, con esto el esfuerzo tangencial $\sigma_{\theta cil}$ y esfuerzo meridional $\sigma_{\phi cil}$ quedan definidos en las ecuaciones (56) y (57) respectivamente, con altura h_{cil} de 600 [mm].

$$\sigma_{\theta cil} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_{cil} \cdot r_t}{t_{cil}} = \frac{p_2 \cdot r_t}{t_{cil}} \quad (56)$$

$$\sigma_{\phi cil} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_{cil} \cdot r_t}{2 \cdot t_{cil}} = \frac{p_2 \cdot r_t}{2 \cdot t_{cil}} \quad (57)$$

Donde:

p_2 : Es la presión manométrica del líquido.

$\sigma_{\theta cil}$: Es el esfuerzo tangencial del tanque cilíndrico.

$\sigma_{\phi cil}$: Es el esfuerzo meridional del tanque cilíndrico.

h_{cil} : Es la altura total del líquido en el tanque cilíndrico.

Por lo tanto, el esfuerzo crítico de toda la tolva quedará definido como la suma de los esfuerzos tangenciales como se muestra en la ecuación (58), donde los espesores t_{cil} y t_c serán equivalentes, ya que serían parte de un mismo sólido.

$$\sigma_{\theta max} = \frac{p_2 \cdot r_t}{t_c} + \frac{\gamma(h_c)^2 \cdot \tan(\alpha)}{4t_c \cdot \cos(\alpha)} \quad (58)$$

Sin embargo, el proceso de llenado y vaciado de la tolva se repetirá por varios ciclos, así el esfuerzo será fluctuante y se realizó un análisis de resistencia a fatiga. Se eligió un acero inoxidable AISI 304 debido a que son apropiados para el procesamiento y almacenamiento de químicos y sus propiedades mecánicas son adecuadas para la industria de pinturas. En la Tabla 14 se muestra las propiedades del material elegido.

Tabla 14

Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304 de la tolva.

Dato	Valor
Norma	AISI 304
Resistencia a la fluencia	175.8 [MPa] (25500 [psi])
Resistencia última a tracción	479.2 [MPa] (69500 [psi])
Espesor de plancha	1.5 [mm]

Nota. Adaptado de *Propiedades mecánicas* (p.56), por Dipac Manta S.A., 2022.

Para establecer la resistencia (23) de la plancha de acero inoxidable, se calculó el límite de resistencia a fatiga mediante la ecuación (24), el factor de superficie con (25), el factor de tamaño con (26) y (27), el factor de carga con (28), el factor de temperatura según (29) y el factor de confiabilidad al 99% según (30). El esfuerzo tangencial mínimo será cero, por lo cual el esfuerzo alternante y medio serán los mismos, y aplicando criterio de Soderberg de la ecuación (35) se despeja el espesor mínimo de la tolva $t_{t,min}$ y se reduce a la ecuación (66).

$$S'_{et} = 0.5(479.2) = 239.6[\text{MPa}] \quad (59)$$

$$k_{at} = 4.51(479.2)^{-0.265} = 0.88 \quad (60)$$

$$k_{bt} = 1.51 \cdot \left(\sqrt{\frac{0.010462 \cdot (1000)^2}{0.0766}} \right)^{-0.157} = 0.37 \quad (61)$$

$$k_{ct} = 1 \quad (62)$$

$$k_{dt} = 1 \quad (63)$$

$$k_{et} = 0.814 \quad (64)$$

$$S_{et} = S'_{et} \cdot k_{at} \cdot k_{bt} \cdot k_{ct} \cdot k_{dt} \cdot k_{et} = 63.41 [MPa] \quad (65)$$

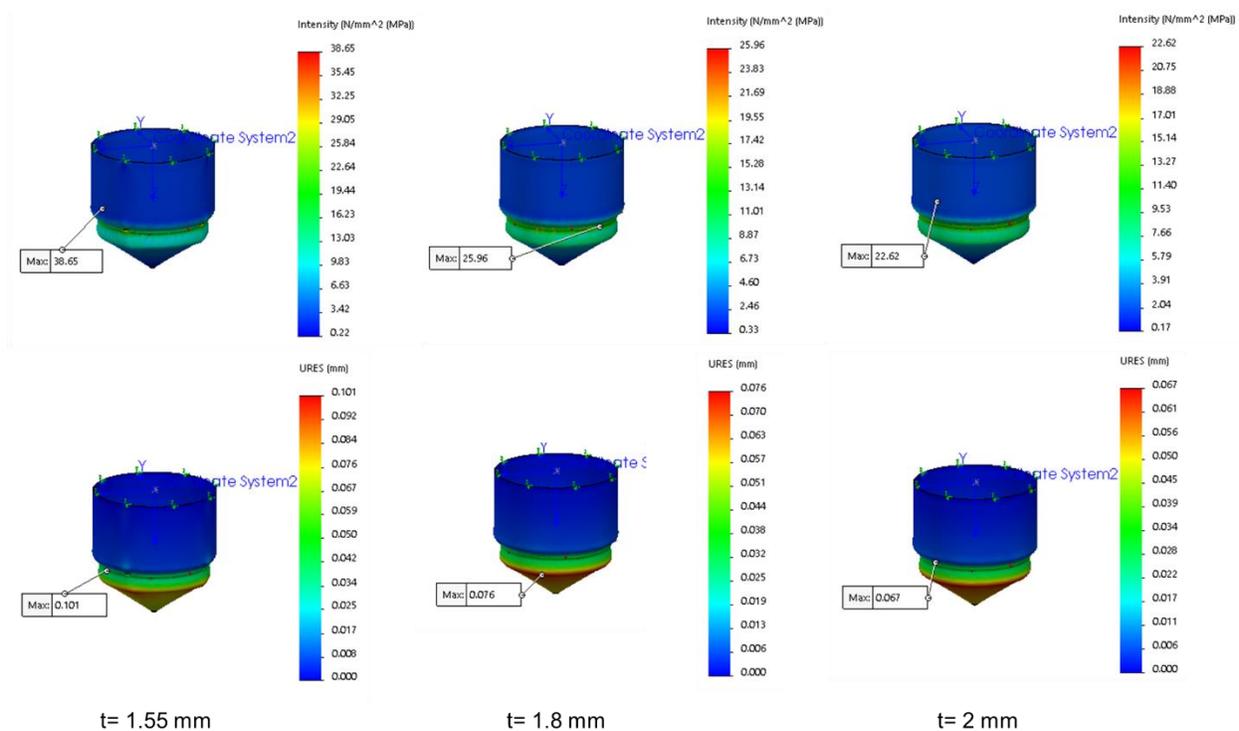
$$t_{t,min} = \left(\frac{n}{2} \right) \cdot \left(\rho_{AM225} \cdot g \cdot h_{cil} \cdot r_t + \frac{\gamma_{AM225} \cdot h_c \cdot \tan(\alpha)}{4 \cdot \cos(\alpha)} \right) \cdot \left(\frac{S_{et} + S_{yt}}{S_{et} \cdot S_{yt}} \right) = 0.12 [mm] \quad (66)$$

Simulación CAE de la tolva. Una vez obtenido el valor mínimo del espesor de la tolva se procedió a realizar simulaciones, en las que se sometía a la tolva a presión interna debido al líquido que contiene, el volumen del interior de la tolva es de 562.87 [L]. La aplicación permitió realizar el análisis con espesores igual o mayores a 1.55 mm de espesor. En la Figura 48 se muestra el análisis realizado con plancha de espesores: 1.55 [mm], 1.8 [mm] y 2 [mm]; según las propiedades mecánicas del acero inoxidable, la densidad es $\rho_{304} = 10 [g/cm^3]$, por lo cual, la masa de la tolva sin cartelas fue de 43.22 [kg] en el diseño software.

Según Dipac Manta S.A. (2022) los espesores disponibles comercialmente son de: 0.6, 0.7, 1.0, 1.2, 1.5, 1.9, 2.0, 2.5, 3.0 [mm], etc. En este estudio se verificó que el esfuerzo máximo en la tolva debido al contenido del aditivo de mayor densidad sea menor que el esfuerzo admisible de fluencia. Con el espesor mínimo de estudio, es decir, 1.55 [mm], se obtuvo un esfuerzo máximo de 15.47 [MPa], con 1.8 [mm] se consiguió 14.58 [MPa] y con 2.0 [mm] se llegó hasta 10.61 [MPa] con el criterio de cortante máximo, considerando que la resistencia a la fluencia es de 175.82 [MPa], el esfuerzo de 15.47 [MPa] representa el 6.2% de la resistencia, y como el software Solidworks sugirió un mínimo de 1.55 [mm] de espesor, se decidió establecer el valor de 1.5 [mm] de espesor para la tolva, valor que facilitó el proceso de soldadura TIG.

Figura 48

Esfuerzos y deflexión en la tolva de dosificación a distintos espesores.



Nota. Esfuerzos estáticos bajo el criterio de falla del cortante máximo.

La presión en la parte cilíndrica p_{cil} y cónica p_c se calcularon considerando el aditivo AM225 que posee la mayor densidad ya que al ocupar el volumen máximo se obtendrá también una masa máxima, en la simulación el valor máximo de p_{cil} fue 7296.15 [Pa], p_c de 2650.62 [Pa], la sumatoria de estas presiones p_t fue 9946.77 [Pa], este valor se dará en la salida de la tolva, es decir en el agujero donde se ubicará el nepló de dos pulgadas para la salida de la mezcla de aditivos.

$$p_{cil} = \rho_{AM225} \cdot g \cdot h_{cil}$$

$$p_c = \frac{\rho_{AM225} \cdot g \cdot h_c \cdot \tan(\alpha)}{4 \cdot \cos(\alpha)}$$

$$p_t = p_{cil} + p_c$$

Diseño de ménsulas

Inicialmente se realizó un análisis de las placas sin cartelas para determinar las cargas y esfuerzos críticos que soportarían las cuatro placas de empotramiento. En primera instancia se consideró un equilibrio uniforme en los cuatro apoyos de la tolva sobre la estructura de ensamble, las 4 bases soportarían una carga distribuida equitativamente, es decir, el 25% de la carga en el mismo instante. Estas placas estarían soldadas en posición horizontal, considerando el ajuste de la estructura en la que estaría empotrada la tolva, se evitaría la soldadura por debajo de la placa para que el cordón de soldadura no interfiera en el ensamble. Como se muestra en la Figura 49, el primer análisis comprende a las cargas de la placa inferior, la cual inicialmente se dimensionó con valores de una placa rectangular.

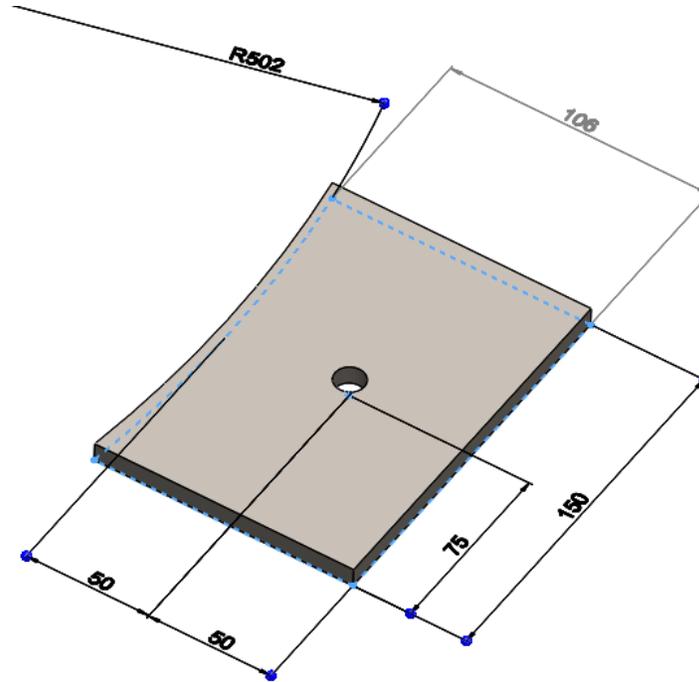
Se consideró el uso de dos cartelas para disminuir el efecto del esfuerzo flector sobre la placa inferior, lo que conlleva trabajar con placas de menor espesor, así también se reduce la deflexión que en este diseño es relevante porque influirá en el desempeño de las celdas de carga.

Análisis estático de las placas de empotramiento

En la Figura 53 se muestra la geometría de la placa base para los cuatro elementos de empotramiento de la tolva, en el anexo C se detallan las tolerancias dimensionales y geométricas, también se especifica la soldadura necesaria. El espesor de la placa e_{base} se determinó mediante las propiedades del material elegido, los datos iniciales de las placas base, rectangulares se definen en las ecuaciones (67) y (68). El análisis es similar al de una viga empotrada como se muestra en la Figura 50, cuando la tolva está vacía el peso mínimo de la misma será de 43.23 [kg] según el cálculo de software y cuando esté completamente llena el peso máximo será de 741.18 [kg] ya que se considera la masa de la tolva y el líquido, con estos datos se calcularon el peso mínimo (74) y máximo (75) de la tolva, mediante la ecuación (69).

Figura 49

Dimensiones generales de la placa base para empotrar la tolva.



Nota. El radio mostrado está especificado para el espesor de la tolva de 2 mm.

$$l_{base} = 100 [mm] \quad (67)$$

$$b_{base} = 150 [mm] \quad (68)$$

$$W = m \cdot g \quad (69)$$

$$m_{AM225} = \left(\frac{\pi}{3} \cdot (r_t)^2 \cdot h_c + \pi \cdot (r_t)^2 \cdot h_{cil} \right) \cdot \rho_{AM225} = 697.96 [kg] \quad (70)$$

$$m_{tolva} = 62.5 [kg] \quad (71)$$

$$m_{min} = m_{tolva} = 62.5 [kg] \quad (72)$$

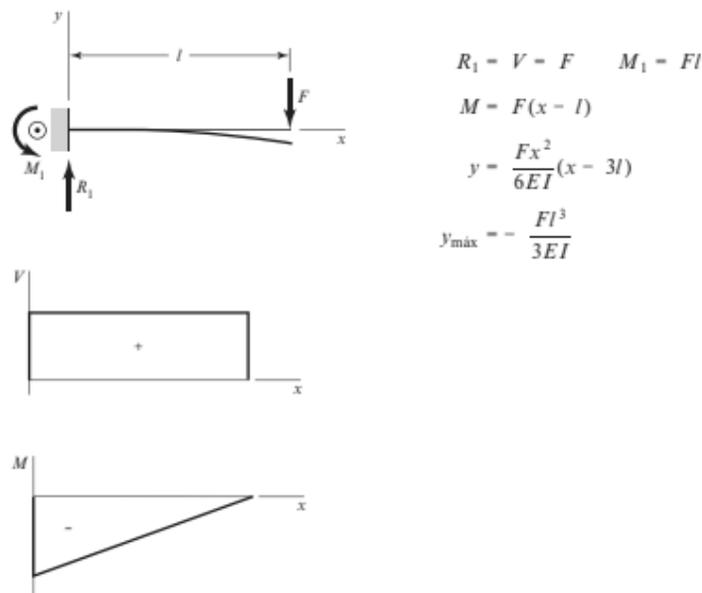
$$m_{max} = m_{AM225} + m_{tolva} = 741.18 [kg] \quad (73)$$

$$W_{min} = m_{min} \cdot g = 62.5 [kg] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 423.91 [N] \quad (74)$$

$$W_{max} = m_{max} \cdot g = 841.61 [kg] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 7268.54 [N] \quad (75)$$

Figura 50

Cortante, momento y deflexión de una viga en voladizo.



Nota. Tomado de *Cortante, momento y deflexión de vigas* (p.A11), por R. Budynas & J.K. Nisbett, 2018, McGraw-Hill.

Según el planteamiento propuesto, las ecuaciones de equilibrio (76), (77) y (78) nos da como resultado un valor equitativo en las reacciones (79), es decir, el 25% del peso actual de la tolva, por lo tanto (80) representa el valor de las reacciones cuando están distribuidas equitativamente. Sin embargo, por seguridad es necesario considerar un caso más crítico; las condiciones mínimas para que la tolva se mantenga en equilibrio, serán con dos empotramientos como mínimo, debido a que se necesita una estructura para la instalación de los sensores de carga. En ese caso, la carga estaría distribuida al 50 %, ya que solo habrían dos reacciones en sentido opuesto al peso, por lo tanto, la ecuación (81) representaría este caso, que se consideró en varios puntos del diseño. El cálculo del cortante con la carga en el extremo de la placa será la misma en toda la longitud, por lo tanto la ecuación (82) indica que el cortante será igual a la reacción de cada empotramiento. La ecuación (83) corresponde al

cortante de una ménsula de una tolva con cuatro apoyos, y la ecuación (84) corresponde al caso en el que la tolva solo tenga dos apoyos soportando la carga de su contenido.

$$\Sigma F_y = 0 \quad (76)$$

$$R_A + R_B + R_C + R_D - W = 0$$

$$\Sigma M_A = 0 \quad (77)$$

$$R_B \cdot d_{tolva} + (R_C + R_D - W) \cdot \frac{d_{tolva}}{2} = 0$$

$$\Sigma M_B = 0 \quad (78)$$

$$(W - R_C - R_D) \cdot \frac{d_{tolva}}{2} + R_A \cdot d_{tolva} = 0$$

$$R_A = R_C = R_B = R_D \quad (79)$$

$$4 \cdot R_A = W$$

$$R_{25} = R_A = \frac{W}{4} \quad (80)$$

$$R_{50} = \frac{W}{2} \quad (81)$$

$$V = R \quad (82)$$

$$V_{25} = \frac{W}{4} \quad (83)$$

$$V_{50} = \frac{W}{2} \quad (84)$$

$$V_{min_{25}} = \frac{W_{min}}{4} = 105.98 [N] \quad (85)$$

$$V_{max_{25}} = \frac{W_{max}}{4} = 1817.13 [N] \quad (86)$$

$$V_{min_{50}} = \frac{W_{min}}{2} = 211.96 [N] \quad (87)$$

$$V_{max_{50}} = \frac{W_{max}}{2} = 3634.27 [N] \quad (88)$$

Los cortantes mínimo y máximo al 25% se muestran las ecuaciones (85) y (86), y al 50% en las ecuaciones (87) y (88). El momento flector tiene un crecimiento directamente proporcional a la longitud donde se aplica la fuerza, por lo tanto, el momento flector se determina mediante la ecuación (89).

Los momentos flectores críticos afectarán en el punto de empotramiento de las placas, cuando el valor de longitud x es cero, de las ecuaciones (90), (91), (92), (93) se obtienen los momentos críticos para cada caso. De estos valores se escogerá el de valor más alto ya que el esfuerzo resultante será el que permita tomar la decisión de diseño para determinar el espesor mínimo de la placa base de la ménsula.

$$M = F(x - l_{base}) \quad (89)$$

$$M_{min_{25}} = \frac{W_{min}}{4}(x - l_{base}) = 10.6[N \cdot m] \quad (90)$$

$$M_{max_{25}} = \frac{W_{max}}{4}(x - l_{base}) = 181.71[N \cdot m] \quad (91)$$

$$M_{min_{50}} = \frac{W_{min}}{2}(x - l_{base}) = 21.2[N \cdot m] \quad (92)$$

$$M_{max_{50}} = \frac{W_{max}}{2}(x - l_{base}) = 363.43[N \cdot m] \quad (93)$$

Las gráficas de carga cortante y momento flector para cargas al 25% se muestran en la Figura 51 y para cargas al 50% se muestran en la Figura 52. Las dimensiones de las placas, el módulo de elasticidad y momento de inercia son datos necesario para el cálculo de deflexión, que se lo realiza una vez determinado el espesor de la placa.

Cálculo de esfuerzos. Según las gráficas ya mencionadas, el momento flector máximo se produce en el punto de empotramiento de la placa, por lo tanto, se calcula el esfuerzo flector máximo en tal punto mediante la ecuación (94), en la cual se reemplazaron por las ecuaciones (95) y (96) para obtener la ecuación (97) en función del espesor de la placa.

Según Norton (2011), menciona que, la teoría de falla de carga máxima, está dada por la ecuación (98), la cual dice que, en este caso, en el punto donde el momento flector es máximo, solo habrá esfuerzo axial, por lo tanto, deberá ser menor a la resistencia del material, para ello se usa el factor de seguridad n , en este caso será de 2.5, ya que se conoce el material y la geometría de la placa.

$$\sigma_b = \frac{M \cdot c}{I} \quad (94)$$

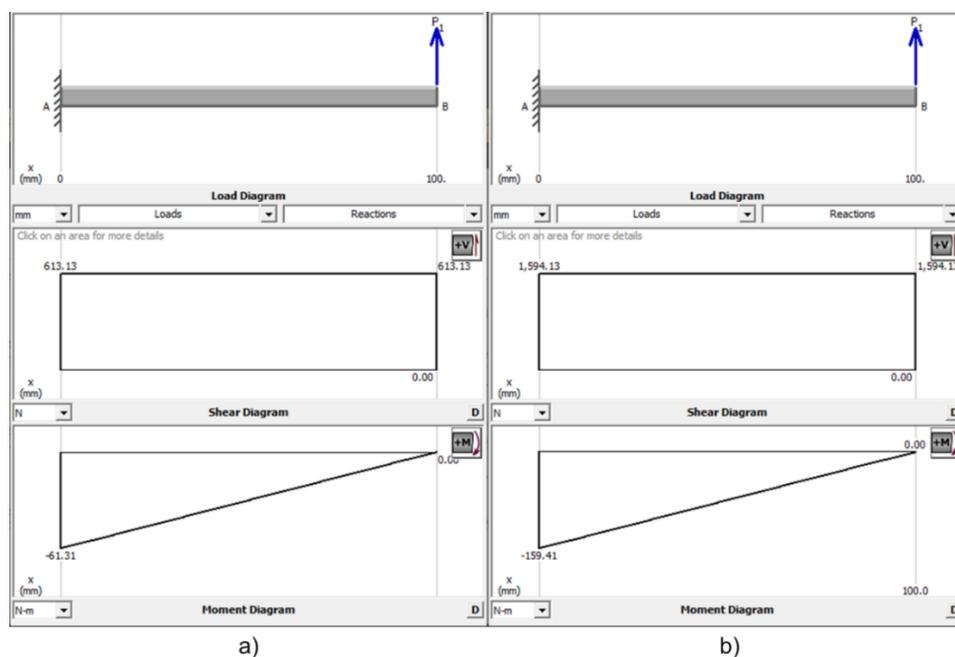
$$c = \frac{e_{base}}{2} \quad (95)$$

$$I = \frac{b_{base} \cdot (e_{base})^3}{12} \quad (96)$$

$$\sigma_b = \frac{6 \cdot M}{b_{base} \cdot (e_{base})^2} \quad (97)$$

Figura 51

Gráficas de carga cortante y momento flector de las placas al 25%.



Nota. Las gráficas muestran condiciones: a) masa mínima de tolva y b) masa máxima de la tolva.

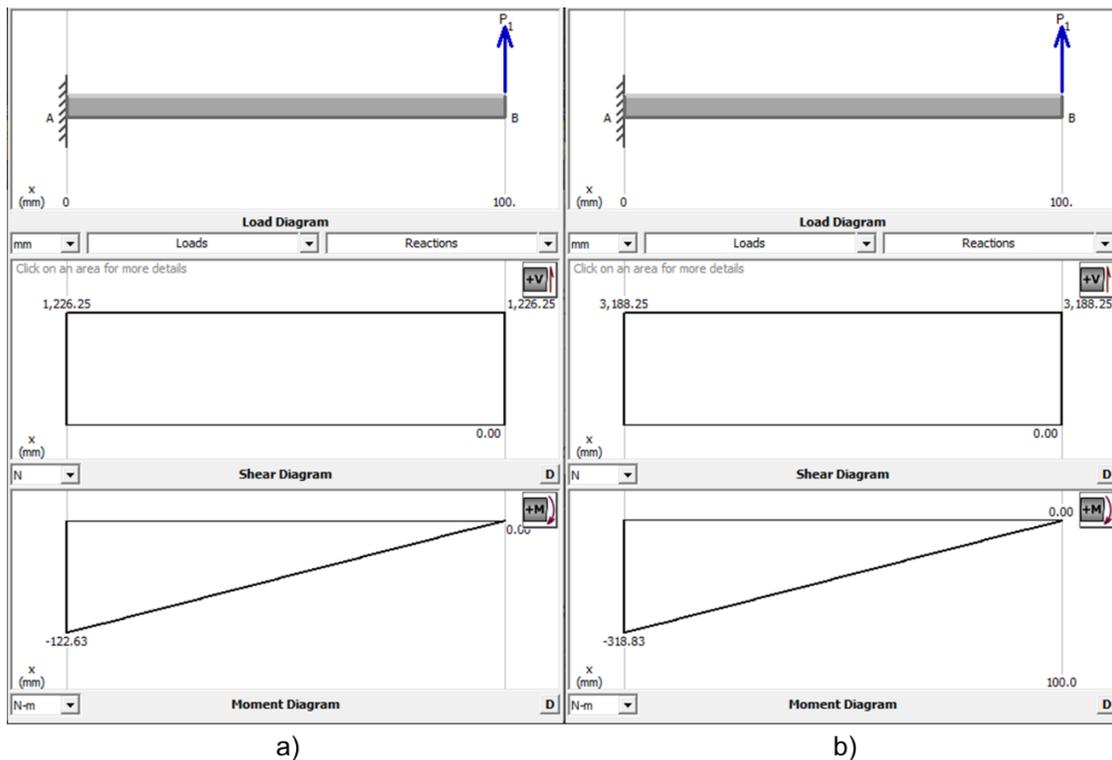
Al reemplazar la ecuación (98) en (97), se obtiene la ecuación del espesor mínimo de la placa para carga estática, El momento flector crítico, es $M_{max_{50}}$, por lo tanto, se determinó el espesor mínimo de la placa mediante la ecuación (99) considerando el factor de concentración de esfuerzo K_t de la ecuación (105) debido al agujero en el centro de la placa, la resistencia a la fluencia se obtiene de la **Tabla 14** ya que es de acero inoxidable AISI 304.

$$\sigma_b = \frac{Sy}{n} \quad (98)$$

$$t_{base} = \sqrt{\frac{6 \cdot M \cdot n}{b_{base} \cdot Sy \cdot K_t}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 363.43 [N \cdot m] \cdot 2.5}{0.150 [m] \cdot 175.82 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2}\right] \cdot 2.1}} = 9.92 [mm] \quad (99)$$

Figura 52

Gráficas de carga cortante y momento flector de las placas al 50%.



Nota. Las gráficas muestran las condiciones: a) masa mínima de tolva y b) masa máxima de la tolva.

La deflexión máxima de la placa está dada por la ecuación (101), se consideró la carga al 50% a su máxima capacidad, con el espesor mínimo calculado, el resultado es poco satisfactorio, ya que un espesor de 9.92 mm es demasiado para una tolva de 500 Litros de capacidad, por lo tanto, se decidió agregar dos cartelas a los lados de la placa.

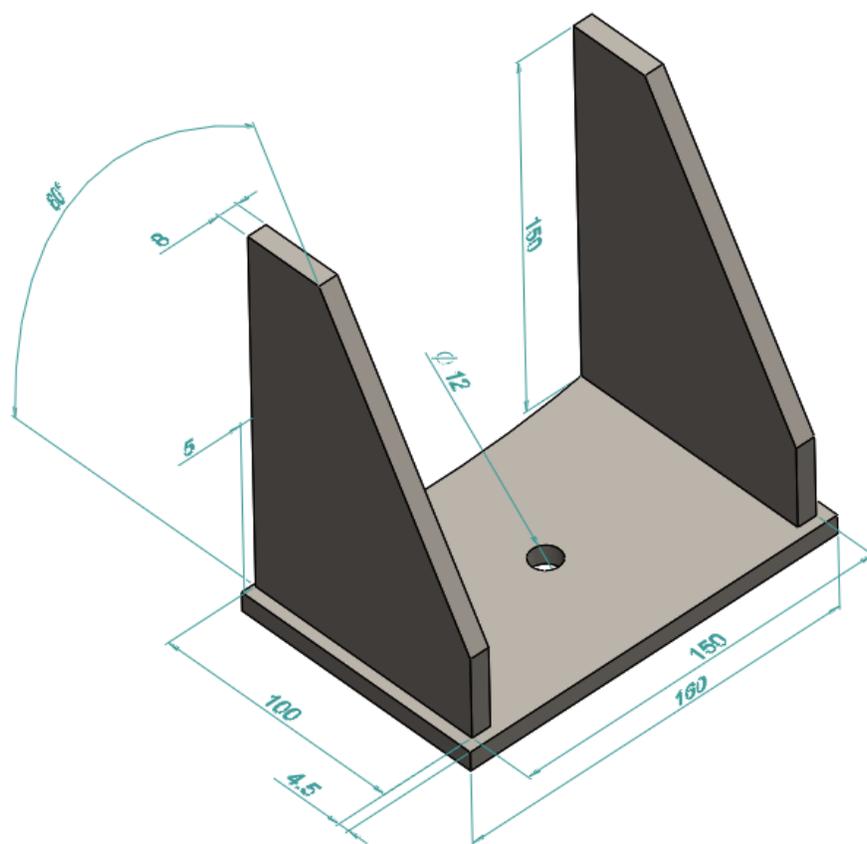
$$I = \frac{b_{base} \cdot (e_{base})^3}{12} = \frac{0.150[m] \cdot (9.92 \cdot 10^{-3})^3[m^3]}{12} = 12207.25[mm^4]$$

$$E_{acero} = 207[GPa] \quad (100)$$

$$y_{max_1} = \frac{V_{max_{50}}(l_{base})^3}{3EI} = \frac{3634.27[N](0.1[m])^3}{3 \cdot 12207.25[mm^4] \cdot 207 \cdot 10^9 \left[\frac{N}{m^2}\right]} = 0.48 [mm] \quad (101)$$

Figura 53

Vista isométrica de un apoyo de la tolva y sus dimensiones



Nota. Las gráficas muestran las condiciones: a) masa mínima de tolva y b) masa máxima de la tolva.

Análisis estático con cartelas laterales

En este caso se realizó el análisis estático de la placa base reforzada con dos cartelas laterales, para optimizar el espesor de la placa base, sin embargo, también fue necesario realizar el análisis sobre la soldadura de las placas laterales mostradas en la Figura 53, porque el cordón de soldadura soportará esfuerzos críticos debido a la carga cortante generada por el peso de la tolva y/o su contenido.

Se consideró un análisis de tipo estático como una aproximación inicial, con un factor de seguridad de 2.5 debido a que se conoce el tipo de material, sin embargo, las condiciones de trabajo de las placas no serán estáticas, sino a fatiga debido a la carga y descarga de aditivos. La placa base tendrá un agujero en el centro, ya que será por donde se ajusten las celdas de carga, por experiencia de los colaboradores de la empresa, se consideró el diámetro de este agujero de 12 mm.

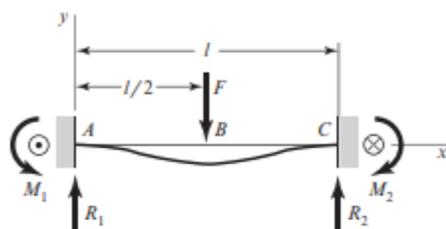
Cálculo de cargas estáticas. En los apoyos de la tolva, se generarán esfuerzos cortantes puros en las gargantas de los cordones de soldadura en posición vertical (3F) como se detalla en el plano del anexo C. La carga cortante aplicada a cada apoyo se calcula mediante las ecuaciones de equilibrio (76), (77) y (78). El sistema de referencia utilizado, muestra que solamente en la componente “y” habrá una fuerza debido a la masa de la tolva y su contenido, por lo tanto, las reacciones para el equilibrio estarían en sentido opuesto y en la misma dirección. El espesor de la placa e_{base} se determinó mediante el análisis similar al de una viga doblemente empotrada como se muestra en la Figura 54, para este caso solamente se considerará el peso máximo de la tolva.

Según Budynas & Nisbett (2018) mencionan que, las discontinuidades en los elementos mecánicos alteran la distribución del esfuerzo en las inmediaciones de la discontinuidad, este fenómeno es conocido como concentrador de esfuerzo, y en este caso sucede por existir un agujero de diámetro d_a en el centro de la placa base de la ménsula.

Figura 54

Cortante, momento y deflexión de viga con doble empotramiento y carga central

14 Apoyos fijos: carga central



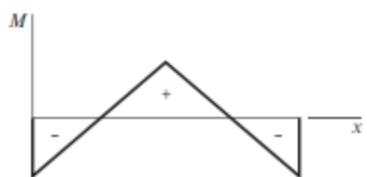
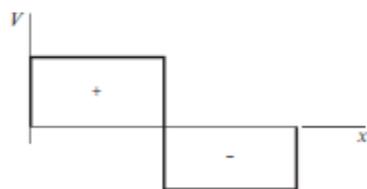
$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2} \quad M_1 = M_2 = \frac{Fl}{8}$$

$$V_{AB} = -V_{BC} = \frac{F}{2}$$

$$M_{AB} = \frac{F}{8}(4x - l) \quad M_{BC} = \frac{F}{8}(3l - 4x)$$

$$y_{AB} = \frac{Fx^2}{48EI}(4x - 3l)$$

$$y_{\max} = -\frac{Fl^3}{192EI}$$



(continúa)

Nota. Tomado de *Cortante, momento y deflexión de vigas (continuación)* (p.A17), por R.

Budynas & J.K. Nisbett, 2018, McGraw-Hill.

Se establece el factor concentrador de esfuerzo K_t según las fórmulas de la Figura 55 y la gráfica mostrada, el esfuerzo máximo está definido en la ecuación (102) que es el producto entre el esfuerzo nominal por el factor K_t .

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_o \quad (102)$$

Según las gráficas ya mencionadas, el momento flector máximo (109) se produce en el punto de medio de la placa base, por lo tanto, se calcula dicho esfuerzo mediante las ecuaciones (107) y (108), y se calcula el esfuerzo flector máximo en tal punto mediante la ecuación (97). Las ecuaciones (106) y (107) obtenidas de la Figura 55, permitieron establecer el valor del coeficiente de concentración de esfuerzos en la ecuación (105) y el esfuerzo

máximo mediante (102). Mediante el criterio de falla del cortante máximo utilizado previamente, se calculó el espesor mínimo de la placa base y quedó establecido en la ecuación (110) con un valor mínimo de 7.44 [mm], por lo tanto, se estableció el espesor a 8 [mm]. Y la deflexión máxima se calculó mediante la ecuación (111) según los datos de la Figura 54, considerando el momento de inercia I_2 que resta el diámetro del agujero d_a de 12 mm, obteniendo una deflexión máxima de 0.02 [mm] que evitará problemas en la lectura de masa.

$$\frac{d}{w} = \frac{d}{l_{base}} = \frac{12[mm]}{100[mm]} = 0.12 \quad (103)$$

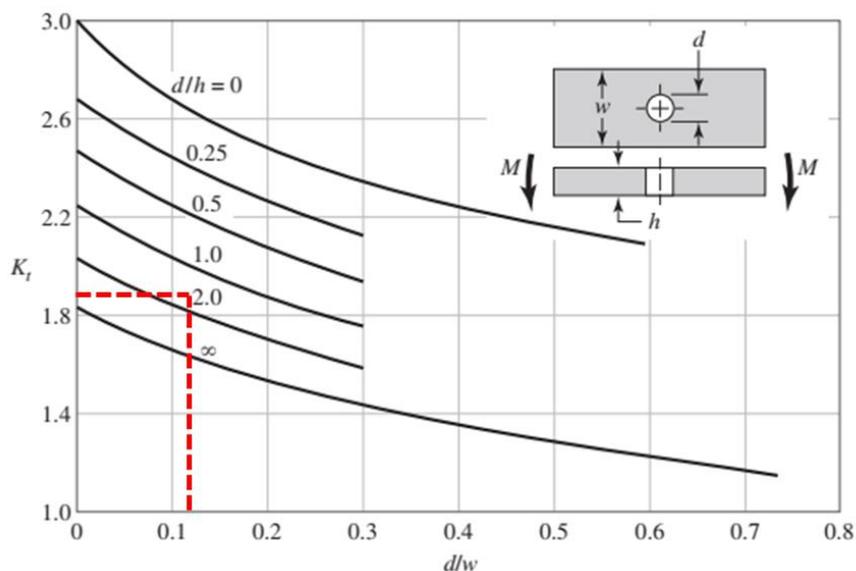
$$\frac{d}{h} = \frac{d}{e_{base}} = \frac{12[mm]}{7[mm]} = 1.71 \quad (104)$$

$$K_t = 2.1 \quad (105)$$

$$V_{max_{50}} = R_{max_{50}} = \frac{W_{max}}{2} = 3634.27 [N] \quad (106)$$

Figura 55

Coefficiente de concentración de esfuerzos en barra rectangular a flexión



Nota. Tomado de *Barra rectangular con un agujero transversal en flexión* (p.A17), por R.

Budynas & J.K. Nisbett, 2018, McGraw-Hill.

$$M_{AB} = \frac{W_{max}}{8} \cdot (4x - b_{base}) \quad (107)$$

$$M_{BC} = \frac{W_{max}}{8} \cdot (3b_{base} - 4x) \quad (108)$$

$$M_{max} = \frac{3728.77[N]}{8} \cdot \left[4 \left(\frac{0.15[m]}{2} \right) - 0.15[m] \right] = 209.74 [N \cdot m] \quad (109)$$

$$t_{base} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max} \cdot n}{b_{base} \cdot S_y \cdot k_t}} = \sqrt{\frac{6 \cdot (209.74 [N \cdot m]) \cdot 2.5}{0.150 [m] \cdot 175.82 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot 2.1}} = 7.44 [mm] \quad (110)$$

$$I_2 = \frac{(b_{base} - d_a)(e_{base})^3}{12} = \frac{(0.15 - 0.012)[m] \cdot (7.44 \cdot 10^{-3})^3 [m^3]}{12} = 4737.94 [mm^4]$$

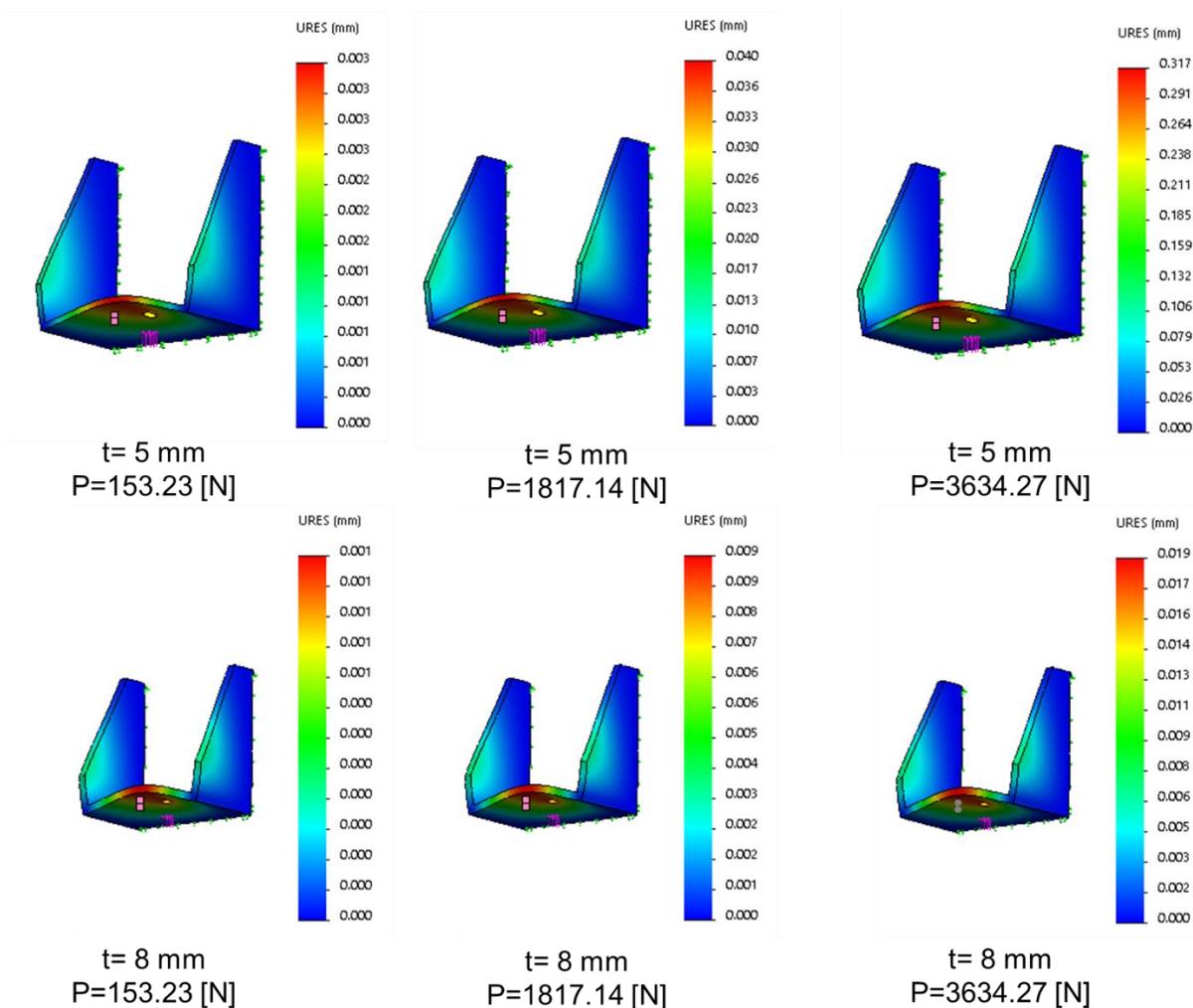
$$y_{max} = \frac{F(l_{base})^3}{192 \cdot E \cdot I_2} = \frac{3634.27[N](0.1[m])^3}{192 \cdot 4737.94 [mm^4] \cdot 207 \cdot 10^9 \left[\frac{N}{m^2} \right]} = 0.02 [mm] \quad (111)$$

Simulación de deflexión CAE. El propósito de las simulaciones mostradas en la Figura 56 fue determinar la deflexión máxima para distintos espesores de la base, ya que la carga máxima en cada ménsula, según los cálculos realizados la resistencia del material a espesores mayores de 7.44 [mm] es suficiente en el caso de dos apoyos, sin embargo, para garantizar la estabilidad de la tolva sobre la estructura de apoyo se decidió utilizar cuatro ménsulas. En el análisis se verificó que, en espesores de menor valor al mínimo calculado, la ménsula no llegaba a fallar, pero su deflexión era crítica, y este punto es de importancia en el diseño ya que, el correcto funcionamiento de las celdas de carga, dependen de este elemento.

La carga mínima fue de 520 [N], esto corresponde al momento cuando la tolva está vacía, y la carga máxima del análisis fue de 7640.5 [N] con lo cual la deflexión llegó hasta 0.16 [mm], y considerando cuatro apoyos la carga máxima considerada fue la mitad, es decir, 3820.25 [N], con lo que la deflexión máxima llegó hasta 0.08 [mm] con un espesor de 8 [mm], comparando con los cálculos teóricos, existe una diferencia de 0.06 [mm] ya que en la simulación la placa base no actúa como una viga doblemente empotrada.

Figura 56

Simulaciones de carga estática en ménsulas de distintos espesores y carga.

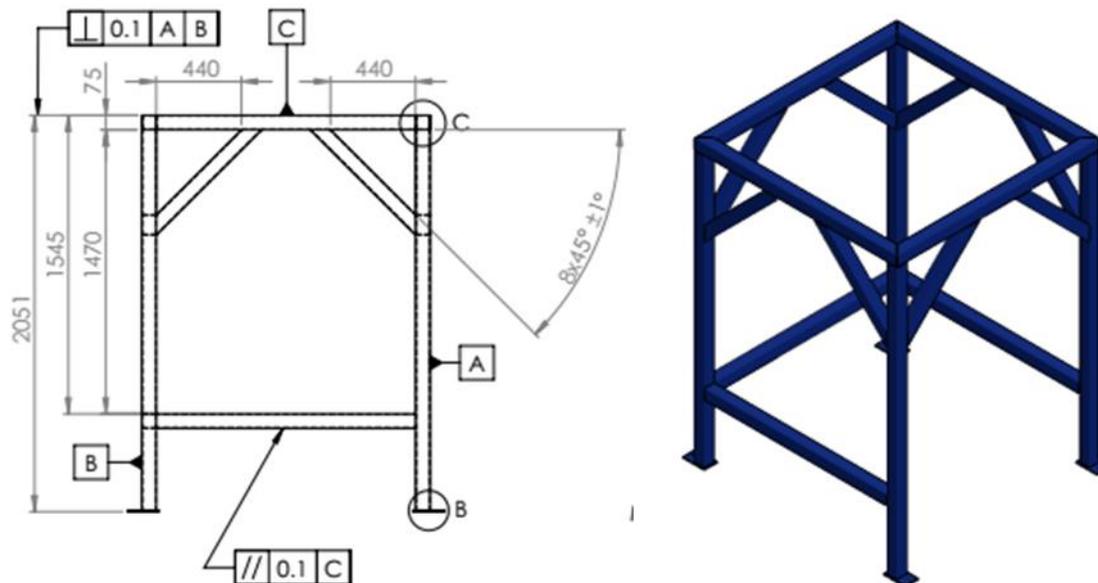


Análisis estático de la estructura para montaje de la tolva

La tolva tendrá cuatro ménsulas de apoyo, las cuales estarán empennadas sobre las celdas de carga, y éstas estarán sobre una placa soldada en la mitad de cada tubo cuadrado de la estructura a diseñar, las dimensiones de este elemento se muestran en la Figura 57. Para el análisis se consideró la Figura 54, como una viga doblemente empotrada con una carga en el centro, esto representaría uno de los cuatro lados de la estructura, que bastó para establecer las dimensiones del tubo cuadrado necesario en el diseño.

Figura 57

Dimensiones de la estructura de apoyo para la tolva.



La longitud del tubo de apoyo l_3 definida en (112) será la misma en los cuatro lados de la estructura, se utilizó la misma carga máxima de los cálculos de las ménsulas, en uno de los lados esta carga será el 25%, con lo cual se calcula el momento flector máximo en (113), según los datos del catálogo del distribuidor, el momento de inercia de un tubo cuadrado de 3 [mm] de espesor se define en (114), la distancia crítica desde el eje neutro del tubo se establece en (115), con lo que el esfuerzo flector en uno de los lados de la estructura se calcula en (116), el factor de seguridad para la geometría y el material conocidos se calcula en (117), el valor de 2.44 se aproxima al valor 2.5 de diseño. Finalmente se calculó la deflexión del tubo en (118), en primera instancia no se consideran apoyos, estos fueron utilizados en la simulación.

$$l_3 = 1500[\text{mm}] \quad (112)$$

$$M_{max_e} = \frac{7268.54[\text{N}]}{8} \cdot \left[4 \left(\frac{1.5[\text{m}]}{2} \right) - 0.15[\text{m}] \right] = 1362.85 [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (113)$$

$$I = 71.54[\text{cm}^4] \quad (114)$$

$$c_e = \frac{75[\text{mm}]}{2} = 37.5[\text{mm}] \quad (115)$$

$$\sigma_{be} = \frac{M_{max_e} \cdot c_e}{I} = 71.44[\text{MPa}] \quad (116)$$

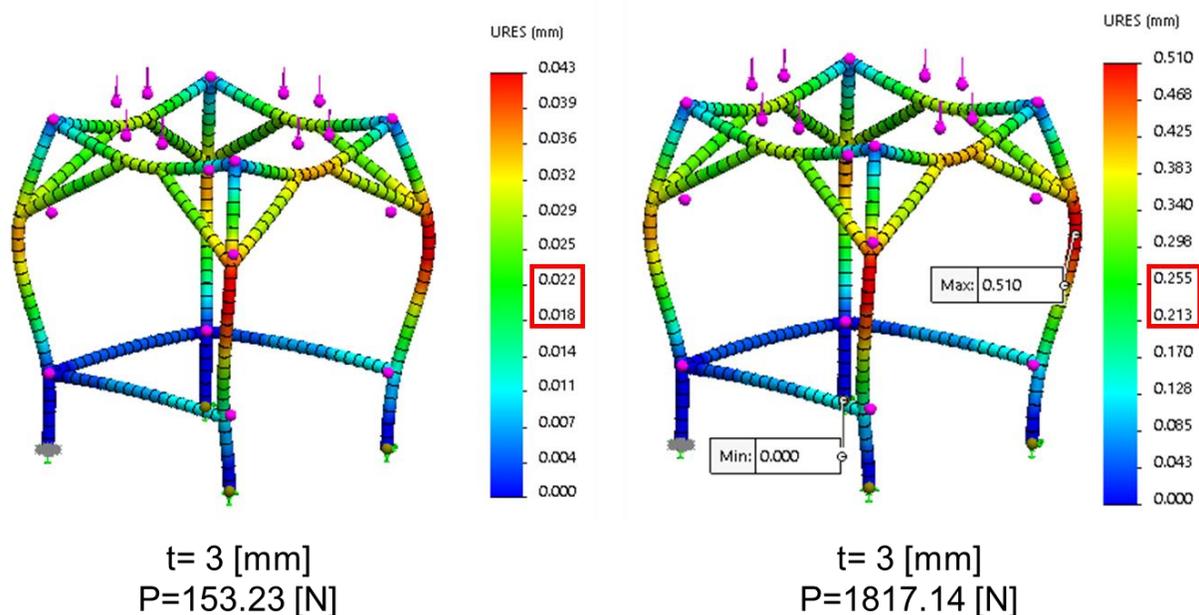
$$n_e = \frac{S_y}{\sigma_{be}} = \frac{179}{71.44} = 2.51 \quad (117)$$

$$y_{max_e} = \frac{W_{max}(l_{base})^3}{4 \cdot 192 \cdot E \cdot I} = \frac{7268.54[\text{N}](0.1[\text{m}])^3}{4 \cdot 192 \cdot 71.54 \cdot 10^{-8}[\text{m}^4] \cdot 207 \cdot 10^9 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]} = 0.22 [\text{mm}] \quad (118)$$

Simulación de deflexión CAE. En este punto se realizó la simulación CAE de la Figura 58 considerando que la deflexión obtenida de 0.22[mm] sucede por la longitud del tubo, y se consideró reforzar la estructura, en las esquinas de la misma, reduciendo la distancia de 1.5 [m] a 0.5 [m], con lo cual, en la simulación se obtuvo una deflexión mínima en los puntos de apoyo de la tolva entre 0.018 a 0.022 [mm] cuando la tolva está vacía y la carga es 153.23 [N], y una deflexión máxima entre 0.213 a 0.255 [mm] para 1817.14 [N] en cada apoyo, en los cálculos la deflexión a 1817.14 [N] fue de 0.22 [mm].

Figura 58

Resultados de simulación CAE de la estructura de apoyo de la tolva



Dimensionamiento de celdas de carga

Una vez establecidos los límites de carga a los que van a estar expuestos los elementos mecánicos diseñados que son: la tolva de dosificación y su estructura de apoyo, se procedió con el dimensionamiento de las celdas de carga, los cuales dependen de la carga máxima a las que van a estar expuestos, es decir a 698 [kg].

Figura 59

Equipos y accesorios para mediación de masa.



Nota: Adaptado de *Single ended shear beam*, por Transcell, 2022.

Según el proveedor sugerido por la empresa, se tenía a disposición los equipos que se muestran en la Figura 59, de los cuales las características técnicas de la celda de carga se muestran en la Tabla 15, Para la carga de diseño la resolución fue de 0.2 [kg], lo cual, fue aceptado por la empresa, ya que el objetivo interno es de dosificar lotes grandes, es decir, cantidades desde 10 hasta 250 [kg]. Las celdas de carga estarán emperradas sobre placas de acero inoxidable que fueron soldadas en cada punto de apoyo de la estructura, el servicio incluyó la entrega e instalación de un indicador del peso digital con comunicación RS232, que sirvió para enviar la información hacia el autómatas seleccionado en los siguientes apartados.

Tabla 15

Especificaciones técnicas de las celdas de carga.

Especificaciones	Valor o característica	Esquema
Capacidad	250 a 2500 [kg]	
Salida nominal	2.0 mV/V a 3.0 mV/V $\pm 0.1\%$	
No linealidad	$\pm 0.03\%$ de la salida nominal	
Histéresis	$\pm 0.03\%$ de la salida nominal	
Repetibilidad	$\pm 0.03\%$ de la salida nominal	
Efecto de la temperatura en la salida	$\leq 0.002\%$ de la salida aplicada / $^{\circ}\text{C}$	
Impedancia de entrada	387 ohm ± 20 ohm	
Impedancia de salida	350 ohm ± 5 ohm	

Nota: Adaptado de *Single ended shear beam*, por Transcell, 2022.

Dimensionamiento de bombas

Según White (2016) manifestó que las bombas rotodinámicas no son adecuadas para fluidos de viscosidad más alta que la del agua, porque afecta críticamente al rendimiento de la bomba y a la vida útil de la misma. Lo que nos deja como alternativa al amplio grupo de las bombas de desplazamiento positivo, de las cuales se pudieron analizar y escoger según criterios de los asesores técnicos comerciales de la empresa proveedora, el personal de la empresa donde se realizó este proyecto y propios. Se tenían tres alternativas de bombas: Bombas de doble diafragma, bombas de engranes y bombas peristálticas.

Las bombas de engranes son bastante apropiadas para fluidos con una viscosidad muy alta, estas tienen la ventaja de que el fluido se transporte con un caudal y velocidad alta, y normalmente se utiliza con tuberías y accesorios de aluminio. Estas bombas funcionan mediante un motor trifásico que según el fabricante se podría configurar en conexión delta o estrella.

Las bombas peristálticas tienen un flujo volumétrico perfecto que va desde 0.5 [L/h] hasta los 150 [m³/h] lo cual las hacen perfectas para un sistema de dosificación, y su funcionamiento es mediante un motor trifásico. Las dos bombas mencionadas hasta el momento funcionan mediante motores eléctricos, y debido a la complejidad de sus estructuras los hacen unas bombas muy robustas y por lo tanto costosas, cada bomba supera los 4000 [\$], con este precio base, para cuatro bombas sería un total de 16000 [\$], lo cual afecta mucho al requerimiento de abaratar costos. También, se requeriría de variadores de frecuencia, equipos de protección del circuito de potencia de los motores eléctricos, y mayor espacio en el gabinete de circuitos de control, que a fin de cuentas también elevarían los costos de construcción del sistema.

$$m = \rho \cdot V \quad (119)$$

Tabla 16

Características técnicas de bombas de doble diafragma Yamada.

Bomba	Caudal máximo [gpm]	Presión de trabajo [psi]	Volumen por ciclo [gal]	Volumen por ciclo [cm ³]	Ciclos máximos por minuto	Elevación máxima de succión en seco [ft]	[kg/ciclo]
¼	3.4	20-100	0.0078	29	400	5	0.04
½	7.4	20-100	0.025	93	300	10	0.12
¾	31.7	20-100	0.143	539	195	18	0.67
1	46.2	20-100	0.21	210	210	18	0.26
1 ½	107	20-100	0.37	1.4[L]	270	18	1.74
2	164	20-100	0.69	2.61[L]	220	19	3.24

Nota. Adaptado de la hoja de especificaciones. *Product specification guide*, por Yamada

America Inc, 2018.

La última alternativa fueron las bombas de doble diafragma de las cuales existen varios modelos, de distinta capacidad, material y fabricación. A diferencia de las otras dos bombas rotatorias, esta es de tipo reciprocante, funciona mediante el flujo de aire comprimido, son capaces de transportar fluidos viscosos, y el autocebado permite que la bomba no presente problemas de funcionamiento con aire. Económicamente, según el modelo, marca y tamaño, será menor a los 4000 [\$]. Según Yamada (2018) menciona que, algunos productos disponibles se distinguen por el caudal máximo de la bomba con agua, el tipo de rosca de entrada y salida, presión de trabajo, volumen por ciclo, materiales, etc. En la Tabla 16 se muestran las opciones y las características técnicas, que se consideraron en el dimensionamiento de las bombas.

$$\rho_{min} = \rho_{AM223} = 0.86 \left[\frac{kg}{L} \right] \quad (120)$$

$$\rho_{max} = \rho_{AM225} = 1.24 \left[\frac{kg}{L} \right] \quad (121)$$

Tabla 17

Resultados de selección de bomba de doble diafragma.

Bomba	Caudal máximo [gpm]	Volumen por ciclo [gal]	Volumen por ciclo [cm ³]	Masa mínima [kg/ciclo]	Masa máxima [kg/ciclo]
¼	3.4	0.0078	29	0.02	0.04
½	7.4	0.025	93	0.08	0.12
¾	31.7	0.143	539	0.46	0.67
1	46.2	0.21	210	0.18	0.26
1 ½	107	0.37	1400	1.2	1.74
2	164	0.69	2610	2.24	3.24

Nota. Adaptado de la hoja de especificaciones. *Product specification guide*, por (Yamada America Inc, 2018).

Para seleccionar la bomba más adecuada para esta aplicación se calculó la masa por ciclo mediante el producto del volumen por ciclo de cada bomba y la densidad del aditivo como se define en la ecuación (119), y considerando que la resolución de las celdas de carga es de

0.2 [kg]. Se consideró la densidad máxima ρ_{max} correspondiente al aditivo AM225, y la densidad mínima ρ_{min} del aditivo AM223. Los resultados se muestran en la Tabla 17, de la cual se escogió la bomba de rosca de 1 pulgada debido a que la masa por cada ciclo está en un rango de 0.18 hasta 0.26 [kg/ciclo] según el aditivo. Las especificaciones técnicas de la bomba seleccionada se muestran en la Tabla 18, cabe mencionar que, la selección de este tipo de bomba es válida además porque a pesar de necesitar cuatro bombas para cada aditivo, se podrá controlar el flujo de aire con la misma válvula de control a todas las bombas, esto permite que no se requieran de más componentes de diseño e implementación que eleven el costo del proyecto.

Tabla 18

Características técnicas de las bombas de doble diafragma seleccionadas.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Modelo	NDP-25BAN	
Marca	Yamada	
Tipo de válvula	Bola	
Material del cuerpo	Aluminio (ADC-12)	
Material de diafragma	Caucho de nitrilo (NBR)	
Diámetro de rosca	1" NPT Hembra	
Presión de funcionamiento	20 a 100 [psi]	
Caudal máximo (agua)	46.2 [gpm]	
Temperatura de funcionamiento	0 a 70 [°C]	
Peso neto	13 [kg] (27 [lbs])	
Entrada de aire (válvula de bola)	3/8" NPT	
Escape de aire (silenciador)	3/4 " NPT	
Vida útil	10 años	

Nota: Tomado de la hoja de especificaciones. *NDP-25 Specifications*, por Yamada America Inc, 2018.

Dimensionamiento de tuberías

Una vez dimensionadas las bombas de doble diafragma se tomó la decisión de realizar el circuito de tuberías para el flujo de líquidos y aire comprimido, en base a las normas mencionadas en el marco teórico se calculó el esfuerzo tangencial máximo admisible de las tuberías del fabricante seleccionado, con la presión máxima de operación de la bomba definida en la ecuación (122), y las dimensiones de las tuberías se muestran en la Tabla 19.

Tuberías para líquidos. Para el flujo de líquidos se utilizaron tuberías de PVC y accesorios de polipropileno de 1 pulgada, ya que el dimensionamiento de las bombas estuvo en función de esa dimensión, el diámetro y espesor están definidos en las ecuaciones (123) y (124). El esfuerzo tangencial según la presión (122), se calculó mediante la ecuación (2), quedando establecida en (125), y según la presión máxima de trabajo (126), se calculó el esfuerzo admisible (127), el factor de seguridad para este caso será de 3.21.

Tabla 19

Especificaciones técnicas de tuberías roscadas PVC.

Diámetro [in]	Diámetro exterior [mm]	Espesor [mm]	Diámetro interior [mm]	Presión trabajo [psi]	Presión trabajo [MPa]	Longitud de rosca ext. [mm]	[hilos/in]
½	21.34	3.73	13.88	420	2.90	13.56	14
¾	26.67	3.91	18.85	340	2.34	13.86	14
1	33.40	4.55	24.30	320	2.21	17.34	11.5
1 ¼	42.16	4.85	32.46	260	1.79	17.95	11.5
1 ½	48.26	5.08	38.10	240	1.65	18.38	11.5
2	60.32	5.54	49.24	200	1.38	19.22	11.5

Nota. La rosca es de tipo NPT. Adaptado de *Especificaciones técnicas y de roscas* (p.2), por Mexichem Ecuador S.A., 2018, Plastigama.

$$P = 100[psi] = 0.69[MPa] \quad (122)$$

$$D_1 = 33.4[mm] \quad (123)$$

$$e_1 = 4.55[mm] \quad (124)$$

$$\sigma_{p1} = \frac{P}{2} \left(\frac{D_1}{e_1} - 1 \right) = \frac{0.69}{2} \left(\frac{33.4}{4.55} - 1 \right) = 2.19[MPa] \quad (125)$$

$$P_{max} = 2.21[MPa] \quad (126)$$

$$\sigma_{p1_{max}} = \frac{2.21}{2} \left(\frac{33.4}{4.55} - 1 \right) = 7.01[MPa] \quad (127)$$

$$n_{p1} = \frac{\sigma_{p1_{max}}}{\sigma_{p1}} = 3.21 \quad (128)$$

Tuberías para aire comprimido. Para el flujo de aire presurizado se utilizaron tuberías de PVC y accesorios de polipropileno de 1/2 pulgada, ya que las normas establecen que el uso de PVC para gases es limitado, el diámetro y espesor están definidos en las ecuaciones (129) y (130) y con esta tubería se logró obtener un factor de seguridad de 4.21, mediante el mismo procedimiento, el esfuerzo tangencial, presión máxima, esfuerzo permisible y factor de seguridad de las tuberías para aire comprimido se establecen en las ecuaciones (131), (132), (133) y (134) respectivamente. Según el diseño CAD del circuito de tuberías para los líquidos y aire comprimido mostrado en la Figura 60, se requieren de cierta cantidad de accesorios, que se detallan en la Tabla 20, el diagrama de instrumentación y tuberías se muestra en el anexo B.

$$D_2 = 21.34[mm] \quad (129)$$

$$e_2 = 3.73[mm] \quad (130)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{P}{2} \left(\frac{D_2}{e_2} - 1 \right) = \frac{0.69}{2} \left(\frac{21.34}{3.73} - 1 \right) = 1.63[MPa] \quad (131)$$

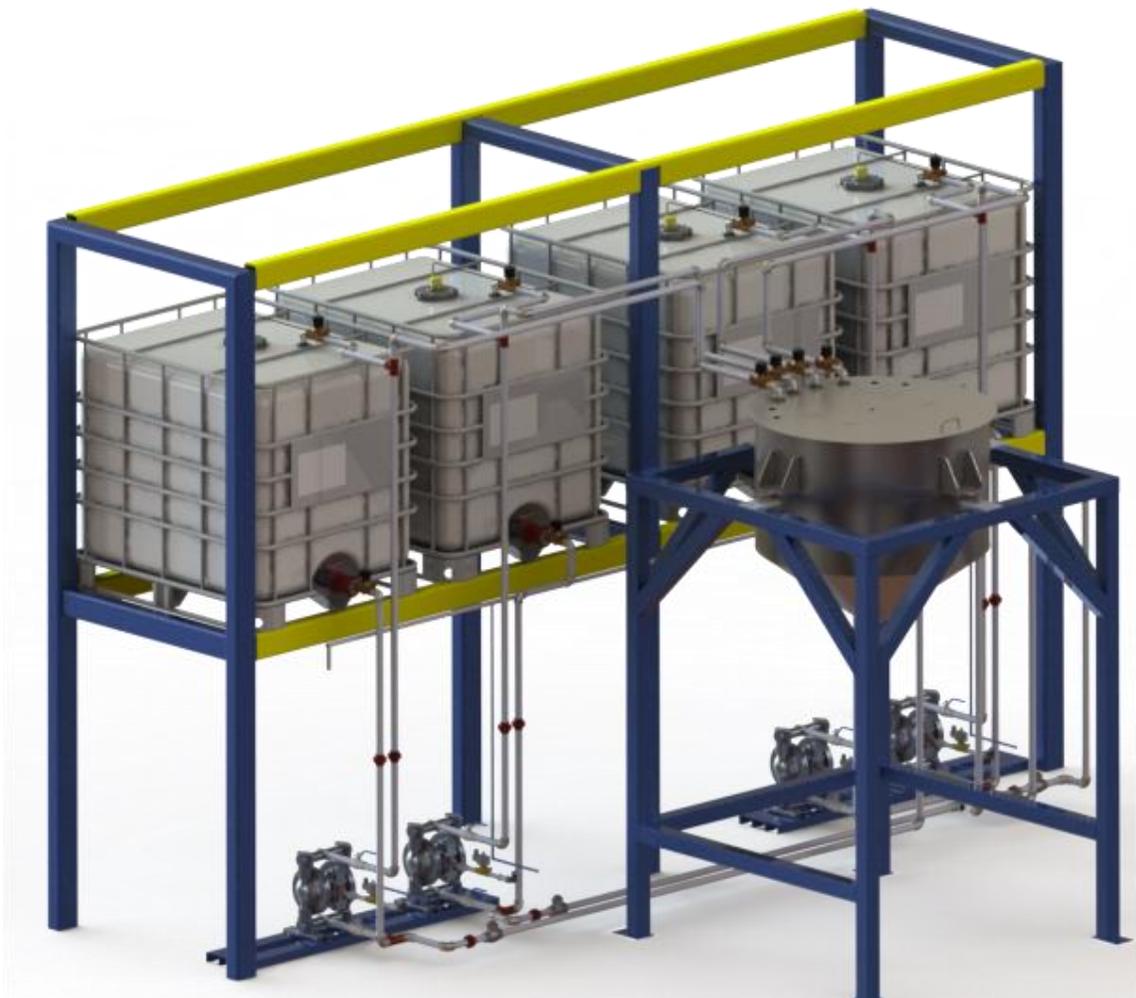
$$P_{max_2} = 2.90[MPa] \quad (132)$$

$$\sigma_{p2_{max}} = \frac{2.90}{2} \left(\frac{21.34}{3.73} - 1 \right) = 6.85 [MPa] \quad (133)$$

$$n_{p2} = \frac{\sigma_{p2_{max}}}{\sigma_{p2}} = 4.21 \quad (134)$$

Figura 60

Vista isométrica del circuito de tuberías.



Nota. El esquema mostrado requirió de estructuras adicionales para mantener estáticas las tuberías.

Tabla 20

Accesorios requeridos en el circuito de tuberías diseñado.

Descripción	Cantidad
Codos 90° de 1" PVC	66
Codo 90° de 1/2" PVC	13
Tees de 1" PVC	8
Tee de 1/2" PVC roscable	6
Tubos de 1" PVC x 6m	9
Tubos de 1/2" PVC x 6m	6
Uniones de 1/2" roscables	5
Universales 1" roscables	12
Universales 1/2" roscables	6
Neplos 1" x 5 PVC	32
Neplos 1" x 7 PVC	14
Neplos 1/2" x 5 PVC	17
Tapones 1/2" macho	4
Bushing 2" a 1"	4
Bushing 1" a 1/2"	1
Bushing 1/2" a 3/8"	6
Adaptadores para tanques de 1"	8
Adaptadores para tanques de 1/2"	1
Codos 45° de 2 " PVC	1
Reducción 1 " a 1/2"	0
Grapas metálicas para tubo de 1"	30
Grapas metálicas para tubo de 1/2"	20
Tornillos negros pulgada y media negros	25
Taco Fisher F6	15
Teflones blancos	50
Acople rápido CAM LOCK A 1"	4
Válvula de bola 1" metálica	13

Dimensionamiento de la boquilla de aspersión

La selección de este elemento se basó únicamente en las dimensiones internas del tanque a ser lavado, en este caso fue la tolva para la dosificación, que posee un diámetro interno de 1000 [mm], se requirió que el aspersor limpie el tanque con dos abanicos de agua a presión con una cobertura de 180°. La rosca de la boquilla dependió de la instalación de agua potable disponible en el espacio de trabajo del sistema dosificador, en donde se pudo observar que se tenía a disposición tuberías y accesorios de ½ pulgada de PVC. La gran ventaja de este limpiador de tanque es la capacidad de poder girar únicamente con el flujo de agua, y a su vez por su diseño sencillo, su mantenimiento resulta ser de fácil solución. En la Tabla 21 se muestra las características técnicas del limpiador de tanque seleccionado.

Tabla 21

Características técnicas de la boquilla de limpieza de tanque seleccionada.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Marca	Cyco	
Serie	19250-STCN5-316-SS	
Caudal	14 a 55 [l/min]	
Caudal de operación	19.7 [l/min] a 3 [bar]	
Presión máxima	13 [bar]	
Material	Acero inoxidable (316LSS)	
Diámetro de rosca	1/2" NPT Hembra	
Material componentes internos	Polipropileno	
Diámetro máximo de alcance	1 [m]	
Cobertura de pulverización	180° a 360°	
Temperatura de funcionamiento	0 a 180 [°C]	
Peso neto	0.23 [kg]	
Tamaño de la boquilla	89 x 25.4 [mm]	
Punta de rociado	3 con abanico plano de orificio 25 mm	

Nota. Tomado de *Tank cleaner nozzle 19250*, por CYCO, 2021.

Diseño eléctrico

En este apartado se menciona la lógica implementada para el funcionamiento del sistema mecatrónico, partiendo del dimensionamiento de los componentes necesarios tanto para el control de elementos eléctricos. Luego, se realizó el diseño de los circuitos eléctricos correspondientes basados en la norma EN 60617 para que su comprensión sea fácil y se pueda realizar verificaciones o trabajos de mantenimiento adecuadamente.

Requerimientos del sistema eléctrico

El objetivo principal de este proyecto menciona que se debe dosificar con precisión los aditivos según las fórmulas planteadas, esto indica que el valor de cada aditivo puede variar, y se debe controlar los valores máximos de entrada a la tolva de mezcla, mediante la lectura de la masa de su contenido, se trabajará con cuatro aditivos, para lo cual se listan las tareas en la Tabla 22 y se detallan a continuación:

Dosificación. A partir de cada tanque IBC de almacenamiento de materia prima, el aditivo correspondiente deberá ser transportado a la tolva de mezcla hasta el valor de masa deseada, de manera secuencial.

Alimentación. Cuando el nivel de contenido en el tanque IBC de almacenamiento de materia prima sea bajo, el operador deberá reabastecer el tanque IBC desde barriles o canecas que estarán conectados a una manguera para transportar el aditivo hacia el tanque IBC correspondiente.

Recirculación. A partir del tanque IBC de almacenamiento de materia prima de un solo aditivo, se transporta el contenido dentro del mismo con el fin de que el fluido no permanezca estático y tampoco haya separación de partículas de mayor y menor densidad entre sí.

Limpieza. Cuando la tolva haya sido vaciada, debido a la viscosidad y consistencia de los aditivos, será necesaria una operación de limpieza que permitirá mezclar los residuos en solución acuosa para que fluya fácilmente por la válvula de salida de la tolva.

Tabla 22

Requerimientos para la ejecución y funcionamiento del sistema.

Tarea	Elementos eléctricos necesarios
Automatización de circuitos eléctricos	1 controlador lógico programable (PLC). 1 pantalla HMI para tablero de control.
Medición del peso	4 celdas de carga. 1 módulo de comunicación RS232. 1 indicador de medición digital.
Medición de nivel	4 sensores de nivel analógicos
Activación de bombas	4 electroválvulas para paso de aire comprimido a bombas neumáticas.
Dosificación	4 electroválvulas de entrada a tolva. 4 electroválvulas de salida de materia prima desde los tanques IBC correspondientes.
Alimentación	4 válvulas antirretorno de entrada del fluido desde barril o caneca (Componente no eléctrico). 4 electroválvulas de salida hacia los tanques IBC correspondientes.
Recirculación	4 electroválvula de entrada hacia los tanques IBC correspondientes 4 electroválvulas de salida desde los tanques IBC correspondientes.
Limpieza	1 electroválvula de salida de agua a tolva

Dimensionamiento del autómata programable

Según la norma IEC-61131 se han establecido las condiciones de trabajo y requisitos del entorno físico en las que funcionará el PLC, esto ha sido determinante para la selección del mismo ya que, al tratarse de un proyecto de aplicación industrial, existen algunos factores a considerar.

Requisitos eléctricos. En la Tabla 23 se especifican los requisitos eléctricos para el controlador lógico programable a considerar previo a la selección del PLC según la disponibilidad del mercado y su fiabilidad.

Tabla 23

Entradas, salidas analógicas y digitales requeridas en la aplicación.

Tipo de puertos	Cantidad de Elementos	Puertos
Entradas digitales	1 pulsador de emergencia	1
Entradas analógicas	4 sensores de nivel	4
Salidas digitales VDC	NA	
	12 electroválvulas para transporte de fluidos líquidos.	
	4 electroválvulas para paso de aire comprimido.	
Salidas digitales tipo relé	1 electroválvula para el paso de agua potable. 5 indicadores luminosos (Encendido, paro, dosificación, alimentación y recirculación)	22
Salidas analógicas	1 posicionador de válvula proporcional	1
Comunicación RS232	4 celdas de carga configuradas en un solo circuito	1
Comunicación Ethernet	1 pantalla HMI del tablero de control 1 puerto de conexión a PC y software de programación 1 puerto de conexión a PC de sistema SCADA	3

Nota. Los valores considerados están relacionados con los componentes de diseño.

Alimentación del PLC. Para determinar este parámetro, simplemente se tuvo que considerar la fuente de alimentación eléctrica disponible en la empresa Zatotek S.A., en la cual se pudo determinar que, debido a la maquinaria instalada en la planta de producción, poseen acometidas de 220VAC trifásicas, provisto por la Empresa Eléctrica Quito. Por lo cual se tuvo dos opciones de alimentación: 120 VAC o 220 VAC, sin embargo, también fue importante considerar los elementos de protección.

Puertos de entrada y salida de datos. Según lo que se determinó en la Tabla 22, se pudo resumir en la Tabla 23 la cantidad mínima de puertos necesarios en el autómata. Sin embargo, las características de cada PLC son limitadas, por lo cual fue necesario implementar módulos de entradas y salidas adicionales.

Interfaces de comunicación. El usuario u operador tendrá dos opciones de manejo del sistema: Mediante una pantalla HMI en el tablero de control ubicado en la zona de producción y la segunda opción mediante un sistema SCADA desde una PC instalada en la oficina de materia prima. Se propuso dos opciones debido a que la producción de pinturas está dividida en algunas etapas como se mencionó en capítulos anteriores, por lo tanto, se requiere implementar un sistema SCADA que permita adaptar este proyecto a otros subprocesos, según las necesidades de la empresa.

Selección de PLC según requerimientos eléctricos. Las características y requerimientos eléctricos ya definidos permitieron elegir en primera instancia un tipo de PLC según las marcas disponibles en el mercado, sin embargo, es importante considerar las licencias necesarias para el uso del software. En Zatotek S.A. los más recientes proyectos implementados para la automatización de sus procesos han sido mediante autómatas de la marca Siemens, por lo tanto, para este proyecto se eligió el PLC Siemens S7-1200 CPU-1500C, diseñado y utilizado en entornos industriales. Posee puertos de salida analógicas, permite hasta 8 módulos de expansión de Entrada/Salida, de los cuales se usaron: 1 para entradas analógicas y 2 para salidas tipo relé. También se implementará un módulo de comunicación RS232, y para la comunicación ethernet se utilizó un switch de 5 puertos LAN, para optimizar costos, en la Tabla 24 se muestran los parámetros de selección del PLC.

Tabla 24*Selección de PLC Siemens S7-1200*

Especificación	Cantidad de Elementos
PLC	S7-1200
CPU	1215C
Entradas digitales	14
Salidas digitales	10
Entradas analógicas	2
Salidas analógicas	2
Ampliación con módulo de señales (SM)	8
	125 KB de Trabajo
Memoria de usuario	4MB de carga
	10 KB remanente
Puertos Ethernet	2

Nota. Tomado de *Comparación de los modelos de CPU* (p.29), por Siemens, 2018.

Requisitos mecánicos. Una vez elegido el PLC, se verificó el grado de protección que ofrece el producto según el fabricante, considerando las condiciones de trabajo del proyecto que se detalla en la Tabla 25.

Protección contra el polvo. El tablero de control estará en un ambiente en el que se deba tener precaución principalmente con el polvo, ya que los tanques dispersores están alrededor de 5 metros de distancia del espacio de instalación de este sistema y el tablero de control. Según el fabricante Siemens, menciona que, la protección mecánica del PLC S7-1200 es la IP20, EN 60529, los detalles se muestran en la Tabla 26.

Tabla 25*Condiciones de trabajo del PLC en la aplicación*

Parámetro	Valor o característica
Temperatura	0 a 35 ° C
Presión	0.7 a 0.9 bar
Ambiente	Polvo
Vibraciones	NA
Magnetismo	NA
Choque mecánico	NA

Brindan protección a los dedos contra el contacto con alta tensión. Sin embargo, será necesario implementar una protección externa contra polvo, impurezas, agua y objetos extraños menores a 12,5mm de diámetro. Para este caso, el gabinete que se implementará permanecerá cerrado todo el tiempo, solo se abrirá para realizar trabajos de mantenimiento.

Tabla 26*Condiciones ambientales de funcionamiento del PLC.*

Parámetro	Valor o característica
Rango de temperatura ambiente	0 a 35 ° C
Condiciones de servicio DIN IEC 60721	Clase 3M3, Clase 3K3
Presión atmosférica	1139 a 795 hPa
Concentración de contaminantes	ISA-S71, 04 nivel de severidad G1, G2, G3
Vibración sinusoidal	Montaje en perfil DIN: 3.5 mm de 5 a 9Hz 10 barridos por eje, 1 octava por minuto
Choque mecánico	15 g, 11 ms impulso, 6 choques en c/u de 3 ejes
Cambio de temperatura	De 0 °C a 60 °C

Nota. Tomado de *Condiciones ambientales climáticas* (p.1398), por Siemens, 2018.

Condiciones climáticas. Según Siemens (2018) establece que, el PLC elegido puede operar con normalidad en el rango de temperatura de -20 °C hasta 60 °C. Además, el rango de presión atmosférica es de 1.139 a 0.795 bares (113900 a 79500 hPa), lo cual cumple con el requerimiento establecido, no se menciona choque mecánico, vibraciones ni magnetismo, sin embargo, en la Tabla 27 se detallan estas características. El dispositivo S7-1200 posee grado de contaminación 2, categoría de sobretensión II y clase de protección II según la norma EN 61131-2.

Tabla 27

Características técnicas de las salidas digitales del CPU 1215C del PLC.

Parámetro	Valor o característica
CPU de PLC	CPU 1215C AC/DC/ relé
Número de salidas	10
Tipo	Relé mecánico
Intensidad máxima	2.0 [A]
Carga de lámparas	30 [W] DC / 200 [W] AC
Resistencia en estado ON	Máx. 0.2 [Ω]
Sobre corriente momentánea	7 [A] si están cerrados los contactos

Nota. Tomado de *Salidas digitales* (p.1454), por Siemens, 2018.

Selección de módulos. El PLC S7-1200 CPU-1215C posee 10 salidas digitales, lo que significa que se requerirían de 12 salidas adicionales, por lo tanto, se requirió de un módulo de salida adicional de 16 relés. También fue necesario un módulo de entrada analógica debido a que se requiere lectura de señales de corriente, en la Tabla 28 se especifican los módulos y CPU necesarios para cumplir con los requerimientos de la Tabla 23. Además, para la selección de la pantalla HMI bastó con interpretar la cantidad de operaciones que deberán ser visibles para el usuario, estas fueron: botones de dosificación, alimentación, recirculación.

Tabla 28

Lista del CPU y módulos del PLC seleccionados.

Componente	Esquema
Siemens S7 1200 CPU1215C AC/DC/Relé	14 DI a 24 VDC, 10 DO tipo relé, 2 AI (0-10VDC), 2 AO (0/4-20mA), memoria 125KB. 2 puertos de comunicación Profinet / Industrial Ethernet RJ45 10/100Mbps. Capacidad de ampliación hasta 8 módulos de señal (SM) y 3 módulos de comunicación (CM).
Módulo de señal SM1231	Módulo de señal de 8 entradas analógicas configurables como V/mA
Módulo de señal SM1222	Módulo de salidas digitales SM 1222, 16 DO, relé 2A
Módulo de comunicación CM1241	Módulo de comunicación RS232. Incorpora protocolo Modbus RTU.
Pantalla HMI	SIMATIC HMI, KTP400 Basic, Basic Panel, Manejo con teclado/táctil, pantalla TFT de 4", 65536 colores, Interfaz PROFINET, configurable a partir de WinCC Basic V13/ STEP 7 Basic V13

Nota. Selección de todos los componentes del PLC, en base a los requerimientos a corto y largo plazo.

Dimensionamiento de sensores de nivel

El proceso de alimentación de tanques IBC requirió de control y monitorización de los niveles de cada tanque, estableciendo un punto máximo de llenado del tanque y un medidor visual que indique el estado del tanque, así como la cantidad disponible del aditivo. Para ello fue necesario implementar sensores de medición continua en tiempo real de los fluidos, ya que esto permitió que el operador visualice de manera más explícita el estado del contenido de los

tanques almacenadores de aditivos, en la Tabla 29 se detallan los requerimientos para la selección del sensor de nivel, que en este caso la opción más adecuada fue un sensor ultrasónico. El transmisor de nivel multifunción ultrasónico de uso general proporciona una medición de nivel continua de hasta 1,25 m con una salida de señal analógica de 4-20 mA y cuatro relés, y se configura a través de nuestro software WebCal.

Tabla 29

Lista de requerimientos de los sensores de nivel.

Parámetro	Valor
Tipo de medición	Continua
Altura máxima de medición	1.25 [m]
Tipo de señal	Corriente
Rango de medición	4 a 20 mA
Presencia de espuma	No
Tipo de fluido	Aditivos a base de agua
Temperatura de trabajo	0 a 35 [°C]
Fluidos espumosos	NO
Contacto en la medición	NO
Turbulencias	Mínimas
Condensación	Mínima

Nota. Requerimientos basados en el criterio del personal de mantenimiento de la empresa.

Según Flowline (2019) menciona que cada relé se puede configurar para funciones de alarma, llenado automático o vaciado, este sensor es adecuado para tanques pequeños con medios sin espuma, sin condensación o muy vaporosos, como productos químicos, agua, aguas residuales y aceite. En la Tabla 30 se detalla las características del sensor ultrasónico seleccionado.

Tabla 30

Características técnicas de los sensores de nivel seleccionados.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Marca	Flowline	
Serie	EchoPod-DL14-00	
Tipo	Transmisor de nivel de líquidos ultrasónico multifunción	
Rango	1.25 [m]	
Resolución	3 [mm]	
Precisión	0.5 [mm]	
Banda muerta	5 [cm]	
Amplitud de señal	5 [cm]	
Alimentación DC	24 [V]	
Consumo	0.5 [W]	
Resistencia máxima	400 [Ω]	
Señal de salida	4 a 20 [mA]	
Histéresis	Configurable	
Temperatura de funcionamiento	-7 [°C] a 60 [°C]	
Presión	30 [psi] (2 [bar])	
Material del transductor	PVDF (Fluoruro de polivinilideno)	
Rosca	1" NPT	

Nota. Tomado de *EchoPod DL 14*, por Flowline, 2019.

Se requirió optar por alternativas similares, para ello se escogieron dos sensores ultrasónicos de la marca IFM, que a diferencia de los otros sensores, este no requiere de software para configurar y calibrar, los detalles técnicos del sensor se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31

Características técnicas de los sensores de nivel seleccionados.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Marca	IFM	
Serie	UGT584	
Tipo	Transmisor de nivel de líquidos ultrasónico multifunción	
Rango	80 a 1200 [mm]	
Repetibilidad	1 [%]	
Resolución	3 [mm]	
Tiempo de respuesta	< 450 [ms]	
Banda muerta	6 [cm]	
Amplitud de señal	5 [cm]	
Alimentación DC	10 a 30 [V]	
Consumo	< 35 [mA]	
Resistencia máxima	500 [Ω]	
Señal de salida	4 a 20 [mA]	
Histéresis	< 1[%]	
Temperatura de funcionamiento	-20 [°C] a 70 [°C]	
Material del transductor	PBT (Tereftalato de polibutileno) PA (Poliamida)	
Rosca	M18 x 1	

Nota. Tomado de la Hoja de datos. *UGT584*, por IFM electronic, 2021.

Dimensionamiento de la válvula proporcional

El sistema de control de este sistema es de tipo SISO, lo cual significa que trabaja con una sola variable de entrada y una de salida. La variable de entrada es el error o diferencia que existe entre la masa del contenido de la tolva medida en kilogramos y la masa objetivo, este valor se normaliza y escala según los parámetros de diseño, para que la variable de salida cambie su valor de 4 a 20 mA, que corresponderá al porcentaje de apertura de la válvula proporcional que controlará el caudal de aire comprimido destinado a la activación de las

bombas correspondientes a una presión constante. El elemento que permite realizar este control es una válvula de bola, para automatizar la apertura de este, se requirió de un actuador giratorio controlado mediante un posicionador de señal analógica.

Tabla 32

Lista de requerimientos de los elementos de la válvula proporcional de control.

Elemento	Requerimientos	Valor o característica
Válvula de bola	Diámetro	DN25 o 1 pulgada
	Tipo de accionamiento	ON-OFF
	Alimentación	12, 24 VDC o 120, 220 VAC
	Aplicación	Aire comprimido (40-120 psi)
Actuador giratorio	Ángulo de giro	90°
	Accionamiento	Neumático
	Presión de funcionamiento	40-120 psi
	Diámetro de válvula adaptable	1/2 pulgada
Posicionador	Alimentación	24 VDC o 100-240 VAC (50/60 HZ)
	Señal de entrada	Analógica
	Rango de señal	4 a 20 mA
	Accionamiento	Neumático

Nota. Requerimientos basados en los actuadores seleccionados y fuentes de energía disponibles.

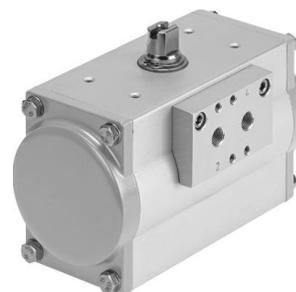
En la Tabla 32 se muestran los requerimientos para la selección de dichos elementos. Los proveedores nacionales disponen de equipos de la marca FESTO, con la cual, se pudo dimensionar la válvula proporcional según las características técnicas de los productos disponibles de la marca mencionada.

Actuador giratorio de la válvula proporcional. Según FESTO (2022a), establecen que, los actuadores giratorios DFPD son aptos para la automatización de válvulas de mariposa, válvulas de bola. Este actuador está compuesto por un sistema de piñón y cremallera que le permite tener un giro de precisión. En la Tabla 33 se muestra las características técnicas.

Tabla 33

Códigos de actuador giratorio de la válvula proporcional.

Descripción	Valor o característica	Código	Esquema
Serie	Actuador giratorio	DFPD	
Sistema de unidades	Métrico	---	
Versión	Estándar	---	
Tamaños	10	10	
Forma constructiva	Cremallera/piñón	RP	
Ángulo de giro	90°	90	
Sentido de giro	Derecha	R	
Función	Doble efecto	D	
Fuerza del muelle	Sin	---	
Conexión de brida 1	Disposición de taladros F03	F03	
Conexión de brida 2	Sin	---	
Margen de temperatura	Estándar	---	
Material del eje	Estándar	---	



Nota. Tomado de la hoja de datos. *Actuadores giratorios DFPD*, por FESTO, 2022a.

Una vez seleccionado el actuador, se procedió a verificar las características técnicas principales, según los requerimientos preestablecidos, en la Tabla 34 se enlista los datos técnicos más relevantes del actuador implementado en el sistema.

Tabla 34

Características técnicas de actuador giratorio de la válvula proporcional.

Descripción	Valor o característica
Conexión neumática	1/8 NPT
Presión de funcionamiento	2 a 8 [bar] / 29 a 116 [psi]
Presión nominal	5.5 [bar] / 79.75 [psi]
Medio de funcionamiento	Aire comprimido
Norma de conexión a las válvulas de proceso	ISO 5211
Temperatura ambiente	-20 a +80 [°C]
Momento de giro teórico en función de la Presión de funcionamiento	2 [bar]: 3.7 [Nm] 5.5 [bar]: 10.3 [Nm] 6 [bar]: 11.2 [Nm] 8 [bar]: 15.0 [Nm]

Nota. Tomado de la hoja de datos. *Actuadores giratorios DFPD*, por FESTO, 2022a.

Posicionador de la válvula proporcional. El CMSX es un posicionador digital electroneumático que permite una regulación sencilla y eficaz de la posición de válvulas de proceso activadas mediante actuadores neumáticos, el manejo del dispositivo se realiza a través de tres pulsadores y una pantalla LCD (FESTO, 2022b). El control de la posición se realiza mediante una señal de corriente que varía entre 4 a 20 mA, esta señal será enviada desde el PLC. En la Tabla 35 se enlista las características principales según los códigos de selección del posicionador, que fueron considerados de los requerimientos planteados al inicio de este apartado, es importante mencionar que para ensamblar este posicionador fueron necesarios accesorios complementarios que se detallan en los siguientes apartados.

Tabla 35

Códigos del posicionador de la válvula proporcional.

Descripción	Valor o característica	Código	Esquema
Serie	Posicionador para la automatización de procesos	CMSX	
Versión del producto	Principalmente proporción de polímero	P	
Tipo de construcción	Posicionador, detección de recorrido / ángulo integrado	S	
Tipo de indicación	LCD, retroiluminado	C	
Valor de consigna	Configurable: 0 a 10 [V] 0 a 20 [mA] 4 a 20 [mA]	U	
Retroalimentación de la posición	4 a 20 [mA]	F1	
Función	Doble efecto	D	
Caudal	50 [l/min]	50	
Función de seguridad	Abriendo o cerrando en caso de fallo del sistema	A	



Nota. Tomado de la hoja de datos. *Posicionador CMSX*, por FESTO, 2022b.

De la misma manera que el actuador, después de haber seleccionado el posicionador, se verificaron las características técnicas principales de funcionamiento del equipo, considerando los requerimientos pendientes, ya que los códigos del producto no dan una información detallada de todas las propiedades del mismo.

En la Tabla 36 se enlista los datos técnicos más relevantes del posicionador implementado en el sistema, estos datos sirvieron como fundamento para selección de los elementos complementarios que se mencionan en los siguientes apartados.

Las dimensiones del actuador giratorio y del posicionador se muestran en el anexo F, para el correcto ensamble de los elementos de la válvula proporcional se utilizaron elementos como: silenciadores, racores rápidos, acoplamiento y adaptadores de montaje.

Tabla 36

Características técnicas del posicionador de la válvula proporcional.

Descripción	Valor o característica
Diámetro del émbolo	>= 160
Conexión neumática	1/8 NPT
Tensión nominal de funcionamiento DC	24 [V]
Margen de tensión de funcionamiento DC	21.6 a 26.4 [V]
Consumo de corriente máxima	600 [mA]
Resolución	16 [bit]
Presión de funcionamiento	3 a 8 [bar] / 43.5 a 116 [psi]
Medio de funcionamiento	Aire comprimido
Temperatura ambiente	-5 a +60 [°C]
Grado de protección	IP65
Resistencia a vibraciones	Prueba de transporte con grado de severidad 2 según FN 942017-4 y EN 60068-2-6

Nota. Tomado de la hoja de datos. *Posicionador CMSX*, por FESTO, 2022b.

Selección de la válvula de bola. En las características técnicas del actuador giratorio seleccionado de la Tabla 34, se menciona que la norma que debe seguirse para el montaje de válvulas de proceso es la ISO 5122, además en los requerimientos establecidos se mencionó que debe ser para tubería de media pulgada, y el rango de presión del aire comprimido será de 40 a 120 psi, en la Tabla 37 se muestra las características de la válvula seleccionada. Mediante esta válvula se controlará el caudal de aire que accionará las bombas de doble diafragma correspondientes, sin embargo, al ser un actuador de comportamiento no lineal, se consideró la

alternativa más adecuada para el sistema de control, ya que el caudal del aire está directamente relacionado con el porcentaje de apertura de la válvula proporcional, por lo tanto, el modelo matemático del actuador es crítico.

Tabla 37

Características técnicas de la válvula de bola seleccionada.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Serie	Válvula de bola 2025N	
Marca	Genebre	
Material	Acero inoxidable austenítico ASTM A351 CF8M (316) / teflón	
Medida	1/2"	
Tipo de rosca	Gas ISO 7-1 (EN 10226-1)	
Juntas y asiento	PTFE + 15% FV tórica eje vitón	
Presión nominal	63 [bar]	
Temperatura de funcionamiento	-20 a 80 [°C]	
Tipo de montaje	Directo s/ISO 5211 con sistema de bloqueo	

Nota. Tomado de la hoja de datos. *Válvulas Industriales*, por Genebre, 2017.

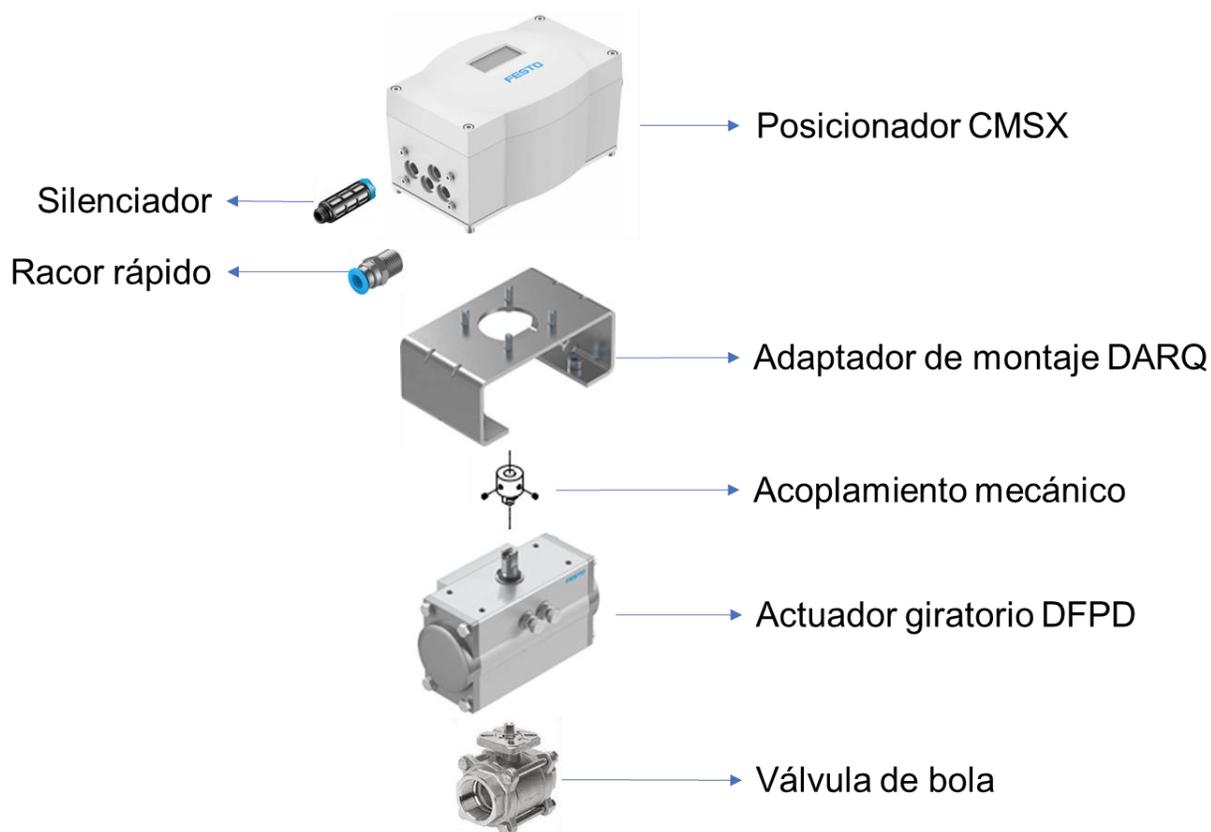
Ensamble de la válvula proporcional. Los tres elementos seleccionados fueron ensamblados mediante accesorios recomendados por el fabricante, estos elementos fueron: un acoplamiento mecánico para unir y transmitir el movimiento del posicionador al eje del actuador giratorio, un silenciador para reducir el ruido del aire comprimido al dispositivo de posición, cuatro racores rápidos para la conexión de las mangueras de aire, tanto para el posicionador, como para el actuador giratorio de doble efecto en ambos casos.

En la Figura 61 se muestra una vista explotada de los elementos y accesorios mencionados, los elementos de unión como pernos y tornillos, vinieron incluidos según el diseño, y en la Figura 62 se muestra la válvula proporcional ensamblada en su totalidad, las

borneras de los circuitos del posicionador se encuentran ubicados dentro de la carcasa superior. Estos dispositivos fueron adquiridos con todos los componentes ensamblados, y calibrados para ser montado en la línea del proceso a controlar, se añadieron dos perfiles para montarlos en las estructuras ya realizadas.

Figura 61

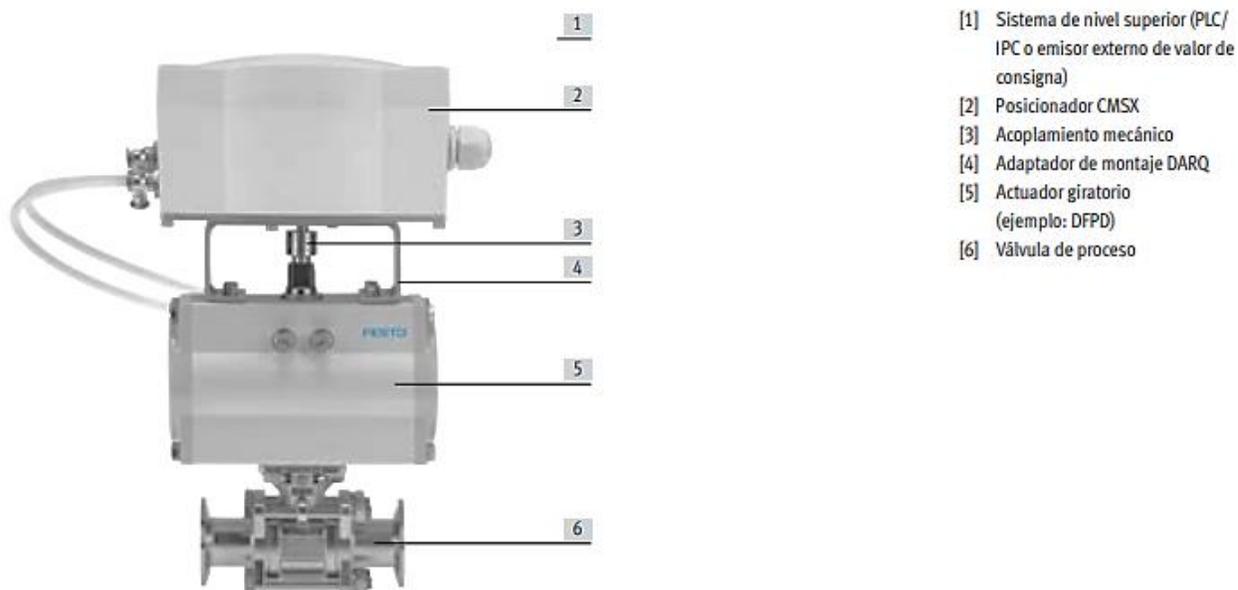
Vista explotada de válvula proporcional



Nota. En la ilustración se omiten los elementos de unión como: pernos y tornillos.

Figura 62

Válvula proporcional ensamblada.



Nota. Tomado de *Posicionador CMSX*, por FESTO, 2022b.

Selección de electroválvulas para fluidos líquidos

Los actuadores encargados de la circulación de los fluidos líquidos serán las electroválvulas, en la Tabla 38 se muestra los requerimientos mínimos para la selección de dichos elementos.

Tabla 38

Lista de requerimientos de las electroválvulas para fluidos líquidos.

Requerimientos	Valor o característica
Diámetro de tubería	DN25 o 1 pulgada
Número de vías	2 NC
Tipo de accionamiento	ON-OFF
Alimentación	12, 24, 120 o 220 VAC
Aplicación	Líquidos viscosos (200 a 700 [cP])

Para la selección de las electroválvulas se consideró la viscosidad dinámica de los aditivos, para ello se calculó mediante la ecuación (1), las densidades de los aditivos están definidas en las ecuaciones (37), (38), (39) y (40). Según los datos del laboratorio de investigación y desarrollo, se obtuvieron los valores de viscosidad absoluta a 25 [°C], y se definieron en las ecuaciones (135), (136), (137) y (138).

Según E-MC (2018) establecen que, fabrican una variedad de electroválvulas que trabajan con fluidos con viscosidades cinemáticas de hasta 20 [St], esta viscosidad se definió en la ecuación (139). Las viscosidades cinemáticas de los aditivos se calcularon y establecieron en las ecuaciones (140), (141), (142) y (143). Teniendo como referencia la Tabla 38, se pudieron escoger electroválvulas para tuberías de 1 pulgada como se muestra en la Tabla 39. Cabe mencionar que a mayor diámetro la dinámica de las electroválvulas se vuelve más compleja, especialmente con los líquidos viscosos, y de igual manera para diámetros menores, ya que el orificio es más reducido y el paso del líquido podría obstaculizarse.

$$\mu_{WP64} = 317 [cP] \quad (135)$$

$$\mu_{AM225} = 317[cP] \quad (136)$$

$$\mu_{SG606} = 159[cP] \quad (137)$$

$$\mu_{AM223} = 700[cP] \quad (138)$$

$$v_{EV_{max}} = 20 [Stokes] \quad (139)$$

$$v_{WP64} = \frac{\mu_{WP64}}{\rho_{WP64}} = \frac{317 \cdot 10}{945} \left[\frac{cm^2}{s} \right] = 3.35 [Stokes] \quad (140)$$

$$v_{AM225} = \frac{\mu_{AM225}}{\rho_{AM225}} = \frac{317 \cdot 10}{1240} \left[\frac{cm^2}{s} \right] = 2.56 [Stokes] \quad (141)$$

$$v_{SG606} = \frac{\mu_{SG606}}{\rho_{SG606}} = \frac{159 \cdot 10}{1100} \left[\frac{cm^2}{s} \right] = 1.45 [Stokes] \quad (142)$$

$$v_{AM223} = \frac{\mu_{AM223}}{\rho_{AM223}} = \frac{700 \cdot 10}{860} \left[\frac{cm^2}{s} \right] = 8.14 [Stokes] \quad (143)$$

Tabla 39

Características técnicas de las electroválvulas seleccionadas para líquidos.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Modelo	UW-25E1	
Marca	E-MC	
Alimentación	110 VAC	
Material del cuerpo	Latón	
Material de sello	Caucho de nitrile (NBR)	
Diámetro de rosca	1" NPT Hembra	
Presión máxima	11 [bar]	
Temperatura de funcionamiento	-5 a 80 [°C]	
Viscosidad cinemática del fluido	20 [St]	
Rango de voltaje	± 10 %	
Coeficiente de flujo de válvula (Cv)	12	
Orificio	25 [mm]	

Nota. Tomado de la hoja de especificaciones. *UW Series 2/2 solenoid valve*, por E-MC, 2018.

Selección de electroválvulas para aire comprimido

En la Tabla 40 se listaron los requerimientos para la selección de electroválvulas de flujo de aire comprimido, en las tablas de los catálogos de electroválvulas se menciona un factor C_v , con el cual se pudo dimensionar estos elementos. Según di Ciancia (2017) menciona que las electroválvulas son orificios de área variable que provocan que la presión de entrada sea mayor a la de salida de la válvula debido a que parte de la energía se disipó, por lo tanto, para las válvulas de control, se define un coeficiente de la válvula conocido como C_v . Al pasar un fluido por una restricción, la ecuación (144) vincula el caudal con la diferencia de presión entre la entrada y la salida es (di Ciancia, 2017).

Tabla 40

Lista de requerimientos de las electroválvulas para aire comprimido.

Requerimientos	Valor o característica
Diámetro de tubería	1/2 pulgada
Número de vías	2
Tipo de accionamiento	ON-OFF
Alimentación	12, 24, 120 o 220 VAC
Rango de presión	20 a 120 [psi]
Caudal	50 [l/min]

Nota. El caudal puede variar debido al control de la válvula proporcional.

Según Sullivan (1989), establece la conversión del caudal ACFM pies cúbicos por minuto real al caudal SCFM pies cúbicos por minuto estándar mediante la ecuación (145), en la que se considera la presión del gas que pasa por la válvula de control medida en libras por pulgada cuadradas [psig] y la temperatura medida en Fahrenheit [°F], con esta ecuación se puede utilizar la gráfica de la Figura 63.

$$q = C_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (144)$$

$$SCFM = ACFM \cdot \left(\frac{P_g}{14.7}\right) \cdot \left(\frac{519}{460 + T_{gas}}\right) \quad (145)$$

Donde:

q : Caudal del fluido

C_v : Coeficiente de la válvula

ΔP : Diferencia entre presión de entrada y salida

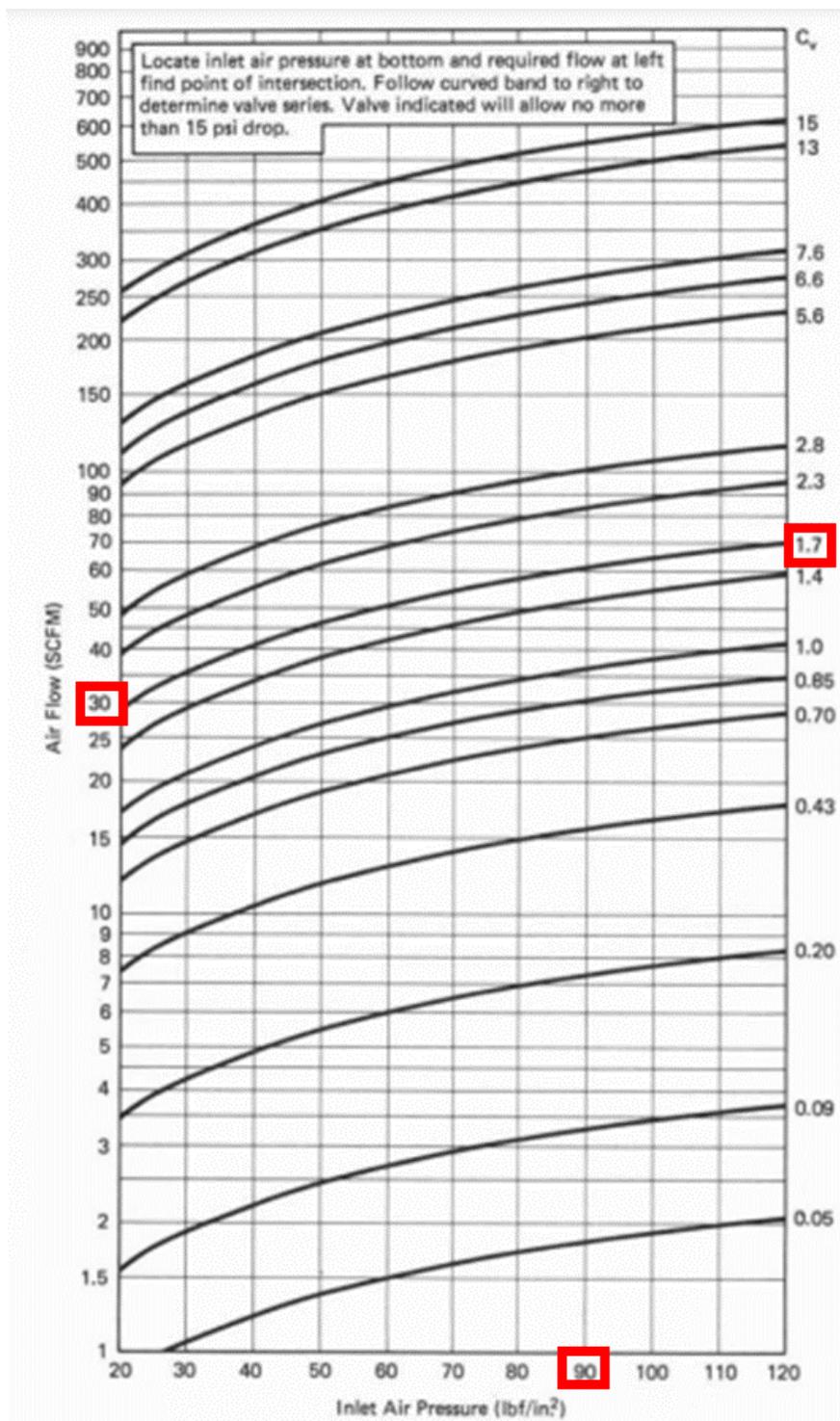
γ : Gravedad específica del fluido.

P_g : Presión del gas [psig]

T_g : Temperatura del gas [°F]

Figura 63

Selección de la electroválvula según la presión del aire y coeficiente de válvula.



Tomado de: Tabla de selección de válvulas. Sizing pneumatic valves, por J. Sullivan, 1989.

El caudal de aire comprimido según el compresor y la línea de aire disponible para el sistema dosificador es de 5 pies cúbicos por minuto reales definido en la ecuación (146), la presión de diseño fue de 90 [psig] y la temperatura ambiente a 20 [°C] establecidas en las ecuaciones (147) y (148) respectivamente, con estos datos se pudo calcular el caudal estándar, y se estableció su valor en la ecuación (149).

$$ACFM = 5 \left[\frac{ft^3}{min} \right] \quad (146)$$

$$P_g = 90 \left[\frac{lbf}{in^2} \right] \quad (147)$$

$$T_g = 20[°C] = 68[°F] \quad (148)$$

$$SCFM = 5 \cdot \left(\frac{90}{14.7} \right) \cdot \left(\frac{519}{460 + 68} \right) = 30.11 \left[\frac{ft^3}{min} \right] \quad (149)$$

Figura 64

Características técnicas de electroválvulas solenoides.

Specifications

Port size (G)	Orifice (mm)	CV value	Pressure difference (Bar)				Max. temperature (°C)	Power		Order code		Main dimension Length x Width x Height AxBxH(mm)
			Max. working pressure					VA AC 220	W DC 24V	220VAC	50/60Hz	
			Min. pressure	Air, Gas	Water, Hot water, Liquid	Light oil ≤20CST						
1/8"	3	0.23	0	13	13	10	80	22	13	SLP06-030E2	SLP06-030E2S1	
	3	0.23	0	13	13	—	130	22	13	SLP06-030E2E	SLP06-030E2S1E	
	3	0.23	0	13	13	10	120	22	13	SLP06-030E2V	SLP06-030E2S1V	
1/4"	3	0.23	0	13	13	10	80	22	13	SLP08-030E2	SLP08-030E2S1	
	3	0.23	0	13	13	—	130	22	13	SLP08-030E2E	SLP08-030E2S1E	
	3	0.23	0	13	13	10	120	22	13	SLP08-030E2V	SLP08-030E2S1V	
	10.5	1.47	0	10	10	10	80	22	13	SLP08-105E2	---	
	10.5	1.47	0	10	10	—	130	22	13	SLP08-105E2E	---	
3/8"	10.5	1.47	0	10	10	10	120	22	13	SLP08-105E2V	---	
	3	0.3	0	13	13	10	80	22	13	SLP10-030E2	SLP10-030E2S1	
	3	0.3	0	13	13	10	130	22	13	SLP10-030E2E	SLP10-030E2S1E	
	3	0.3	0	13	13	10	120	22	13	SLP10-030E2V	SLP10-030E2S1V	
	4	0.6	0	8	8	6	80	22	13	SLP10-040E2	SLP10-040E2S1	
	4	0.6	0	8	8	6	130	22	13	SLP10-040E2E	SLP10-040E2S1E	
	4	0.6	0	8	8	6	120	22	13	SLP10-040E2V	SLP10-040E2S1V	
	10.5	1.68	0	10	10	10	80	22	13	SLP10-105E2	---	
	10.5	1.68	0	10	10	—	130	22	13	SLP10-105E2E	---	
	10.5	1.68	0	10	10	10	120	22	13	SLP10-105E2V	---	
1/2"	13	4.5	0.5	16	16	13	80	22	13	SLP10-130E2	SLP10-130E2S1	66 x 48 x 112
	13	4.5	0.5	16	16	—	130	22	13	SLP10-130E2E	SLP10-130E2S1E	66 x 48 x 112
	13	4.5	0.5	16	16	13	120	22	13	SLP10-130E2V	SLP10-130E2S1V	66 x 48 x 112
	10.5	1.75	0	10	10	10	80	22	13	SLP15-105E2	---	
	10.5	1.75	0	10	10	—	130	22	13	SLP15-105E2E	---	
3/4"	10.5	1.75	0	10	10	10	120	22	13	SLP15-105E2V	---	
	13	4.5	0.5	16	16	13	80	22	13	SLP15-130E2	SLP15-130E2S1	66 x 48 x 112
	13	4.5	0.5	16	16	—	130	22	13	SLP15-130E2E	SLP15-130E2S1E	66 x 48 x 112
	13	4.5	0.5	16	16	13	120	22	13	SLP15-130E2V	SLP15-130E2S1V	66 x 48 x 112
	20	7.6	0.5	16	16	13	80	22	13	SLP20E2	SLP20E2S1	75 x 58 x 118
3/4"	20	7.6	0.5	16	16	—	130	22	13	SLP20E2E	SLP20E2S1E	75 x 58 x 118
	20	7.6	0.5	16	16	13	120	22	13	SLP20E2V	SLP20E2S1V	75 x 58 x 118

Nota. Tomado de la hoja de especificaciones. *UW Series 2/2 solenoid valve*, por E-MC, 2018.

El caudal estándar obtenido es cercano a los 30 SCFM, en la Figura 63 se observa que para este valor, el coeficiente de la válvula C_v , está entre 1.4 y 1.7, y según la Figura 64 las electroválvulas de media pulgada disponibles tienen un coeficiente de 1.75 que es el más cercano a lo que indica en la gráfica, por lo tanto, la electroválvula escogida se muestra en detalle en la Tabla 41. Estos elementos servirán para el paso absoluto de aire hacia las bombas de doble diafragma, se utilizarán cuatro en total y estarán conectadas paralelamente, cada una funcionará según el proceso y secuencia programada, funcionarán una a la vez, ya que la entrada de aire estará controlada por la válvula proporcional que regulará el flujo de aire, según la presión.

Tabla 41

Características técnicas de electroválvulas seleccionadas para aire comprimido.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Modelo	VX2120-15	
Marca	E-MC	
Alimentación	110 VAC	
Material del cuerpo	Latón	
Material de sello	Caucho de nitrilo (NBR)	
Diámetro de rosca	1/2" NPT Hembra	
Presión máxima	11 [bar]	
Temperatura de funcionamiento	-5 a 80 [°C]	
Viscosidad cinemática del fluido	20 [St]	
Rango de voltaje	± 10 %	
Coeficiente de flujo de válvula (C_v)	1.75	
Orificio	13 [mm]	

Nota. Tomado de la hoja de especificaciones. *UW Series 2/2 solenoid valve*, por E-MC, 2018.

Selección de regulador de presión de aire

Según Campbell Hausfeld (2012) establece que, el filtro/regulador combina un filtro para uso general con un regulador de presión en una unidad compacta, está diseñado para quitar la mayoría de las partículas líquidas y sólidas del suministro de aire. El regulador automático de liberación de presión se utiliza para ajustar la salida de presión entre 0 y 14,8 bar, puede eliminar agua condensada y partículas de hasta 5 micrones.

El manómetro de este regulador permitirá observar en qué condiciones estará trabajando la válvula proporcional, ya que la presión de aire podría variar debido a distintos procesos de la empresa en los que requieran de aire comprimido, por lo tanto, servirá para monitorización en la zona productiva, el filtro de agua servirá para que la vida útil de los actuadores no se reduzca, los detalles se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42

Especificaciones del regulador de presión para aire comprimido seleccionado.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Modelo	PA211300AV	
Marca	Campbell Hausfeld	
Tipo de regulador	Alivio automático	
Rango de temperatura	4.5 [°C] a 60 [°C]	
Presión máxima	17.2 [bar] (250 [psi])	
Entrada/Salida de aire	½" NPT	
Puertos del manómetro	¼" NPT	
Elemento del filtro	5 [micrón]	
Flujo nominal	2124 [l/min] (75 SCFM)	
Capacidad de drenaje	80 [ml]	

Nota: Tomado del manual de instrucciones de operación y lista de partes. *Filtro-Regulador*, por Campbell Hausfeld, 2012.

Dimensionamiento de fuente de alimentación externa

Se dispone de una fuente trifásica de hasta 220 VAC en la empresa, sin embargo, los módulos y componentes del PLC funcionan a 24 VDC, inclusive la válvula de control y los sensores de nivel. La CPU 1215C elegida tiene una fuente de voltaje DC integrada de 24 VDC de 400 [mA], se realizó el cálculo sugerido por el fabricante en la Tabla 43, donde se puede observar que debido a la cantidad de módulos requeridos y de expansión, se requerirán de 440 mA adicionales únicamente para los módulos del PLC, la corriente total necesaria se define en (157). Por lo tanto, fue necesario implementar una fuente externa, para todos los componentes mencionados. Como el PLC elegido es para montaje en riel DIN, el gabinete que se implementará poseerá rieles de este tipo, por lo tanto, la fuente de alimentación de preferencia debió ser para este tipo de montaje, el voltaje de la fuente se define en la ecuación (150).

Tabla 43

Corriente consumida por el PLC y los módulos requeridos.

Corriente disponible de la CPU	5 VDC	24 VDC
CPU 1215C AC/DC/Relé	1600 mA	400 mA
Requisitos del sistema	5 VDC	24 VDC
CPU 1215C, 14 entradas	-	14 x 4 mA = 56 mA
1 CM 1241, RS422/485, 5 V	220 mA	
2 SM 1223, 5V	2 x 180 mA = 360 mA	
1 SM 1231, 5V	1 x 90 mA = 90 mA	
2 SM 1223, 16 entradas c/u		2 x 16 x 4 mA = 128 mA
2 SM 1223, 16 salidas relé c/u		2 x 16 x 11 mA = 352 mA
1 SM 1231, 8 entradas analógicas		1 x 8 x 45 mA = 360 mA
Consumo total	670 mA	840 mA
Balance total de corriente	930 mA	(440 mA)

Nota. Tomado de *Cálculo de la corriente necesaria* (p.1600), por Siemens, 2018.

Consumo de corriente de sensores de nivel. Se utilizaron cuatro sensores de nivel, de los cuales dos pares eran de distinta marca, por lo tanto, sus especificaciones técnicas se diferenciaron en algunos aspectos, en este caso en el consumo eléctrico. Según el fabricante Flowline, el consumo de los sensores a 24 [V] se define en la ecuación (152), la corriente se pudo calcular mediante la ecuación (151), y se despejó su valor en la ecuación (153). Para los sensores IFM se establece en las especificaciones que la corriente será menor a 35 [mA], se consideró este valor de consumo en la ecuación (154).

$$V_S = 24 [V] \quad (150)$$

$$P = I \cdot V_S \quad (151)$$

$$P_{LS1} = 0.5 [W] \quad (152)$$

$$I_{LS1} = \frac{P_{LS}}{V_{LS}} = \frac{0.5}{24} = 20.83 [mA] \quad (153)$$

$$I_{LS2} = 35[mA] \quad (154)$$

Consumo de corriente en válvula proporcional. La tensión de funcionamiento de la válvula de control según las especificaciones es de 21.6 a 26.4 V, y la corriente máxima de consumo es de 600 [mA] y se establece en la ecuación (155).

Consumo de corriente en pantalla HMI. Según el fabricante, la tensión para poner en funcionamiento la pantalla es de 19.2 a 28.8 V, según las especificaciones de la pantalla elegida en la Tabla 28, el consumo será de 125 [mA], y se define en la ecuación (156).

Selección de la fuente de alimentación. Para dimensionar la fuente de alimentación DC se sumó todas las corrientes de consumo calculadas y según la norma NEC artículo 240 se consideró este valor como el 80% de la corriente de la fuente, es decir, que el valor resultante de la suma tuvo que ser multiplicado por el factor de 1.25, como se establece en la ecuación (158), y considerando una posible expansión de elementos en el tablero, se escogió una fuente de mayor capacidad al mínimo calculado, como se establece en la Tabla 44.

$$I_{VP} = 600 \text{ [mA]} \quad (155)$$

$$I_{HMI} = 125 \text{ [mA]} \quad (156)$$

$$I_M = 840 \text{ [mA]} \quad (157)$$

$$I_{ST} = 1.25 \cdot (I_{VP} + 2 \cdot I_{LS1} + 2 \cdot I_{LS2} + I_{HMI} + I_M) = 2088.33 \text{ [mA]} \quad (158)$$

Donde:

V_S : Tensión de la fuente [V]

P_{LS1} : Potencia del primer sensor [W]

I_{LS1} : Corriente en el primer sensor [mA]

I_{LS2} : Corriente en el segundo sensor [mA]

I_{VP} : Corriente de válvula proporcional [mA]

I_{HMI} : Corriente de pantalla HMI [mA]

I_M : Corriente de PLC y módulos a 24V [mA]

Tabla 44

Especificaciones técnicas de la fuente seleccionada.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Marca	EBCHQ	
Potencia	120W	
Voltaje	24VDC	
Corriente de salida	5 A	
Alimentación 100-240vac	100-240VAC	
Protección	Cortocircuito y sobrecarga	
Voltaje ripple	150mV	
Regulación de carga	+/- 0,5%	
Regulación de línea	+/- 0,5%	

Nota. Tomado de *Fuentes de alimentación switcheadas 24 VDC*, por EBCHQ, s. f..

Dimensionamiento de cables

Los circuitos eléctricos diseñados fueron de baja tensión, y requirieron de una red monofásica V_n de 127 VAC proveniente de la red trifásica disponible de la acometida principal, también se requirió de una fuente de corriente continua de 24 VDC que se detalló en el apartado anterior, para seleccionar los conductores que suministren la tensión eléctrica en los circuitos de control y potencia, se consideró la caída máxima de tensión en los circuitos.

Tabla 45

Categorías de caída de tensión máxima admisible.

Parte de la instalación	Alimentación	Caída de tensión máxima [%]
Línea general de alimentación	Suministro de un único usuario	---
	Contadores totales concentrados	0.5
	Centralizaciones parciales de contadores	1.0
Derivación individual	Suministro de un único usuario	1.5
	Centralizaciones parciales de contadores	1.0
	Contadores totales centralizados	0.5
Circuitos interiores	Circuitos interiores en viviendas	3
	Circuitos de alumbrado que no sean vivienda	3
	Circuito de fuerza que no sean viviendas	5

Nota: Adaptado de Construcción de acometida y tablero de control de suministro de energía para el laboratorio de análisis instrumental. *Caída de tensión máxima por categoría*, por Arregui & Bastidas, 2018.

Según la Tabla 45 se determinó que, al tratarse de una derivación individual que alimenta al tablero de control, se considera como contadores totales centralizados, por lo tanto, el porcentaje de caída de tensión considerado es 0.5% del voltaje nominal, como se define en (159).

$$\Delta V = 0.005 * V_n \quad (159)$$

Donde:

ΔV : Caída de tensión [V]

V_n : Tensión nominal [V]

La caída de tensión para los cables de las conexiones del PLC, electroválvulas y módulos se calcularon mediante la ecuación (159).

$$\Delta V_{PLC} = \Delta V_{EV} = 0.005 * 127 = 0.64 [V] \quad (160)$$

$$\Delta V_M = 0.005 * 24 = 0.12 [V] \quad (161)$$

Donde:

ΔV_{PLC} : Caída de tensión máxima en el PLC [V]

ΔV_{EV} : Caída de tensión máxima en electroválvula [V]

ΔV_M : Caída de tensión máxima en módulos de señal del PLC [V]

La corriente o intensidad del cable se calcula mediante los valores establecidos en la Tabla 43, donde se puede establecer la corriente consumida por el PLC y sus módulos SM1231 y SM1223. Para el caso de las electroválvulas, se determinó la corriente necesaria según los datos técnicos del fabricante.

$$I_{w_{PLC}} = 1.25(1600 + 400 + 14 * 4) = 2570 [mA] \quad (162)$$

$$I_{SM1231} = 1.25(90 + 360) = 562.3 [mA] \quad (163)$$

$$I_{SM1223} = 1.25(180 + 64 + 176) = 525 [mA] \quad (164)$$

$$I_{w_M} = 562.3 [mA] \quad (165)$$

$$S_{EV} = 14 \text{ [VA]} \quad (166)$$

$$P = S * \cos(\varphi) \quad (167)$$

$$P_{EV} = 14 * 0.8 = 11.2 \text{ [W]} \quad (168)$$

$$I_{EV} = \frac{11.2}{127} = 88.19 \text{ [mA]} \quad (169)$$

El área transversal nominal estándar en milésimas circulares y milímetros cuadrados se basan en las ecuaciones (170) y (171), con las cuales el redondeo va de acuerdo al mismo número de cifras significativas, en este caso, mayor o igual a tres cifras significativas como se indica en la Tabla 46 (ASTM, 2002):

$$S_{cmil} = d^2 \quad (170)$$

$$S_{mm^2} = d^2 \cdot 5.067 \cdot 10^{-4} \quad (171)$$

Donde:

d : diámetro del cable en [mils]

S_{cmil} : área transversal en [cmils]

S_{mm^2} : área del cable en [mm^2]

Según Arregui & Bastidas (2018) mencionan que, la ecuación para determinar la sección mínima del cable en un circuito monofásico, está dada por el número de conductores por la resistividad del conductor, por la longitud total del cable, por la intensidad, dividida entre la caída de tensión máxima, como se indica en la ecuación (172).

$$S_w = \frac{2 \cdot \rho_{cobre} \cdot L_w \cdot I}{\Delta V} \quad (172)$$

Donde:

S_w : Sección del cable.

ρ_{cobre} : Resistividad del cobre = $0.019 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$

L_w : Longitud del cable

I : Intensidad

Tabla 46

Diámetros y áreas de sección AWG para conductores a 20 °C.

Size		Diameter		Cross-Sectional Area		Size		Diameter		Cross-Sectional Area				
AWG	mils	mm	cmils	mm ²	AWG	mils	mm	cmils	mm ²	AWG	mils	mm	cmils	mm ²
4/0	460.0	11.684	211 600	107.2	29	11.3	0.287	128	0.0647					
3/0	409.6	10.404	167 800	85.0	30	10.0	0.254	100	0.0507					
2/0	364.8	9.26	133 100	67.4	31	8.9	0.226	79.2	0.0401					
1/0	324.9	8.25	105 600	53.5	32	8.0	0.203	64.0	0.0324					
1	289.3	7.35	83 690	42.4	33	7.1	0.180	50.4	0.0255					
2	257.6	6.54	66 360	33.6	34	6.3	0.160	39.7	0.0201					
3	229.4	5.82	52 620	26.7	35	5.6	0.142	31.4	0.0159					
4	204.3	5.19	41 740	21.1	36	5.0	0.127	25.0	0.0127					
5	181.9	4.62	33 090	16.8	37	4.5	0.114	20.2	0.0103					
6	162.0	4.11	26 240	13.3	38	4.0	0.102	16.0	0.00811					
7	144.3	3.67	20 820	10.6	39	3.5	0.0890	12.2	0.00621					
8	128.5	3.26	16 510	8.37	40	3.1	0.0787	9.61	0.00487					
9	114.4	2.91	13 090	6.63	41	2.8	0.0711	7.84	0.00397					
10	101.9	2.59	10 380	5.26	42	2.5	0.0635	6.25	0.00317					
11	90.7	2.30	8 230	4.17	43	2.2	0.0559	4.84	0.00245					
12	80.8	2.05	6 530	3.31	44	2.0	0.0508	4.00	0.00203					
13	72.0	1.83	5 180	2.63	45	1.76	0.0447	3.10	0.00157					
14	64.1	1.63	4 110	2.08	46	1.57	0.0399	2.46	0.00125					
15	57.1	1.45	3 260	1.65	47	1.40	0.0356	1.96	0.000993					
16	50.8	1.29	2 580	1.31	48	1.24	0.0315	1.54	0.000779					
17	45.3	1.15	2 050	1.04	49	1.11	0.0282	1.23	0.000624					
18	40.3	1.02	1 620	0.823	50	0.99	0.0252	0.980	0.000497					
19	35.9	0.904	1 290	0.653	51	0.88	0.0224	0.774	0.000392					
20	32.0	0.813	1 020	0.519	52	0.78	0.0198	0.608	0.000308					
21	28.5	0.724	812	0.412	53	0.70	0.0178	0.490	0.000248					
22	25.3	0.643	640	0.324	54	0.62	0.0158	0.384	0.000195					
23	22.6	0.574	511	0.259	55	0.55	0.0140	0.302	0.000153					
24	20.1	0.511	404	0.205	56	0.49	0.0125	0.240	0.000122					
25	17.9	0.455	320	0.162										
26	15.9	0.404	253	0.128										
27	14.2	0.361	202	0.102										
28	12.6	0.320	159	0.0804										

Nota. Tomado de Standard specification for standard nominal diameters and cross-sectional areas of AWG sizes of solid round wires used as electrical conductors. ASTM B258-02, por ASTM, 2002, ASTM International.

Sección mínima para cableado en pines de PLC. La longitud de diseño del cable para el PLC se define en (173), y mediante la ecuación (172) se calcula la sección mínima en la ecuación (174).

$$L_{PLC} = 5 [m] \quad (173)$$

$$S_{W_{PLC}} = \frac{2 \cdot \rho_{cobre} \cdot L_{PLC} \cdot I_{PLC}}{\Delta V_{PLC}} = \frac{2 \cdot 0.019 \cdot 5 \cdot 2.57}{0.64} = 0.72 [mm^2] \quad (174)$$

Sección mínima para cableado de electroválvulas. Para las electroválvulas, se consideró la longitud máxima según las dimensiones de la instalación de la planta, y se define en (175), con lo cual, se calculó de la misma forma la sección mínima en la ecuación (176).

$$L_{EV} = 10 [m] \quad (175)$$

$$S_{W_{EV}} = \frac{2 \cdot \rho_{cobre} \cdot L_{EV} \cdot I_{EV}}{\Delta V_{EV}} = \frac{2 \cdot 0.019 \cdot 10 \cdot 0.09}{0.64} = 0.05 [mm^2] \quad (176)$$

Sección mínima para cableado de módulos del PLC. Para las electroválvulas, se consideró la longitud máxima L_M según las dimensiones de la instalación de la planta, y se define en (177), con lo cual, la sección mínima se establece en la ecuación (178).

$$L_M = 4 [m] \quad (177)$$

$$S_{W_M} = \frac{2 \cdot \rho_{cobre} \cdot L_M \cdot I_{W_M}}{\Delta V_{EV}} = \frac{2 \cdot 0.019 \cdot 4 \cdot 0.5623}{0.12} = 0.71 [mm^2] \quad (178)$$

Tabla 47

Conductor de cobre flexible con aislamiento de policloruro de vinilo.

CONDUCTOR			Espesor de Aislamiento (mm)	Diámetro Externo Aprox (mm)	Peso total Aprox (kg / km)	*Capacidad de Corriente (A)
CALIBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm ²)	No. Hilos				
24	0.205	0.254	0.51	1.68	4.54
22	0.324	0.254	0.51	1.80	5.88
20	0.519	0.254	0.76	2.45	10.49
18	0.823	0.3	0.76	2.72	14.04	6
16	1.31	0.3	0.76	3.03	19.47	8
14	2.08	0.3	0.76	3.42	27.72	20
12	3.31	0.3	0.76	3.90	40.43	25
10	5.261	0.4	0.76	4.51	60.26	30
8	8.367	0.4	1.52	6.81	112.19	40
6	13.30	0.4	1.52	7.79	169.56	55
4	21.15	0.4	1.52	9.05	250.89	70
2	33.62	0.4	1.52	10.60	376.78	95
1	42.4	0.4	2.03	12.55	495.07	110
1/0	53.49	0.4	2.03	13.60	607.07	125
2/0	67.44	0.4	2.03	14.77	746.52	145
3/0	85.02	0.4	2.03	16.08	920.62	165
4/0	107.2	0.4	2.03	17.56	1138.46	195
250	127	0.4	2.41	19.50	1365.02	215

Nota: Tomado del catálogo. *Conductores de cobre FXT, TFF, TW-F*, por Electrocables, s. f..

Selección del cable. Los conductores eléctricos tienden a calentarse debido al efecto Joule, cuando esto sucede, es clara señal de que el diámetro del conductor debe ser mayor, ya que este sobrecalentamiento puede averiar el mismo. En los cálculos realizados se pudo determinar los valores mínimos de sección del cable, sin embargo, el más crítico es el de mayor valor, en este caso, la sección de cable para el PLC que fue de 0.72 mm^2 , lo cual, según

la tabla, el cable más adecuado para esta aplicación fue de calibre 18 AWG que equivale a 0.823 mm^2 como se muestra en la Tabla 47, las especificaciones del cable elegido se muestran en la Tabla 48.

Color del cable. Según las normas INEN (2008), establecen que, el color de los aislantes de los conductores eléctricos variará dependiendo del uso predestinado, es decir, para fases, neutro o puesta a tierra. Para uso de puesta a tierra se deberá identificar mediante un color verde, con o sin franjas amarillas continuas, para el conductor neutro se identificará mediante un color blanco o gris, y para uso de elementos activos o fases deberán identificarse mediante un color o combinación de colores distintos y que contrasten del blanco, gris o verde. En este caso se eligieron los cables de color: azul para las fases, blanco para neutro y verde para tierra.

Tabla 48

Características técnica de cables seleccionados

Característica	PLC y módulos	Electroválvulas
Tipo	TFFN	TC-THHN/THWN
Calibre AWG	18	18
Número de conductores	1	2
Color	Azul	Blanco/Negro
Voltaje máximo [V]	600	600
Corriente máxima [A]	6	10
Material del aislante	PVC	Aislamiento individual de PVC y chaqueta de poliamida (nylon) con chaqueta externa de PVC
Protección	Calor y humedad	Calor y humedad
Temperatura máxima	90 °C	90 °C

Nota. La chaqueta externa de PVC protegerá a los conductores del polvo.

Dimensionamiento de relés

Según los circuitos diseñados será necesario utilizar 17 electroválvulas, para ello se requieren de 17 salidas digitales que estarán establecidas en el PLC y los módulos correspondientes, sin embargo, estas salidas estarían conectadas en serie a cada electroválvula correspondiente, las electroválvulas están expuestas a fenómenos externos, ya que están fuera del tablero de control, llevando así un riesgo al PLC y componentes dentro del tablero, además, en la Tabla 27 se muestra que las salidas digitales no tienen protección a sobrecargas, es por ello que se decidió implementar relés que permitirán separar el circuito de control del PLC, con el de baja potencia en el que están involucradas las electroválvulas. Se consideró el 80% de la ampacidad del conductor 18 AWG, que es de 5.6 amperios, con lo cual la intensidad del relé que se consideró fue de 6 amperios, la lista de requerimientos de muestra en la Tabla 49.

Tabla 49

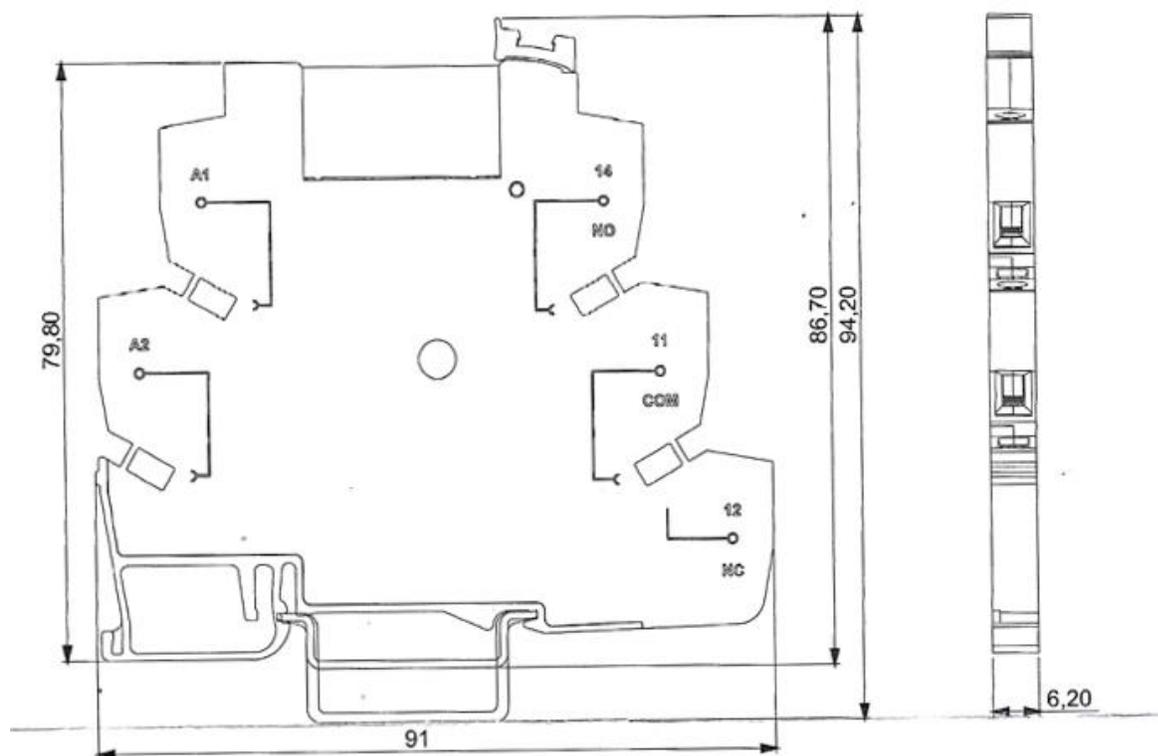
Lista de requerimientos de los relés.

Requerimientos	Valor o característica
Alimentación	110 a 220 VAC
Intensidad	6 [A]
Cantidad de contactos	1
Tipo de contacto	Normalmente Abierto (NA)
Montaje	Riel DIN
Dimensiones	Compactas
Cantidad	17
Elementos a conmutar	Electroválvulas solenoides de 120 VAC
Led indicador	Si
Calibre de cable	18 AWG

Según WEG (2022) menciona que, los relés de interface han sido “desarrollados para aplicaciones de automatización industrial para amplificación, protección, conexión y desconexión de señales en entradas y salidas digitales de PLC”, en la Figura 65 se muestra las dimensiones del relé del fabricante, estas dimensiones son bastante compactas, siendo beneficioso para el ahorro de espacio dentro del tablero, ya que se requirió de 17 relés. Las características técnicas del relé seleccionado se muestran en la Tabla 50.

Figura 65

Dimensiones del relé de interface seleccionado.



Nota. Tomado de la hoja técnica del relé de interface. *Dimensiones relé de interfaz BTWR P16E29*, por WEG, 2022.

Tabla 50

Características técnicas de relé de interface seleccionado.

Descripción	Valor o característica	Esquema
Tipo de contacto	1 contacto (NA/NC)	
Material del contacto	AgSnO ₂	
Valores nominales de operación del contacto	6A 250VAC / 30VDC	
Voltaje de conmutación máximo	400VAC / 125VDC	
Corriente de conmutación máximo	6 A	
Potencia de conmutación máxima	1500VA / 180W	
Vida útil mecánica	1 x 10 ⁷ operaciones	
Vida útil eléctrica	(NA) 3 x 10 ⁴ operaciones (NC) 1 x 10 ⁴ operaciones	
Tiempo de operación (voltaje nominal)	10 ms máx.	
Tiempo de liberación (voltaje nominal)	5 ms máx.	
Humedad	5 % hasta 85 %	
Temperatura de operación	-40 °C hasta 85 °C	
Voltaje de entrada (V _N)	115V, 230V (AC/DC)	
Voltaje de operación	0.8 x V _N	
Voltaje de liberación	0.2 x V _N	
Calibre máximo del cable	2.5 mm ²	
Tipo de montaje	riel DIN fijo	
Indicador de relé	LED verde	
Riel de montaje	MR 35 x 7.5 / MR 35 x 15	

Nota. Tomado de la hoja técnica del producto seleccionado. Relé de interfaz BTWR P16E29, por WEG, 2022.

Dimensionamiento de switch para ampliación de red ethernet

Según Siemens (2018) menciona que el CPU 1215C posee 2 puertos de comunicación Ethernet Profinet, de los cuales uno de ellos fue destinado a la comunicación entre el monitor HMI y el PLC. El segundo puerto podría ser utilizado para la comunicación entre un solo computador personal, sin embargo, fue necesario una ampliación de puertos, en la cual, la opción más económica y eficaz fue la implementación de un switch con las características mostradas en la Tabla 51, esto facilitó la conexión entre computadores de operación y de mantenimiento. El consumo de corriente de este dispositivo está establecido por la característica de su fuente de alimentación externa como se establece en (179).

$$I_{switch} = 0.6 [A] \quad (179)$$

Tabla 51

Características técnica de switch para conexiones ethernet.

Característica	PLC y módulos	Modelo
Alimentación externa	100-240VAC, 50/60 Hz	
Fuente de alimentación	Adaptador de 9 VDC / 0.6 A	
Marca	Tp-link	
Consumo de potencia	2.05 W	
Interfaz	8 puertos	
Tamaño del búfer	2 Mb	
Tasa de transferencia	10/100 Mbps	
Estándares y protocolos	IEEE 802.3, CSMA/CD	
Temperatura de operación	0 a 40 [°C]	

Nota. Este dispositivo se implementará en el tablero de control, estará ubicado hacia uno de los costados ya que no es de montaje de riel DIN. Tomado de *Switch de sobremesa con 8 puertos a 10/100 Mbps*, por TP-Link, 2022.

Protección a sobre corrientes

En la norma NEC (2017) se establece que, la protección contra sobre corriente no debe exceder la requerida después de que se haya aplicado cualquier factor de corrección para la temperatura ambiente y el número de conductores. El conductor que se eligió fue de cobre 18 AWG, con lo cual el elemento de protección debe ser de 7 amperios, sin embargo, la norma menciona que las cargas continuas no deben superar los 5,6 amperios (187), es decir, el 80% de la corriente máxima. El consumo de corriente máximo de: PLC se muestra en (180), fuente de 24 VDC en (181), monitor HMI en (156), módulos en (182) y switch de ampliación en (183).

$$I_{PLC} = 1600 + 400 = 2000 [mA] \quad (180)$$

$$I_{Fuente} = 5000 [mA] \quad (181)$$

$$I_{Modulos} = 360 + 220 + 180 + 128 + 352 + 720 = 1960 [mA] \quad (182)$$

$$I_{Switch} = 600 [mA] \quad (183)$$

La suma total de las corrientes fue de 9685 [mA] como se muestra en (184), lo cual supera el valor permisible de la norma, la solución implementada fue utilizar dos fases. Para la primera fase se consideró la suma de la corriente del PLC, los módulos, la pantalla HMI y el switch de conexión ethernet, lo cual dio un resultado de 4685 mA como se muestra en (185). La segunda fase se destinó a la fuente de corriente continua de 24 V, en los apartados anteriores se estableció que la corriente máxima de esta fuente es de 5 amperios como se muestra en (186), debido a disponibilidad en el mercado, la corriente necesaria fue de 2.5 amperios. El breaker seleccionado fue de 6 amperios, ya que el 80% permisible es de 4.8 amperios, y al multiplicar la corriente de la primera fase por 1.25 obtenemos un valor de 5.86 amperios como se muestra en (188), de la misma manera para la segunda fase (189), se obtuvo un valor de 6.25 amperios, sin embargo, el valor máximo en el diseño fue de 2.5 amperios mas no de 5 amperios, por lo tanto, los disyuntores seleccionados para ambas fases fueron de 6 amperios.

$$I_T = I_{PLC} + I_{Modulos} + I_{Fuente} + I_{Switch} + I_{HMI} = 9685 [mA] \quad (184)$$

$$I_{1F} = I_{PLC} + I_{Modulos} + I_{Switch} + I_{HMI} = 4685 [mA] \quad (185)$$

$$I_{2F} = I_{Fuente} = 5000 [mA] \quad (186)$$

$$I_{P_{max}} = 7 * 0.8 = 5.6 [A] \quad (187)$$

$$I_{B_1} = I_{1F} * 1.25 = 5.86 [A] \quad (188)$$

$$I_{B_2} = I_{2F} * 1.25 = 6.25 [A] \quad (189)$$

El elemento de protección contra sobre corriente elegido fueron dos interruptores termomagnéticos (breakers) de un polo, para usar con alambre de cobre de 18 AWG, los detalles se muestran en la Tabla 52.

Tabla 52

Características técnicas del interruptor termomagnético.

Requerimientos	Valor o característica	Esquema
Alimentación	100 a 230 VAC 50/60 Hz	
Cantidad de polos	1P	
Marca	Schneider Electric	
Tipo de contacto	Normalmente abierto (NA)	
Montaje	Riel DIN, fijo	
Corriente nominal	6A	
Normas	EN 60898-1 EN 60947-2 IEC 60898-1	
Grado de protección	IP20	
Clase de limitación	3 según EN 60898-1 / IEC 60947-2	

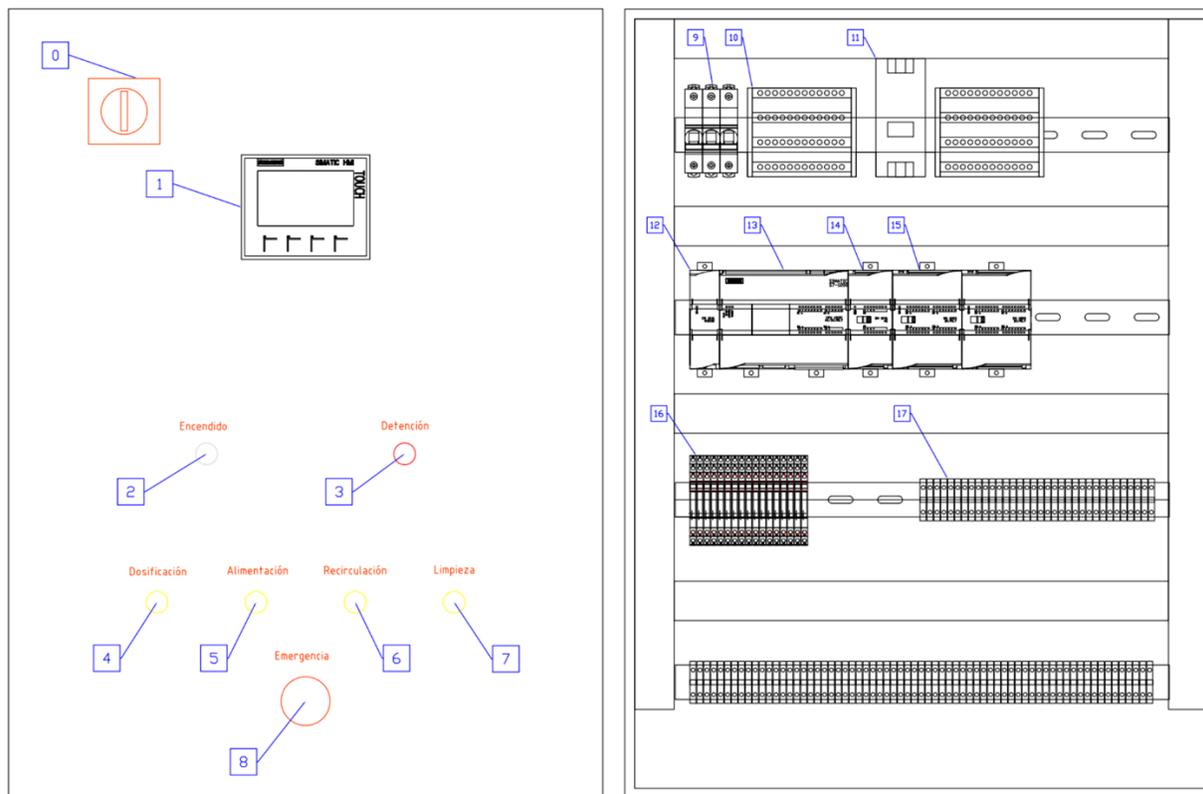
Nota. Tomado de *Interruptor termomagnético riel Acti 9 iC60N 1P 6 A Curva C*, por Schneider Electric, 2022.

Dimensionamiento del tablero de control

Para armar los circuitos fue necesario establecer elementos de maniobra, control y otros adicionales que permitieron realizar conexiones y distribuciones ordenadas, en la Figura 66 se muestra un fragmento del plano de panel (ver anexo A), indicando las partes más relevantes del tablero y se detallan las partes en la tabla. Las dimensiones mínimas se basaron en el planteamiento de una posible expansión de módulos del PLC a largo plazo, quedando el segundo riel con: 1 módulo de comunicación RS232, 1 CPU 1215C, 2 módulos de entradas analógicas, 3 módulos de salidas digitales, las dimensiones geométricas de cada elemento se muestran en el anexo A.

Figura 66

Esquema del tablero de control.



Nota. Se muestra al lado izquierdo la tapa del gabinete, y al lado derecho el interior del tablero.

Tabla 53*Lista de elementos del tablero de control*

Ítem	Valor o característica	Cantidad
0	Interruptor principal	1
1	Pantalla HMI	1
2	Indicador de encendido	1
3	Indicador de paro o detención	1
4	Indicador de dosificación	1
5	Indicador de alimentación	1
6	Indicador de recirculación	1
7	Indicador de limpieza	1
8	Pulsador de paro de emergencia	1
9	Breaker de 6 A	3
10	Repartidor de cables	2
11	Fuente de alimentación de 24 VDC	1
12	Módulo de comunicación RS232 CM1241	1
13	CPU 1215C AC/DC/Relé	1
14	Módulo de entradas analógicas SM1223	1
15	Módulo de salidas digitales tipo relé SM1223	2
16	Relés de interfaz de 6 A 100 a 230 VAC	17
17	Borneras para riel DIN	60

Las dimensiones mínimas para el tablero fueron de: 745 [mm] x 475 [mm] x 150 [mm], sin embargo, Beaucoup (2020) establecen que, se fabrican tableros de servicio pesado de dimensiones 800 [mm] x 600 [mm] x 250 [mm], el cual fue seleccionado como se muestra en la Figura 67.

Figura 67

Gabinete *Beaucoup* seleccionado.



GABINETE PARA SERVICIO PESADO, PUERTA CIEGA

CÓDIGO	REFERENCIA	DIMENSIONES (mm)			PESO APROX. (kg.)	TIPO DE PUERTA		ESPEORES			TIPO DE ANCLAJE
		ALTO (H)	ANCHO (W)	PROF. (D)		NORMAL	BISELADA	CUERPO	PUERTA	DOBLE FONDO (S/C)	
I-0311	GSP-202015/C	200	200	150	2.2	X		1 mm	1 mm	1.2 mm	Tornillo, arandela de cucho y taco fisher
I-0312	GSP-302015/C	300	200	150	3.0	X		1 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0313	GSP-303020/C	300	300	200	4.5		X	1 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0314	GSP-403020/C	400	300	200	5.7		X	1 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0315	GSP-304020/C	300	400	200	5.7		X	1 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0316	GSP-404020/C	400	400	200	7.1		X	1 mm	1 mm	1.2 mm	Soporte metálico con tornillo y taco fisher
I-0316-1	GSP-504030/C	500	400	300	9.8		X	1.5 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0317	GSP-604020/C	600	400	200	9.8		X	1.2 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0318	GSP-406020/C	400	600	200	9.8		X	1 mm	1 mm	1.2 mm	
I-0319	GSP-606020/C	600	600	200	18.5		X	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	
I-0319-1	GSP-605020/C	600	500	200	15.9		X	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	
I-0319-2	GSP-705030/C	700	500	300	22.6		X	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	
I-0320	GSP-806025/C	800	600	250	25.2		X	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	
I-0320-1	GSP-806030/C	800	600	300	26.6		X	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	
I-0320-2	GSP-806040/C	800	600	400	29.5		X	1.5 mm	1.5 mm	1.5 mm	

Nota. Tomado de *Gabinete de pared servicio pesado* (p.15), por Beaucoup, 2023.

Indicadores de luz. Estos elementos servirán para visualizar cuando el sistema dosificador este operando, es por ellos que se utilizaron los colores respectivos. El color verde indicará que la máquina está encendida, el indicador rojo, que cualquier proceso ha sido detenido a voluntad, y los indicadores amarillos indicarán que se están ejecutando una de las cuatro operaciones, los indicadores utilizados se muestran en la Figura 68.

Figura 68

Indicadores luminosos.



Nota. Tomado de *Luces piloto*, por Bekam, 2017.

Interruptor principal. Es te elemento servirá para alimentar a todo el tablero desde la parte externa, este tipo de interruptores son de color rojo con amarillo, y son considerados interruptores de emergencia, sin embargo, sirven para energizar los circuitos internos de un tablero de control sin la necesidad de abrir el gabinete, evitando el mal manejo de los mismos, en la **Figura 69** se muestra en interruptor de 4 polos utilizado.

Figura 69

Interruptor de cuatro polos para paneles de control.



Nota. Tomado de *Interruptores rotativos para candado (4 polos)*, (p. C33), por (Automatización y control ingeniería S.A.S., 2023).

Pulsador de emergencia. Según las normas, los circuitos deben tener un elemento de maniobra que permita detener el funcionamiento del mismo en caso de averías, fenómenos o accidentes u otros eventos anormales al funcionamiento de diseño. En la Figura 70 se muestra el pulsador de emergencia normalmente cerrado que se implementó en el los circuitos y programación del PLC.

Figura 70

Pulsador de emergencia tipo hongo.



Nota. Tomado de *Hongo gira para soltar* (p. 24), por WEG, 2022a.

Elementos adicionales

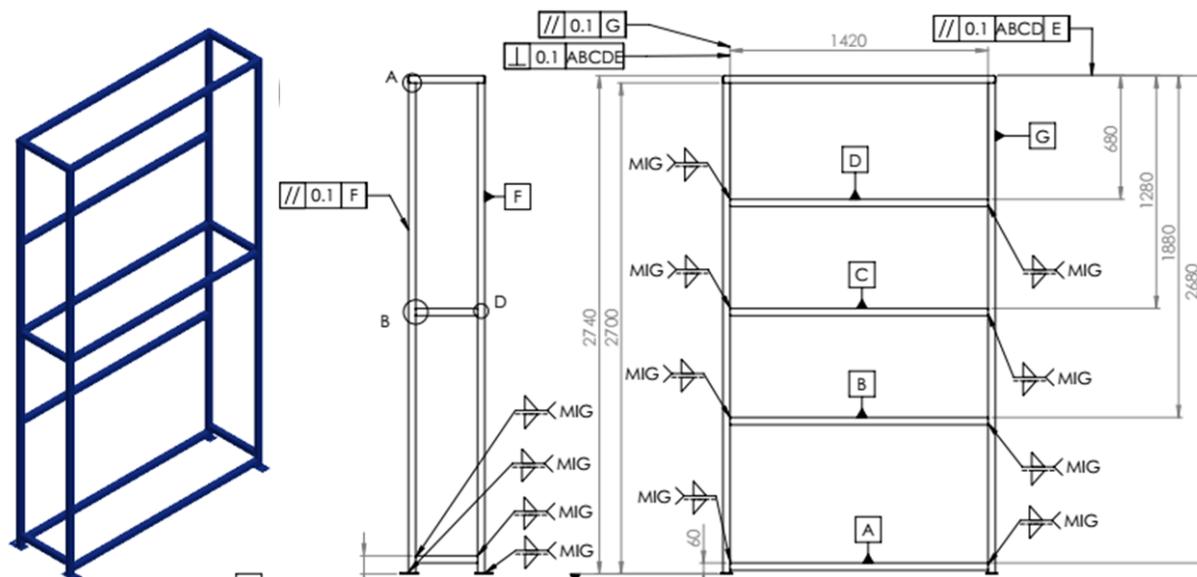
Una vez establecidas las dimensiones de todos los elementos requeridos en el sistema, se buscó una forma de fijación de las tuberías, así como el ensamble de la válvula de control, tablero de control y organización de los cables eléctricos.

Estructura para tuberías, accesorios, tablero y actuadores. Se realizaron dos estructuras con tubos cuadrados de 2 [mm] de espesor, como se detalla en el anexo C. Ambas estructuras sirvieron para fijar las tuberías de aire comprimido, líquidos y mangueras con cables eléctricos. La diferencia fue que una de estas estructuras sirvió para montar el tablero de control, la válvula de control y el regulador de presión. En cambio, la segunda estructura sirvió

para fijar los acoples rápidos para la alimentación de aditivos a los tanques IBC, garantizando la estabilidad de todos los componentes del sistema.

Figura 71

Dimensiones de las estructuras para tuberías

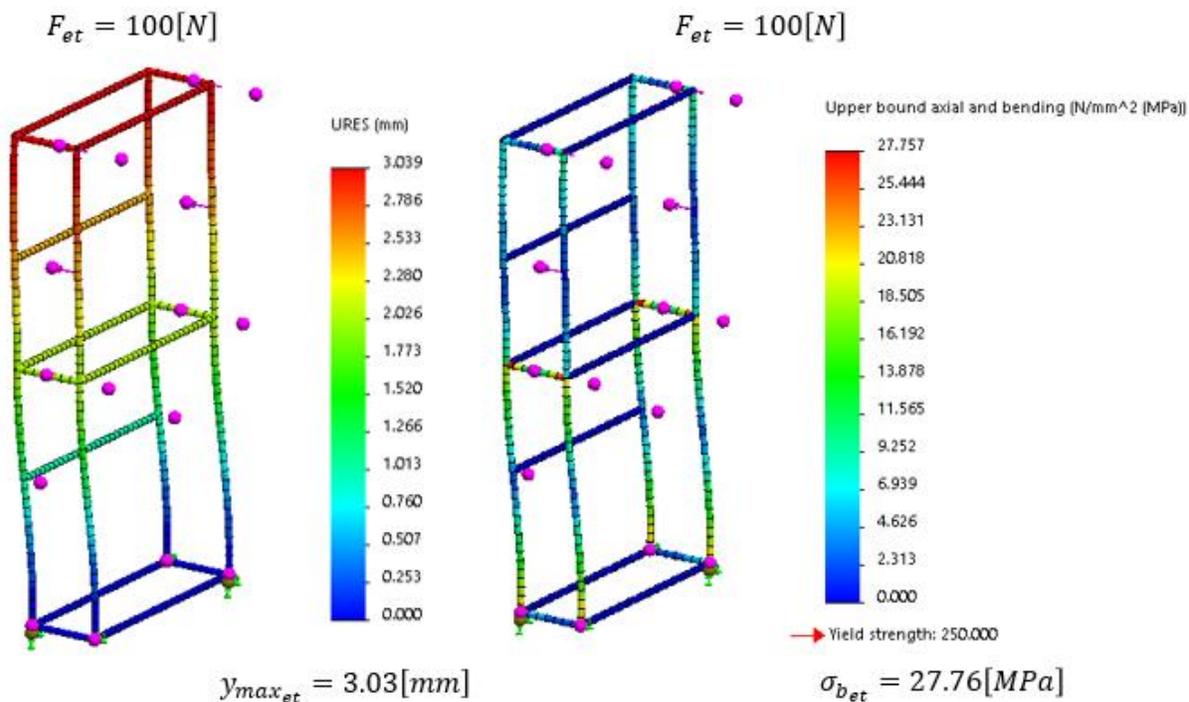


Nota. Los esquemas mostrados son fragmentos del plano de detalle del anexo C.

Las bombas de doble diafragma presentan pulsaciones durante su funcionamiento, estas pulsaciones causarán vibraciones en las tuberías, y por lo tanto en la estructura de las mismas, por lo tanto, se realizó una simulación CAE de la estructura sometida a flexión con cargas de 100 [N] en cada vértice de la estructura, el objetivo fue verificar que la estructura no presente una deflexión crítica que reduzca la vida útil de las tuberías. También se busca garantizar que los elementos montados sobre las estructuras no sufran averías, por choques mecánicos en la Figura 72 se muestra la deflexión máxima de 3.04 [mm] en el punto más alto de la estructura, la carga de 100 [N] es un valor de diseño, la carga dependerá de la energía neumática e hidráulica, normalmente el sistema operará a 80 [psi]. El esfuerzo máximo en la simulación fue de 27.76 [MPa], y la resistencia a la fluencia del material ASTM A36 es de 250 MPa.

Figura 72

Simulación de estructura a cargas estáticas.

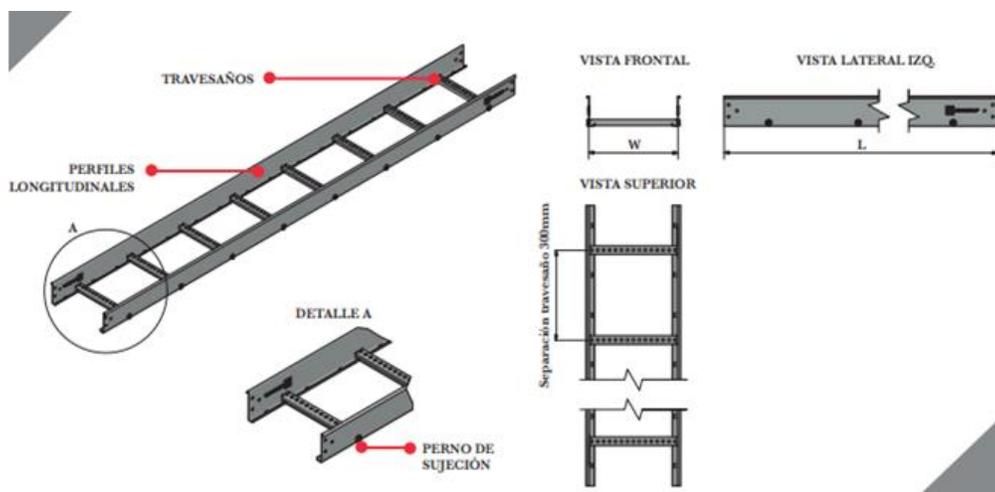


Nota. Las estructuras fueron soldadas mediante proceso MIG para obtener un cordón más uniforme sin porosidades, evitando que las juntas se debilitaran.

Bandeja para cables y tuberías. El ancho de las estructuras diseñadas fue de 400 [mm], se tomó como referencia esta misma dimensión para que las bandejas pueda ser empotradas sobre las estructuras, esto facilitó a que se pueda organizar adecuadamente la distribución de tuberías y cables eléctricos. Para ello se utilizaron dos bandejas de 2400 [mm] de largo, con sus respectivas tapas. En la Figura 73 se muestra el esquema del fabricante de las bandejas, y la tabla de donde se seleccionaron los elementos de este proyecto. Se tuvo la alternativa de altura de 80 [mm], sin embargo, no estaban disponibles en el mercado durante el período de tiempo de la ejecución del trabajo de titulación, quedando únicamente la alternativo de altura de 100 [mm].

Figura 73

Bandejas seleccionadas



**MODELOS
DISPONIBLES**



BANDEJA PORTACABLES SIN TAPA, ACERO PRE-GALVANIZADO, TIPO ESCALERA

CÓDIGO	REFERENCIA	DIMENSIONES (mm)			CAPACIDAD DE CARGA		
		ALTO (H)	ANCHO (W)	LONG. (L)	CARGA DE FALLA (mm)	CARGA (Kg/m)	DESIGNACIÓN NEMA
I-0711	BNJE-100/80	80	100	2400	162	45	8AA
I-0712	BNJE-150/80	80	150	2400	162	45	8AA
I-0713	BNJE-200/80	80	200	2400	162	45	8AA
I-0714	BNJE-250/80	80	250	2400	162	45	8AA
I-0715	BNJE-300/80	80	300	2400	162	45	8AA
I-0716	BNJE-400/80	80	400	2400	162	45	8AA
I-0771	BNJE-100/100	100	100	2400	162	45	8AA
I-0772	BNJE-150/100	100	150	2400	162	45	8AA
I-0773	BNJE-200/100	100	200	2400	162	45	8AA
I-0774	BNJE-250/100	100	250	2400	162	45	8AA
I-0775	BNJE-300/100	100	300	2400	162	45	8AA
I-0776	BNJE-400/100	100	400	2400	162	45	8AA

*Incluye 2 uniones rígidas con tornillería de sujeción.

Nota. Tomado de *Bandeja tipo escalera* (p.76), por Beaucoup, 2023.

Diseño del sistema de control

Para el diseño del sistema de control se observó previamente las condiciones de funcionamiento de la planta a controlar, es decir, una vez ya implementado el sistema, se visualizó y se determinó las posibles perturbaciones a los que el controlador debía ser capaz de compensar, sin embargo, un sistema de control convencional normalmente está diseñado para mantener un valor deseado en tiempo real, según la dinámica del sistema podría ser rápido o lento según el caso, pero el objetivo es mantener el error lo más cercano a cero durante su funcionamiento. En este sistema dosificador no es el mismo caso, lo que se requiere es que una vez que se alcance el valor de masa deseado, el sistema finalice la operación y, además, al existir la posibilidad de necesitar realizar una mezcla de cuatro aditivos, el sistema debe controlar el proceso de dosificación de cada uno con la limitación ya mencionada.

Las dimensiones del sistema de tuberías de cada tanque varían, así como las propiedades físicas y químicas de cada aditivo, esto provoca que la dinámica del sistema también varíe, ya que los actuadores reaccionarán de distinta manera. Para aplicar un sistema de control convencional como el PID, se requeriría realizar la identificación de cuatro funciones de transferencia, lo cual es un proceso bastante largo y requiere de muchos recursos de software para la adquisición de datos y el sistema sería una aproximación no garantizada para el funcionamiento a largo plazo. Inclusive, si se desea en trabajos futuros expandir la capacidad del sistema, sería más dificultoso implementar el sistema de control requerido para más tanques. Es por ello, que se decidió implementar un sistema de control no convencional por lógica difusa que no requiere de modelos matemáticos, y se adapta de mejor manera a la dinámica del todo el sistema y de cada componente, considerando las mismas variables de entrada y salida, para ello se siguieron los siguientes pasos: establecer las variables de entrada y salida, definir un universo de discurso, establecer las variables lingüísticas con sus respectivos conjuntos difusos definidos por funciones de membresía correspondientemente,

establecer reglas de control para la fusificación y finalmente aplicar un método de defusificación que mandará una señal de salida nítida para el control de los actuadores del sistema.

Variables del sistema

El proyecto implementado es un sistema de masa con una variable de entrada $m_i(t)$ que será la masa deseada, y una variable de salida $m_o(t)$ que será la masa medida. Como se muestra en la Figura 74 la entrada de controlador es el error que se calcula de la diferencia entre la masa medida y la masa deseada definida en la ecuación (190), y en la salida del controlador se obtendrá un valor de porcentaje de apertura de la válvula proporcional $a_{VP}(t)$.

$$e(t) = m_i(t) - m_o(t) \quad (190)$$

Donde:

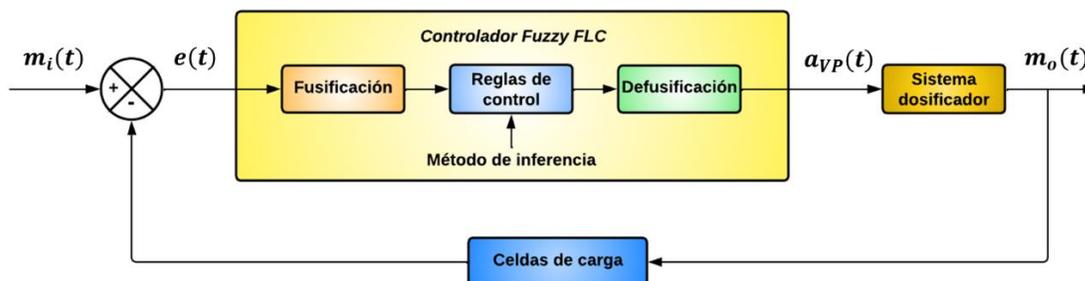
$e(t)$: Error entre masa deseada y masa medida [kg].

$m_i(t)$: Masa deseada [kg].

$m_o(t)$: Masa medida [kg].

Figura 74

Diagrama de bloques del sistema de control implementado.



Universo de discurso

El universo de discurso se definió para la variable de entrada y para la variable de salida del controlador. El límite de masa dosificada para cada aditivo será de 250 [kg], por lo tanto, el universo de discurso de entrada está definida en la ecuación (191), el porcentaje de apertura

de la válvula proporcional, según las pruebas realizadas, presentó un correcto funcionamiento dentro del rango de 3.0 hasta 60.0 [%], por lo tanto, queda definido el universo de discurso para la variable de salida en la ecuación (192).

$$X_e = \{0.0, \dots, 250.0\} \quad (191)$$

$$X_{a_{VP}} = \{3.0, \dots, 60.0\} \quad (192)$$

Variables lingüísticas

Las variables lingüísticas serán las magnitudes de entrada y salida respectivamente, estas son: error en unidad de kilogramo [kg] y apertura de válvula en unidad porcentual [%], correspondientemente.

Conjuntos difusos. Se consideró un número total de 8 conjuntos tanto para la entrada como para la salida, los cuales están definidos por funciones de membresía triangulares y trapezoidales correspondientes a las ecuaciones (10) y (11), y sus parámetros están definidos en la Tabla 54 para los conjuntos de entrada de la función de membresía $\mu_E(e)$, y en la Tabla 55 para los conjuntos de salida de la función $\mu_{AV}(a_{vp})$.

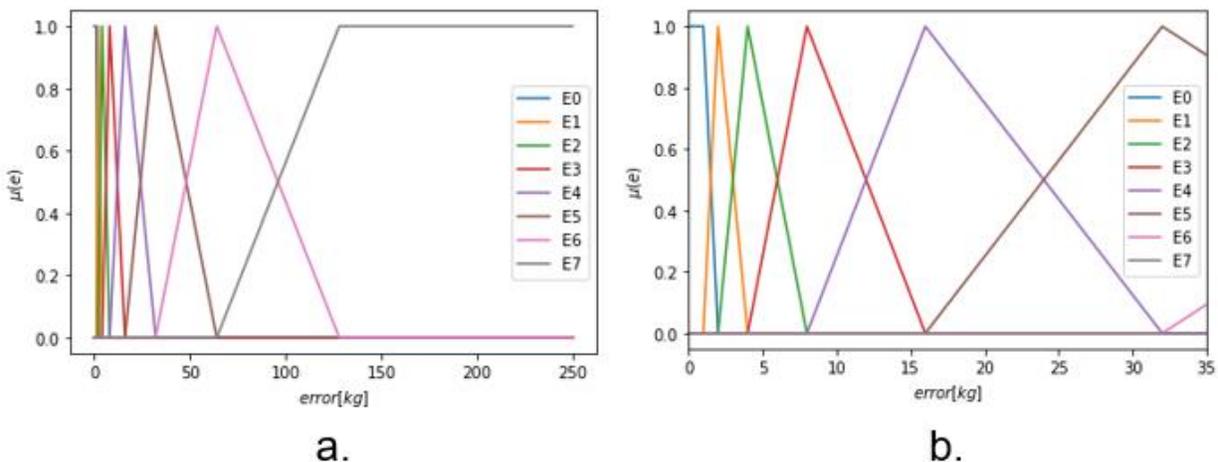
Tabla 54

Conjuntos difusos de entrada del controlador.

Conjuntos de entrada	Función de membresía	a	b	c	d
E0	Trapezoidal	0	0	1	2
E1	Triangular	1	2	4	-
E2	Triangular	2	4	8	-
E3	Triangular	4	8	16	-
E4	Triangular	8	16	32	-
E5	Triangular	16	32	64	-
E6	Triangular	32	64	128	-
E7	Trapezoidal	64	128	250	250

Figura 75

Funciones de membresía de la variable de entrada.



Nota. En la figura a. se observa todo el universo de discurso y en la figura b. se limita el eje hasta 35 kilogramos.

Las funciones de membresía de la entrada se muestran en la Figura 75, y las de salida en la Figura 76 cabe mencionar que las funciones de membresía, para que tengan una respuesta apropiada, es conveniente que se crucen en 0.5.

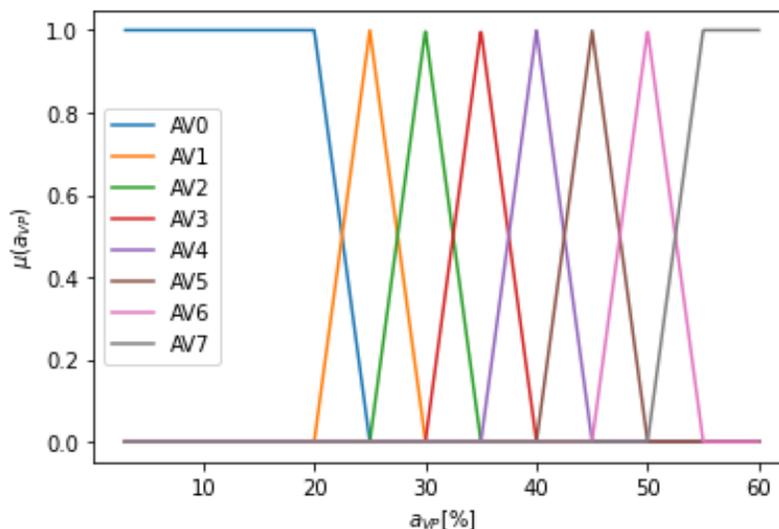
Tabla 55

Conjuntos difusos de salida del controlador.

Conjuntos de salida	Función de membresía	a	b	c	d
AV0	Trapezoidal	3	3	20	25
AV1	Triangular	20	25	30	-
AV2	Triangular	25	30	35	-
AV3	Triangular	30	35	40	-
AV4	Triangular	35	40	45	-
AV5	Triangular	40	45	50	-
AV6	Triangular	45	50	55	-
AV7	Trapezoidal	50	55	60	60

Figura 76

Funciones de membresía de la variable de salida.



Reglas de control. Previamente a la fusificación, se establecieron las reglas de control en la Tabla 56 que se deben tomar en cuenta para el control, ya que se fundamenta en la inferencia lógica.

Tabla 56

Reglas de control del sistema dosificador de aditivos.

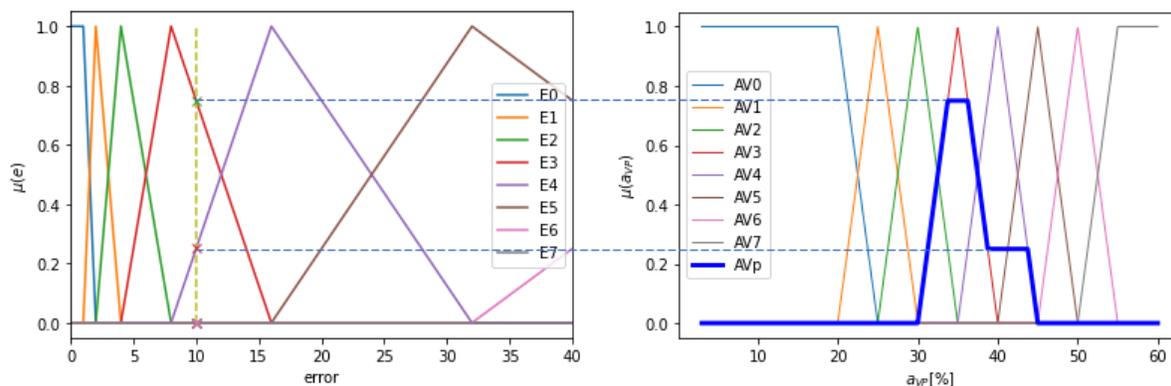
Error	Apertura	Regla
E0	AV0	Si el error es E0, entonces la apertura será AV0.
E1	AV1	Si el error es E1, entonces la apertura será AV1.
E2	AV2	Si el error es E2, entonces la apertura será AV2.
E3	AV3	Si el error es E3, entonces la apertura será AV3.
E4	AV4	Si el error es E4, entonces la apertura será AV4.
E5	AV5	Si el error es E5, entonces la apertura será AV5.
E6	AV6	Si el error es E6, entonces la apertura será AV6.
E7	AV7	Si el error es E7, entonces la apertura será AV7.

Fusificación

La señal de entrada al controlador será un valor nítido establecido por $e(t)$, este valor tendrá un grado de pertenencia en cada uno de los 8 conjuntos difusos establecidos, y considerando las reglas de control de la Tabla 56, se aplica el método de inferencia Modus ponens de la ecuación (16). Y según el operador de implicación de Mamdani de la ecuación (17) se consideraron los valores mínimos del punto de corte, para ilustrar esta idea se tomó como ejemplo un valor de $e(t) = 10$ [kg], en la Figura 77 se muestran los puntos de corte en las funciones de membresía $\mu_E(e)$, y finalmente estos cortes se agregan a una sola función de membresía de salida $\mu_{AV'}(a_{vp})$ tratada, como un sistema disyuntivo, aplicando la ecuación (15).

Figura 77

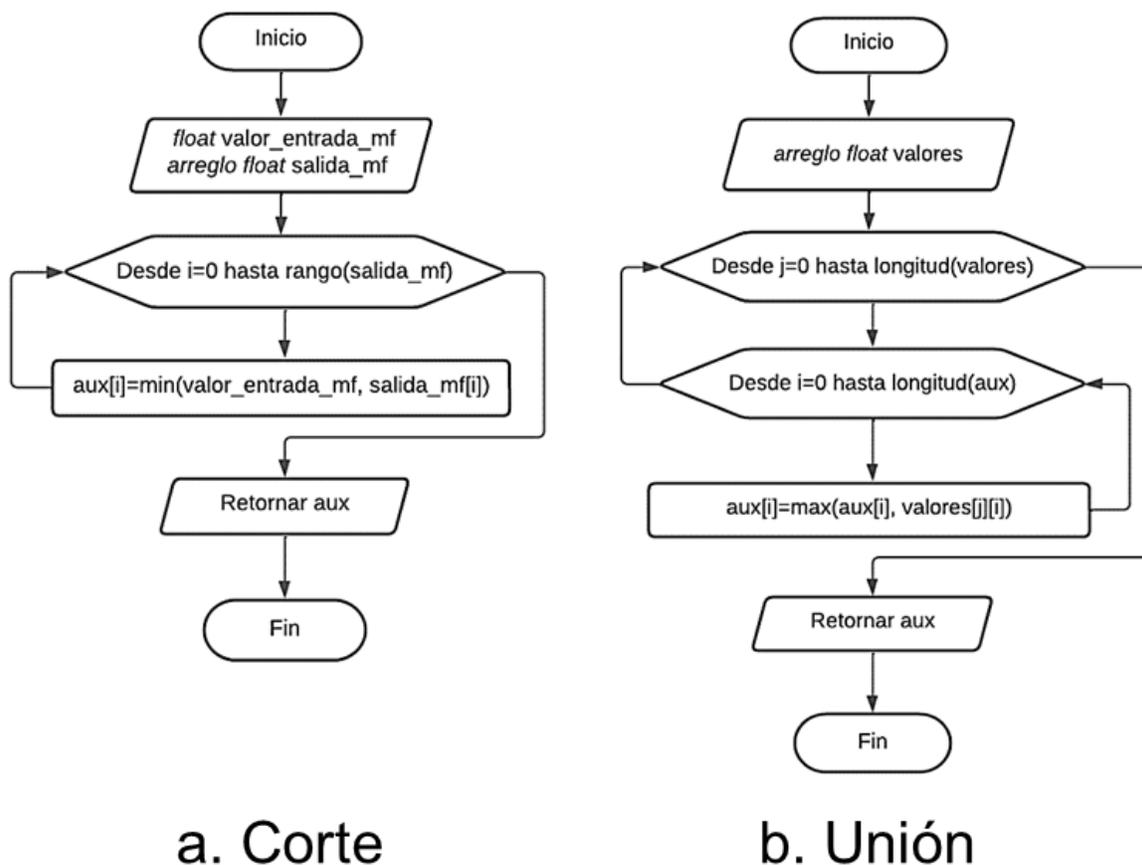
Fusificación de la entrada al controlador.



Para realizar el corte se utilizó el algoritmo que se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 78 donde se muestra que en el universo de discurso interpretado como un arreglo numérico se evalúa el grado de pertenencia del error de 10 [kg] de las funciones de membresía de entrada E3 y E4, la inferencia corresponderá a las funciones de membresía de salida AV3 y AV4, y se almacenan los valores mínimos de cada función, luego mediante el algoritmo de unión, estos valores de salida almacenados se evalúan los máximos de cada función según el porcentaje de apertura, creando una sola función resultante AVp de color azul en la Figura 77.

Figura 78

Diagramas de flujo del algoritmo de fusificación.



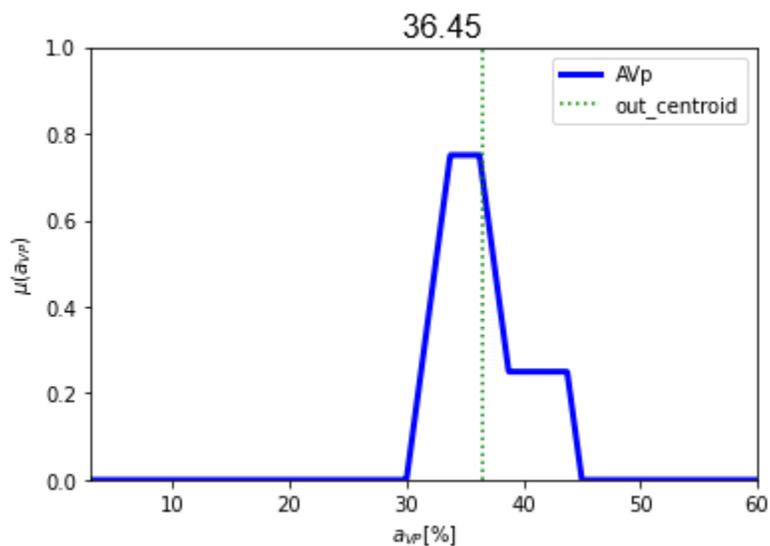
Nota. En el lenguaje de programación, se deberá restringir el ingreso de datos no numéricos.

Defusificación

La función de membresía de salida tratada, dio como resultante un área bajo la curva, que es interpretado como un conjunto difuso, que debe ser transformado a un valor nítido, es decir, un valor único que será aquel que determine directamente el porcentaje de apertura de la válvula proporcional, para ello se aplicó el método de defusificación del centroide, definido en la ecuación (22). En la Figura 79 se muestra el valor de apertura resultante de 36.45 % para un valor instantáneo de $e(t) = 10$ [kg].

Figura 79

Defusificación de la función de membresía de salida tratada.

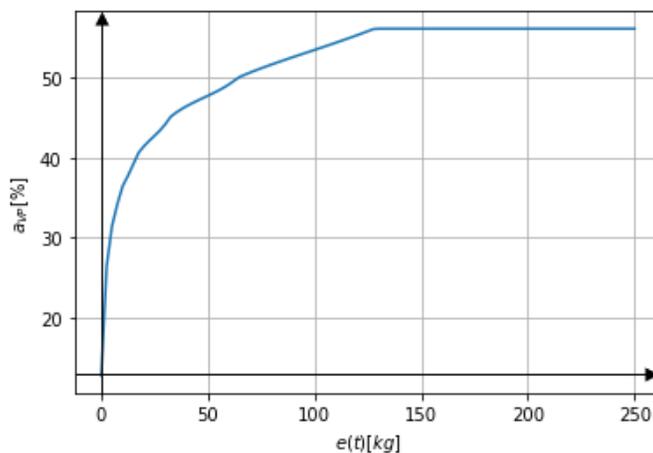


Apertura de la válvula vs. Error

Con los parámetros establecidos al controlador y el método del centroide, en la Figura 80 se puede observar que la respuesta de la apertura es rápida cuando el error tiende a cero sin cambios abruptos.

Figura 80

Respuesta del controlador con el método del centroide.



Diseño de software

El tablero de control únicamente posee dos elementos de maniobra que son: el interruptor de emergencia y el pulsador de paro de emergencia tipo hongo. Para operar el sistema dosificador se ha implementado dos opciones: mediante una HMI en el tablero de control, o a su vez mediante un sistema SCADA que podrá ser utilizado desde un computador de una oficina, básicamente se tendrán disponibles los mismos objetos en ambas interfaces, sin embargo, en el sistema SCADA debido a que se dispone de mayor espacio visual, se ha incluido objetos de monitorización que indicarán el estado de los actuadores durante una operación.

Diseño de la interfaz HMI

Para esta interfaz se decidió establecer cinco imágenes: principal o raíz, dosificación, alimentación, recirculación y limpieza. Cada una posee los objetos mínimos necesarios para la operación adecuada del sistema dosificador, en la Tabla 57 se detalla la simbología utilizada para identificar los objetos dentro de cada pantalla de la interfaz HMI.

Pantalla principal. En esta imagen se muestra las opciones de: dosificación, alimentación, recirculación y limpieza. Para realizar la operación descrita se deberá pulsar en el botón de texto o en el ícono correspondiente, como muestra la Figura 81.

Figura 81

Pantalla principal de la interfaz HMI.



Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Tabla 57*Simbología de los objetos en la interfaz HMI.*

Nombre	Descripción
A1	Selección de aditivos para dosificación
A2	Cuadros de texto para ingreso del peso deseado
A3	Botón de paro y retorno a pantalla principal
A4	Botón de inicio de dosificación
A5	Botón de paro del proceso de dosificación
B1	Información de peso disponible de cada aditivo
B2	Información del peso dosificado de cada aditivo
B3	Información del peso total objetivo
B4	Información del peso actual del contenido de la tolva
B5	Información de apertura de válvula proporcional [%]
C1	Selección del aditivo para reabastecimiento en tanque IBC
C3	Botón de inicio de alimentación al tanque IBC seleccionado
C4	Botón de paro del proceso de alimentación
D1	Información del estado del tanque IBC y peso disponible
D2	Información del aditivo seleccionado
D3	Información de apertura de válvula proporcional [%]
E1	Selección del aditivo para recirculación en tanque IBC
E2	Selección del tiempo de recirculación
E4	Botón de inicio de recirculación
E5	Botón de paro del proceso de recirculación
F1	Información del tiempo del proceso transcurrido
F2	Información del estado del tanque IBC y peso disponible
F3	Información de apertura de válvula proporcional [%]
G1	Selección del tiempo de limpieza de la tolva
G3	Botón de inicio de limpieza
G4	Botón de paro del proceso de limpieza
H1	Información del tiempo del proceso transcurrido
H2	Información del peso actual del contenido de la tolva
I1	Estado de electroválvulas

Pantalla de operación para dosificación de aditivos.

En la pantalla de dosificación

1. En el área A1 se selecciona los aditivos que desean dosificar.
2. En el área A2 se ingresa el peso deseado (mínimo 10, máximo 250 kg).
3. El área informativa B1 muestra la cantidad de aditivo disponible en el tanque IBC, el valor ingresado debe ser menor o igual a este.
4. El área informativa B4 muestra la cantidad de líquido dentro de la tolva, si este valor es mayor a 0.2 kg, el usuario deberá vaciar la tolva, antes de dar inicio al proceso.
5. Si se cumplen las condiciones se podrá visualizar el botón de encendido A4, con el cual se podrá dar inicio al proceso de dosificación.
6. El botón A3 permitirá detener el proceso y regresar a la pantalla principal, y el botón A5 permitirá únicamente detener el proceso.

Figura 82

Pantalla de la operación de dosificación en la interfaz HMI.



Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla de operación para alimentación de materia prima a tanques IBC. En la pantalla de alimentación Figura 83, se debe realizar los siguientes pasos para iniciar el proceso:

1. En el área C1 se selecciona el aditivo que desea reabastecer.
2. El área informativa D1 muestra la masa disponible del aditivo correspondiente en el tanque IBC.
3. El área D2 muestra la información del aditivo que se va a ingresar al tanque IBC.
4. Es importante la verificación de conexión de la manguera en la válvula de entrada correspondiente; esta válvula debe estar abierta.
5. Con el botón C3 se dará inicio al proceso de alimentación o reabastecimiento.
6. Con los botones C4 o C2 se podrá detener el proceso. Si el tanque llega al límite de seguridad, se detendrá automáticamente.

Figura 83

Pantalla de la operación de alimentación en la interfaz HMI.



Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla de operación para recirculación de aditivos en tanques IBC. En la pantalla de recirculación que se muestra en la Figura 84 se deberá seguir los siguientes pasos para realizar correctamente la operación:

1. En el área E1 se selecciona el tanque IBC del aditivo que desea recircular.
2. En el área E2 se selecciona el tiempo que desea recircular, las opciones son: 30, 60, 90 o 120 segundos.
3. Mediante el botón E4 se dará inicio al proceso de recirculación.
4. En el área informativa F1 se podrá visualizar el tiempo transcurrido del proceso.
5. Para detener el proceso antes del tiempo asignado se podrá realizarlo mediante el botón E5, y para regresar a la pantalla principal, el botón E3.

Figura 84

Pantalla de la operación de recirculación en la interfaz HMI.



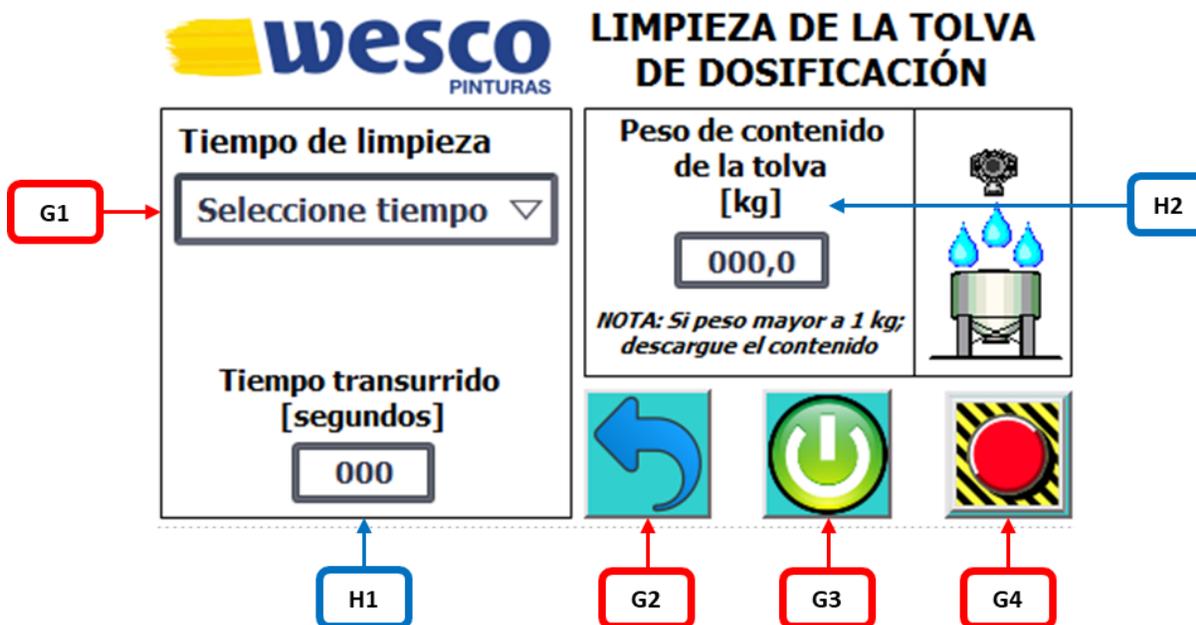
Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla de operación para limpieza de la tolva de dosificación. En la pantalla de limpieza que se muestra en la Figura 85 se deberá seguir los siguientes pasos para realizar correctamente la operación:

1. En el área G1 seleccionar el tiempo para realizar el proceso.
2. Verificar el área informativa H2, si muestra un valor mayor a 1 kg, debe vaciar la tolva.
3. Si se cumplen las condiciones se podrá visualizar el botón de encendido G3, con el cual se podrá dar inicio al proceso.
4. Podrá visualizar el transcurso del tiempo del proceso mediante H1.
5. El botón G2 permitirá detener el proceso y regresar a la pantalla principal, y el botón G4 permitirá únicamente detener el proceso.

Figura 85

Pantalla de la operación de limpieza de la tolva en la interfaz HMI.



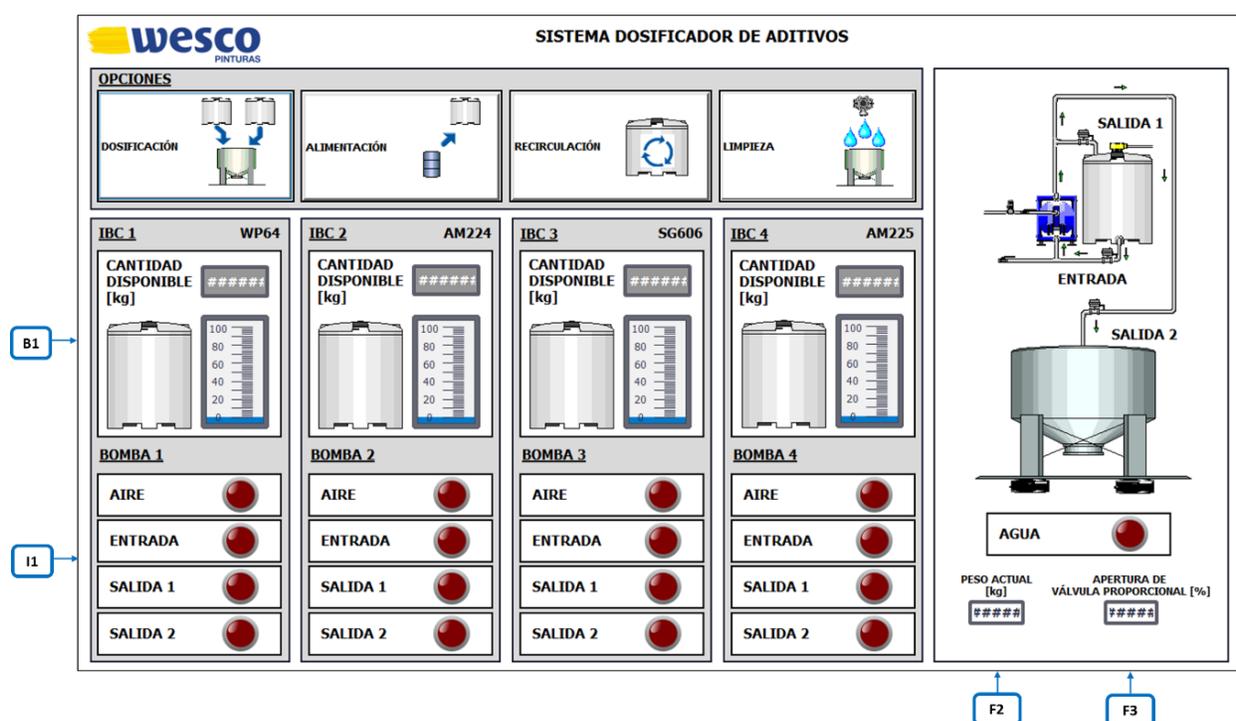
Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Diseño del sistema SCADA

La segunda opción que se implementó para la operación del sistema dosificador de aditivos fue mediante un sistema SCADA, el cual permite monitorizar el estado del sistema, y operar de manera similar a la interfaz HMI del tablero de control, en un computador que se comunicará con el PLC mediante conexión ethernet, de la misma manera mediante la Tabla 57 se establece la función de cada objeto dentro de las pantallas correspondientes.

Figura 86

Pantalla principal del sistema SCADA.



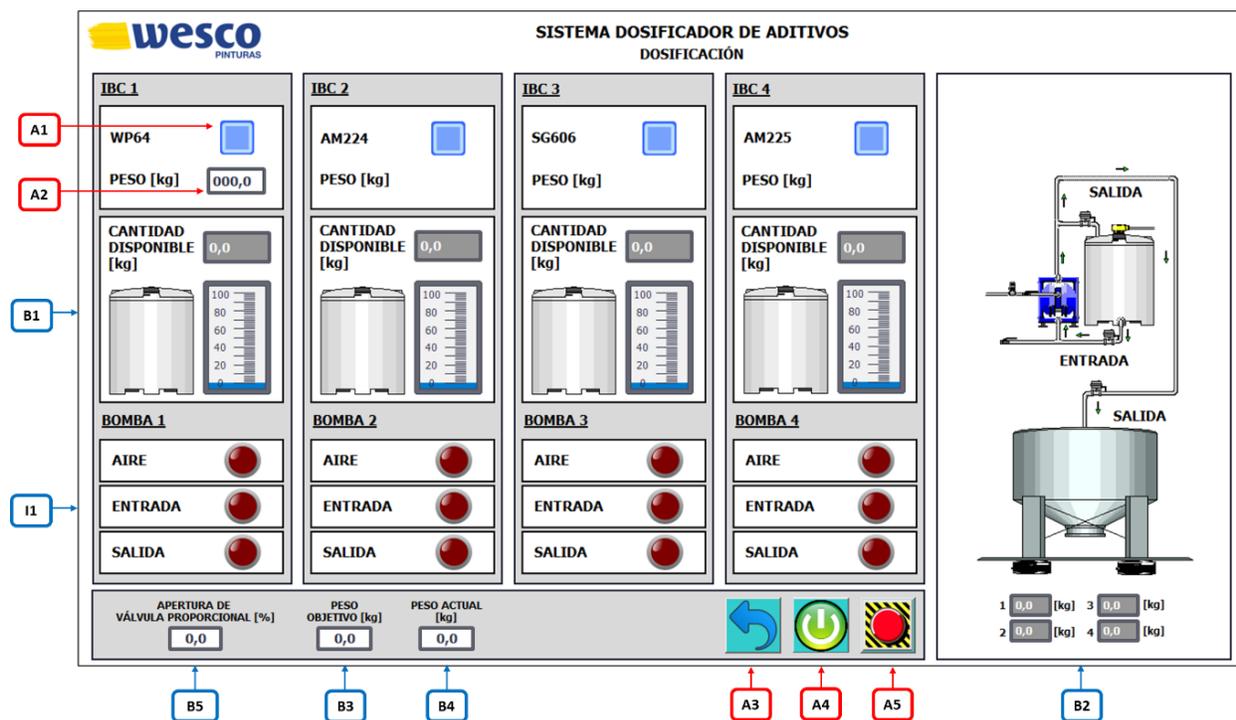
Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla principal. En esta imagen se muestra principalmente las opciones de: dosificación, alimentación, recirculación y limpieza. Sin embargo, se cuenta con indicadores para la monitorización del estado de las electroválvulas y la información en tiempo real de la lectura de sensores de nivel y peso. Para realizar una de las operaciones se deberá pulsar en el botón correspondiente, como muestra la Figura 86.

Pantalla de operación para dosificación de aditivos. En la pantalla de dosificación se deberá seguir los mismos pasos que se mencionaron en el diseño de la interfaz HMI, en la Figura 87 se muestra la simbología equivalente a los objetos de la interfaz HMI en el sistema SCADA.

Figura 87

Pantalla de la operación de dosificación en el sistema SCADA.

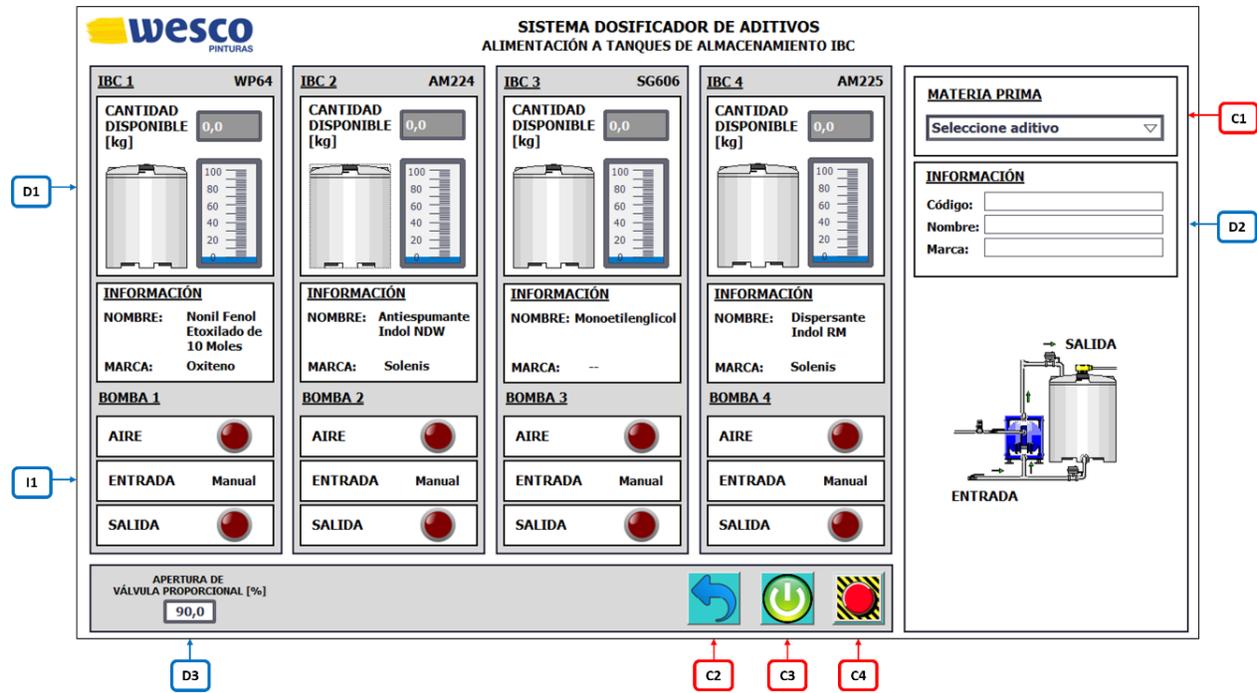


Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla de operación para alimentación de materia prima a tanques IBC. En la pantalla de alimentación Figura 88 se deberá seguir los mismos pasos que se mencionaron en el diseño de la interfaz HMI, de la misma manera se muestra la simbología equivalente a los objetos de la interfaz HMI en el sistema SCADA. El usuario podrá visualizar el estado de las electroválvulas de entrada al tanque IBC, aire comprimido de las bombas y el porcentaje de apertura de la válvula de control, que en este caso deberá estar abierta completamente, para acelerar el proceso.

Figura 88

Pantalla de la operación de alimentación en el sistema SCADA.

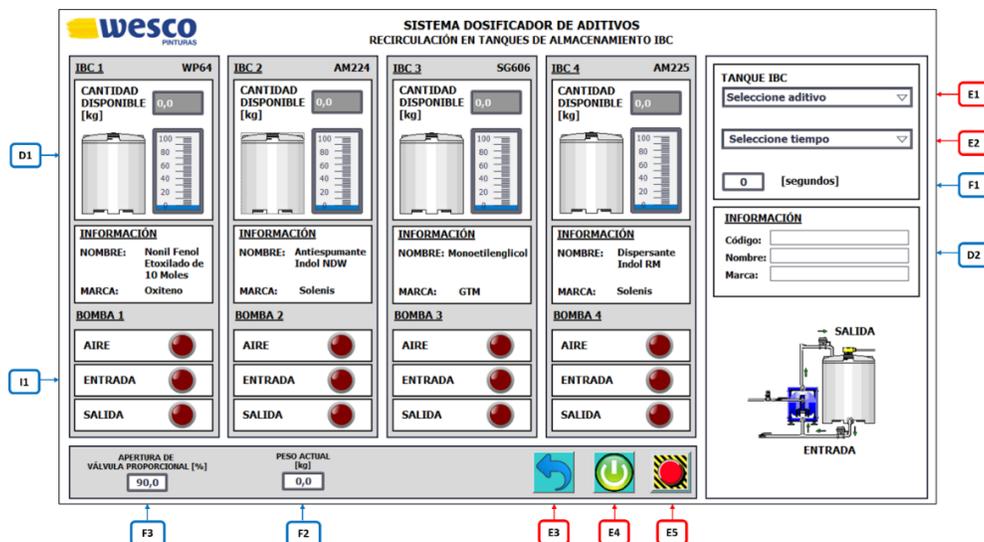


Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla de operación para recirculación de aditivos en tanques IBC. En la pantalla de recirculación que se muestra en la Figura 89 se deberá seguir los mismos pasos que se mencionaron en el diseño de la interfaz HMI, de la misma manera se muestra la simbología equivalente a los objetos de la interfaz HMI en el sistema SCADA. En este caso se podrá visualizar el estado de tres electroválvulas que corresponderán a la salida del tanque IBC, la entrada al mismo tanque y el flujo de aire comprimido para poner en funcionamiento las bombas de doble diafragma. También se podrá visualizar el porcentaje de apertura de la válvula proporcional, en donde se debe verificar que la apertura sea completa, ya que no se requiere un control de flujo de aire en el proceso de recirculación, ya que puede ser contraproducente que el flujo sea de baja velocidad, ya que el objetivo de la recirculación es evitar que los líquidos contenidos en los tanques IBC no se solidifiquen.

Figura 89

Pantalla de la operación de recirculación en el sistema SCADA.

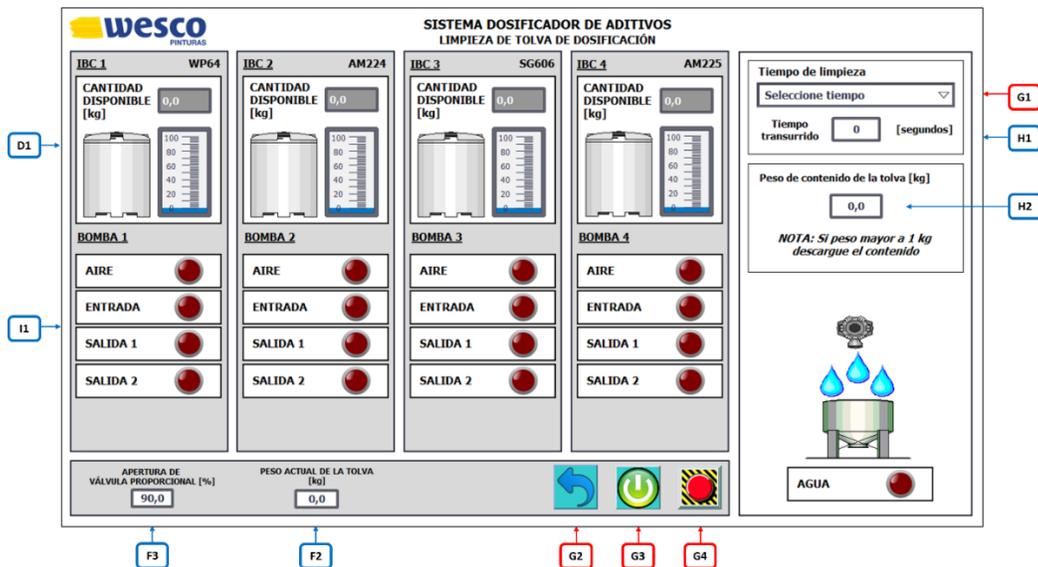


Nota. El usuario podrá pulsar el ícono o en el texto correspondiente.

Pantalla de operación para limpieza de la tolva de dosificación. En la pantalla de limpieza que se muestra en la Figura 90 se deberá seguir los mismos pasos descritos en el apartado anterior para realizar correctamente la operación.

Figura 90

Pantalla de la operación de limpieza de la tolva en la interfaz HMI.



Diseño de data logging

En la programación del PLC se utilizó las herramientas de registro de data logging disponible en el lenguaje de programación del fabricante, esto permitió almacenar registrar la cantidad dosificada de los aditivos de cada lote procesado en un archivo de valores separados por comas (csv), como se muestra en la Figura 91, para detalles de programación ver anexo D.

Figura 91

Registro de datos en el PLC.

The image shows two screenshots of the Siemens TIA Portal interface for an S7-1200 PLC station named 'station_1' with the project name 'PLC_DOSIFICACION'.

Top Screenshot: General Information

General:

- TIA Portal: V13.0 SP1
- Nombre del equipo: S7-1200 station_1
- Nombre del módulo: PLC_DOSIFICACION
- Tipo de módulo: CPU 1215C AC/DC/Rly

Estado:

- Estado operativo: RUN
- Estado: Aceptar

Panel de operador de la CPU:

-
-
-

Bottom Screenshot: Data Records

Registros de datos

Nombre	Tamaño	Modificado el	Activa	Borrar	Recuperar y borrar
RegistroDosificacion.csv	24147	12:31:40 17.01.2023	Sí	X	

Integración de elementos de diseño

Tanto el diseño mecánico, eléctrico, electrónico, software y control se integran mediante la arquitectura mostrada en la Figura 92, la cual está sustentada por sus respectivos planos mecánicos, eléctricos y P&ID de los anexos A, B, C y D, teniendo claras las tareas de construcción e implementación que se requirieron para poner en marcha el sistema físico, y para la ejecución por parte del usuario se estableció un algoritmo en un diagrama de flujo en la Figura 93.

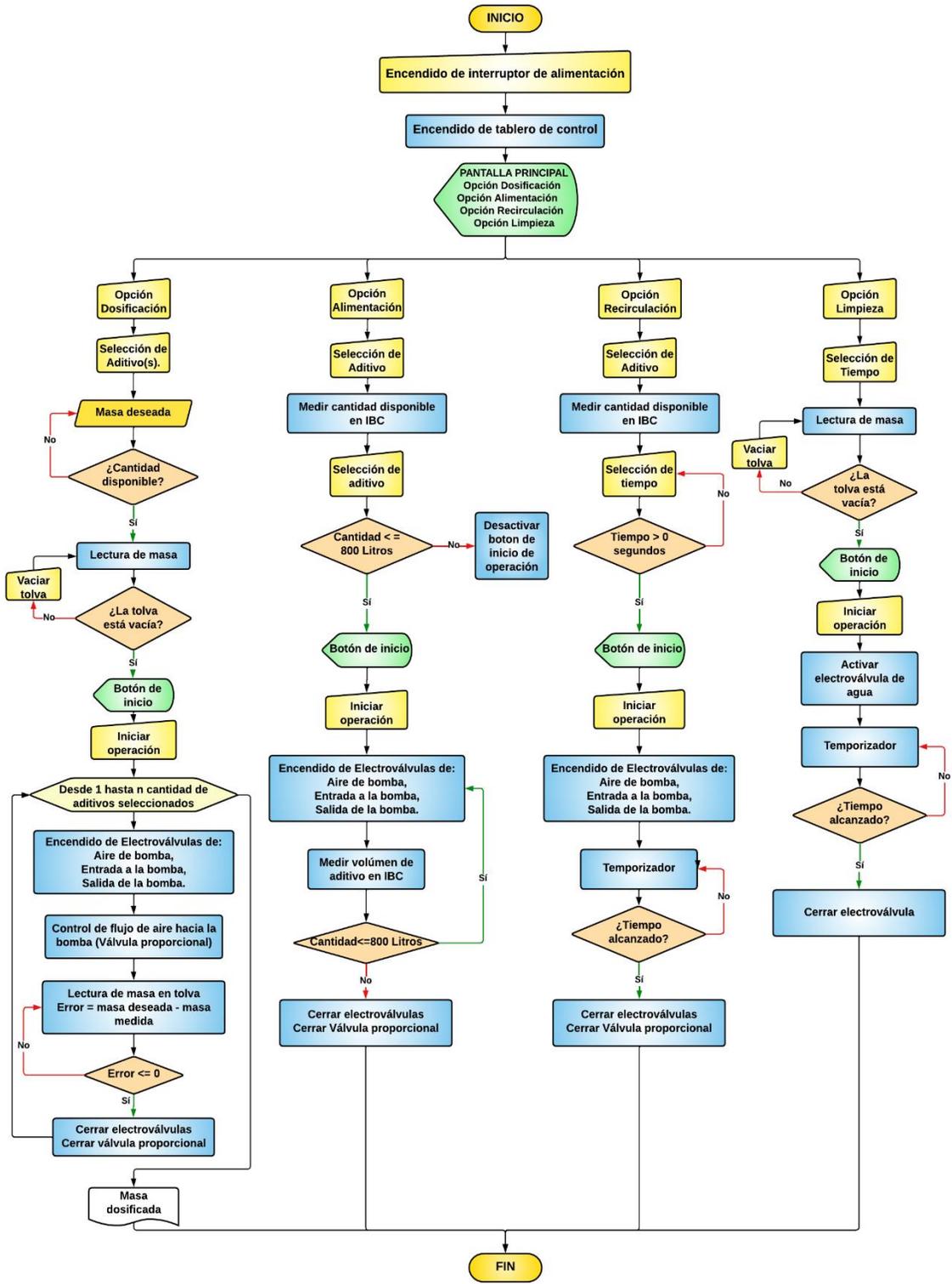
Figura 92

Diseño CAD del sistema dosificador de aditivos.



Figura 93

Diagrama de flujo del sistema dosificador de aditivos.



CAPÍTULO IV

Construcción e implementación

Para la construcción del sistema dosificador de aditivos, se consideró en primer lugar al diseño mecánico, en el cual se analizaron las características de las estructuras metálicas, sistemas de tuberías y actuadores. En segundo lugar, se armaron todos los circuitos eléctricos diseñados y dimensionados, en los que integran: el PLC, actuadores electromecánicos y elementos instrumentación correspondientes. En tercer lugar, se implementaron las interfaces gráficas HMI y SCADA, y finalmente se implementó también, el sistema de control por lógica difusa diseñado para este proyecto.

Componentes mecánicos

La construcción de la tolva y la estructura metálica para su montaje, dieron lugar al primer paso de construcción, luego se construyeron la estructura para las tuberías y bases de las bombas. Al ubicar estos elementos en su espacio correspondiente, se verificaron las dimensiones de las tuberías y accesorios necesarios para su instalación, luego de haber realizado el ensamble correspondiente, como se detalla a continuación.

Tolva para mezcla de aditivos

Según las dimensiones, materiales y características establecidas en los planos, fue posible realizar y obtener una tolva de acero inoxidable AISI 304, con tapas abatibles que permitirán el ensamble y desensamble de las electroválvulas y la boquilla de limpieza, como se muestra en la Figura 94.

Tapa abatible. Este elemento cuenta con dos ganchos para que pueda ser sujetado por el cierre, los cauchos alrededor de la parte inferior brindan un cierre tipo hermético que garantiza un ajuste seguro. Además, en su estructura cuenta con nueve agujeros para permitir el ingreso de hasta 8 aditivos, de los cuales solamente se consideraron cuatro de estos y un agujero central para la instalación de tubería agua potable que permite la limpieza de la tolva.

Figura 94

Tolva para mezcla de aditivos construida.



Nota. Las fotografías muestran la tolva construida, y la función de su tapa abatible cerrada.

Estructura de la tolva

Esta estructura será en donde se ensamblará la tolva, sin embargo, cabe mencionar que es de suma importancia que se mantenga fija y nivelada, por lo tanto, se utilizaron pernos de anclaje de 3/8" x 100 mm. Esto se debe a que la calibración de las celdas de carga puede verse afectada. Para esta estructura se utilizaron tubos cuadrados de acero estructural de 3 mm de espesor, que brindan robustez, esteticidad y poca deflexión en los puntos de apoyo de la tolva, como se justifica en los cálculos de diseño. Para la construcción se realizó operaciones de corte, soldadura de los tubos, y se pintó de color azul como se muestra en la Figura 95.

Figura 95

Estructura construida para montaje de la tolva.



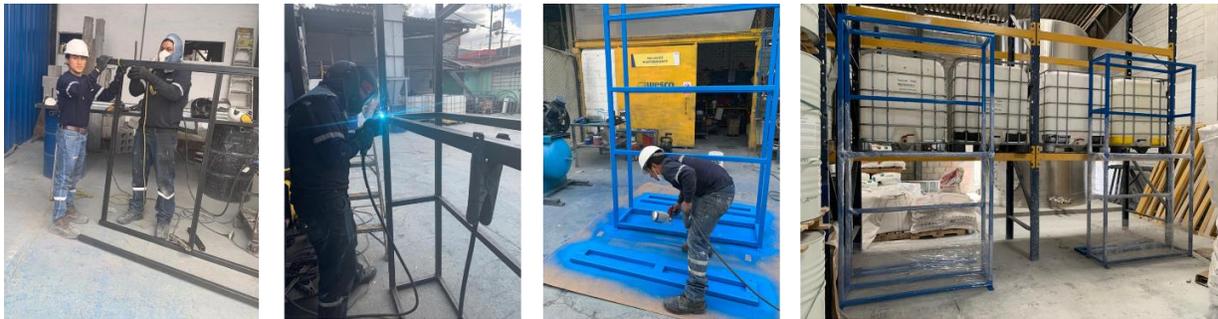
Nota. Las fotografías muestran los tubos cortados, proceso de soldadura y pintura.

Estructura para tuberías y cables

Se realizaron dos estructuras con las mismas características. Para ello se usó tubo cuadrado de dimensiones 50 mm x 2 mm y material de acero estructural ASTM A36. Estas estructuras permitirán reducir el daño a las tuberías de PVC debido a las pulsaciones de las bombas de doble diafragma, el procedimiento de construcción fue el mismo de la estructura de la tolva, como se muestra en la Figura 96.

Figura 96

Estructura construida para instalación de tuberías y cables.



Nota. Las fotografías muestran el proceso de soldadura, pintura y acabado de las estructuras.

Instalación de bombas de doble diafragma

Se implementaron un total de cuatro bombas de doble diafragma con rosca de entrada y salida de 1 pulgada, las dimensiones de la bomba según el fabricante se pueden observar en el anexo E. Debido a la naturaleza de funcionamiento de las bombas, fue necesario ajustar las bases de las bombas a una estructura base que está nivelada y fija al piso con pernos de anclaje de 3/8" x 100 mm, esto permitió que la bomba no cambie de posición mientras esté en funcionamiento, así también se reduce la posibilidad de daño a las tuberías y accesorios de la instalación correspondiente, cada bomba contará con una válvula de bola manual de 3/8" en la entrada de aire comprimido, que servirá como válvula de seguridad de la bomba, sin embargo, su localización no es estratégica, por lo cual se implementó una válvula adicional, de fácil acceso. La instalación de dos bombas de doble diafragma se muestra en la Figura 97.

Figura 97

Bombas de doble diafragma del sistema dosificador.

***Instalación de tuberías y accesorios***

Las tuberías de líquidos de 1 pulgada están distribuidas de tal forma que desde las bombas, la entrada esté conectada con las válvulas de alimentación, válvulas de retención y electroválvulas de salida de los tanques IBC. En la salida de las bombas las tuberías estarán distribuidas de tal manera que se conecten las electroválvulas de reabastecimiento al tanque IBC y salida hacia la tolva de dosificación, como se muestra en la Figura 98.

Figura 98

Instalación de tuberías.



Nota. Las fotografías muestran las tuberías y accesorios instalados.

Instalación de válvula proporcional

La válvula de control implementada está compuesta por un posicionador, actuador giratorio y una válvula de bola que permitirá controlar el flujo de aire comprimido, estará conectado a la salida de la válvula reguladora de presión, y estará ubicada detrás del tablero de control montada sobre la estructura de las tuberías como se indica en la Figura 99. La salida de la válvula de bola corresponderá a la línea de abastecimiento de aire para las bombas. Cabe mencionar que, durante cualquier operación, solo se podrá utilizar una bomba a la vez, debido a los parámetros del sistema de control y eficiencia de las bombas.

Figura 99

Válvula proporcional instalada.



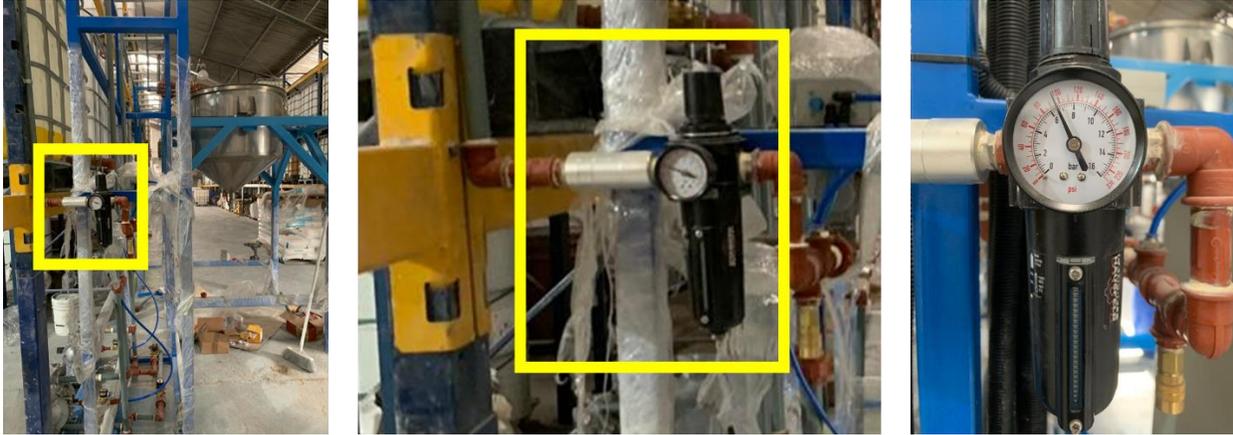
Nota. La válvula de control se adquirió ensamblada.

Instalación de línea de aire comprimido

La empresa cuenta con compresores de abastecimiento de aire y tanques pulmones para diferentes aplicaciones en particular, en este caso para este sistema está disponible un tanque pulmón, con el cual se puede abastecer aire comprimido al sistema, con una presión máxima de 110 [psi]. Para regular esta presión se instaló una válvula de retención de 3/8" y un regulador de presión de 230 [psi] máximo, véase la Figura 100. La regulación de la presión es importante para proteger la vida útil de la válvula de control y las bombas de doble diafragma.

Figura 100

Válvula de retención y válvula reguladora de caudal de aire comprimido.



Nota. Las fotografías muestran la ubicación y características físicas de las válvulas de retención y regulador de presión.

Componentes eléctricos y electrónicos

La implementación de los circuitos eléctricos comenzó con el ensamble del tablero de control, siguiendo lo establecido en los planos. Para poder conectar todos los actuadores, sensores y componentes externos al tablero de control se implementaron borneras cercanas a los agujeros de entrada de cables hacia el tablero, ya que los cables de los actuadores debieron ser organizados adecuadamente antes de conectarlos al tablero.

Preparación del tablero de control

El gabinete seleccionado para los circuitos eléctricos se dimensionó según las características de los elementos y el espacio total requerido. Se realizaron agujeros y cortes a la tapa del gabinete para ubicar los indicadores luminosos, pulsador de emergencia, interruptor de encendido principal del tablero y un agujero rectangular para la pantalla HMI con las dimensiones recomendadas por el fabricante, y dentro del gabinete se armaron las canaletas y rieles para todos los componentes necesarios, como se muestra en la Figura 101.

Figura 101

Gabinete para circuitos del sistema.



Nota. Las fotografías muestran la puerta con los agujeros respectivos y el gabinete con canaletas y rieles.

Montaje y conexión de componentes

El gabinete tiene cuatro rieles; en el primer riel están colocados los interruptores de alimentación de todo el circuito, la fuente de alimentación DC, con sus respectivos repartidores de cables, en el segundo riel está el PLC y sus módulos de comunicación, señales analógicas y digitales. En el tercer riel están los relés de interface, borneras auxiliares en el cuarto riel y hacia un costado el switch de conexión ethernet, como se muestra en la Figura 102.

Figura 102

Circuitos eléctricos del tablero de control.



Instalación de sensores de nivel

Se implementaron un total de cuatro sensores de nivel ultrasónicos con una distancia de seguridad de 20 [cm], es decir que, la distancia entre el contenido de cada tanque IBC y su sensor no deberá ser menor a esa cantidad. Como se muestra en la Figura 103 cada sensor estará ubicado en la parte superior central de cada tanque, estarán conectados al tablero de control, los cables están montados sobre la canaleta ensamblada encima de las estructuras de las tuberías.

Figura 103

Sensores de nivel instalados.



Nota. Las fotografías muestran los sensores de nivel en el centro de cada tanque IBC, y las electroválvulas de reabastecimiento.

Instalación de celdas de carga

La empresa proveedora de estos equipos ofrecieron el servicio de instalación y calibración de las cuatro celdas de carga. En la Figura 104 se muestra el proceso de soldadura de las placas base sobre la estructura realizada, el ensamble de cada celda quedando unida a la tolva y a la estructura y también la conexión hacia el módulo correspondiente.

Figura 104

Instalación de celdas de carga.



Nota. Las fotografías del proceso de instalación de las celdas de carga.

Componentes informáticos

Las interfaces gráficas diseñadas están orientadas a dos tipos de dispositivos: la pantalla HMI ubicada en el tablero de control de circuitos eléctricos y computadores personales mediante sistema SCADA. Para ambos casos se utilizó el software del fabricante para el diseño e implementación a dichos dispositivos, inclusive dentro de la programación del PLC se agregó la herramienta data logger para registro de los lotes de dosificación.

Instalación de interfaz HMI diseñada

Para implementar la interfaz en la pantalla HMI bastó con realizar una comunicación vía ethernet entre la PC donde se programó y el dispositivo HMI instalado en el tablero de control, en la Figura 105 se muestra el tablero de control con la interfaz cargada en el dispositivo correspondiente.

Figura 105

Interfaz HMI en funcionamiento.



Nota. Las fotografías muestran la ubicación del tablero de control y la interfaz cargada.

Sistema de control

El sistema de control por lógica difusa diseñado fue implementado en bloques de programa SCL del software del fabricante del PLC, los cuales se muestra en el anexo D. Fue necesario definir arreglos de 100 elementos tanto para el universo de discurso, además de 8 variables para determinar el grado de pertenencia a los conjuntos difusos, para la señal de entrada y para la señal de salida.

Sistema dosificador de aditivos

El sistema construido e implementado en su totalidad ofrece la posibilidad de realizar operaciones de dosificación, reabastecimiento de materia prima a tanques IBC, recirculación de contenido en los IBC y limpieza de la tolva de dosificación mediante la interfaz HMI o sistema SCADA, los sensores de nivel mostrarán la cantidad de aditivos disponible en cada tanque, y la masa dentro de la tolva se mostrará en un indicador ubicado en la parte frontal de todo el sistema, como se muestra en la Figura 106 y a su vez esta información será enviada al PLC mediante comunicación RS232, las bombas serán activadas mediante la circulación de aire comprimido regulado por la válvula de control que recibe la señal del PLC.

Figura 106

Sistema dosificador de aditivos construido.



Nota. Las fotografías muestran al sistema dosificador construido e implementado en su totalidad listo para la etapa de pruebas.

CAPÍTULO V

Pruebas y resultados

La construcción e implementación del sistema dosificador dio paso a la etapa de pruebas del mismo, el proceso principal es la dosificación, en la cual se aplicó la metodología de diseño de experimentos de tipo Taguchi para evaluar sus resultados. Luego se evaluó el funcionamiento general de cada proceso: dosificación, alimentación, recirculación y limpieza.

Pruebas del módulo de dosificación

Para realizar las pruebas de dosificación se utilizó la metodología de diseño de experimentos DOE de tipo Taguchi para optimizar el número de experimentos. En este análisis se consideraron dos factores de tres niveles para determinar el error entre el valor de masa deseada y el valor de masa medida. Los factores corresponden a: la presión del aire comprimido y la masa deseada, como se indica en la Tabla 58, y se realizaron pruebas para cada aditivo de este proyecto.

En la

Tabla 59 se muestra el orden de corrida de cada experimento para cada aditivo, se escogió un rango de 70 a 90 [psi] debido a que, en las especificaciones de las bombas, la presión máxima es de 100 [psi], y la válvula de control funciona desde 43.5 hasta 145.0 [psi], sin embargo, los valores mínimos de presión afectan a la velocidad de respuesta del actuador.

Tabla 58

Factores y niveles para aplicación de metodología DOE de Taguchi.

Factor	Nivel		
	1	2	3
Presión [psi]	70	80	90
Masa [kg]	10	25	50

Tabla 59*Orden de ejecución de experimentos.*

N.º Experimento	Presión		Masa Deseada	
1	1	70 [psi]	1	10 [kg]
2	1	70 [psi]	2	10 [kg]
3	1	70 [psi]	3	10 [kg]
4	2	80 [psi]	1	25 [kg]
5	2	80 [psi]	2	25 [kg]
6	2	80 [psi]	3	25 [kg]
7	3	90 [psi]	1	50 [kg]
8	3	90 [psi]	2	50 [kg]
9	3	90 [psi]	3	50 [kg]

Aditivo WP 64

Las pruebas consistieron en dosificar las cantidades establecidas en la Tabla 60 de experimentos, según la presión de aire que pudo ser controlada manualmente por el regulador de presión instalado. La masa deseada fue ingresada por pantalla, los parámetros previos a la corrida de los experimentos fueron: la compensación del controlador con +0.3 [kg] y viscosidad de aditivo a 25 [°C] de 317 [cP].

Tabla 60*Resultados de los experimentos con aditivo WP64.*

N.º Experimento	Presión [psi]	Masa deseada [kg]	Masa obtenida [kg]	Error [kg]
1	80.0	10.0	9.4	0.6
2	80.0	25.0	24.6	0.4
3	80.0	50.0	49.6	0.4
4	90.0	10.0	10.0	0.0
5	90.0	25.0	25.0	0.0
6	90.0	50.0	50.2	-0.2
7	100.0	10.0	10.4	-0.4
8	100.0	25.0	25.6	-0.6
9	100.0	50.0	50.8	-0.8

Los resultados se muestran en la Tabla 60, donde el error equivale a la diferencia entre el valor de masa deseada y la masa medida. En el software Minitab se empleó la herramienta

DOE tipo Taguchi con la cual se pudo elegir una matriz ortogonal L9 donde se estableció el orden de experimentos ya definidos en la

Tabla 59. Se agregaron los resultados de cada uno de los experimentos de la Tabla 60, de donde se puede observar un rango de error desde -0.8 hasta 0.6 [kg], el análisis de estos resultados se realizó mediante las gráficas de interacción y efectos principales que se obtuvieron al ingresar los datos del error en la medición de aditivo WP64.

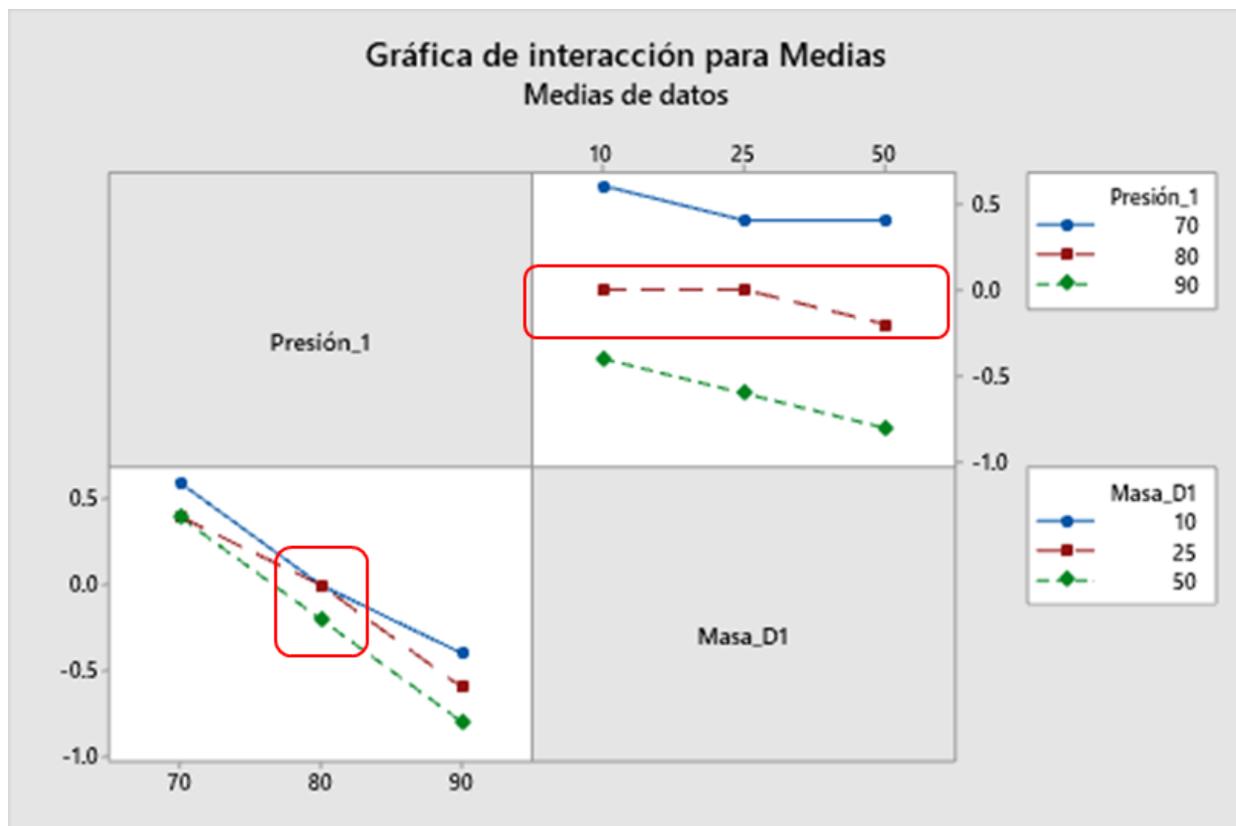
Para que en estos experimentos el error no superara el rango de -1.0 hasta 1.0 [kg], se tuvo que realizar previamente una compensación en el controlador por lógica difusa añadiendo al valor de masa deseada a +0.3 [kg] en este caso, y la relación de señal a ruido implementada en el análisis de Taguchi fue la denominada “Nominal es lo mejor” debido a que la variable de salida es el error y lo que se desea es que su valor sea precisamente igual a cero, ya que esto determinaría la precisión de la dosificación realizada.

En la Figura 107 se aprecia que en la gráfica de presión el error crece proporcionalmente cuando la presión de aire comprimido disminuye o crece de los 80 [psi], lo cual refleja que el error en este caso es directamente proporcional a la presión de aire del sistema, y a su vez se observa que, con 10 [psi] de diferencia el error puede superar los valores de ± 0.5 [kg].

Sin embargo, en la gráfica de masa se observa que únicamente con una presión de 80 [psi] se podrá tener un error máximo de ± 0.2 [kg], y en el caso de la presión de 90 [psi], el error crece a medida que la masa objetivo sea mayor, esto se debe a que la velocidad de respuesta de la válvula de control no es lo suficientemente alta para realizar el giro correspondiente en el tiempo requerido.

Figura 107

Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de WP64.

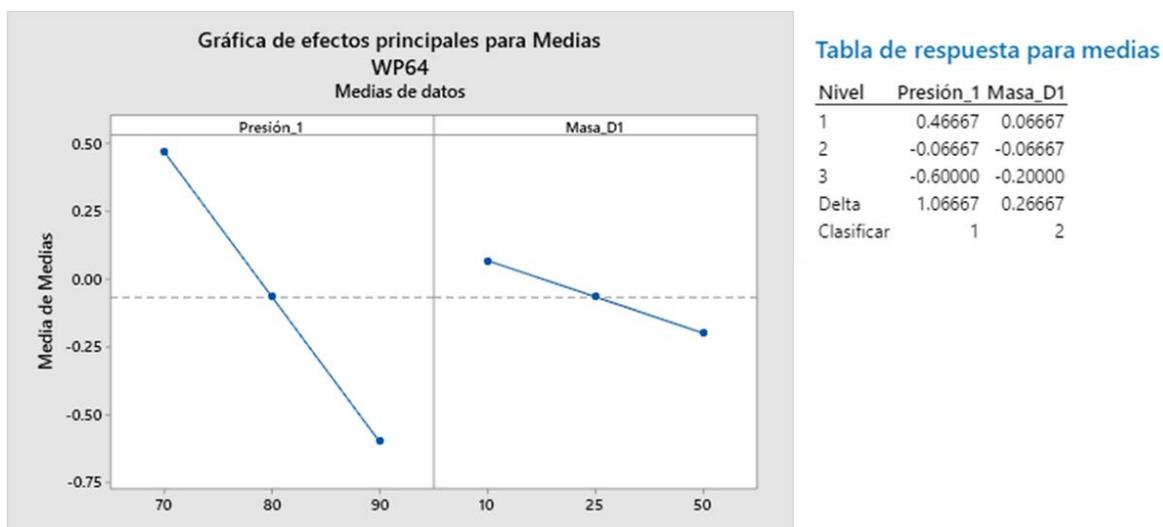


Nota. Las gráficas muestran las interacciones entre las variables de presión y masa deseada según los ensayos de dosificación realizados para aditivo WP64.

Una vez realizado el análisis de interacción entre la presión y la masa deseada, se procedió a la verificación de los parámetros adecuados para un obtener un error cercano a cero. En la Figura 108 se aprecia las gráficas de efectos principales de medias con los experimentos de aditivo WP64, donde se observa que es estrictamente necesario que la presión de aire comprimido sea de 80 [psi], es decir, el nivel 2 de presión. Y también se pudo verificar que se puede considerar cualquier valor de masa para la dosificación a esa presión ya que la resolución de las celdas de carga es de 0.2 [kg] y en la gráfica se muestra que en los tres niveles de masa el error no supera esa cantidad.

Figura 108

Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de WP64.



Nota. Los valores de los puntos en las gráficas están establecidos en la tabla de respuesta.

Aditivo AM223

Para las pruebas de este aditivo los parámetros previos a la corrida de los experimentos fueron: compensación del controlador: +0.3 [kg] y viscosidad de aditivo a 25 [°C]: 700 [cP]. Los resultados se muestran en la Tabla 61.

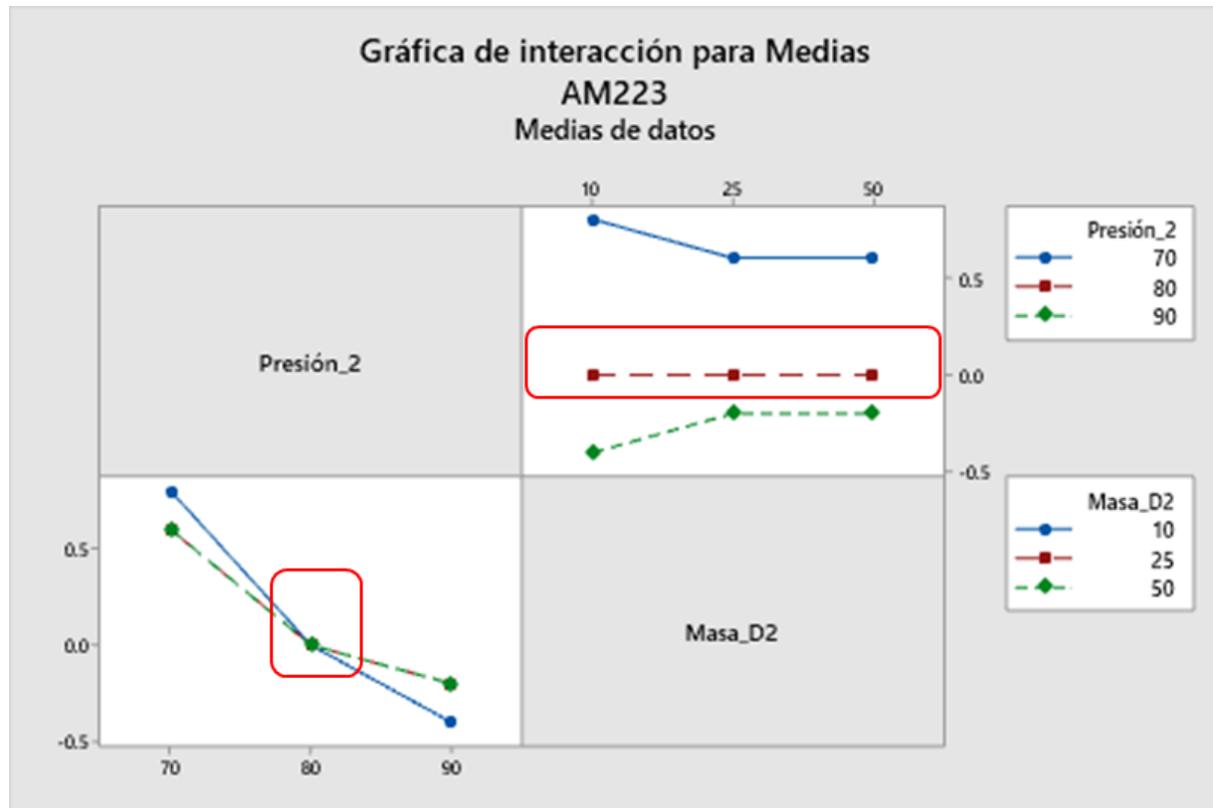
Tabla 61

Resultados de los experimentos con aditivo AM223.

N.º Experimento	Presión [psi]	Masa deseada [kg]	Masa obtenida [kg]	Error [kg]
1	80.0	10.0	9.2	0.8
2	80.0	25.0	24.4	0.6
3	80.0	50.0	49.4	0.6
4	90.0	10.0	10.0	0.0
5	90.0	25.0	25.0	0.0
6	90.0	50.0	50.0	0.0
7	100.0	10.0	10.4	-0.4
8	100.0	25.0	10.2	-0.2
9	100.0	50.0	10.2	-0.2

Figura 109

Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de AM223.



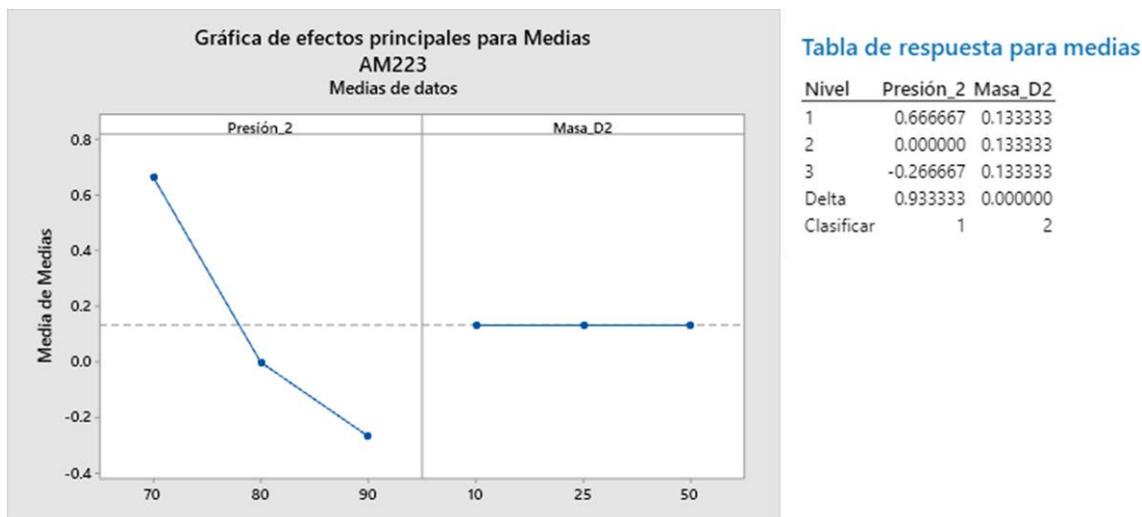
Nota. Las gráficas muestran las interacciones entre las variables de presión y masa deseada según los ensayos de dosificación realizados para aditivo AM223.

La compensación en el controlador de este aditivo fue de +0.3 [kg], en la Figura 109 se aprecia que en la gráfica de presión que como en el caso anterior el error crece de forma proporcional cuando la presión de aire comprimido disminuye o crece de los 80 [psi], lo cual refleja que el error en este caso es directamente proporcional a la presión de aire del sistema, pero además se aprecia que en este caso cuando es menor a 80 [psi] el error es mayor que al aumentar la presión superando los 0.5 [kg].

En la gráfica de masa se observa que únicamente con una presión de 80 [psi] el error podría llegar a cero, en las presiones de 70 y 90 [psi] se observa que pierde precisión cuando se desea dosificar masas cercanas a 10 [kg], a partir de 25 [kg] se mantiene constante el error.

Figura 110

Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de AM223.



Nota. Los valores de los puntos en las gráficas están establecidos en la tabla de respuesta.

La gráfica de efectos principales mostrada en la Figura 110, indica que efectivamente el error se mantendrá constante en 0.13 [kg] trabajando con una presión de 80 [psi] para cualquier nivel de masa deseada, sin embargo, es importante recalcar que, la reducción de presión provocará que el error se eleve hasta 0.67 [kg] como se muestra en la gráfica de presión.

Tabla 62

Resultados de los experimentos con aditivo SG606.

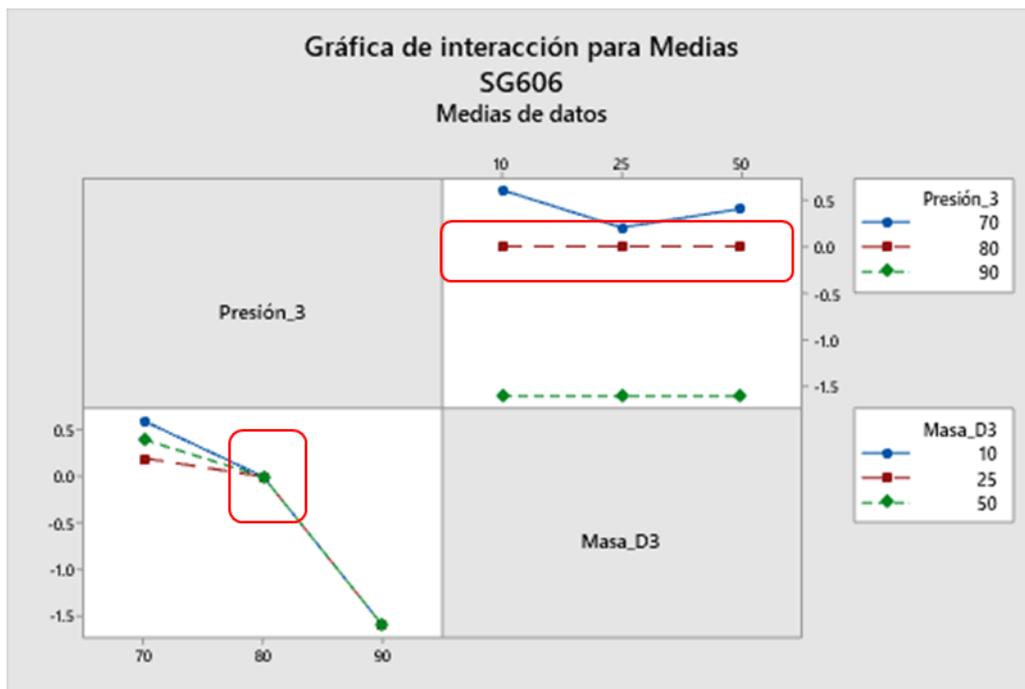
N.º Experimento	Presión [psi]	Masa deseada [kg]	Masa obtenida [kg]	Error [kg]
1	80.0	10.0	9.4	0.6
2	80.0	25.0	9.8	0.2
3	80.0	50.0	9.6	0.4
4	90.0	10.0	10.0	0.0
5	90.0	25.0	10.0	0.0
6	90.0	50.0	10.0	0.0
7	100.0	10.0	11.6	-1.6
8	100.0	25.0	26.6	-1.6
9	100.0	50.0	51.6	-1.6

Aditivo SG606

El controlador diseñado para este aditivo tuvo una compensación de: +0.3 [kg] y viscosidad de este aditivo a 25 [°C] es de: 159 [cP] según la medición en el laboratorio. Los resultados de los experimentos se muestran en la Tabla 62.

Figura 111

Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de SG606.

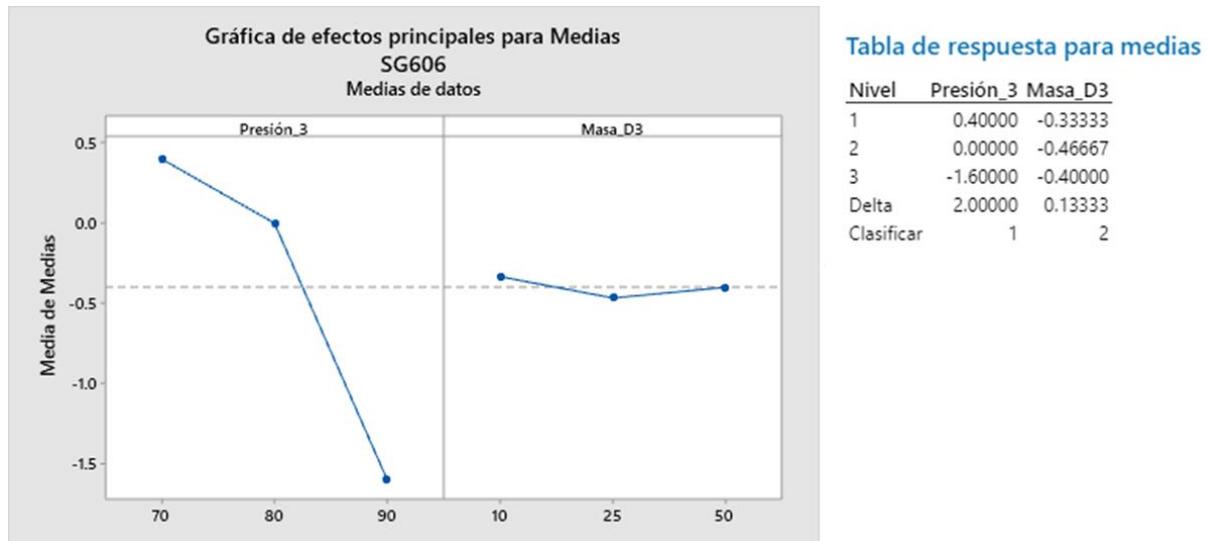


Nota. Las gráficas muestran las interacciones entre las variables de presión y masa deseada según los ensayos de dosificación realizados para aditivo SG606.

La gráfica de interacción para medias del aditivo SG606 mostrada en la Figura 111 como en los dos casos anteriores muestra que el error aumenta proporcionalmente según el nivel de presión con el que se esté operando el sistema, sin embargo en este caso, cuando la presión aumenta de 80 [psi] como se aprecia en la gráfica inferior izquierda, el error excede de 1.5 [kg], en valores absolutos, esto se debe a que la viscosidad de este aditivo es mucho menor que los anteriores casos estudiados.

Figura 112

Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de SG606.



Nota. Los valores de los puntos en las gráficas están establecidos en la tabla de respuesta.

Según los resultados de la gráfica de presión es importante considerar la velocidad de respuesta de la válvula de control regulando presión de aire comprimido. La gráfica de masa deseada indica que a 70 [psi] el error será mínimo para una masa de 25 [kg], pero no se aprecia un crecimiento proporcional, por lo cual el sistema sería inestable a esa presión. Sin embargo, a partir de los 80 [psi] en adelante el error si se mantiene constante.

En la gráfica de efectos principales de los experimentos, mostrada en la Figura 112 se comprueba en la gráfica de presión que el sistema presenta menor error si se trabaja con 80 [psi] o menos, sin embargo, en la gráfica de masa deseada se observa que el error puede llegar a un valor absoluto de 0.46 [kg] lo cual indica una mayor sensibilidad en los experimentos realizados y no se asegura una dosificación estable, eso quiere decir que, debido a la baja viscosidad de este aditivo, los niveles de presión provocaron que el error no sea constante por inestabilidad a 70 [psi], y la velocidad de respuesta de la válvula de control será lenta para

trabajar a 90 [psi], con lo que se concluye que a 80 [psi] el sistema dosifica adecuadamente el aditivo SG606, sin embargo la variación de este parámetro afectará en la dosificación.

Aditivo AM225

El parámetro de compensación del controlador diseñado para aditivo AM225 fue de +0.3 [kg] y la viscosidad a 25 [°C] es de 317 [cP] según las mediciones realizadas en el laboratorio de desarrollo e investigación de la empresa. Se registraron los resultados de los experimentos en la Tabla 63, y se realizó el análisis respectivo mediante las gráficas de interacción para medias y las gráficas de efectos principales para medias.

Tabla 63

Resultados de los experimentos con aditivo AM225.

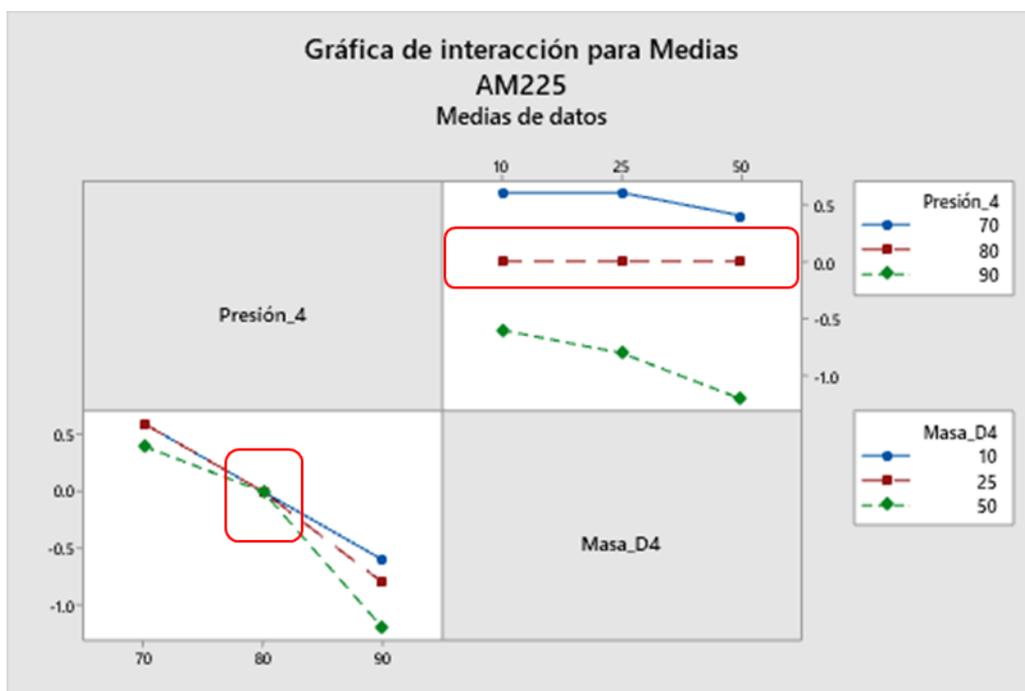
N.º Experimento	Presión [psi]	Masa deseada [kg]	Masa obtenida [kg]	Error [kg]
1	80.0	10.0	9.4	0.6
2	80.0	25.0	9.4	0.6
3	80.0	50.0	9.6	0.4
4	90.0	10.0	10.0	0.0
5	90.0	25.0	25.0	0.0
6	90.0	50.0	50.0	0.0
7	100.0	10.0	10.6	-0.6
8	100.0	25.0	25.8	-0.8
9	100.0	50.0	51.2	-1.2

La gráfica de interacción para medias del aditivo AM225 mostrada en la Figura 113 de igual forma muestra que el error aumenta proporcionalmente dependiendo del valor de presión con el que se esté trabajando en el sistema, según la gráfica de presión ubicada en la parte inferior izquierda. Sin embargo, en la gráfica de masa deseada se puede observar que cuando la presión es de 90 [psi] el error aumenta a más de un valor absoluto de 1.0 [kg] cuando se dosifica a 50 [kg], a pesar de tener la misma viscosidad que el aditivo WP64, lo cual nos da a entender que la velocidad de respuesta de la válvula de control es más baja de lo normal, y la

explicación está en las propiedades físicas del aditivo AM225, especialmente en su densidad, ya que a diferencia del aditivo WP64 que posee una densidad de 0.945 [kg/L], el aditivo AM225 posee una densidad de 1.24 [kg/L] según los registros del laboratorio de investigación y desarrollo de la empresa. Esto quiere decir que, con un menor volumen el aditivo AM225 se dosificará el aditivo a la masa requerida, por lo tanto, será más rápida su dosificación.

Figura 113

Gráfica de interacción para medias del experimento DOE de AM225.



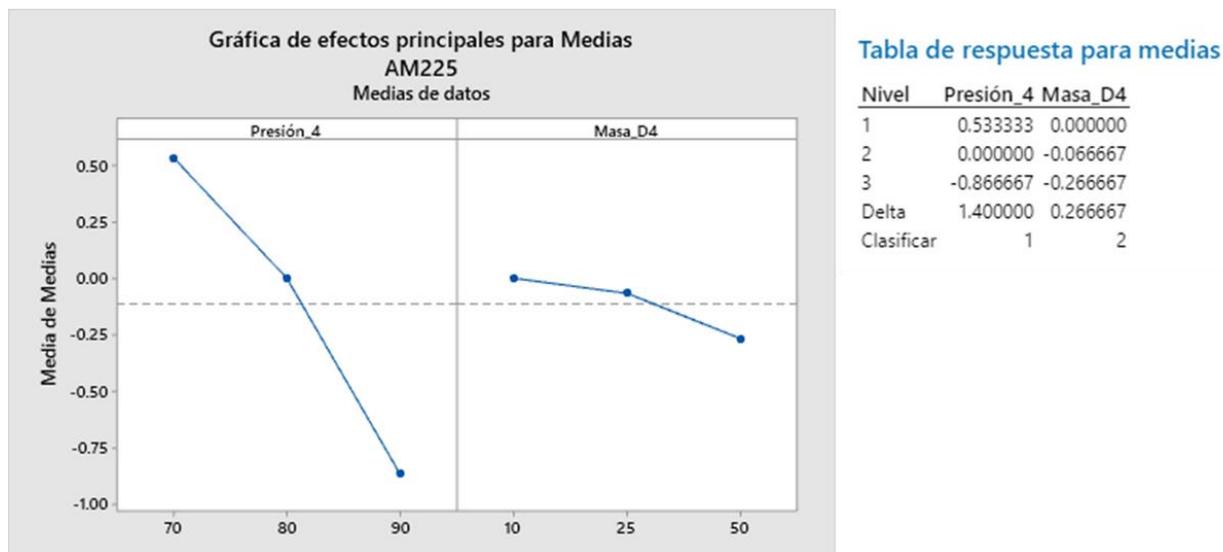
Nota. Las gráficas muestran las interacciones entre las variables de presión y masa deseada según los ensayos de dosificación realizados para aditivo AM225.

Finalmente, en la gráfica de efectos principales para medias del aditivo AM225 mostrado en la Figura 114 se puede observar que en la gráfica de presión que, efectivamente a 80 [psi] el error será igual a cero, y la variación de 10 [psi], causa que el error aumente en valor absoluto hasta 0.86 [kg] especialmente si la presión aumenta.

En la gráfica de la masa deseada se observa que debido a la rapidez con la que se dosificaría el aditivo, la velocidad de respuesta de la válvula de control provoca que el valor absoluto del error sea directamente proporcional a la masa deseada.

Figura 114

Gráfica de efectos principales para medias del experimento DOE de AM225.



Nota. Los valores de los puntos en las gráficas están establecidos en la tabla de respuesta.

Evaluación del módulo de dosificación

La automatización del proceso se evaluó según los requerimientos de la Tabla 64, según la operatividad de la interfaz gráfica HMI del tablero de control o del sistema SCADA, y las condiciones técnicas y físicas del sistema dosificador.

Tabla 64

Evaluación de la automatización del proceso de dosificación.

Requerimiento	Evaluación
El botón de inicio se habilita cuando se cumple que: <ul style="list-style-type: none"> • La tolva esté vacía • La cantidad ingresada está disponible. • La cantidad ingresada es menor al volumen máximo de la tolva 	Cumple

Requerimiento	Evaluación
La dosificación se detiene al alcanzar la cantidad requerida	Cumple
La pantalla HMI muestra las cantidades de masa dosificadas	Cumple
Flujo de líquidos en tuberías sin fugas	Cumple
La dosificación se detiene al pulsar botón de paro o pulsador de emergencia	Cumple
Conmutación de electroválvulas en el orden correcto	Cumple

Pruebas del módulo de alimentación

Para realizar las primeras pruebas de funcionamiento del sistema dosificador, se debió partir desde el proceso de alimentación a los tanques, ya que los tanques IBC se encontraban vacíos. En este proceso se verificó el tiempo de carga de cada aditivo, considerando que el flujo es distinto debido a la viscosidad de cada líquido, se registró en la Tabla 65 los resultados.

Tabla 65

Evaluación de alimentación a tanques IBC.

IBC	Aditivo	Tiempo de carga	Cantidad	Flujo
1	WP64	35.4 [min]	220.0 [kg]	6.21 [kg/min]
2	AM223	45.3 [min]	175.0 [kg]	3.86 [kg/min]
3	SG606	6.4 [min]	230.0 [kg]	35.94 [kg/min]
4	AM225	12.0 [min]	200.0 [kg]	16.67 [kg/min]

El funcionamiento del módulo de alimentación fue evaluado, según el contenido de cada tanque, esta información se obtuvo de los sensores de nivel, como se muestra en la Tabla 66. En la Figura 115 se muestran los barriles en los que son adquiridos los aditivos, de los cuales se utiliza un tubo conectado a una manguera que se acopla con la entrada correspondiente al sistema.

Tabla 66

Evaluación de la automatización de alimentación a tanques IBC.

Requerimiento	IBC 1	IBC 2	IBC 3	IBC 4
El reabastecimiento se detiene al llegar a los 800 litros	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
La pantalla HMI muestra el nivel del tanque IBC seleccionado	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
El proceso se detiene al pulsar el botón de paro en pantalla	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
El proceso se detiene al activar el pulsador de emergencia	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Pruebas del módulo de recirculación

La recirculación de aditivos será una operación útil cuando el sistema permanezca inactivo durante varios días. Para facilitar la operación del usuario se han establecido cuatro opciones de tiempo para este proceso: 30, 60, 90 y 120 segundos. Se evaluó el funcionamiento de la automatización según los requerimientos de la Tabla 67.

Tabla 67

Evaluación de la automatización de recirculación en tanques IBC.

Requerimiento	IBC 1	IBC 2	IBC 3	IBC 4
La recirculación se detiene al alcanzar el tiempo establecido	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
La pantalla HMI muestra el nivel del tanque IBC seleccionado	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
El proceso se detiene al pulsar el botón de paro en pantalla	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
El proceso se detiene al activar el pulsador de emergencia	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Flujo de líquidos sin fugas en tuberías y accesorios	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
Conmutación de electroválvulas en el orden correcto	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

Figura 115

Barriles de 200 litros de aditivos.



a. WP64



c. SG606



b. AM223



d. AM225

Nota. Las fotografías muestran los contenedores en los que los proveedores entregan a la empresa cada aditivo de este proyecto.

Pruebas del módulo de limpieza

El proceso de limpieza de la tolva de dosificación será semiautomático, debido a que el operador tendrá que verificar que la tolva se encuentre vacía para poder realizar la limpieza, porque de no estar vacía, el sistema no permitirá iniciar la operación, y el usuario tendrá la libertad de escoger el tiempo de limpieza por pantalla. Los resultados de la evaluación de la automatización de este proceso se muestran en la Tabla 68.

Tabla 68

Evaluación de proceso de limpieza de la tolva de dosificación.

Requerimiento	Evaluación
La limpieza se detiene al alcanzar el tiempo escogido	Cumple
La pantalla HMI muestra la masa del contenido de la tolva	Cumple
El proceso se detiene al pulsar el botón de paro o emergencia en pantalla	Cumple
Flujo de líquidos sin fugas en tuberías y accesorios	Cumple
Conmutación de electroválvula al pulsar botón de inicio	Cumple
El rociador limpia con movimiento giratorio con alcance de 180°	Cumple
El botón de inicio se inhabilita si la tolva posee más de 1 kg de contenido	Cumple

Requerimientos resueltos

Las características de técnicas de calidad de la Tabla 13 ordenada por ponderaciones de mayor a menor fueron verificadas y especificadas, con sus magnitudes y unidades respectivas en la Tabla 69.

Tabla 69

Verificación de características de calidad del sistema dosificador de aditivos.

N.º	Característica de calidad	Pond.	Valores obtenidos
1	Presión de trabajo óptima de aire comprimido para la operación de bombas y actuadores.	11.2	Presión: 80 [psi]
2	Resolución de celdas de carga [kg]	10.9	Resolución: 0.2 [kg]
3	Precio del prototipo [\$]	10.6	Presupuesto: 22961.74 [\$]
4	Cantidad de barriles por tanque IBC	10.4	Capacidad WP64: 4 barriles de 200.0 [L] Capacidad AM223: 4 barriles de 200.0 [L] Capacidad SG606: 4 barriles de 200.0 [L] Capacidad AM225: 5 barriles de 200.0 [L]
5	Tiempo de respuesta de sensores de nivel y carga [ms]	10.0	Tiempo sensores de nivel: 100 [ms] Tiempo celda de carga: 100 [ms]

N.º	Característica de calidad	Pond.	Valores obtenidos
6	Tanques IBC disponibles	9.7	Cantidad de tanques IBC: 4 [Tanques]
7	Flujo de dosificación [kg/min] a condiciones ambientales	8.6	Flujo de WP64: 6.2 [kg/min] Flujo de AM223: 3.9 [kg/min] Flujo de SG606: 35.9 [kg/min] Flujo de AM225: 16.7 [kg/min]
8	Operaciones disponibles en pantalla	8.3	Operaciones disponibles: 4 (Dosificación, Alimentación, Recirculación y Limpieza)
9	Cantidad de datos y registros por lote	8.2	Datos: Fecha, Cantidad dosificada 1, 2 ,3 y 4. Registros: máximo 1000.
10	Presión de agua y radio de alcance del limpiador [psi]	6.5	Presión de agua: 60 [psi] Radio de alcance: 0.5 [m]
11	Tiempo de capacitación de operarios [horas]	5.6	Tiempo de capacitación: 0.5 [horas]

Las características técnicas de calidad ya verificadas, permitieron evaluar los requerimientos preestablecidos al inicio de la etapa de diseño, con lo cual se pudo llegar a completar la evaluación del sistema construido y determinar el grado de satisfacción. Se muestran los resultados de la evaluación de los requerimientos del sistema dosificador de aditivos en la Tabla 70.

Tabla 70

Verificación de los requerimientos del sistema dosificador.

N.º	Requerimiento	Evaluación
1	Bajo costo de construcción	Cumple
2	Fácil mantenimiento	Cumple
3	Operación sencilla	Cumple
4	Optimizar consumo de materia prima	Cumple
5	Reducir espacio para almacenamiento	Cumple

N.º	Requerimiento	Evaluación
6	Limpieza autónoma del sistema	No cumple
7	Monitorización de sistema a distancia	Cumple
8	Registrar cantidad de materia prima consumida	Cumple
9	Capacidad de expansión de tanques IBC.	Cumple
10	Disponibilidad de interfaz HMI y tablero de control	Cumple

Conclusiones

El sistema diseñado e implementado es de 500 litros de capacidad, posee cuatro celdas de carga de viga de corte para masas de hasta 1000 kg, con una resolución de 0.2 kg, el valor medido es enviado por comunicación RS232 al controlador con un tiempo de respuesta menor o igual a 100 ms, y se ubicó a 1.20 m de la base para que la mezcla dosificada sea vertida a recipientes móviles con la apertura de una válvula de bola manual.

El dimensionamiento de bombas dependió plenamente de las propiedades físicas del fluido a transportar, principalmente de la viscosidad, se descartó el uso de bombas centrífugas ya que se trabajó con fluidos de viscosidades absolutas dentro del rango de 159 a 700 cP que reducen la eficiencia de las bombas hasta el 11% a 1000 cP, afectando también la vida útil de las mismas. Además, se descartaron bombas de desplazamiento positivo rotativos como las de engranes y peristálticas debido a la cantidad de dispositivos eléctricos requeridos para controlar a cada una de las bombas, por lo tanto, se seleccionaron cuatro bombas de doble diafragma de 1 pulgada que son accionadas por una sola válvula de control de flujo de aire, con un volumen por ciclo de 210 cm³ que permite dosificar a 0.26 kg por ciclo, lo cual fue adecuado debido a la resolución del sistema de masa.

Los algoritmos de dosificación, alimentación, recirculación y limpieza fueron diseñados e implementados para ser ejecutados mediante una pantalla HMI integrada al tablero de control de circuitos o mediante un sistema SCADA que podrá ser utilizado en un PC conectado por red ethernet al PLC, de esta forma se podrá monitorizar el estado de los actuadores

electromecánicos y electroneumáticos, verificar del nivel de contenido de cada tanque IBC según la señal de lectura de los sensores de nivel ultrasónicos, la masa medida en tiempo real dentro de la tolva, y habilitar automáticamente el acceso a objetos de ejecución por pantalla.

El sistema de control por lógica difusa diseñado e implementado permitió calibrar rápidamente la precisión de dosificación de cada aditivo, debido a que por cada tanque IBC existe un subsistema de dosificación que se controlará con su respectivo bloque de lógica difusa, la diferencia entre cada bloque será únicamente la compensación entre 0 a 1.2 kg que se estableció según la velocidad de flujo del aditivo a 80 psi de presión en la bomba. A diferencia del control PID, no será necesario la identificación de un modelo matemático que represente la dinámica de cada subsistema, lo cual ahorra tiempo en el diseño del controlador y recursos computacionales.

Mediante el diseño de experimentos (DOE) de tipo Taguchi realizado se verificó el desempeño de cada subsistema de dosificación, considerando que las variables de entrada fueron la masa deseada o ideal y la presión de aire comprimido. Se observó que las condiciones óptimas según el análisis realizado, el sistema de dosificación presentará un error de ± 0.2 kg por cada aditivo, se realizaron pruebas con 10, 25 y 50 kg de dosificación, de donde se pudo determinar que el error no es proporcional a la masa medida, por lo tanto, el porcentaje de error máximo será del 2%, valor establecido por la masa mínima permitida por el sistema que es de 10 kg.

Recomendaciones

Los parámetros del sistema de control están establecidos para una presión de aire de 80 psi, si este valor cambia, la precisión del sistema dosificador se vería afectada, para reducir este riesgo se recomienda implementar un transmisor de presión que permitirá compensar el error dentro de un rango de presión de 70 hasta 90 psi, considerando la velocidad de respuesta de la válvula de control y el caudal de las bombas.

Se recomienda establecer un calendario de mantenimiento preventivo y limpieza del sistema dosificador ya que está ubicado en la zona de producción de pinturas látex, en donde existe presencia de polvos químicos. Es importante también verificar las líneas de abastecimiento de aire comprimido, vaciar el filtro del regulador de presión, comprobar el paso de agua potable hacia el sistema dosificador, y visualizar el estado de los componentes eléctricos dentro del tablero de control.

Debido a que la resolución del sistema es de ± 0.2 kg se recomienda al departamento de investigación y desarrollo de la empresa concordar las fórmulas de dosificación con solo un decimal que sea múltiplo de 0.2, es decir, 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 respectivamente, ya que según los requerimientos tomados en cuenta a lo largo del proyecto, se acordó que el sistema dosificador de aditivos será de uso exclusivo para fabricación de lotes de gran volumen, en los que la resolución de las celdas de carga no afectará a la calidad del producto fabricado.

Trabajos futuros

La empresa Zatotek S.A. realiza proyectos de mejora continua paulatinamente, en los que integra de manera modular cada uno de ellos, en este caso, el sistema dosificador de aditivos está enfocado en la primera etapa para la fabricación de pinturas látex, los procesos consiguientes, tratan sobre la mezcla de resinas y otros componentes químicos que serán automatizados según el propósito, hasta crear un sistema automatizado completo de fabricación.

El sistema dosificador realizado tiene la capacidad de trabajar hasta con 12 tanques IBC, según las especificaciones del PLC implementado, y debido a que se crean nuevas fórmulas en el departamento de investigación, surgirá la necesidad de añadir más tanques IBC al sistema construido, es por eso que se diseñó un sistema de control que permita adaptarse fácilmente a cualquier tipo de aditivo que se utilice en el proceso.

CAPÍTULO VI

Bibliografía

Alonso, J. (2020). *Pinturas, barnices y afines: Composición, formulación y caracterización* [Universidad Politécnica de Madrid].

https://oa.upm.es/39501/1/Pinturas_barnices_y_afines_2020.pdf

Arregui, A., & Bastidas, I. (2018). *Construcción de acometida y tablero de control de suministro de energía para el laboratorio de Análisis Instrumental*. EPN.

ASTM. (2000). *Standard Terminology Relating to Plastics* (D 883 – 00).

<http://file.yizimg.com/175706/2011090910321097.pdf>

ASTM. (2002). *Standard specification for standard nominal diameters and cross-sectional areas of AWG sizes of solid round wires used as electrical conductors* (N.º B258-

02). <https://www.altanatubes.com.br/Blog/AWG/ASTM-B258.pdf>

ASTM. (2005). *Standard Specification for Carbon Structural Steel* (A 36/A 36M-05).

www.astm.org,

Automatización y control ingeniería S.A.S. (2023). *Catálogo industrial*.

<http://catalogoindustrial.co/C32/>

Beaucoup. (2023). *Catálogo de productos*. [https://www.inselec.com.ec/wp-](https://www.inselec.com.ec/wp-content/uploads/2023/01/CATALOGO-BEAUCOUP..pdf)

[content/uploads/2023/01/CATALOGO-BEAUCOUP..pdf](https://www.inselec.com.ec/wp-content/uploads/2023/01/CATALOGO-BEAUCOUP..pdf)

Bekam. (2017). *Luces Piloto*. [http://bekam.cl/wp-](http://bekam.cl/wp-content/uploads/2017/08/Luces_Piloto_final.pdf)

[content/uploads/2017/08/Luces_Piloto_final.pdf](http://bekam.cl/wp-content/uploads/2017/08/Luces_Piloto_final.pdf)

Benavides, J. (2018). Consumo de pintura llega a 1.3 galones per cápita, uno de los más bajos en la región. *Revista Perú Construye*.

<https://peruconstruye.net/2018/11/16/consumo-de-pintura-llega-a-1-3-galones-per-capita-uno-de-los-mas-bajos-en-la-region/>

- Budynas, R., & Nisbett, J. K. (2018). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Décima). McGraw-Hill.
- Camacho, O., Iglesias, E., Herrera, M., & Aboukheir, H. (2021). Fuzzy logic-based control: From fundamentals to applications. *Novasinerгия*, 4(2), 6-37.
<http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rns/v4n2/2631-2654-rns-4-02-00006.pdf>
- Campbell Hausfeld. (2012). *Filtro-Regulador*.
https://www.campbellhausfeld.com/files/manuals/manual01/739900_1012_web.pdf
- CEER. (2020). *Estudio de línea base del mercado de la pintura en Ecuador*.
http://www.saicm.org/Portals/12/Documents/GEF-Project/Lead-Paint/L%C3%ADnea_Base_Ecuador_SP.pdf
- Contaval Automatismos y Componentes Electrónicos. (s. f.). *Delcon relés de interfaz*. Recuperado 4 de enero de 2023, de
https://delcon.fi/sites/default/files/relas_interfaz_delcon.pdf
- Corso, P., López, A., Caleffi, C., & Dominguez, N. (2016). *Polipropileno*.
<https://ppqujap.files.wordpress.com/2016/05/proceso-de-polipropileno.pdf>
- CYCO. (2021). *Tank cleaner nozzle 19250*. <https://tankcleaningnozzles.com/tank-cleaning-nozzle-19250/>
- di Ciancia, G. (2017). ¿Qué es coeficiente de la válvula “cv”? *AAEDECA*, 1(4), 46-47.
https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa4_di_ciancia_coeficiente_valvula.pdf
- Dieter, G., & Schmidt, L. (2013). *Engineering design* (Quinta). McGraw-Hill.
- Dipac Manta S.A. (2022). *Planchas de acero inoxidable*.
- Dulhoste, J. (s. f.). *Medición de nivel*. Recuperado 4 de enero de 2023, de
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/Documentos/I4_Medicion_de_nivel.pdf

- EBCHQ. (s. f.). *Fuentes de alimentación switcheadas 24 VDC*. Recuperado 29 de enero de 2023, de https://www.viaindustrial.com/catalogos_pdf/fuentes-de-alimentacion-switcheadas-24-vdc-43079-ebchq-catalogo-espanol.pdf
- ECVM, & Plastics Europe. (2005). *Polyvinylchloride (PVC)*.
http://www.inference.org.uk/sustainable/LCA/elcd/external_docs/spvc_60635d04-5246-45d7-90a5-59a203bd9369.pdf
- Electrocables. (s. f.). *Conductores de cobre FXT, TFF, TW-F (N.º 17)*. Recuperado 29 de enero de 2023, de <https://www.electrocable.com/uploads/product/17-conductores-de-cobre-fxt-tff-tw-f.pdf>
- Elementis Specialties. (2015). DAPRO ® DF 7010. *Ficha técnica del producto*.
www.elementis-specialties.com.
- E-MC. (2018). *Solenoid Valve*. <https://www.emc-machinery.com/static/uploaded/pdf/20190514161415.pdf>
- Emerson Automation Solution. (2019). *Guía de válvulas de control (Quinta)*. Emerson.
<https://www.emerson.com/documents/automation/gu%EDa-de-v%E1lvulas-de%AOcontrol-control-valve-handbook-spanish-es-5459932.pdf>
- FESTO. (2022a). *Actuadores giratorios DFPD*. https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_ES/PDF/ES/DFPD_ES.PDF
- FESTO. (2022b). *Posicionador CMSX*.
<https://www.festo.com/media/pim/541/D15000100149541.PDF>
- Flowline. (2019). *EchoPod DL14*.
https://www.flowline.com/_data_sheet_and_manuals/current/EchoPod_DL14_Data_Sheet.pdf
- Fuller, R. (1995). *Neural Fuzzy Systems*. Abo Akademi University. <https://uni-obuda.hu/users/fuller.robert/ln1.pdf>

- Genebre. (2017). Válvulas industriales. *Línea industrial*.
https://www.genebre.es/media/contents/catalogo/genebre_catalogo_industrial_2017.pdf
- GTM. (2017). Monoetilenglicol. *Ficha de datos de seguridad*.
- Hicks, T. (1988). *Bombas: Su selección y aplicación*.
- IFM electronic. (2021). *UGT584 Sensor ultrasónico*.
<https://www.ifm.com/es/es/product/UGT584>
- INEN. (1998). *Pinturas* (N.º 1021-1983-04).
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1021.pdf>
- INEN. (2008). *Conductores y alambres para uso eléctrico aislados con material termoplástico* (RTE-021).
[https://www2.aladi.org/nsfaladi/normasTecnicas.nsf/09267198f1324b64032574960062343c/38e14acd6fe10986032579de006caed0/\\$FILE/Resolución%20Nº%20020-2008.pdf](https://www2.aladi.org/nsfaladi/normasTecnicas.nsf/09267198f1324b64032574960062343c/38e14acd6fe10986032579de006caed0/$FILE/Resolución%20Nº%20020-2008.pdf)
- INEN. (2015a). *Pinturas arquitectónicas, pintura en emulsión base agua (látex)* (N.º 1544-2015-07). <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte-inen-1544-2.pdf>
- INEN. (2015b). *Tubería plástica: tubos de pvc rígido unión por rosca para conducción de agua potable a presión, cédula 80, requisitos* (NTE 2497).
https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2497.pdf
- INEN. (2017). *Tubería plástica: Accesorios de polipropileno (pp) para unión por rosca en sistemas de conducción de agua fría y caliente a presión, requisitos* (NTE INEN 2956). https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_2956.pdf
- Jebsen & Jessen Chemicals. (2018). *Nonylphenol ethoxylated 10 mol*.
- Jefferson Sudamericana S.A. (2015). *Válvulas a solenoide. 2*.

- Karassik, I., Messina, J., Cooper, P., & Heald, C. (2001). *Pump handbook* (Tercera). McGraw-Hill.
- Klir, G., & Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications*. Prentice Hall.
- Kutz, M. (2006). Energy and power. En *Mechanical engineers' handbook* (Tercera, Vol. 4). John Wiley & Sons, INC.
- Metálicos del Bajío. (s. f.). *Estantería, racks, sistema de almacenamiento*. Recuperado 3 de enero de 2023, de <https://meb.com.mx/catalogos/Racks/Racks.pdf>
- Mexichem Ecuador S.A. (2018). *Presión PVC roscable*. <https://plastigama.com/wp-content/uploads/2018/09/HT-PVC-Roscable-2018.pdf>
- NEC. (2017). *Overcurrent protection* [Article 240.4]. <https://www.lorisweb.com/CMGT235/DIS23/NEC%2070%20Section%20240%20pgs%2093-95.pdf>
- Nopco Colombiana S.A. (2014). *Indol RM*.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado* (Cuarta). Pearson Education.
- Parrilla, P. (2011). *Pinturas y revestimiento* [Universidad de San Carlos]. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/02/02_2967.pdf
- PCB Load & Torque Inc. (2014). *Load cell handbook*. https://www.pcb.com/contentstore/mktgcontent/linkedddocuments/load_torque/lt-loadcellhandbook_lowres.pdf
- PetroDerivados. (s. f.). PDC contenedores IBC. *Ficha técnica*. Recuperado 3 de enero de 2023, de <https://petroderivados.com.co/pdf/ibccontenedor.pdf>
- Ross, T. (2004). *Fuzzy logic with engineering applications* (Segunda). John Wiley & Sons, Inc.

- Sandmeyer Steel Company. (2014). Most widely used austenitic stainless steel, a versatile corrosion resistant alloy for general purpose applications. *Specification sheet: Alloy 304-304L*. <https://www.sandmeyersteel.com/images/Alloy304-304L-APR2013.pdf>
- Schneider Electric. (2022). *Interruptor Termomagnético Riel Acti 9 iC60H 1P 6 A Curva C* [Ficha técnica del producto].
<https://www.se.com/pe/es/product/A9F84106/interruptor-termomagn%C3%A9tico-riel-acti-9-ic60h-1p-6-a-curva-c-10-ka-iec-608981-15-ka-iec-609472/>
- Siemens. (2018). *Controlador programable S7-1200 (V4.2.3)*.
<https://support.industry.siemens.com/cs/ww/es/>
- Spraying Systems Co. (s. f.). *Productos para lavado de tanques*.
- Sullivan, J. (1989). *Fluid power, theory and applications* (Tercera). Prentice hall.
- TP-Link. (2022). *Switch de sobremesa con 8 puertos a 10/100 Mbps*. Características de hardware TL-SF1008D. <https://www.tp-link.com/es/home-networking/soho-switch/tl-sf1008d/#specifications>
- Transcell. (2022). *Single Ended Shear Beam (V18.5)*. <https://www.transcell.com/wp-content/uploads/SBS-V18.5.pdf>
- Ugural, A. C. (2015). *Mechanical design of components* (Segunda). Taylor & Francis Group.
- VDI. (2004). *Design methodology for mechatronic systems (VDI 2206)*.
- Viejo, M. (2000). *Bombas, teoría, diseño y aplicaciones* (Segunda). Limusa.
- Wang Li-Xing. (1997). *A course in fuzzy systems and control*. Prentice-Hall International Inc. https://research.iaun.ac.ir/pd/naghsh/pdfs/UploadFile_2079.pdf
- WEG. (2022a). *Línea CSW comando y señalización*.
<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h6d/h42/WEG-mando-y-senalizacion-CSW-50036401-catalogo-es.pdf>

WEG. (2022b). *Relé de interfaz BTWR P16E29*. Detalles del producto.

<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Automatizaci%C3%B3n-Industrial/Controls/Bornes%2C-Enchufes-y-Z%C3%B3calos-Industriales/Bornes/Bornes-Rel%C3%A9-de-Interfaz-BTWR/RELE-INTERFAZ-BTWR-P16E26/p/12604116>

White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (Octava). McGraw-Hill.

Yamada America Inc. (2018). *Product specification guide*.

https://www.yamadapump.com/assets/literature/guides/Yamada_2018_US-ENG_Product_Guide.pdf

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001999586590241X>

Zatotek S.A. (2022). *Pinturas Wesco*. <https://www.pinturaswesco.com/productos>

Zhang, P. (2010). *Advanced Industrial Control Technology* (Primera). Elsevier.