



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA INYECTORA DE POLIURETANO
SEMIAUTOMÁTICA PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA
EMPRESA SETEG PIGS EC**

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

PATRICIO ESTEBAN GARAY CÁRDENAS

DIRECTORA: ING. CRISTINA GISELLE OSCULLO NARANJO, MSc

D. M. Quito

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Patricio Esteban Garay Cárdenas, declaro ser autor del presente trabajo de titulación de la carrera de Ingeniería Mecatrónica y eximo expresamente a la Universidad Internacional del Ecuador y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR”

Patricio Esteban Garay Cárdenas

C.I. 1719528513

CERTIFICACIÓN

La docente de la Facultad de Ciencias Técnicas Ingeniera Cristina Giselle Oscullo Naranjo.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación “DISEÑO DE UNA MÁQUINA INYECTORA DE POLIURETANO SEMIAUTOMÁTICA PARA LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE LA EMPRESA SETEG PIGS EC”, fue desarrollado por Patricio Esteban Garay Cárdenas y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Técnicas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

Ing. Cristina Giselle Oscullo Naranjo, MSc

DIRECTORA DE PROYECTO

ÍNDICE GENERAL

1. TEMA	1
2. OBJETIVOS	1
2.1. OBJETIVO GENERAL	1
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
4. HIPÓTESIS	3
5. ESTUDIO TEÓRICO DEL POLIURETANO Y SU PROCESO DE INYECCIÓN ..	4
5.1. EL POLIURETANO	4
5.1.1. PREPOLÍMERO	5
5.1.2. ACTIVANTE	6
5.1.3. PIGMENTO	6
5.2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN DE POLIURETANO	7
5.2.1. MÁQUINAS DE FUNDICIÓN DE ELASTÓMERO COMERCIALES.....	7
5.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA MÁQUINA DE FUNDICIÓN DE ELASTÓMEROS	9
5.3.1. CABEZAL DE MEZCLA.....	9
5.3.1.1. Cabezales de mezcla de baja presión.....	9
5.3.2. BOMBAS DE DOSIFICACIÓN	11
5.3.3. BOMBA DE VACÍO	12
6. DISEÑO DE LA MÁQUINA INYECTORA DE POLIURETANO	13
6.1. DISEÑO CONCEPTUAL	13
6.1.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	13
6.1.2. DATOS TÉCNICOS DE LOS COMPONENTES.....	14
6.1.2.1. Activante.....	14
6.1.2.2. Prepolímero.....	15
6.1.2.3. Pigmento	15
6.1.3. NORMATIVAS APLICABLES AL DISEÑO DE LA MÁQUINA INYECTORA DE POLIURETANO.....	16

6.1.3.1. Estandar ISO/FDIS 20430.2 “Plastics and Rubber Machines — Injection Moulding Machines — Safety Requirements”	16
6.1.3.2. Normativa aplicable a tanques y recipientes sometidos a baja presión interna.....	17
6.1.3.3. Normativa de bombas de desplazamiento positivo y volumen controlado.....	17
6.1.3.4. Normativa de tableros eléctricos	17
6.1.4. MEZCLA ESTEQUIOMÉTRICA DE COMPONENTES	17
6.1.5. RANGO DE PROPORCIÓN.....	20
6.1.6. CAPACIDAD MÁXIMA	21
6.1.7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	22
6.2. DIMENSIONAMIENTO MECÁNICO	23
6.2.1. CABEZAL DE MEZCLA.....	23
6.2.1.1. Soporte del cabezal de mezcla	25
6.2.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO.....	27
6.2.2.1. Volumen de los tanques.....	27
6.2.2.2. Cilindro de los tanques.....	30
6.2.2.3. Tapas de los tanques	35
6.2.2.4. Soporte de los tanques	39
6.2.3. BOMBA DE VACÍO	40
6.2.4. BOMBAS DE DOSIFICACIÓN	43
6.2.4.1. Bomba de dosificación para el prepolímero y pigmento.....	43
6.2.4.2. Bomba de dosificación para el activante	44
6.2.5. MANGUERAS	45
6.2.6. ESTRUCTURA PRINCIPAL	46
6.2.6.1. Viga Crítica.....	47
6.2.7. RECÁMARAS DE AISLAMIENTO.....	48
6.2.8. RUEDAS	51
6.3. DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO	52
6.3.1. CONTROL DE CAPACIDAD DE LAS BOMBAS	52
6.3.2. CONTROL DE VELOCIDAD DE LAS BOMBAS DE DOSIFICACIÓN Y EL CABEZAL DE MEZCLA	53
6.3.3. ELECTROVÁLVULAS.....	54
6.3.4. MEDIDOR DE FLUJO MÁSSICO	54

6.3.5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE	55
6.3.5.1. Entradas y salidas analógicas y digitales	55
6.3.5.2. Selección del controlador	56
6.3.5.3. Selección de la HMI	57
6.3.6. CONTROLADOR DE TEMPERATURA DE LOS TANQUES	58
6.3.6.1. Módulo de programación Siemens PID_Compact.....	60
6.3.6.2. Termocupla	61
6.3.6.3. Relé de estado sólido.....	61
6.3.7. CABLEADO	62
6.3.8. PROTECCIONES ELÉCTRICAS	63
6.3.9. TABLERO DE CONTROL	65
6.4. PROGRAMACIÓN	66
6.4.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROGRAMACIÓN	67
6.4.2. DISEÑO DE INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI).....	68
7. CONCLUSIONES	70
8. RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. PIGs elaborados por la compañía.....	2
Figura 2. Identificación de las principales partes de los PIGs adaptada de [1].	2
Figura 3. Molde abierto utilizado en la elaboración de discos de limpieza.	3
Figura 4. Cabezal de mezcla modelo MEL de la marca Hennecke.	10
Figura 5. Tipos de mezcladores disponibles para cabezales de baja presión adaptada de [18].	11
Figura 6. Gráfico comparativo del flujo vs presión entre bombas centrífugas y dosificadoras.	12
Figura 7. Pigmento azul (COLORANT BLEU 5013).	16
Figura 8. Caneca de prepolímero Adiprene LF 1800A.	18
Figura 9. Diseño 3D de la solución inicial del prototipo de la inyectora.	23
Figura 10. Cabezal de mezcla MK 400 de la marca Sonderhoof.	24
Figura 11. Diagrama de cuerpo libre del soporte del cabezal.	26
Figura 12. Reacciones generadas por el soporte del cabezal.	26
Figura 13. Variables inmersas en una tapa toriesférica.	36
Figura 14. Tapa modelo “1.2 Round Pressure Cover” de la marca zimmerlin adaptada de [38]	38
Figura 15. Representación gráfica del soporte de los tanques.....	39
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre del soporte del tanque A.	40
Figura 17. Bomba de dosificación marca AquFlow, Series 3000.	44
Figura 18. Selección de la viga crítica en la estructura principal.	46
Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de la viga crítica.	47
Figura 20. Dimensiones generales de las recámaras de aislamiento.	48
Figura 21. Resistencia eléctrica de 500 [W] – 220 [V].	49
Figura 22. Rueda Serie 60 con soporte NL de la marca telluraRota.	52
Figura 23. Variador de frecuencia HydroDrive.	53
Figura 24. Diagrama de bloques de las entradas y salidas digitales y analógicas.	56
Figura 25. Controlador lógico programable Siemens SIMATIC S7-1200.	56
Figura 27. Interfaz humano-máquina SIMATIC HMI KPT400 Basic.	57
Figura 28. Gráficas del sistema sin controlador simulado en Simulink de Matlab.	59
Figura 29. Gráficas del sistema implementando un controlador PID simulado en Simulink de Matlab.	60

Figura 30. Módulo tecnológico de programación Siemens PID_Compact.	61
Figura 31. Termocupla tipo J modelo 1118 de la marca TCP.	61
Figura 32. Relé de estado sólido de la marca RELEQUICK.	62
Figura 33. Tableros de control tipo mural de la marca LOHMEIER.....	65
Figura 34. Diagrama de flujo de programación principal.	67
Figura 35. Pantalla principal de la HMI de la máquina inyectora de poliuretano.	68
Figura 36. Pantalla de las variables del proceso de la HMI de la máquina inyectora de poliuretano.....	69
Figura 37. Pantalla de proceso de la HMI de la máquina inyectora de poliuretano...	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes principales del poliuretano.....	4
Tabla 2. Cuadro comparativo de máquinas de fundición de elastómeros comerciales.	8
Tabla 3. Representación de las necesidades en características técnicas.....	14
Tabla 4. Características típicas de la Moca.....	15
Tabla 5. Propiedades típicas de los prepolímeros.....	15
Tabla 6. Condiciones de procesamiento de los prepolímeros.	15
Tabla 7. Datos técnicos de los pigmentos de la marca Baulé.	16
Tabla 8. Etapas identificadas del proceso con la alternativa de solución.	22
Tabla 9. Especificaciones técnicas requeridas para el cabezal de mezcla.	23
Tabla 10. Cabezales de baja presión de la marca Sonderhoff.	24
Tabla 11. Propiedades mecánicas del perfil IPN de DIPAC.	25
Tabla 12. Datos requeridos para el cálculo del volumen del tanque B.....	28
Tabla 13. Datos requeridos para el cálculo del volumen del tanque A.....	29
Tabla 14. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304.....	33
Tabla 15. Datos requeridos en el cálculo del espesor del tanque de prepolímero. ...	34
Tabla 16. Datos requeridos en el cálculo del espesor del tanque de activante.	35
Tabla 17. Datos para la selección del factor M.....	36
Tabla 18. Características técnicas y dimensiones de las tapas superiores de los tanques.	38
Tabla 19. Dimensiones de las tapas inferiores de los tanques de los componentes.	39
Tabla 20. Datos disponibles para la selección de la bomba de vacío	40
Tabla 21. Cuadro comparativo de bombas de vacío de la marca BECKER.....	42
Tabla 22. Requerimientos técnicos para la selección de las bombas de dosificación.	43
Tabla 23. Bombas de dosificación de la marca AquFlow para el prepolímero + pigmento.....	43
Tabla 24. Bombas de dosificación de la marca AquFlow para el activante.....	44
Tabla 25. Requerimientos técnicos de las mangueras.....	45
Tabla 26. Datos técnicos de las mangueras de teflón (PTFE) de la marca ORK serie M.	46
Tabla 27. Datos requeridos para el cálculo del espesor del aislante.....	49

Tabla 28. Condiciones de trabajo para las ruedas de la máquina inyectora de poliuretano.....	51
Tabla 29. Características técnicas de la rueda Serie 60 con soporte NL.	52
Tabla 30. Especificaciones técnicas del controlador ECCA.	53
Tabla 31. Especificaciones técnicas del variador de frecuencia HydroDrive.....	53
Tabla 32. Características técnicas de las electroválvulas seleccionadas.....	54
Tabla 33. Características técnicas principales del medidor de flujo másico de la marca Tricor.	55
.Tabla 34. Características principales del PLC Siemens SIMATIC S7-1200.....	57
Tabla 35. Características principales de SSR RELEQUICK.	62
Tabla 36. Conexiones requeridas con su respectivo calibre AWG.....	62
Tabla 37. Cálculo de la corriente de fusión dependiente de la corriente nominal del fusible.....	64
Tabla 38. Dimensiones de los componentes eléctricos / electrónicos.....	66

ABREVIATURAS

API: American Petroleum Institute.

ASME: American Society of Mechanical Engineers.

BPVC: Boilers and Pressure Vessels Code.

CFM: Cubic feet per minute.

ECCA: Electronic Capacity Control AquFlow

GPH: Galones por hora.

HMI: Human Machine Interface.

IEC: International Electrotechnical Commission.

ISO: International Organization for Standardization.

MDI: Diisocianato de difenilmetano.

NCO: Nitrógeno, Carbono y Oxígeno.

NDI: Diisocianato de 1,5-naftaleno.

NEC: National Electric Code.

NFPA: National Fire Protection Association.

PIG: Pipeline Inspection Gauge.

PLC: Programmable Logic Controller.

PU: Poliuretano.

RIM: Reaction Injection Molding.

TDI: Diisocianato de tolueno.

VF: Variador de frecuencia.

W/H/D: Ancho x alto x profundidad.

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se diseñó una máquina inyectora de poliuretano semiautomática para la línea de producción de la empresa SETEG PIGS EC, especializada en la elaboración y ensamblaje de herramientas de limpieza utilizadas en el mantenimiento, inspección y conservación del interior de tuberías, denominados PIGs. La máquina posee una capacidad de inyección aproximada de 26.000 [g] con un caudal de inyección de 60 [g/s].

Se realiza un análisis de las máquinas distribuidas comercialmente de similares características como punto de referencia para el dimensionamiento y selección de los diferentes elementos requeridos en la parte mecánica, eléctrica y de programación.

La máquina diseñada es móvil y comienza su proceso con el aislamiento de la temperatura de los componentes ingresados previamente por el operador a la temperatura requerida, terminando en la inyección de la mezcla estequiométrica que es depositada en los moldes que posee la compañía. Consta del cabezal de mezcla Sonderhoff modelo MK 400 de baja presión, la dosificación se realiza con las bombas de la marca AquFlow Series 3000 modelo CNIT 1088-04055 y CNIT 1044-04055 para el prepolímero + pigmento y el activante respectivamente. La degasificación se lleva a cabo con la bomba Becker modelo U4.40. La capacidad mínima de los tanques se establece en 40 litros para el prepolímero + pigmento y 3 litros para el activante. El diseño de los elementos estructurales es enfocado en la rigidez de los mismos, siendo considerada como una máquina de precisión moderada.

Finalmente se selecciona el PLC Siemens S7-1200 CPU 1214C, con los módulos adicionales SM 1232, SM 1222 y SM 1231 requeridos por el manejo de 25 entradas y salidas analógicas y digitales; y una HMI KTP 400 Basic que permite el control de las variables del proceso, incluido el ingreso del peso de cada pieza a inyectar para modificar automáticamente el tiempo de inyección requerido.

1. TEMA

Diseño de una máquina inyectora de poliuretano semiautomática para la línea de producción de la empresa SETEG PIGS EC.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar una máquina inyectora de poliuretano semiautomática para la línea de producción de la empresa SETEG PIGS EC.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y documentar las principales características del poliuretano utilizado como materia prima para los productos fabricados por la empresa SETEG PIGS EC.
- Investigar y documentar los principios de funcionamiento de las máquinas inyectoras de poliuretano.
- Identificar las diferentes etapas del proceso y diseñar los elementos que componen la máquina inyectora de poliuretano, con una capacidad de inyección de hasta sesenta gramos por segundo.
- Diseñar un control semiautomático del proceso de inyección por medio de un controlador.
- Programar una HMI (Human Machine Interface) para el ingreso del valor de los parámetros de inyección, de acuerdo a los requerimientos técnicos de los productos elaborados por la empresa.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

SETEG PIGS EC [1], en adelante denominada como la compañía, es una empresa ecuatoriana dedicada a la fabricación y comercialización de diversos productos en poliuretano, especializándose en la elaboración y ensamblaje de herramientas de limpieza utilizadas para el mantenimiento e inspección del interior de tuberías, denominados PIGs (por sus siglas en inglés *Pipeline Inspection Gauge*) como los mostrados en la Figura 1; además brindan los servicios asociados a dicha operación

como el rastreo y localización de PIGs atascados, capacitaciones en la limpieza y conservación de ductos, charlas sobre el almacenamiento y ensamble de PIGs, entre otros.



Figura 1. PIGs elaborados por la compañía [1].

Los PIGs están formados por diferentes combinaciones de partes en acero, aluminio y polímero; por tal motivo la empresa dispone de dos áreas específicas, el área de producción de poliuretano y el área de metalmecánica en donde se trabaja el acero, el aluminio y los polímeros a mecanizar.

El área de producción de poliuretano es la encargada de la fabricación de las principales partes de los PIGs descritas a continuación e identificadas en la Figura 2:

- Discos de limpieza desde 2 hasta 36 pulgadas de diámetro.
- Discos guía desde 2 hasta 36 pulgadas de diámetro.
- Copas cónicas desde 2 hasta 36 pulgadas de diámetro.
- Copas planas desde 2 hasta 36 pulgadas de diámetro.
- Espaciadores desde 2 hasta 28 pulgadas de diámetro.
- Bumpers desde 2 hasta 28 pulgadas de diámetro.

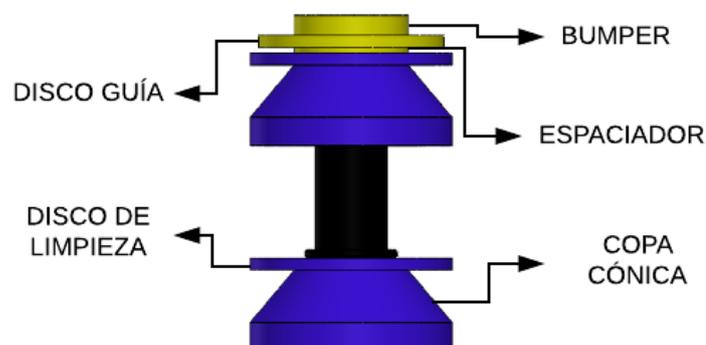


Figura 2. Identificación de las principales partes de los PIGs adaptada de [1].

En la compañía todas las partes de poliuretano son fabricadas mediante el proceso de vertido manual en un molde de acero abierto como el mostrado en la Figura 3;

por lo cual, las dimensiones y peso de las diferentes piezas dependen de la precisión y experiencia del operario. Se ha comprobado que los productos elaborados, no poseen consistencia dimensional unos con otros. Esta inconsistencia afecta en el armado, presentación de las herramientas y en la calidad de los productos que la empresa provee a sus distintos clientes.

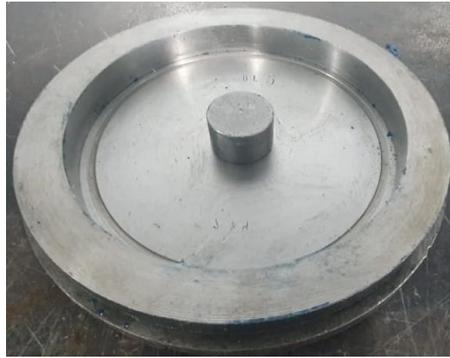


Figura 3. Molde abierto utilizado en la elaboración de discos de limpieza.

La compañía en un proceso de mejora continua, requiere incorporar una máquina que permita inyectar el poliuretano de una manera automatizada y disponer de productos de superior calidad que le brinden la posibilidad de mantenerse competitivos en el mercado petrolero, que es uno de los principales segmentos que utiliza estos PIGs.

La capacidad de producción de la empresa actualmente es de 20 [kg] de poliuretano en una jornada de trabajo completa (8 horas diarias). El número de lotes y unidades producidas depende del diámetro y el número de moldes disponibles por cada pieza. La empresa no maneja un stock definido y la fabricación se realiza de acuerdo a las especificaciones técnicas de cada pedido.

4. HIPÓTESIS

La implementación de una máquina inyectora de poliuretano para la compañía permite el aumento de la producción diaria con una capacidad máxima de 60 [g/s] (sesenta gramos por segundo) y con un máximo de 26 [kg] de poliuretano por ciclo de inyección aproximadamente.

Además, el operador puede ingresar el peso de las distintas piezas a ser fabricadas, y la inyectora modificará el tiempo de inyección del material, garantizando las cantidades requeridas de materia prima para la mezcla.

5. ESTUDIO TEÓRICO DEL POLIURETANO Y SU PROCESO DE INYECCIÓN

La presente sección busca introducir la teoría general de los componentes que forman parte del proceso de inyección del poliuretano manejado por la compañía. El poliuretano, identificado como componente principal, será definido por medio de conceptos e información relevante sobre sus propiedades. Cada componente es descrito con el objetivo de conocer sus propiedades técnicas y los requisitos necesarios a tomar en cuenta para su manipulación y procesamiento.

Se realiza un estudio comparativo de máquinas comerciales empleadas en la inyección del poliuretano, buscando una referencia o punto de partida en el diseño del proyecto. Adicional, los componentes de la máquina identificados como principales, son definidos para su posterior selección o diseño.

5.1. EL POLIURETANO

El poliuretano pertenece a la gran familia de los elastómeros, que tienen como características principales la elasticidad y resiliencia; es decir, tienen la capacidad de deformarse y volver a su forma inicial, cuando se elimina la fuerza aplicada, por medio de la energía que se almacenó al deformarse [2].

Los poliuretanos son polímeros orgánicos que contiene al grupo uretano, en su estructura; y están principalmente formados de la reacción de un poliol con un diisocianato [3].

En la Tabla 1 se muestran los componentes principales de un elastómero de poliuretano curado.

Tabla 1. Componentes principales del poliuretano [3].

1. Polioles	<ul style="list-style-type: none"> • Poliéter • Poliéster
2. Diisocianato	<ul style="list-style-type: none"> • Aromático • Alifático
3. Extensor de cadena	<ul style="list-style-type: none"> • Diaminas • Componentes de hidroxilo (agua) • Polioles
4. Otros	<ul style="list-style-type: none"> • Pigmentos

Cada uno de los componentes cumple con una función específica dentro de las propiedades mecánicas del poliuretano:

- **Poliol (Polyol):** Los polioles proporcionan el esqueleto o segmento blando que brinda la dureza, resistencia y rigidez del producto final. En la fabricación de poliuretanos moldeables se emplea dos grupos principales de polioles, los poliéteres y poliésteres.
- **Diisocianato (Diisocyanate):** Los isocianatos forman la mayor parte de la fase dura o rígida del poliuretano. Los tres isocianatos principales empleados en el poliuretano moldeable son el diisocianato de tolueno (TDI), el 4,4' diisocianato de difenilmetano (MDI) y el diisocianato de 1,5-naftaleno (NDI).
- **Extensor de cadena o activante (Chain extender):** Los dos grupos principales utilizados como extensores de cadena son las diaminas y los dioles. La elección del extensor de cadena depende de las propiedades mecánicas requeridas y las condiciones del proceso. Los dioles brindan mejores propiedades y velocidad de procesamiento con prepolímeros basados en MDI y las diaminas con prepolímeros terminados en TDI.

Los poliuretanos poseen propiedades similares al caucho y se forman de la reacción entre un prepolímero con un agente de curado; uno de los agentes curativos utilizados en prepolímeros terminados en diisocianato de tolueno (TDI) es la Moca [4].

5.1.1. PREPOLÍMERO

El prepolímero, típicamente es la síntesis entre la reacción de un exceso de Diisocianato con uno de Polioliol, formando un compuesto estable listo para ser procesado con un activante y obtener poliuretano según las propiedades mecánicas requeridas [3].

La compañía emplea dos referencias de prepolímero, Adiprene LF 1900A [5] y Adiprene LF 1800A [6]; cada una es aplicada en la fabricación de las partes en poliuretano, dependiendo de la dureza requerida.

Los prepolímeros Adiprene LF 1800A y Adiprene LF 1900A son fabricados por la empresa LANXESS y distribuidos en canecas metálicas de 22,7 [kg]. Ambas referencias son prepolímeros de poliéster terminado en TDI (Diisocianato de

Tolueno) que tienen un contenido de TDI libre muy bajo, menos del 0,1% libre de TDI, beneficioso para el manejo y control de exposición del trabajador al TDI.

Las características principales de ambos prepolímeros son las siguientes:

- Baja viscosidad, lo que le permite procesarse a temperatura reducida para una mejor estabilidad al calor.
- Mayor tiempo permisible para el vertido.
- Aplicaciones de alta carga, como rodillos y ruedas.

La baja viscosidad y el mayor tiempo permisible de vertido, mejoran el rendimiento del proceso de fundición (casting process).

5.1.2. ACTIVANTE

Para conseguir las propiedades mecánicas de dichos prepolímeros, es necesaria la mezcla estequiométrica con un activante. Comercialmente existen varias diaminas empleadas en el curado del poliuretano, una de ellas, la Moca (4,4" Methylene bis (2-chloroaniline)), ha brindado las mejores propiedades mecánicas finales; sin embargo, ha sido catalogada como un agente cancerígeno sospechoso.

Dos alternativas comerciales son presentadas actualmente por Clemitson [3], Ethacure 300 y Lonzacure M-CDEA. El estudio de Nalepa [7] muestra la comparación de las propiedades mecánicas entre la Moca y el Ethacure 300 y los datos se muestran en el Anexo A.1.

5.1.3. PIGMENTO

El pigmento brinda al poliuretano una protección contra los rayos UV evitando la degradación y la coloración amarilla distintiva de un material expuesto al sol. Permite la diferenciación por color entre piezas de distinta dureza y da una mejor presentación a las mismas.

Los pigmentos se introducen típicamente y se mezclan previamente en la fase de polioli del sistema (resina, extensor de cadena) antes de agregar el prepolímero. De ser necesario o por mayor facilidad, se pueden agregar al prepolímero. Los agentes colorantes se pueden introducir en el sistema hasta el 1% de acuerdo con la intensidad del color objetivo, sin afectar las propiedades [8].

5.2. MÁQUINAS DE INYECCIÓN DE POLIURETANO

Conocidas como Máquinas de Fundición de Elastómero (por su traducción del inglés de *Elastomer Casting Machine*) estas máquinas fueron desarrolladas por la necesidad de procesar elastómeros, de mediana escala a gran escala, y por la imposibilidad de emplear la mezcla por colisión (por su traducción del inglés de *Impingement Mixing*), que se describe en el Anexo C.1.

Los elementos principales de una máquina de fundición de elastómero, recopilando la información de ANNOVI [9] y Zhejian [10], son los siguientes:

1. Estructura principal para soporte de todos los componentes e instrumentos.
2. Tanque de almacenamiento individual para el prepolímero y el activante.
3. Bombas de dosificación independientes para el prepolímero y el activante.
4. Tuberías y mangueras diseñadas para temperaturas ≥ 100 [°C]
5. Controlador de flujo de cada bomba (VF).
6. Bomba de vacío para desgasificación del prepolímero.
7. Cabezal de mezcla dinámico de baja presión.
8. Bombas de dosificación para la inyección de pigmentos directamente al cabezal o previamente al tanque de prepolímero.
9. Apoyo tipo brazo para cabezal de mezcla.
10. Mandos de control lógicos para la inyección y limpieza.
11. Interfaz humano – máquina (HMI) para el control intuitivo y rápido.
12. Controlador Lógico Programable (PLC) para el control global de la máquina.

5.2.1. MÁQUINAS DE FUNDICIÓN DE ELASTÓMERO COMERCIALES

Actualmente existen varias empresas que fabrican este tipo de maquinaria, como VM, ANNOVI, PUMIX, Henghui, SAIP, Sonderhoff, entre otros. Algunas máquinas encontradas comercialmente son descritas en el Anexo C.2. En la Tabla 2 se presenta un resumen comparativo de las máquinas de fundición de elastómeros descritas anteriormente. Dicha comparación permite visualizar de una mejor manera los datos recopilados.

Tabla 2. Cuadro comparativo de máquinas de fundición de elastómeros comerciales.

	Zhejiang Henghui Machine [10]	Elastomix (Size S) [11]	Elastoline F [12]	Sonderhoff DM 70 [13]	Sonderhoff DM 402/403 [14]
Dimensiones generales [mm] (W/H/D)	1500 x 2200 x 2000	2800 x 2000 x 1300	1600 x 2430 x 2990	850 x 1.300 x 1400	1500 x 1500 x 1280
Número de componentes a mezclar	2	2 o 3	máx. 8	2	2 o multi - componentes
Método de calentamiento de los tanques	Cada tanque mediante electricidad	Independiente con recirculación forzada de aire caliente	Tecnología de aire caliente	Cada tanque mediante electricidad	Cada tanque mediante electricidad
Rango de mezcla	N/D	N/D	10:1	100:5 a 1:1	100:1 a 1:100
Rango de flujo [g/s]	16 - 50	8,33 - 200	máx. 500	0,1 - 100	0,05 - 100
Velocidad del agitador del cabezal [rpm]	N/D	0 - 6000	N/D	200 - 2700	1 - 6000
Rango de viscosidad [Pa.s (cP)]	N/D	N/D	0,1 – 2 (100 – 2000)	0,1 – 2000 (100 - 2x10 ⁶)	0,001 - 2000 (1 - 2x10 ⁶)
Peso total [kg]	1500	N/D	N/D	400	920
Presión de aire para limpieza [bar (MPa)]	N/A	N/A	6 (0,6)	6 – 7 (0,6 – 0,7)	6 – 7 (0,6 – 0,7)
Presión máxima de operación [MPa (bar)]	N/D	N/D	6 (60)	5 (50)	2 (20)
Capacidad de tanques [m³ (lt)]	0,06 (60)	0,02 – 0,1 (20 - 100)	0,03 / 0,06 (30 / 60)	0,024/0,044 (24 / 44)	0,024 / 0,044 (24 / 44)

N/A: No Aplica / N/D: Información no disponible

5.3. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA MÁQUINA DE FUNDICIÓN DE ELASTÓMEROS

Analizando la información recopilada de las máquinas de fundición de elastómero, se determina que posee cinco componentes principales:

1. Cabezal de mezcla.
2. Bombas de dosificación para cada componente.
3. Bomba de desgasificación.
4. Tanques de almacenamiento para cada componente.
5. Controlador lógico programable.

5.3.1. CABEZAL DE MEZCLA

El cabezal de mezcla es el componente principal de una máquina inyectora de poliuretano; dentro de este se produce la mezcla y reacción química del prepolímero con el activante, y dependiendo del tipo de cabezal permite la adición directa del pigmento en la mezcla.

Existen actualmente una gran cantidad de empresas que manufacturan distintos tipos de cabezales de mezcla dependiendo de la aplicación, entre las cuales se encuentran Cannon, Hennecke, Ureatac, Graco, Krauss Maffei, EMB, SAIP, entre otras.

Los cabezales de mezcla se clasifican en dos grandes grupos:

- Cabezales de mezcla a alta presión (High-pressure mixing head), descritos en el Anexo C.1.
- Cabezales de mezcla a baja presión (Low-pressure mixing head).

5.3.1.1. Cabezales de mezcla de baja presión

Fabricados por empresas como Hennecke, SAIP o Sonderhoff, son empleados en producciones relativamente bajas de recubrimientos, adhesivos, selladores y elastómeros de poliuretano.

Posee un principio de funcionamiento parecido a los cabezales de alta presión, con la diferencia principal del método de mezcla. El proceso se efectúa en el interior de

una cámara de mezcla, donde ingresan los componentes a una baja presión, entre 206 y 3447 [kPa] dependiendo de la viscosidad y del flujo requerido; la mezcla es realizada por un agitador mecánico que gira entre 3000 y 8000 [rpm] dependiendo del compuesto y flujo requerido según Council [15]. Al finalizar el ciclo de inyección es necesaria la limpieza de la cámara de mezcla con solventes y/o agua, dependiendo del cabezal, evitando la obstrucción del rotor o taponamiento de la boquilla.

En la Figura 4 se muestra el cabezal de mezcla de baja presión de la marca Hennecke [16], modelo MEL diseñado especialmente para sistemas elastoméricos de 6 u 8 componentes.

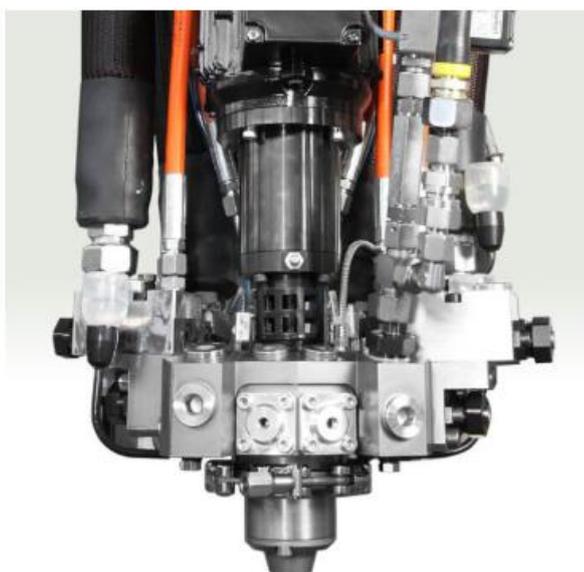


Figura 4. Cabezal de mezcla modelo MEL de la marca Hennecke [16].

Los cabezales de baja presión ofrecen un amplio rango en la proporción de la mezcla y en la capacidad de descarga, así lo muestra la marca Sonderhoff [17], brindando una salida entre 0,1 y 100 [g/s] y una relación desde 100:1 a 1:100 con una precisión en la descarga de los componentes de aproximadamente +/- 1%.

El tipo de mezclador depende principalmente de la viscosidad, características del fluido y flujo de inyección. El proveedor del cabezal de mezcla recopila dicha información y proporciona el mezclador adecuado para cada aplicación. En la Figura 5 se muestra diferentes tipos de mezcladores de la marca ESCO [18].

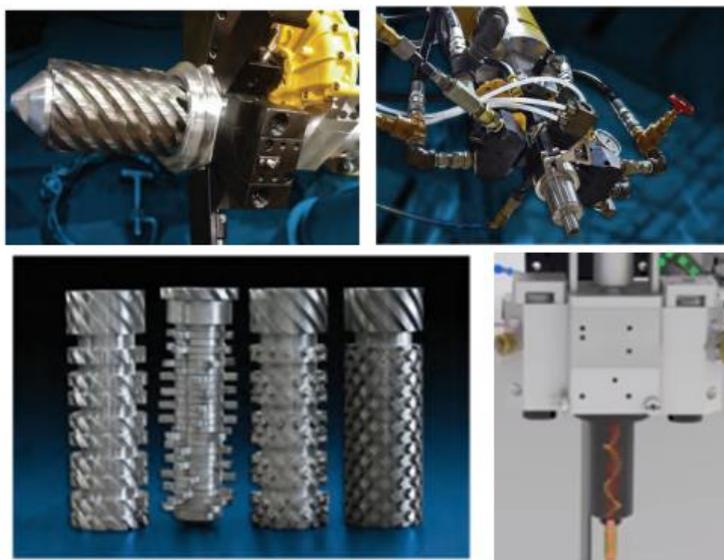


Figura 5. Tipos de mezcladores disponibles para cabezales de baja presión adaptada de [18].

5.3.2. BOMBAS DE DOSIFICACIÓN

Las bombas de dosificación (conocidas en inglés como *Metering Pumps*) son dispositivos con la posibilidad de variar su capacidad de forma manual o automática según requiera las condiciones del proceso, y mantener una salida lineal en el transcurso del tiempo. Entre las características principales descritas por Milton Roy [19] se tiene:

- Alto nivel de precisión repetitiva.
- Bombeo de una amplia gama de productos químicos, incluidos ácidos, bases, corrosivos o líquidos viscosos y lodos.
- Rangos bajos de caudal (ml/hr).
- Sistemas de alta y baja presión.
- Alta precisión de bombeo requerido.
- Dosificación controlada por un microcontrolador, PLC, etc.
- Se manejan fluidos corrosivos, peligrosos o de alta temperatura.

La Figura 6 muestra la comparación entre una bomba de dosificación de desplazamiento positivo y una bomba centrífuga convencional, el flujo se mantiene constante pese a los cambios de presión en la descarga.

En la selección de las bombas de dosificación se debe tomar en consideración varios parámetros principales descritos por PSG [20] y AquFlow [21] como:

1. Presión de descarga.
2. Caudal requerido o tasa de inyección usualmente en GPH (Galones por hora).
3. Viscosidad del fluido.
4. Temperatura del fluido.
5. Detección de fugas.
6. Cambios futuros en el proceso.

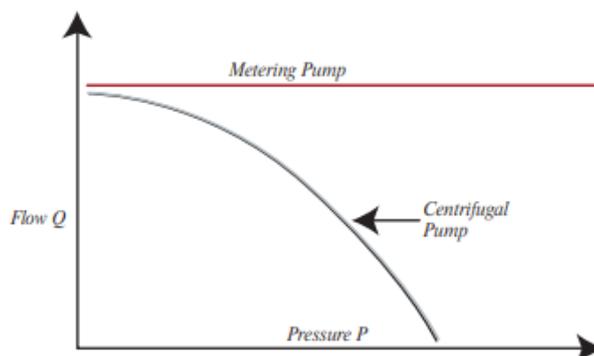


Figura 6. Gráfico comparativo del flujo vs presión entre bombas centrífugas y dosificadoras [19].

Se recomienda que la capacidad de la bomba no exceda el 90% de su capacidad de flujo máximo y a su vez no se encuentre por debajo del 10% de su flujo mínimo [21].

Las características principales de los diferentes tipos de bombas de dosificación de desplazamiento positivo, empleadas en la industria química, son descritas en el Anexo C.3.

La capacidad de flujo puede ser controlada de dos maneras:

1. Regulando la velocidad de la carrera de la bomba con un variador de velocidad.
2. Regulando la longitud de la carrera efectiva del émbolo de la bomba. Este ajuste de longitud de carrera se puede hacer manualmente o mediante un ajustador de carrera automático.

5.3.3. BOMBA DE VACÍO

La bomba de vacío es empleada en la extracción de partículas de un gas dentro de un volumen cerrado. Debido a que la diferencia de presión máxima absoluta que se puede producir es igual a la presión atmosférica (nominalmente 29,92 [inHg] (101.32 [kPa]) al nivel del mar), es importante conocer este valor en el sitio de trabajo.

Por ejemplo, una bomba con una capacidad de vacío máxima de 24 [inHg] (81.2 [kPa]), no puede generar 24 [inHg] (81.2 [kPa]) de vacío cuando la presión atmosférica es de 22 [inHg] (74.5 [kPa]) en el sitio de trabajo [22].

Los principales datos técnicos para la selección de la bomba de vacío son los siguientes:

- Presión atmosférica en el sitio de trabajo.
- Volumen de la recámara o tanque a evacuar.
- Tasa de succión del volumen de aire aspirado en CFM (ft³/min) o m³/h.
- Nivel de vacío máximo requerido en inHg o Pa.

6. DISEÑO DE LA MÁQUINA INYECTORA DE POLIURETANO

En la presente sección se definen, por medio de un diseño conceptual, los requerimientos técnicos que la máquina debe poseer para satisfacer las necesidades de producción de la compañía. Mediante los datos definidos, se dimensiona y selecciona los diferentes equipos y componentes tanto en la parte mecánica, eléctrica y de programación.

6.1. DISEÑO CONCEPTUAL

El proceso actual empleado por la compañía es representado mediante un diagrama de flujo del proceso, aplicando la simbología ASME mostrada en el Anexo A.2. El diagrama de flujo del proceso de fabricación de las piezas de poliuretano de la empresa SETEG y su respectiva explicación son presentados en el Anexo A.3.

6.1.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Las necesidades expresadas por parte del usuario son traducidas a características técnicas de la máquina por medio del conocimiento previo del ingeniero y son presentadas en la Tabla 3.

Tabla 3. Representación de las necesidades en características técnicas.

Requerimientos del usuario	Requerimientos técnicos
El prepolímero mezclado previamente con el pigmento debe mantenerse a 100 °C y la Moca a 116 °C durante el proceso de inyección.	Control de temperatura de materias primas a 100 °C y 116 °C respectivamente.
Realizar la mezcla de los componentes según la necesidad de producción.	Dosificación de cada uno de los componentes según la estequiometría de cada material.
Evitar las burbujas en el producto final.	Desgasificación del prepolímero mediante proceso de vacío.
Inyección de material necesario por molde según la planificación de producción.	Control del tiempo de inyección de la mezcla necesaria para llenar los moldes planificados por producción.
Movilidad de la máquina por la planta de producción.	Implementación de apoyos móviles y frenos en la estructura, permitiendo la movilidad por la planta de producción
Consideración del espacio disponible para su movilidad.	Dimensionamiento de los componentes y estructura según el espacio disponible para la movilidad.

6.1.2. DATOS TÉCNICOS DE LOS COMPONENTES

Los componentes principales que intervienen en el proceso de producción del poliuretano son el prepolímero, el pigmento y el activante. Los datos técnicos son requeridos para su correcto procesamiento y manejo durante el proceso de inyección.

6.1.2.1. Activante

El activante empleado, conocido como Moca, Mboca o Mbca dependiendo del fabricante, es un agente de curado y endurecimiento de diamina principalmente para uso con prepolímeros de uretano, que a temperatura ambiente se lo encuentra en estado sólido en forma de pellets. Químicamente se lo denota como 4,4" Methylene bis (2-chloroaniline), y comercialmente según Chemtura [23] se lo puede encontrar como:

- CAS #s [101-14-4, 202-918-9].
- Vibracure® A133.

- Vibracure A133 HS.
- Vibracure A134.

Las características típicas de la Moca descritas por Chemtura y Osha [24] son recopiladas en la Tabla 4.

Tabla 4. Características típicas de la Moca [23].

Características	Valor
Punto de fusión	98 [°C]
Temperatura máxima de operación	140 [°C]
Temperatura de descomposición	204 [°C]
Gravedad específica [24]	1,44

6.1.2.2. Prepolímero

En la Tabla 5 y en la Tabla 6 se comparan las propiedades típicas y las condiciones de procesamiento de cada prepolímero.

Tabla 5. Propiedades típicas de los prepolímeros.

	LF 1800A [6]	LF 1900A [5]
Viscosidad a 100 °C [Pa.s (cP)]	0,65 (650)	0,5 (500)
Gravedad Específica a 100 [°C]	1,158	1,168
Dureza [Shore A]	80 - 85	90 - 93
% NCO	3,15 – 3,35	4,05 – 4,35

Tabla 6. Condiciones de procesamiento de los prepolímeros.

	LF 1800A [6]	LF 1900A [5]
Temperatura prepolímero [°C]	80 - 100	85 - 100
Temperatura activante [°C]	116	
Tiempo de vertido [min]	10 - 13	6 - 8

6.1.2.3. Pigmento

El pigmento o colorante empleado es una dispersión concentrada de pigmentos en plastificante, adecuada para colorear poliuretano fundido. Brinda protección contra

los rayos UV y permite distinguir las piezas de diferente dureza, de color azul la dureza 80-85 [Shore A] y de color amarillo la dureza 90-93 [Shore A] [8] [25].

Los datos técnicos disponibles de los pigmentos utilizados por SETEG, son mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7. Datos técnicos de los pigmentos de la marca Baulé.

	Pigmento azul [8]	Pigmento amarillo [25]
Viscosidad a 25 °C [Pa.s (cP)]	1 – 3 (1000 – 3000)	0,12 – 0,18 (120 – 180)
Densidad a 25 °C [kg/m³]	1070	1060

En la Figura 7 se muestra el pigmento de color azul con su codificación específica.



Figura 7. Pigmento azul (COLORANT BLEU 5013).

6.1.3. **NORMATIVAS APLICABLES AL DISEÑO DE LA MÁQUINA INYECTORA DE POLIURETANO**

En el dimensionamiento y selección de los diferentes componentes deben ser consideradas varias normativas y estándares mostrados a continuación.

6.1.3.1. **Estandar ISO/FDIS 20430.2 “Plastics and Rubber Machines — Injection Moulding Machines — Safety Requirements”**

El estándar ISO/FDIS 20430.2 se encuentra en desarrollo, alcanzando la última etapa previa a la publicación. Como su nombre lo indica, trata los requerimientos de

seguridad inmersos en las máquinas de plásticos y caucho. El índice del estándar, mostrado en ISO [26], muestra los riesgos mecánicos y térmicos en cada área de la máquina.

6.1.3.2. Normativa aplicable a tanques y recipientes sometidos a baja presión interna

El código ASME Boilers and Pressure Vessels Code Sección VIII Div. 1, abarca el diseño, fabricación e inspección de tanques y recipientes a baja presión; incluye el cálculo dimensional del espesor de los cilindros, tapas, boquillas, soldadura, entre otras [27].

6.1.3.3. Normativa de bombas de desplazamiento positivo y volumen controlado

La norma API 675 [28] fue escrita por la American Petroleum Institute para bombas de desplazamiento positivo y volumen controlado en el área petrolera, química y de gas. Requiere que las bombas de diafragma cumplan ciertos requisitos mínimos de vida útil, funcionamiento ininterrumpido, capacidad de servicio, precisión, repetitividad, entre otras.

6.1.3.4. Normativa de tableros eléctricos

La sección NFPA 79 del NEC abarca los estándares de cableado para maquinaria industrial. El alcance de esta norma abarca elementos eléctricos y electrónicos de toda la maquinaria que opera a 600 [V] o menos, incluidas las máquinas de moldeo por inyección, maquinaria de ensamblaje, máquinas herramientas y maquinaria de manejo de materiales, entre otros [29].

La Norma IEC-61439 garantiza la concepción óptima y el buen funcionamiento de tableros eléctricos de baja tensión, con una tensión nominal máxima de 1.000 [V] en corriente alterna o 1.500 [V] en corriente continua [30].

6.1.4. MEZCLA ESTEQUIOMÉTRICA DE COMPONENTES

El poliuretano es obtenido de la reacción química entre el prepolímero y el activante; previamente, el prepolímero es mezclado con pigmento de color azul o amarillo según corresponda, en cada caneca.

La cantidad de cada componente es calculado por diferentes fórmulas, donde todas dependen del peso de la pieza a fabricar, que es obtenido del volumen de los moldes y la densidad de las piezas proporcionado por SETEG [1].

$$\rho_{piezas} = 1212 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 1,212 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

El proceso de cálculo inicia con (1), donde se obtiene el peso requerido de pigmento.

$$peso_{pigmento} = \frac{peso_{Pieza}}{100} \quad (1)$$

Donde

$peso_{pigmento}$: Peso a aplicar del pigmento, en g;

$peso_{Pieza}$: Peso de la pieza, en g.

Con el peso del pigmento calculado se procede al cálculo del peso del activante, que depende directamente del porcentaje de NCO marcado en cada caneca de prepolímero como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Caneca de prepolímero Adiprene LF 1800A.

En (2) se ingresa el valor del NCO como un número decimal (por ejemplo 3,22) y se obtiene el resultado de las partes por millón requerido para el cálculo final del porcentaje de Moca en (3).

$$pph_{Moca} = \frac{\%NCO \times 12682,5}{4202} \quad (2)$$

Donde

pph_{Moca} : Partes por millón de Moca;

$\%NCO$: Porcentaje de NCO.

$$\%Moca = \frac{pph_{Moca} \times 100}{100 + pph_{Moca}} \quad (3)$$

Donde

$\%Moca$: Porcentaje de Moca para la mezcla, en %;

pph_{Moca} : Partes por millón de Moca.

El peso requerido de Moca es finalmente obtenido en (4).

$$peso_{Moca} = (peso_{Pieza} - peso_{Pigmento}) \times \%Moca \quad (4)$$

Donde

$peso_{Moca}$: Peso de Moca para la mezcla, en g;

$peso_{Pieza}$: Peso de la pieza, en g;

$peso_{Pigmento}$: Peso a aplicar del pigmento, en g;

$\%Moca$: Porcentaje de Moca para la mezcla, en %.

El peso de prepolímero se calcula en (5), con el peso de los otros componentes calculados anteriormente.

$$peso_{Prepolímero} = peso_{Pieza} - peso_{Pigmento} - peso_{Moca} \quad (5)$$

Donde

$peso_{Prepolímero}$: Peso de prepolímero para la mezcla, en g;

$peso_{Pieza}$: Peso de la pieza, en g;

$peso_{Pigmento}$: Peso a aplicar del pigmento, en g;

$peso_{Moca}$: Peso de Moca para la mezcla, en g.

6.1.5. RANGO DE PROPORCIÓN

El rango de proporción es la relación de cantidades presente al momento de realizar la mezcla entre el prepolímero + pigmento y la Moca sin importar el peso final. Esta relación depende principalmente del rango de porcentaje de Moca y está definida por (6).

$$\text{Proporción} = \frac{\%(\text{Prepolímero} + \text{Pigmento})}{\%Moca} = \frac{100\% - \%Moca}{\%Moca} = \frac{100\%}{\%Moca} - 1 \quad (6)$$

Donde

Proporción: Relación entre los componentes;

$\%(\text{Prepolímero} + \text{Pigmento})$: Porcentaje de prepolímero y pigmento presente en la mezcla, en %;

$\%Moca$: Porcentaje de Moca presente en la mezcla, en %.

El porcentaje de NCO, tomando en cuenta ambas referencia de prepolímeros, varía entre 3,15 y 4,35 según la Tabla 5. Aplicando (2) y (3) se calcula el rango de porcentaje de la Moca.

Reemplazando el valor para el límite inferior se obtiene:

$$pph_{Moca} = \frac{3,15 \times 12682,5}{4202} = 9,507$$

$$\%Moca = \frac{9,507 \times 100}{100 + 9,507} = 8,681 [\%] \rightarrow \mathbf{8,69 [\%]}$$

Reemplazando el valor para el límite superior se obtiene:

$$pph_{Moca} = \frac{4,35 \times 12682,5}{4202} = 13,129$$

$$\%Moca = \frac{13,129 \times 100}{100 + 13,129} = 11,605 [\%] \rightarrow \mathbf{11,61 [\%]}$$

El rango obtenido del porcentaje de Moca es:

Rango de porcentaje: 8,69 [%] – 11,61 [%]

Reemplazando el porcentaje mayor y menor de Moca en (6) se obtiene:

$$Proporción_{menor} = \frac{100\%}{11,61\%} - 1 = 7,61 \rightarrow 7$$

$$Proporción_{mayor} = \frac{100\%}{8,69\%} - 1 = 10,5 \rightarrow 11$$

Se aproxima al inferior y al superior, respectivamente, para garantizar que la proporción pueda ser cumplida.

Rango de proporción: 11:1 – 7:1

El dato obtenido es empleado principalmente para la selección del cabezal de mezcla que soporte dicho rango de proporción. Esto quiere decir que en la proporción mayor, por cada gramo de Moca se requiere once gramos de prepolímero + pigmento; o a su vez que en la proporción menor, por cada gramo de Moca se requiere siete gramos de prepolímero + pigmento.

6.1.6. CAPACIDAD MÁXIMA

La capacidad de la máquina, está limitada por el peso de prepolímero en cada caneca (22,7 [kg]). La capacidad máxima se obtiene al considerar el porcentaje superior de Moca en la mezcla estequiométrica (11,61 %) y la cantidad de pigmento requerido. Tomando en cuenta estos parámetros, la cantidad máxima de poliuretano producido está definida por (7).

$$peso_{max} = p_{prepolímeromax} + p_{pigmentomax} + p_{Mocamax} \quad (7)$$

Donde

- $p_{eso_{max}}$: Peso máximo de fabricación, en g;
- $p_{prepolímeromax}$: Peso de prepolímero en cada caneca, en g;
- $p_{pigmentomax}$: Peso máximo de pigmento requerido, en g;
- $p_{Mocamax}$: Peso máximo de moca requerido, en g.

Reemplazando los valores y resolviendo (7) se obtiene:

$$peso_{max} = 22700 [g] + \frac{peso_{max}}{100} + \left(peso_{max} - \frac{peso_{max}}{100} \right) \times 11,61 [\%]$$

$$peso_{max} = 25941 [g]$$

6.1.7. SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Analizando las máquinas de fundición de elastómeros encontradas comercialmente, se puede llegar a definir cuatro etapas principales que emplean la mayoría o en algunos casos todas. Las cuatro etapas principales identificadas son:

- Programación y control.
- Calentamiento de materias primas.
- Dosificación.
- Mezcla, inyección y limpieza.

En la Tabla 8 se define las alternativas seleccionadas para cada etapa identificada del proceso.

Tabla 8. Etapas identificadas del proceso con la alternativa de solución.

Etapa	Alternativa de solución
Programación y control	Programación y control del proceso y los diferentes componentes por medio de un PLC y una HMI.
Calentamiento de materias primas	Recámaras de aislamiento para los tanques de las materias primas, calentados por resistencias eléctricas.
Dosificación	Bombas de dosificación para el control del flujo de inyección de cada componente.
Mezcla, inyección y limpieza	Cabezal de mezcla de baja presión con sistema de limpieza incorporado.

En la Figura 9 se muestra el bosquejo del prototipo incluyendo los componentes principales modelado en un software CAD de diseño.

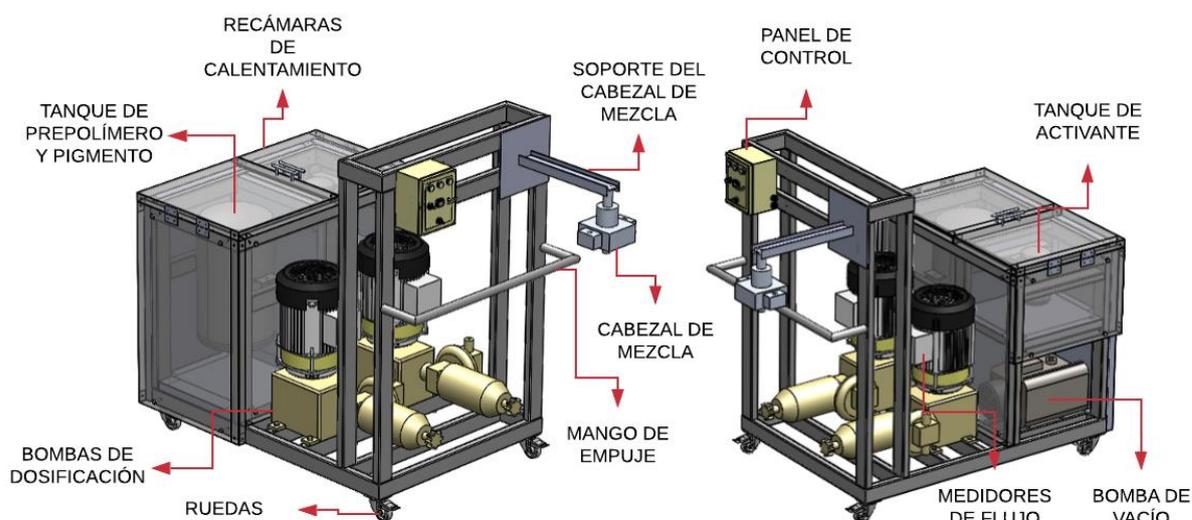


Figura 9. Diseño 3D de la solución inicial del prototipo de la inyectora.

6.2. DIMENSIONAMIENTO MECÁNICO

En la presente sección se dimensiona y selecciona los componentes que conforman la parte mecánica de la máquina de inyección de poliuretano, tales como el cabezal de mezcla, los tanques de almacenamiento, la bomba de vacío, la bomba de dosificación, las mangueras, la estructura principal, las recámaras de aislamiento y las ruedas.

6.2.1. CABEZAL DE MEZCLA

Las características de la máquina son dadas principalmente por los parámetros que proporciona el cabezal de mezcla. Las especificaciones técnicas que debe cumplir el cabezal de mezcla seleccionado son mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones técnicas requeridas para el cabezal de mezcla.

Descripción	Valor
Número de componentes manejados	2
Capacidad de salida	60 [g/s]
Rango de proporción	11:1 – 7:1
Tipo de mezcla	Dinámica
Tipo de limpieza	NO agentes químicos

Dentro de los modelos disponibles que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas, se encuentran los modelos de la marca Sonderhoff mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10. Cabezales de baja presión de la marca Sonderhoff [17].

	MK 600	MK 400
Número máx. de componentes manejados	3	
Dimensiones para 2 componentes [mm] (W/H/D)	200 x 235 x 130	260 x 240 x 175
Presión de operación [bar (MPa)]	Hasta 20 (2)	Hasta 15 (1,5)
Capacidad de salida [g/s]	3 – 100	0,3 – 100
Precisión de dosificación	+/- 1%	
Peso del cabezal para 2 componentes [kg]	5,9	4,6
Rango de proporción	100:1 - 1:100	
Velocidad del agitador [rpm]	1 - 4500	
Limpieza de la recámara de mezcla	Agua a alta presión	

El cabezal de mezcla seleccionado, es el modelo MK 400 de la marca Sonderhoff mostrado en la Figura 10, al cumplir con las características técnicas requeridas y por ser el de menor peso. La presión de descarga del cabezal escogido es máximo 15 [bar] (1,5 [MPa]), pero se asume 20 [bar] (2 [MPa]) en el diseño por una posible mejora del cabezal en un futuro.



Figura 10. Cabezal de mezcla MK 400 de la marca Sonderhoff [17].

La velocidad del agitador varía entre 1 y 4500 [rpm] dependiendo de la viscosidad del fluido y del caudal que se requiera. Dicha velocidad es controlada con un variador de frecuencia y debe ser seleccionada en un proceso previo de calibración general de la máquina.

Posee la opción de implementar la recirculación de los componentes, formando un circuito cerrado, garantizando de esta manera la uniformidad de la temperatura; consta de una válvula de recirculación de precisión regulada electro hidromecánicamente para una dosificación precisa.

Adicional se requiere un sistema de inyección de agua a presión para efectuar la limpieza del cabezal y un sistema de aire a presión para el secado del cabezal después de cada lote de inyección. El sistema de inyección de agua debe poseer un caudal de aproximadamente 13 [l/min] a una presión mínima de 4 [bar] (0,4 [MPa]) y el sistema de aire a presión debe poseer un caudal de 150 [l/min] a un presión entre 6 -7 [bar] (0,6 – 0,7 [MPa]). En el Anexo B.1 se encuentra la ficha técnica del cabezal de mezcla.

6.2.1.1. Soporte del cabezal de mezcla

El soporte, brinda la sujeción al cabezal de mezcla, las mangueras que transportan los fluidos y los cables de control y fuerza que llegan hasta el cabezal de mezcla.

El tipo de perfil escogido es un tipo IPN de DIPAC por los canales, superior e inferior, que permiten la separación y distribución de las mangueras por la parte superior, y los cables de control y fuerza por la parte inferior. La hoja de datos técnica puedes ser visualizada en el Anexo B.2. Las propiedades mecánicas principales son mostradas en la Tabla 11.

Tabla 11. Propiedades mecánicas del perfil IPN de DIPAC.

Descripción	Valor
Tipo de acero	ASTM A 36
Módulo de elasticidad	200 [GPa]
Límite a la fluencia	250 [MPa]

En el diseño del soporte se considera las tres cargas presentes, mostradas en el diagrama de cuerpo libre de la Figura 11. Cada carga corresponde a:

- q1: peso del cabezal sobredimensionado igual a 5,3 [kg].
- q2: peso de las mangueras igual a 0,58 [kg/m].
- q3: peso de 30 [cm] de mangueras igual a 0,174 [kg]).

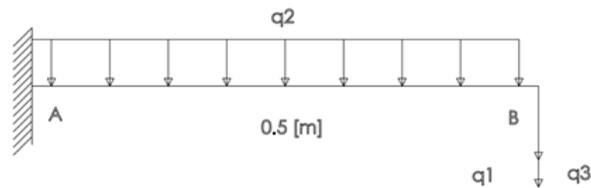


Figura 11. Diagrama de cuerpo libre del soporte del cabezal.

Las reacciones generadas por el soporte del cabezal son mostradas en la Figura 12; las mismas que se deben a la consideración de una viga empotrada en voladizo.

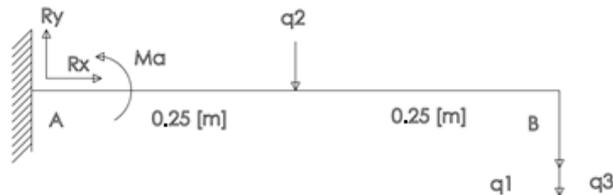


Figura 12. Reacciones generadas por el soporte del cabezal.

Considerando al sistema como isostático, el procedimiento de cálculo de las reacciones puede ser visualizado en el Anexo C.4.

Se aplica un diseño por rigidez para una máquina de precisión moderada donde es permisible una deformación entre 0,00001 - 0,0005 unidades por cada unidad de longitud de la viga según Mott [31]. Aplicando el límite inferior, la deflexión máxima permisible es calculada con (8).

$$y_{\text{máx}} = 0,0005 L \quad (8)$$

Donde

$y_{\text{máx}}$: Deflexión máxima permisible, en m;

L : Longitud de la viga, en m.

La deflexión de una viga en voladizo empotrada puede ser calculada con (9) según Shigley [32].

$$y_{\text{máx}} = -\frac{FL^3}{3EI} \quad (9)$$

Donde

- $y_{m\acute{a}x}$: Deflexión máxima permisible, en m;
- F : Fuerza ejercida en el extremo de la viga, en N;
- L : Longitud de la viga, en m;
- E : Módulo de elasticidad del acero A36, en Pa;
- I : Momento de inercia en el eje de rotación, en m^4 .

Aplicando la deflexión máxima permisible de (8) en (9) se encuentra el momento de inercia mínimo que debe poseer la viga en el eje de rotación que va soportar la carga.

$$I = \frac{(56,56 [N])(0,5 [m])^3}{3(200 \times 10^9 [Pa])(0,0005)(0,5 [m])} = 4,71 \times 10^{-8} [m^4]$$

$$I = 4,71 [cm^4]$$

Finalmente la viga seleccionada es la IPN 80 por cumplir con la inercia requerida en el rango de un diseño por rigidez de una máquina de precisión moderada, en el eje de rotación adecuado ($I=6,29 [cm^4]$).

El soporte es anclado por soldadura a una platina; el cálculo de la soldadura es mostrado en el Anexo C.5.

6.2.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Los tanques son empleados principalmente almacenar los componentes empleados durante el proceso de inyección.

El primer tanque se emplea para el prepolímero mezclado previamente con el pigmento, dentro del cual adicionalmente se realiza el proceso de desgasificación; y el segundo se emplea para el almacenamiento del activante.

6.2.2.1. Volumen de los tanques

El volumen de los tanques es calculado con (10), donde se define que el volumen depende del peso y la densidad de cada componente.

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \quad (10)$$

Donde

V : Volumen del espacio que ocupa el fluido, en m^3 ;

m : Masa del fluido, en kg;

ρ : Densidad del fluido, en kg/m^3 .

6.2.2.1.1. Tanque de activante (tanque B)

Tomando en cuenta el peso máximo de una pieza de poliuretano a ser producida, la cantidad de pigmento requerido, la densidad del activante a 116 [°C] tomada de la Tabla 4 y el límite superior del rango de porcentaje de Moca, se calcula la capacidad volumétrica que el tanque B debe poseer. Los datos descritos se lo puede observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Datos requeridos para el cálculo del volumen del tanque B.

Descripción	Valor
Peso máximo de pieza de poliuretano a ser producida	25,941 [kg]
Densidad del activante (MOCA) a 116 [°C]	1.440 [kg/m ³]
Límite superior del rango de porcentaje	11,61 [%]

Aplicando el orden de cálculo de la sección Mezcla estequiométrica de componentes, se emplea (1) para encontrar el peso de pigmento requerido.

$$peso_{Pigmento} = \frac{25941 [g]}{100} = 259,41 [g]$$

$$peso_{Pigmento} = 260 [g]$$

El límite superior del rango de mezcla estequiométrica determina la cantidad máxima de activante a ser empleado; en este caso la cantidad máxima es calculada con (4):

$$peso_{maxMoca} = (25941 - 260) \times 11,61\% = 2981,56$$

$$peso_{maxMoca} = 2982 [g]$$

Tomando a (10) para el caso del tanque B destinado al activante, se obtiene (11).

$$V_{tanqueB} = \frac{peso_{maxMoca}}{\rho_{Moca}} \quad (11)$$

Donde

$V_{tanqueB}$: Volumen del tanque B, en m^3 ;

$peso_{maxMoca}$: Peso máximo de Moca requerido para la mezcla, en kg;

ρ_{Moca} : Densidad de la Moca, en kg/m^3 .

Aplicando la densidad del activante a la temperatura requerida de 116 [°C], el volumen del tanque B es:

$$V_{tanqueB} = \frac{2,982 [kg]}{1440 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 2,07 \times 10^{-3} [m^3]$$

$$V_{tanqueB} = 2,07 [lt] \rightarrow 3 [lt]$$

El volumen mínimo del tanque B se define en 3 litros por prevención de derrames y un posible aumento de la producción.

6.2.2.1.2. Tanque de prepolímero + pigmento (tanque A)

En el cálculo de la capacidad volumétrica del tanque A, se considera el peso de material en una caneca, la densidad de los materiales a 100 [°C] tanto para el prepolímero 1800A como el 1900A tomado de la Tabla 5, el peso de pigmento requerido para satisfacer la mezcla total y la densidad de los pigmentos utilizados. Los datos descritos se lo puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13. Datos requeridos para el cálculo del volumen del tanque A.

Descripción	Valor
Peso de prepolímero de una caneca	22,7 [kg]
Densidad del material 1800 ^a en 100 °C	1158 [kg/m ³]
Densidad del material 1900 ^a en 100 °C	1168 [kg/m ³]
Peso de pigmento máximo requerido	260 [g]
Densidad del pigmento	1070 [kg/m ³]

La capacidad mínima del tanque se obtiene del prepolímero con la densidad más baja, debido a la relación inversa del volumen definida en (10) y el volumen ocupado por el pigmento.

Aplicando (10) para el caso del tanque A, se obtiene (12).

$$V_{tanqueA} = \frac{m_{prepolimero}}{\rho_{1800}} + \frac{m_{pigmento}}{\rho_{pigmento}} \quad (12)$$

Donde

$V_{tanqueA}$: Volumen del tanque A, en m^3 ;

$m_{prepolimero}$: Masa del prepolímero en cada caneca, en kg;

ρ_{1800} : Densidad del prepolímero LF1800A a 100 [°C], en kg/m^3 ;

$m_{pigmento}$: Masa del pigmento máximo requerido, en kg;

$\rho_{pigmento}$: Densidad del pigmento, en kg/m^3 .

Reemplazando los valores se obtiene:

$$V_{tanqueA} = \frac{22,7 [kg]}{1158 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} + \frac{0,26 [kg]}{1070 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 0,01985 [m^3]$$

$$V_{tanqueA} = 19,85 [lt]$$

Tomando en cuenta las recomendaciones de COIM [33], el tanque debe poseer una capacidad del doble de la requerida debido a la desgasificación. Por lo tanto el volumen final se define en:

$$V_{tanqueA} = 39,7 [lt] \rightarrow 40 [lt]$$

6.2.2.2. Cilindro de los tanques

El espesor de los tanques depende principalmente de la presión que soportan por la succión de las bombas dosificadoras y por la presión de vacío en la desgasificación.

El diseño se basa en el código ASME BPVC Sección VIII Div. 1 [27] y los trabajos de González [34] y Boixader [35]. Las consideraciones de diseño son:

- Diámetro interior del tanque (D_i).
- Presión hidrostática (ΔP): presión que ejerce el fluido en estado de reposo y es calculada con (13).

$$\Delta P = \rho \times g \times h \quad (13)$$

Donde

- ΔP : Presión hidrostática, en Pa;
 ρ : Densidad del fluido, en kg/m^3 ;
 g : Aceleración de la gravedad, en m/s^2 ;
 h : Altura de la columna del líquido, en m.

- Presión de operación (P_o): máxima presión de operación a la que normalmente será sometido el tanque.
- Presión de diseño (P): presión utilizada para el cálculo de las partes que constituyen al tanque, calculada con (14).

$$P = (P_o + \Delta P) + 30 \text{ [psi]} \quad \text{si } P_o \leq 300 \text{ [psi]} \quad (14)$$

Donde

- P : Presión de diseño, en psi;
 P_o : Presión de operación, en psi.

- Temperatura de operación (T_o): Temperatura a la cual será sometido durante el proceso.
- Temperatura de diseño (T_d): Temperatura empleada en el diseño del tanque. Es calculada con (15).

$$T_d = T_o \pm 15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (15)$$

Donde

- T_d : Temperatura de diseño, en $^\circ\text{C}$;
 T_o : Temperatura de operación, en $^\circ\text{C}$.

- Eficiencia de la soldadura (E): grado de confiabilidad según el tipo de soldadura aplicada a las uniones soldadas. La menor eficiencia es 0,45 %.
- Límite elástico del material seleccionado para la fabricación.
- Sobreepesor por corrosión: El espesor varía entre 1 y 6 [mm]. El valor escogido es de 1 [mm] por las condiciones ambientales favorables y el bajo grado de corrosión de los materiales.

El espesor del tanque finalmente es calculado con (16).

$$t_{cilindro} = \frac{PD}{2(SE - 0,6P)} + C_1 \quad (16)$$

Donde

- $t_{cilindro}$: Espesor del tanque, en pulgadas;
 P : Presión de diseño, en psi;
 D : Diámetro interno del tanque, en pulgadas;
 S : Límite elástico del material, en psi;
 E : Factor de soldadura;
 C_1 : Sobreepesor por corrosión, en pulgadas.

6.2.2.2.1. Tanque de prepolímero + pigmento (tanque A)

El diámetro del tanque es calculado con (17), tomando en cuenta el volumen requerido (0,04 m³) y la relación de 1,5 entre el diámetro y la altura que deben poseer los tanques cilíndricos ($h=1,5D_i$).

$$V = \pi \frac{D_i^2}{4} h \quad (17)$$

Donde

- V : Volumen requerido del tanque, en m³;
 D_i : Diámetro interior del tanque, en m;
 h : Altura del tanque, en m.

Resolviendo la ecuación y reemplazando los valores se obtiene:

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{V \times 4}{\pi \times 1,5}} = \sqrt[3]{\frac{0,04[m^3] \times 4}{\pi \times 1,5}} = 0,3238 [m]$$

$$D_i = 0,33 [m]$$

Aplicando la relación entre el diámetro y la altura:

$$h = 1,5(0,33 [m]) \rightarrow h = 0,5 [m]$$

La presión hidrostática generada por la columna de fluido es calculada con (13), donde se aplica la densidad de la referencia LF 1900A por ser mayor y la altura del fluido es desarrollada con el volumen del prepolímero. La presión hidrostática generada por la columna de pigmento es despreciada.

$$\Delta P = \rho_{1900} \times g \times \left(\frac{4V_{prepolímero}}{\pi D_i^2} \right) = 1168 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times \left(\frac{4(0,0196)}{\pi(0,33)^2} \right) [m]$$

$$\Delta P = 2625,73 [Pa] (0,38 [psi])$$

La presión de diseño es calculada con (14), aplicando la presión de operación máxima (2 [MPa] (290 [psi])) y la presión hidrostática.

$$P = (P_o + \Delta P) + 30 [psi] = (290 + 0,38) [psi] + 30 [psi]$$

$$P = 2,21 [MPa] (320,38 [psi])$$

La temperatura de diseño es calculada con (15), empleando la máxima temperatura de operación.

$$T_d = 100 \pm 15 [^{\circ}C] \rightarrow T_d = 115 [^{\circ}C]$$

El material escogido por recomendación de los fabricantes de máquina de fundición de elastómeros y sus excelentes propiedades mecánicas, térmicas y resistencia a la corrosión, es el acero inoxidable AISI 304. Las principales propiedades, tomadas de Carbone [36] y Dipac [37], son mostradas en la Tabla 14.

Tabla 14. Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304.

Propiedades mecánicas	AISI 304
Esfuerzo máximo admisible a tracción [37]	479 [MPa] (69500 [psi])
% de Elongación [37]	40
Densidad [36]	7900 [kg/m ³]
Conductividad térmica a 100 [°C] [36]	15 [W/mK]

En la Tabla 15 se muestra los datos requeridos para el cálculo del espesor del tanque de prepolímero.

Tabla 15. Datos requeridos en el cálculo del espesor del tanque de prepolímero.

Descripción	Valor
Presión de diseño	2,21 [MPa] (320,38 [psi])
Diámetro interior del tanque	330 [mm] (13 [pulgadas])
Esfuerzo máximo admisible del material	479 [MPa] (69500 [psi])
Eficiencia de soldadura	0,45
Sobreespesor por corrosión	1 [mm] (0,04 [pulgadas])

Aplicando (16) se calcula el espesor del tanque de prepolímero.

$$t_{cilindroA} = \frac{(320,38 [psi])(13 [pulgadas])}{2((69500 [psi]) (0,45) - 0,6 (320,38 [psi]))} + 0,04 [pulgadas]$$

$$t_{cilindroA} = 0,107 [pulgadas] = 2,71 [mm] \rightarrow t_{cilindroA} = \mathbf{3 [mm]}$$

6.2.2.2.2. Tanque de activante (tanque B)

El diámetro del tanque es calculado con (17), tomando en cuenta el volumen requerido (0,003 m³) y la relación de 1,5 entre el diámetro y la altura que deben poseer los tanques cilíndricos (h=1,5Di).

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{V \times 4}{\pi \times 1,5}} = \sqrt[3]{\frac{0,003[m^3] \times 4}{\pi \times 1,5}} = 0,1365 [m]$$

$$D_i = \mathbf{0,14 [m]}$$

Aplicando la relación entre el diámetro y la altura:

$$h = 1,5(0,14 [m]) \rightarrow h = \mathbf{0,21 [m]}$$

La presión hidrostática generada por la columna de activante es calculada con (13).

$$\Delta P = \rho_{Moca} \times g \times \left(\frac{4V_{Moca}}{\pi D_i^2} \right) = 1.440 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \times 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \times \left(\frac{4(0,00207)}{\pi(0,14)^2} \right) [m]$$

$$\Delta P = \mathbf{1872,043 [Pa] (0,27 [psi])}$$

La presión de diseño es calculada con (14), aplicando la presión de operación máxima (2 [MPa] (290 [psi])) y la presión hidrostática.

$$P = (P_o + \Delta P) + 30 [psi] = (290 + 0,27) [psi] + 30 [psi]$$

$$P = 2,21 [MPa] (320,27 [psi])$$

La temperatura de diseño es calculada con (15), empleando la máxima temperatura de operación.

$$T_d = 116 \pm 15 [^{\circ}C] \rightarrow T_d = 131 [^{\circ}C]$$

El material escogido es el mismo para ambos tanques y las propiedades mecánicas son descritas en la Tabla 14. En la Tabla 16 se muestra los datos requeridos para el cálculo del espesor del tanque de activante.

Tabla 16. Datos requeridos en el cálculo del espesor del tanque de activante.

Descripción	Valor
Presión de diseño	2,21 [MPa] (320,27 [psi])
Diámetro interior del tanque	140 [mm] (5,51 [pulgadas])
Esfuerzo máximo admisible del material	479 [MPa] (69500 [psi])
Eficiencia de soldadura	0,45
Sobreespesor por corrosión	1 [mm] (0,04 [pulgadas])

Aplicando (16) se calcula el espesor del tanque de activante.

$$t_{cilindroB} = \frac{(320,27 [psi])(2,76 [pulgadas])}{(69500 [psi]) (0,45) - 0,6 (320,27 [psi])} + 0,04 [pulgadas]$$

$$t_{cilindroB} = 0,068 [pulgadas] = 1,73 [mm] \rightarrow t_{cilindroB} = 2 [mm]$$

6.2.2.3. Tapas de los tanques

En la parte superior se emplean tapas diseñadas para la presión y diámetro requerido, que posibiliten la apertura y cierre para el llenado de los tanques. La empresa Zimmerlin [38] ofrece tapas en diferentes modelos, dimensiones y tipos de cierre dependiendo de la aplicación.

En la parte inferior se escoge una tapa toriesférica, por su bajo costo, soporte a presiones moderadas y su radio de abombado que garantiza la correcta succión del

fluido; es descrita en ASME BPVC Sección VIII Div. 1 [27] y mostrada en la Figura 13.

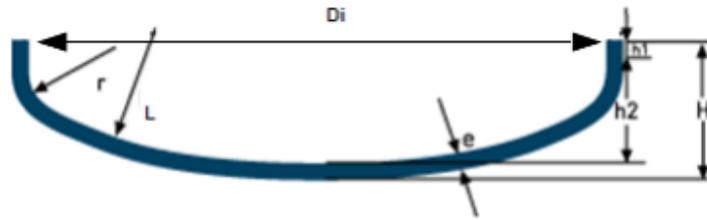


Figura 13. Variables inmersas en una tapa torisférica [34].

El radio de la esfera que forma el torisférico (L) es calculado con (18).

$$L = 0,9D_i \quad (18)$$

Donde

L : Radio de la esfera que forma el torisférico, en pulgadas;

D_i : Diámetro interno del tanque, en pulgadas.

El radio de curvatura (r) es calculado con la relación (19).

$$r = 0,085L \quad (19)$$

Donde

r : Radio de curvatura, en pulgadas.

L : Radio de la esfera que forma el torisférico, en pulgadas.

El factor M requerido para el cálculo del espesor, se lo determina con la relación L/r , siendo determinado por la Tabla 17.

Tabla 17. Datos para la selección del factor M [34].

L/r	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75	3	3,25	3,5
M	1	1,03	1,06	1,08	1,1	1,13	1,15	1,17	1,18	1,2	1,22
L/r	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
M	1,25	1,28	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,5
L/r	9,5	10	10,5	11	11,5	12	13	14	15	16	$16^{2/3}$
M	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,77

El espesor de una tapa toriesférica es calculado con (20).

$$t_{toriesférica} = \frac{PLM}{2SE - 0,2P} + C_1 \quad (20)$$

Donde

- $t_{toriesférica}$: Espesor mínimo de la tapa, en pulgadas;
- P : Presión de diseño, en psi;
- L : Radio de la esfera que forma el toriesférico, en pulgadas;
- M : Factor adimensional de la relación L/r ;
- S : Límite elástico del material, en psi;
- E : Factor de soldadura;
- C_1 : Sobreespesor por corrosión, en pulgadas.

La altura de la tapa no es considerada dentro de la norma ASME; por lo tanto se emplea (21) y (22), tomadas del fabricante Fondeyur [39], para el cálculo de las alturas correspondientes.

$$h_1 \geq 3,5(t_{toriesférica}) \quad (21)$$

Donde

h_1 : Altura de la pestaña inferior de la tapa, en mm;

$t_{toriesférica}$: Espesor mínimo de la tapa, en mm.

$$h_2 = 0,1935(D_i + 2(t_{toriesférica})) - 0,455(t_{toriesférica}) \quad (22)$$

Donde

h_2 : Altura de la pestaña superior de la tapa, en mm;

D_i : Diámetro interno del tanque, en mm;

$t_{toriesférica}$: Espesor mínimo de la tapa, en mm.

6.2.2.3.1. Tapas superiores

La tapa de acero inoxidable, modelo “1.2 Round Pressure Cover” de la marca Zimmerlin, mostrada en la Figura 14, cumple con la presión requerida para salvaguardar al tanque y posee dimensiones cercanas a las calculadas; por lo cual, se escoge los modelos mostrados en Tabla 18 y el espesor de los cilindros de los tanques, calculado anteriormente, se adecuan para su implementación.

$$t_{cilindroA} = t_{cilindroB} = t_{tapa} = 6 \text{ [mm]}$$

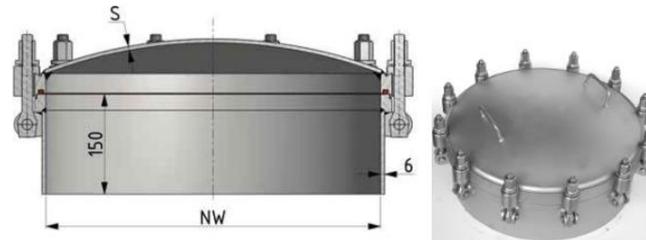


Figura 14. Tapa modelo “1.2 Round Pressure Cover” de la marca Zimmerlin adaptada de [38].

En el Anexo B.3 se muestra la hoja de datos técnica del modelo seleccionado de tapa.

Tabla 18. Características técnicas y dimensiones de las tapas superiores de los tanques [38].

	Prepolímero + pigmento	Activante
Modelo	23502006	21502004
Diámetro interior (NW) [mm]	350	150
Presión máx. [psi (bar)]	145 (10)	
Temperatura máx. [°C]	200	
Número de sujeciones M16	6	4
Radio de curvatura [mm]	500	plana
Espesor de la tapa (S) [mm]	6	24
Peso [kg]	28	13

6.2.2.3.2. Tapas inferiores

El proceso de cálculo de las tapas inferiores de ambos tanques puede ser visualizado en el Anexo C.6 y Anexo C.7. En la Tabla 19 se muestran las dimensiones de ambas tapas.

Tabla 19. Dimensiones de las tapas inferiores de los tanques de los componentes.

	Prepolímero + pigmento	Activante
Radio que forma el toriesférico (L) [mm]	315	135
Radio de curvatura (r) [mm]	26,775	11,475
Espesor calculado (t) [mm]	3.63	2.26
Espesor requerido (t) [mm]	6	6
Altura inferior (h_1) [mm]	21	21
Altura superior (h_2) [mm]	67,317	28,617

6.2.2.4. Soporte de los tanques

Los tanques son soportados por dos platinas, una a cada lado, como se muestra en la Figura 15 y asegurados con tornillos M14 de grado 8. El peso de cada tanque es distribuido en ambas pestañas, requiriendo el cálculo del espesor mínimo de la platina para evitar una posible deformación.

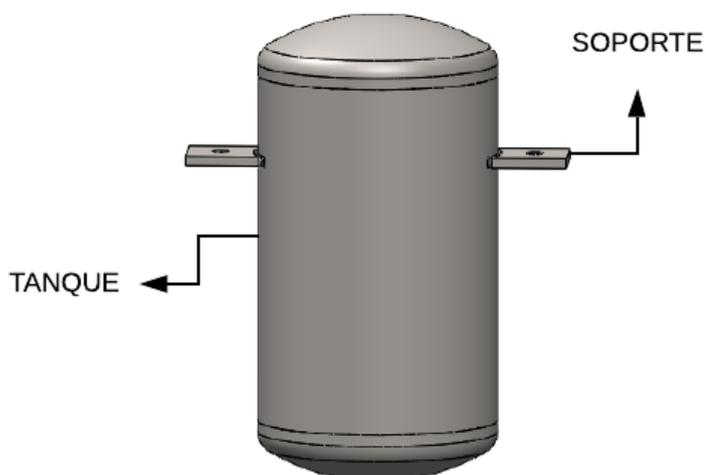


Figura 15. Representación gráfica del soporte de los tanques.

El material escogido para las pestañas es acero inoxidable AISI 304, al igual que los tanques para evitar la corrosión que se produce al unir diferentes tipos de materiales. Se la considera a la pestaña como una viga en voladizo que soporta la mitad del peso del tanque. El diagrama de cuerpo libre es mostrado en la Figura 16 y se procede a realizar el cálculo por rigidez de una máquina de precisión moderada.

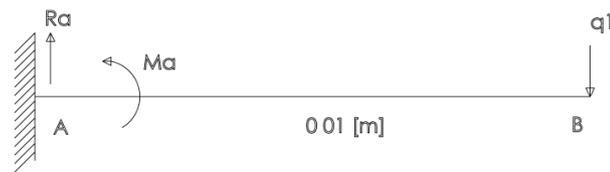


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre del soporte del tanque A.

Se dimensiona el soporte para el tanque A por ser el de mayor masa (33,4 [kg]) y se toma el mismo espesor para todos los soportes. Aplicando (8) y reemplazando los valores obtenemos la inercia mínima que debe cumplir.

$$I = \frac{(327,654 [N])(0,01 [m])^3}{3(200 \times 10^9 [Pa]) \left(\frac{0,01}{2.000} [m]\right)} = 1,1 \times 10^{-10} [m^4]$$

$$I = 0,011 [cm^4]$$

La sección transversal del soporte forma un rectángulo. Empleando el mismo espesor calculado para los tanques, se calcula la inercia en el eje de rotación correspondiente.

$$I_{xx} = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{(8 [cm])(0,6 [cm])^3}{12} \rightarrow I_{xx} = 0,144 [cm^4]$$

El espesor de los soportes es definido en 6 [mm], al superar la inercia mínima requerida.

6.2.3. BOMBA DE VACÍO

La desgasificación se aplica al prepolímero con el pigmento, antes de ser mezclados con el activante, eliminando la concentración de burbujas de aire en el interior de la mezcla. Los datos disponibles para la selección son mostrados en la Tabla 20.

Tabla 20. Datos disponibles para la selección de la bomba de vacío.

Descripción	Valor
Volumen del tanque de prepolímero	0,04 [m ³] (40 [lt])
Presión máxima de vacío requerida [33]	28,5 [inHg] (96,51 [kPa])
Presión atmosférica del sitio de trabajo	22,44 [inHg] (76 [kPa])
Tiempo en alcanzar la presión máxima	10 [s]
Tiempo de desgasificación	2 [min]

El valor nominal de vacío para una bomba, se basa en la operación a 29,92 [inHg] (101,32 [kPa]); el funcionamiento donde la presión atmosférica es más baja, reducirá el vacío que puede producir la bomba. El factor de corrección es tomado de Gast [22] y representado en (23).

$$P_{adjust} = P_{atm} \times \frac{P_{nom}}{P_{std}} \quad (23)$$

Donde

P_{adjust} : Presión máxima de vacío conseguida por la bomba, en inHg;

P_{atm} : Presión atmosférica en el sitio de trabajo, en inHg;

P_{nom} : Presión nominal de la bomba, en inHg;

P_{std} : Presión atmosférica estándar, en inHg.

La presión máxima de vacío en el sitio de trabajo, no puede ser mayor a la presión atmosférica por lo tanto aplicando la presión máxima permisible en (23), se obtiene la presión nominal de la bomba de vacío requerida.

$$22,44 \text{ [inHg]} = 22,44 \text{ [inHg]} \times \frac{P_{nom}}{29,92 \text{ [inHg]}}$$

$$P_{nom} = 29,92 \text{ [inHg]} = 101,32 \text{ [kPa]}$$

Para determinar el aire libre que debe eliminarse, el volumen se multiplica por el nivel de vacío en atmósferas tomado de Gast [22]; este último se obtiene dividiendo la presión de vacío de la bomba en el sitio de trabajo para la presión atmosférica estándar (29,92 [inHg]). La fórmula correspondiente obtenida es (24).

$$A_{libre} = V_{tanqueA} \times \frac{P_{adjust}}{P_{std}} \quad (24)$$

Donde

A_{libre} : Cantidad de aire que debe eliminarse, en m³;

$V_{tanqueA}$: Volumen del tanque A, en m³;

P_{adjust} : Presión máxima conseguida por la bomba, en inHg;

P_{std} : Presión atmosférica estándar, en inHg.

Resolviendo (24) para una bomba ideal se obtiene:

$$A_{libre} = 0,04 [m^3] \times \frac{22,44 [inHg]}{29,92 [inHg]}$$

$$A_{libre} = 0,03 [m^3] = 1,06 [ft^3]$$

En la Tabla 21 se compara bombas de la marca BECKER [40] que se aproximan al parámetro requerido. La capacidad de las bombas de vacío se mide generalmente en CFM (pies cúbicos por minuto).

Tabla 21. Cuadro comparativo de bombas de vacío de la marca BECKER.

Modelo	Imagen	Presión vacío máx.	CFM máx.
U 4.40		29,9 [inHg] (101,25 [kPa])	28 [CFM] (0,79 [m ³ /min])
O 5.4		29,86 [inHg] (101,11 [kPa])	2,8 [CFM] (0,079 [m ³ /min])

Finalmente la bomba seleccionada es el modelo U 4.40, por cumplir con su capacidad de presión máxima de vacío y los CFM. Con los CFM escogidos, el tiempo que tarda la bomba de vacío en llegar a su presión máxima es de:

$$t = \frac{1,06 [ft^3]}{28 \left[\frac{ft^3}{min} \right]} = 0,037 [min] \rightarrow t = 2,27 [s]$$

El tiempo requerido es de 10 [s] por lo tanto cumple con las condiciones requeridas.

Se requiere una línea de despresurización en el tanque de prepolímero + pigmento para evacuar la presión de vacío generada durante la desgasificación.

Se debe incluir una válvula, de apertura y cierre totalmente controlada, en la succión de la bomba dosificadora, en la línea de recirculación y en la línea de despresurización, para el control del proceso de la desgasificación.

6.2.4. BOMBAS DE DOSIFICACIÓN

Los requerimientos técnicos a ser considerados durante la selección son mostradas en la Tabla 22. El caudal requerido de cada componente es calculado en base a la tasa de inyección total (60 [g/s]) y el rango de porcentaje de la mezcla (8,69% - 11,61%).

Tabla 22. Requerimientos técnicos para la selección de las bombas de dosificación.

	Prepolímero + pigmento	Activante
Presión de descarga máxima [17]	20 [bar] (2 [MPa])	
Rango de caudal requerido	43 – 46 [GPH] (53 – 55 [g/s])	3 – 5 [GPH] (5 – 7 [g/s])
Viscosidad [1] [6] [5]	0,5 - 0,65 [Pa.s] (500 – 650 [cP])	<0,5 [Pa.s] (< 500 [cP])
Temperatura del fluido [6] [5]	80 – 100 [°C] (176 – 212 [°F])	116 [°C] (241 [°F])

6.2.4.1. Bomba de dosificación para el prepolímero y pigmento

Considerando los requerimientos técnicos mostrados en la Tabla 22, se presentan opciones de bombas de dosificación de la marca AquFlow [41] que cumplen con la normativa API 675, en la Tabla 23.

Tabla 23. Bombas de dosificación de la marca AquFlow para el prepolímero + pigmento [41].

Modelo	Presión máxima	Caudal máximo	Viscosidad	Temperatura
Series 2000 CD3T 0819- 04055	25 [bar] (2,5 [MPa])	50,0 [GPH] (60,88 [g/s])	Manejo de líquidos difíciles como lodos, gases y altas viscosidades.	121 [°C]
Series 3000 CNIT 1088- 04055	28 [bar] (2,8 [MPa])	75,7 [GPH] (92,17 [g/s])	Manejo de líquidos difíciles como lodos, gases y altas viscosidades.	121 [°C]

Se selecciona la bomba de marca AquFlow, Series 3000, modelo CNIT 1088-04055 mostrada en la Figura 17, debido a que su presión puede ser regulada hasta el máximo requerido, el rango de caudal se encuentra dentro de los límites recomendados (10% - 90% de su caudal máximo) y permite la variación automática de su capacidad mediante una señal analógica.

La capacidad de la bomba depende de la velocidad del motor, el diámetro del émbolo y la longitud de la carrera del émbolo. Un sistema hidráulico ajustable permite cambiar la longitud efectiva de la carrera de 0 a 100%, controlando de esta manera la capacidad del fluido entregado en cada carrera de la bomba [42].



Figura 17. Bomba de dosificación marca AquFlow, Series 3000 [41].

En el Anexo B.5 se muestran la hoja de datos técnica con las respectivas curvas de rendimiento y dimensiones reales. Al no poseer el peso real de la bomba, por motivos de diseño, se asume el mayor peso de modelos similares investigados de 36,75 [kg] en Walchem [43].

6.2.4.2. Bomba de dosificación para el activante

Según los requerimientos técnicos del activante (Tabla 22), se muestran opciones de bombas de dosificación de la marca AquFlow [41] en la Tabla 24.

Tabla 24. Bombas de dosificación de la marca AquFlow para el activante [41].

Modelo	Presión máxima	Caudal máximo	Viscosidad	Temperatura
Series 3000 CNIT 1044- 04055	28 [bar] (2,8 [MPa])	7,8 [GPH] (11,8 [g/s])	Manejo de líquidos difíciles como lodos, gases y altas viscosidades.	121 [°C]
Series 2000 CD3T 0829- 04055	25 [bar] (2,5 [MPa])	7,6 [GPH] (11,5 [g/s])	Manejo de líquidos difíciles como lodos, gases y altas viscosidades.	121 [°C]

Se selecciona la bomba de marca AquFlow, Series 3000, modelo CNIT 1044-04055, debido a que su presión puede ser regulada hasta el máximo requerido, el rango de caudal se encuentra dentro de los límites recomendados (10% - 90% de su caudal máximo) y permite la variación automática de su capacidad mediante una señal analógica. En el Anexo B.5 se puede visualizar las respectivas curvas de rendimiento y dimensiones reales.

Adicional se debe incluir el sistema de detección de fugas, mediante el interruptor de vacío entre los diafragmas, ofertado como característica adicional en la bomba para garantizar la protección del operador y del ambiente.

6.2.5. MANGUERAS

Las mangueras son empleadas como enlace entre los tanques con las bombas de dosificación, entre las bombas de dosificación con el cabezal de mezcla, y entre el cabezal de mezcla con los tanques, cerrando el circuito de recirculación. En el caso del tanque de prepolímero + pigmento, se adiciona una manguera para la conexión con la bomba de vacío.

El conector de entrada de la bomba de vacío es tipo G1 (BSPP) hembra. Por lo tanto, se define una manguera de 1 pulgada de diámetro nominal. El conector en la succión y descarga de ambas bombas de dosificación es de tipo NPTM de ½ pulgada (Anexo B.5). Para evitar la caída de presión o el taponamiento, la manguera debe poseer igual diámetro nominal.

Por motivos de seguridad, se recomienda el uso de mangueras con el interior de teflón (PTFE) para el manejo de químicos como isocianatos y éteres. Los requerimientos técnicos para selección son mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25. Requerimientos técnicos de las mangueras.

Descripción	Bombas de dosificación	Bomba de vacío
Diámetro nominal [pulgadas]	½	1
Temperatura de trabajo [°C]	100	116
Presión de trabajo [MPa] ([bar])	2 (20)	
Material en contacto con el fluido	Teflón	

Se selecciona las mangueras de la marca ORK [44] serie M, cuyas mangueras han sido sometidas a pruebas de presión de vacío y cumple con los requerimientos técnicos. Las características técnicas principales se indican en la Tabla 26 y la ficha técnica completa en Anexo B.6.

Tabla 26. Datos técnicos de las mangueras de teflón (PTFE) de la marca ORK serie M [44].

Descripción	Bombas de dosificación	Bomba de vacío
Diámetro nominal [pulgada]	½	1
Diámetro interior [mm]	10,3	22,2
Diámetro exterior [mm]	14	26,2
Máx. temperatura de trabajo [°C]	204	
Máx. presión de trabajo [MPa] ([bar])	10,3 (103)	6,9 (69)
Masa [kg/m]	0,18	0,4

El tipo de conexiones requeridas para cada etapa es mostrado en el Anexo C.8.

6.2.6. ESTRUCTURA PRINCIPAL

La estructura principal brinda el soporte a todos los componentes de la máquina, donde son anclados y asegurados para su correcto funcionamiento y transporte.

Tomando en cuenta el peso de cada componente y la posibilidad de que una persona pueda subirse en la estructura, se selecciona la viga crítica mostrada en la Figura 18. La viga es seleccionada porque soporta del peso del tanque de prepolímero, la bomba de dosificación y es la de mayor longitud dentro de todas las vigas.

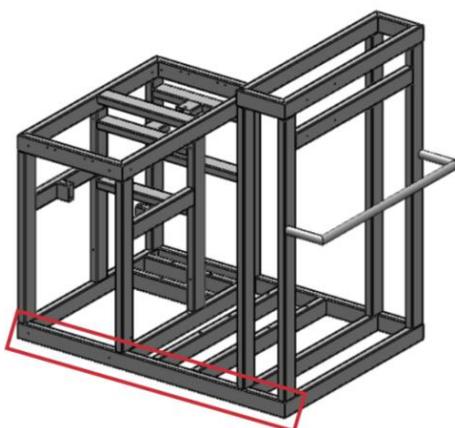


Figura 18. Selección de la viga crítica en la estructura principal.

6.2.6.1. Viga Crítica

En la Figura 19 se muestra el diagrama de cuerpo libre considerando a la viga como un doble empotramiento. La viga crítica soporta tres cargas principalmente que son:

- q1: masa del tanque de prepolímero lleno con fluido igual a 50,7 [kg].
- q2: peso de una persona aproximadamente 75 [kg].
- q3: peso aproximado de una bomba de dosificación 36,75 [kg].

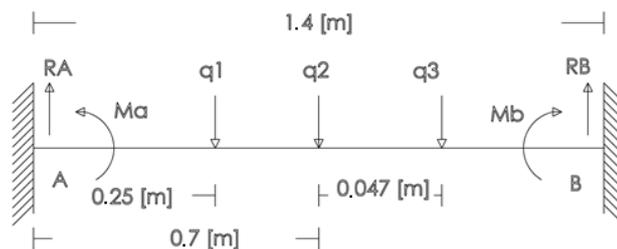


Figura 19. Diagrama de cuerpo libre de la viga crítica.

Al ser un sistema hiperestático se requiere de las ecuaciones de deflexión descritas por Mott [31]. El proceso de cálculo de las reacciones y constante inmersas se puede visualizar en el Anexo C.9. La ecuación de deflexión (25) permite la obtención de la deflexión en cualquier punto de la viga.

$$yEI = M_A x^2 + \frac{R_A x^3}{6} - \frac{q_1 (x - 0,25)^3}{6} - \frac{q_2 (x - 0,7)^3}{6} - \frac{q_3 (x - 0,747)^3}{6} + C_1 x + C \quad (25)$$

Donde

y : Deflexión en el punto de análisis, en m;

E : Módulo de elasticidad del material, en Pa;

I : Momento de inercia en el eje de rotación, en m^4 .

x : Distancia, en m.

Se aplica un diseño por rigidez para una máquina de precisión moderada en el límite inferior. La deflexión máxima permisible es calculada con (8).

$$y_{m\acute{a}x} = 0,0005 (1,4 [m]) = 7 \times 10^{-4} [m] \rightarrow y_{m\acute{a}x} = 0,7 [mm]$$

Aplicando (25) en el punto crítico de la viga ($x=0,7 [m]$) se obtiene la inercia mínima para cumplir con el requisito de una máquina de precisión moderada. Se emplea el

módulo de elasticidad de acero ASTM A-500 por su disponibilidad en el mercado ($E = 200 \text{ [GPa]}$).

$$(7 \times 10^{-4})(200 \times 10^9) I = -227,168(0,7^2) + \frac{620,056(0,7^3)}{6} - \frac{497,36(0,45^3)}{6} + \frac{360,51(0,047^3)}{6} + 296,387(0,7) - 68,402$$

$$I = 39,75 \text{ [cm}^4\text{]}$$

Se selecciona el perfil rectangular de 40 x 80 x 3 [mm] de la empresa DIPAC. En el Anexo B.7 se muestran las propiedades mecánicas incluyendo la inercia en el eje de rotación seleccionado ($I = 52,16 \text{ [cm}^4\text{]}$).

Con la inercia del perfil seleccionado se encuentra la deformación máxima en el punto crítico, comprobando la funcionalidad de la selección.

$$y_{\text{máx}} = 0,53 \text{ [mm]}$$

6.2.7. RECÁMARAS DE AISLAMIENTO

Los tanques de almacenamiento deben mantener la temperatura requerida de procesamiento de los componentes y evitar posibles lesiones por quemaduras al operador; por lo cual se emplean dos recámaras de aislamiento individuales, por la diferencia de temperatura que existe entre ellas. Las dimensiones de las recámaras son mostradas en la Figura 20.

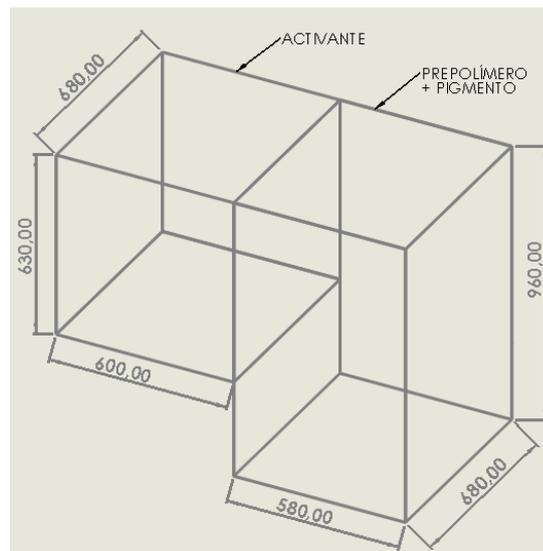


Figura 20. Dimensiones generales de las recámaras de aislamiento.

Las recámaras requieren de un aislante y un generador de calor que mantengan la temperatura deseada. La generación de calor es producida por resistencias

eléctricas de 500 [W] – 220 [V] cada una, ubicadas en contacto con las paredes internas de cada recámara. En la recámara del tanque de prepolímero + pigmento son colocadas dos resistencias por su mayor volumen y en la recámara del tanque de activante es colocada una resistencia. Las resistencias son proporcionadas por la compañía y son mostradas en la Figura 21.

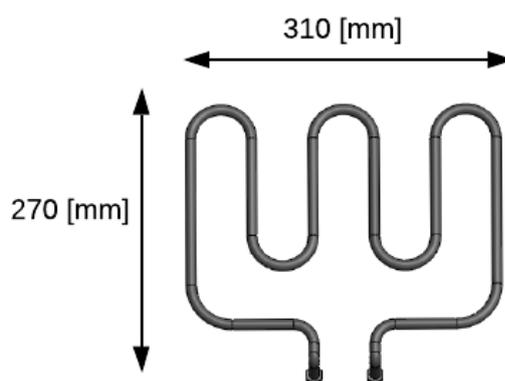


Figura 21. Resistencia eléctrica de 500 [W] – 220 [V].

El aislante se lo calcula por transferencia de calor debido a que las resistencias generan calor por radiación y convección natural hacia los tanques y pierden calor por conducción hacia el ambiente. Incropera [45].

El mayor espesor de aislante es necesario en la recámara de activante por la temperatura que debe alcanzar la misma, validando dicha afirmación en el Anexo C.10. Se selecciona lana mineral por su bajo coeficiente de conductividad y resistencia a altas temperaturas (800 [°C]) tomados de Romeral [46]. Los datos requeridos para el cálculo del espesor del aislante son mostrados en la Tabla 27.

Tabla 27. Datos requeridos para el cálculo del espesor del aislante.

Descripción	Valor
Flujo de calor	500 [W] c/u
Temperatura del tanque de activante	116 [°C]
Temperatura exterior más baja registrada [1]	10 [°C]
Coeficiente de conductividad térmica de la lana mineral [46]	0,00417 [W/mK]
Coeficiente de convección del aire [45]	25 [W/m ² K]
Emisividad [45]	0,8
Coeficiente de Stephen Boltzman [45]	$5,67 \times 10^{-8}$ [W/m ² K ⁴]
Área aproximada de la resistencia	(0,31 x 0,27) [m ²]

Se aplica la ecuación (26) de transferencia de calor por convección natural y radiación tomada de Incropera [45], para el cálculo de la temperatura de la superficie interna de la recámara.

$$q = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon A\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \quad (26)$$

Donde

- q : Flujo de calor, en W;
- h : Coeficiente de transferencia de calor por convección, en W/m²K;
- A : Área de la superficie que genera la transferencia de calor, en m² ;
- T_s : Temperatura de la superficie, en K;
- T_∞ : Temperatura del fluido inmerso, en K;
- ε : Emisividad de cuerpo radiante;
- σ : Coeficiente de Stephen Boltzman, en W/m²K⁴.

Reemplazado los valores en (26) se obtiene la temperatura interna de la pared.

$$\frac{500 [W]}{(0,31 \times 0,27)[m^2]} = 25 \left[\frac{W}{m^2K} \right] (T_s - (116 + 273,15))[K] + 0,8(5,67 \times 10^{-8}) \left[\frac{W}{m^2K^4} \right] (T_s^4 - (116 + 273,15)^4)[K]$$

$$T_s = 528,33 [K] = 255,18 [^\circ C]$$

Con la temperatura de la superficie calculada, se procede al cálculo del espesor del aislante por medio de la ecuación (27) de la ley de Fourier de conducción de calor [45].

$$q = \frac{kA(T_1 - T_2)}{L} \quad (27)$$

Donde

- q : Flujo de calor, en W;
- k : Coeficiente de transferencia de calor por conducción, en W/mK;
- A : Área de la superficie que genera la transferencia de calor, en m² ;

- T_1 : Temperatura al interior de la pared, en K;
 T_2 : Temperatura al exterior de la pared, en K;
 L : Espesor del aislante, en m.

Aplicando (27) se calcula el espesor requerido.

$$\frac{500 [W]}{6(0,68 \times 0,63)[m^2]} = \frac{0,00417 \left[\frac{W}{mK} \right] (528,33 - (10 + 273,15))[K]}{L}$$

$$L = 0,00526 [m] = 5.26 [mm]$$

Comercialmente la empresa Romeral ofrece paneles de lana mineral de 40 [mm] de espesor mínimo, que cumplen con el requerimiento calculado. En el Anexo B.8 se puede encontrar características adicionales de la lana mineral.

Las recámaras son armadas con nueve paneles de acero galvanizado NTE INEN 115 de 1 [mm] de espesor, rellenos con el aislante calculado anteriormente.

6.2.8. RUEDAS

La máquina inyectora de poliuretano posee cuatro ruedas donde es repartido el peso total de la máquina. Las ruedas son seleccionadas por el tipo de piso en el que van a trabajar, y el peso que deben soportar. Las condiciones de trabajo son mostradas en la Tabla 28.

Tabla 28. Condiciones de trabajo para las ruedas de la máquina inyectora de poliuretano.

Descripción	Valor
Masa total aproximada de la máquina	361 [kg]
Tipo de piso	Cemento liso
Fuerza ejercida en cada rueda	885,35 [N] (88,53 [daN])

La empresa italiana tellureRota [47] provee ruedas para distintos tipos de superficie y distintos tipo de carga. La rueda seleccionada por las características técnicas mostradas en la Tabla 29 es la Serie 60 con soporte NL de 80 [mm] de diámetro. La hoja técnica puede ser visualizada en el Anexo B.9.

Tabla 29. Características técnicas de la rueda Serie 60 con soporte NL [47].

Características	Descripción
Fuerza soportada por la rueda	120 [daN] (1.200 [N])
Tipo de piso	Baldosa / Cemento liso
Diámetro de la rueda	80 [mm]
Fuerza requerida para el empuje	4,5 [daN] (45 [N])

La rueda seleccionada posee un sistema de frenado tanto del giro de la rueda, como de la rotación de todo el soporte de la rueda y se puede visualizar en la Figura 22, garantizando un frenado eficiente de la máquina.



Figura 22. Rueda Serie 60 con soporte NL de la marca telluraRota [47].

6.3. DIMENSIONAMIENTO ELÉCTRICO

En la presente sección se dimensiona y selecciona los principales componentes eléctricos y electrónicos que intervienen en el funcionamiento de la máquina inyectora de poliuretano, considerando el voltaje de alimentación disponible en la empresa de 220 [VAC] trifásico.

6.3.1. CONTROL DE CAPACIDAD DE LAS BOMBAS

Se selecciona el controlador de capacidad electrónico de AquFlow número 17100-1104 modelo ECCA-3, específicamente diseñado para las bombas de dosificación de dicha marca. Permite el ajuste automático de la capacidad de la bomba a partir de una señal analógica o de forma manual mediante un micrómetro [48].

La capacidad de la bomba es regulada con una señal análoga de 1-5 [VDC] o de 4 - 20 [mA], donde 4 [mA] representa el 0% de su capacidad y 20 [mA] representa el 100% de su capacidad. En la Tabla 30 se muestra las especificaciones técnicas para la selección del controlador.

Tabla 30. Especificaciones técnicas del controlador ECCA [48].

Características	Descripción
Cubierta del actuador	Tipo Nema 4x
Voltaje de alimentación	230 [V] / 1PH / 50 – 60 [Hz]
Señal de control	4 - 20 [mA] o 1 - 5 [VDC]
Precisión	± 0,5% o mejor
Accionamiento manual	Normalmente desconectado

6.3.2. CONTROL DE VELOCIDAD DE LAS BOMBAS DE DOSIFICACIÓN Y EL CABEZAL DE MEZCLA

La velocidad, de las bombas y del cabezal de mezcla, es controlada con variadores de frecuencia. La empresa AquFlow provee un variador de frecuencia denominado HydroDrive, mostrado en la Figura 23, diseñado específicamente para el control de bombas de dosificación. Las especificaciones técnicas son mostradas en la Tabla 31.

Tabla 31. Especificaciones técnicas del variador de frecuencia HydroDrive [49].

Descripción	Valor
Voltaje de alimentación	115 o 208/230 [VAC] 50/60 [Hz]
Rango de aceleración	0,3 – 20 [s]
Rango de desaceleración	0,3 – 20 [s]
Potencia soportada	¼ - 1 ½ [HP] (186,42 – 118,55 [W])

La velocidad tanto de las bombas como del cabezal de mezcla es fija y no varía durante el proceso, por lo tanto debe ser calibrada previamente.

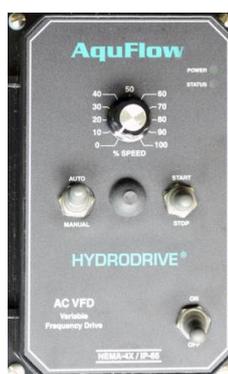


Figura 23. Variador de frecuencia HydroDrive [49].

6.3.3. ELECTROVÁLVULAS

Tres electroválvulas son empleadas en el control principalmente de la desgasificación. La primera controla el paso del fluido del tanque de prepolímero y pigmento, la segunda controla la despresurización del vacío generado en el tanque y la tercera controla la entrada de la recirculación del prepolímero y pigmento. Una cuarta es empleada en el control de la succión del activante.

Las electroválvulas son seleccionadas por el diámetro, por la temperatura, por el tipo de apertura y por el voltaje que maneja el solenoide.

En la Tabla 32 se muestra la selección de cada una, con sus respectivas características. En el Anexo B.10 se muestran las fichas técnicas de las electroválvulas seleccionadas.

Tabla 32. Características técnicas de las electroválvulas seleccionadas [50].

	Succión / Recirculación / Activante	Despresurización
Diámetro [pulgadas]	½	½
Modelo (Series 500)	2MS150-1/2	2MSO150-1/2
Tipo de conexión	NPT	NPT
Temperatura máx. [°C]	180	180
Presión máx. [bar (MPa)]	39 (3,9)	10 (1)
Estado sin energía	Normalmente cerrado (NC)	Normalmente abierto (NO)
Voltaje control [VDC]	24	24

6.3.4. MEDIDOR DE FLUJO MÁSIKO

La lectura del flujo o caudal de los fluidos, brinda un control de la capacidad entregada por las bombas de dosificación; siendo empleado como una herramienta de apoyo en la etapa de calibración de la máquina. Además, se requiere que el medidor de flujo másico cuenta con un monitoreo de la temperatura de los fluidos.

La medición de la temperatura del fluido, previo a ingresar al cabezal de mezcla, brinda un circuito redundante de control que garantiza que los componentes sean mezclados a la temperatura requerida.

La marca Tricor [51] ofrece el medidor de flujo másico tipo Coriolis TCM 1550 / TCE 8000/8100, incorporado con un transmisor de señales analógicas tanto para el caudal como para la temperatura; en la Tabla 33 se muestra las principales características técnicas. En el Anexo B.11 se muestra la hoja de datos técnicos.

Tabla 33. Características técnicas principales del medidor de flujo másico de la marca Tricor [51].

	TCM 1550 / TCE 8000/8100
Diámetro nominal	¼ [pulgada]
Voltaje de alimentación	24 [VDC] ± 20 % o 90 - 264 [VAC]
Potencia max. consumida	11 [W]
Tasa de flujo másico máx.	430 [g/s]
Presión de operación máx.	20 [MPa] (200 [bar])
Densidad de operación máx.	2500 [kg/m ³]
Rango de temperatura	-60 – 200 [°C]
Señal de transmisión	Analógicas, Frecuencia, Pulso, Status
Modelo de selección	TCM 1550-XX-HGSS-CZMS-Ex-XX TCE 8001-W-XBSB-Ex-XX

6.3.5. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE

El controlador lógico programable (PLC) permite, como su nombre lo indica, controlar el proceso desde el inicio hasta el final de la inyección. La selección del controlador adecuado, depende principalmente del número de entradas y salidas analógicas y digitales requeridas, y de las funciones adicionales que brinda en durante el proceso de la programación.

6.3.5.1. Entradas y salidas analógicas y digitales

El diagrama de bloques general de la máquina con las entradas y salidas digitales y analógicas se lo muestra en la Figura 24; de color verde se muestran las señales digitales y de color rojo las señales analógicas, cada una con su respectivo sentido. El número total de señales digitales son siete entradas y doce salidas, mientras que las señales analógicas son cuatro entradas y dos salidas.

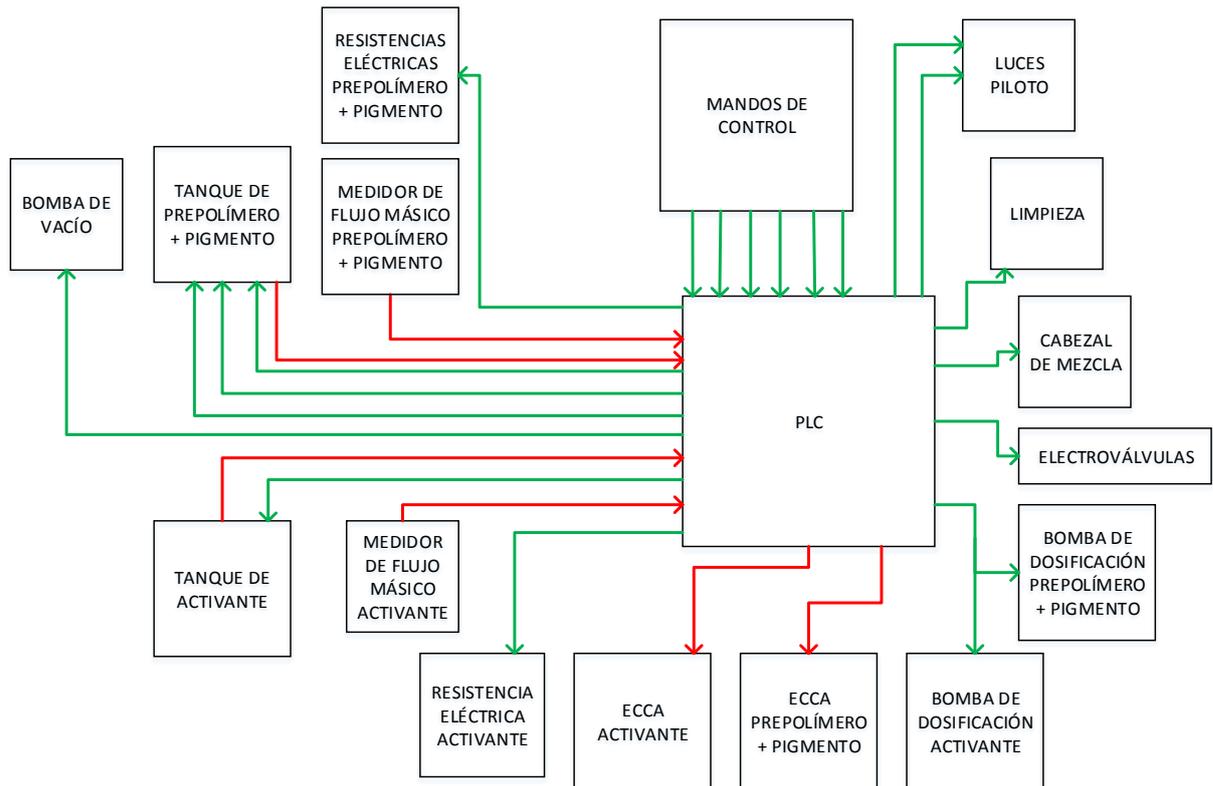


Figura 24. Diagrama de bloques de las entradas y salidas digitales y analógicas.

En el Anexo C.11 se muestra la descripción de cada una de las entradas y salidas digitales y analógicas.

6.3.5.2. Selección del controlador

Se selecciona el PLC Siemens SIMATIC S7-1200, mostrado en la Figura 25, que cumple con la cantidad requerida de entradas y salidas analógicas y digitales debido a la variedad de módulos disponibles; y principalmente por el módulo de programación tecnológico PID_Compact que brinda la posibilidad de implementar un controlador PID con sintonización automática. Las características principales del PLC son mostradas en la Tabla 34.



Figura 25. Controlador lógico programable Siemens SIMATIC S7-1200 [56].

.Tabla 34. Características principales del PLC Siemens SIMATIC S7-1200 [56].

Características	Descripción
Voltaje de alimentación	120/230 V AC
CPU	CPU 1214C AC/DC/Relay (6ES7 214-1BE30-0XB0)
Entradas y salidas digitales	14DI / 10DO
Entradas y salidas analógicas	2AI
Módulos requeridos	<ul style="list-style-type: none"> - Módulo de Salidas Analógicas, SM 1232, 4 AQ. (6ES7 232-4HD30- 0XB0) - Módulo de Salidas Digitales, SM 1222 8 DQ x Relay. (6ES7 222-1HF30-0XB0) - Módulo de Entradas Analógicas TC, SM 1231, 4 x Termopar. (6ES7 231-4HD30- 0XB0)
Tipo de comunicación	Ethernet

6.3.5.3. Selección de la HMI

La HMI elegido por su compatibilidad y facilidad de uso, es el SIMATIC HMI KPT400 Basic mostrado en la Figura 26; compatible con el PLC SIMATIC S7-1200, posee una pantalla de 4" táctil y cuatro botones programables [57].



Figura 26. Interfaz humano-máquina SIMATIC HMI KPT400 Basic [57].

6.3.6. CONTROLADOR DE TEMPERATURA DE LOS TANQUES

Se propone un controlador de temperatura PID para garantizar el rechazo a perturbaciones y mantener una temperatura constante según se requiera. El controlador se lo implementa por medio del bloque de programación PID-Compact del PLC. Este bloque requiere de los parámetros Kp, Ti y Td que son calculados con la función de transferencia de la planta. Al no ser posible la obtención de los parámetros de forma experimental, se toma la función de transferencia aproximada (28) de Saldivar [52] por motivos de simulación.

$$\frac{T_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{R_t q_i + T_a}{(R_t C_t)s + 1} \quad (28)$$

Donde

$T_o(s)$: Temperatura del horno en transformada de Laplace;

$Q_i(s)$: Flujo de calor en transformada de Laplace;

R_t : Resistencia térmica del material de las paredes del horno, en °Cs/kcal;

q_i : Flujo de calor suministrado al horno, en kcal/s ;

T_a : Temperatura ambiente, en °C;

C_t : Capacitancia térmica del medio contenido dentro del horno, en kcal/°C.

Reemplazando los valores en (28) se obtiene la función de transferencia aproximada de la planta.

$$\frac{T_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{\left(22.953,82 \left[\frac{^{\circ}Cs}{kcal}\right]\right) \left(14,33 \left[\frac{kcal}{s}\right]\right) + 10 [^{\circ}C]}{14,33 \left[\frac{kcal}{s}\right]} = \frac{22.954,52}{\left(\left(22.953,82 \left[\frac{^{\circ}Cs}{kcal}\right]\right) \left(0,064 \left[\frac{kcal}{^{\circ}C}\right]\right)\right) s + 1} = \frac{22.954,52}{1.469,04 s + 1}$$

$$\frac{T_o(s)}{Q_i(s)} = \frac{15,625}{s + 0,00068}$$

El controlador PID es implementado y simulado en la herramienta Simulink del software Matlab para comprobar que el sistema es estable en los puntos requeridos

y puede ser controlado con este tipo de controlador. En la Figura 27 se muestra la respuesta gráfica de la planta sin controlador a un impulso tipo escalón, generando un error en estado estacionario por la perturbación generada; mientras que en la Figura 28, la implementación del controlador estabiliza la variable temperatura en el punto deseado a pesar de existir la perturbación.

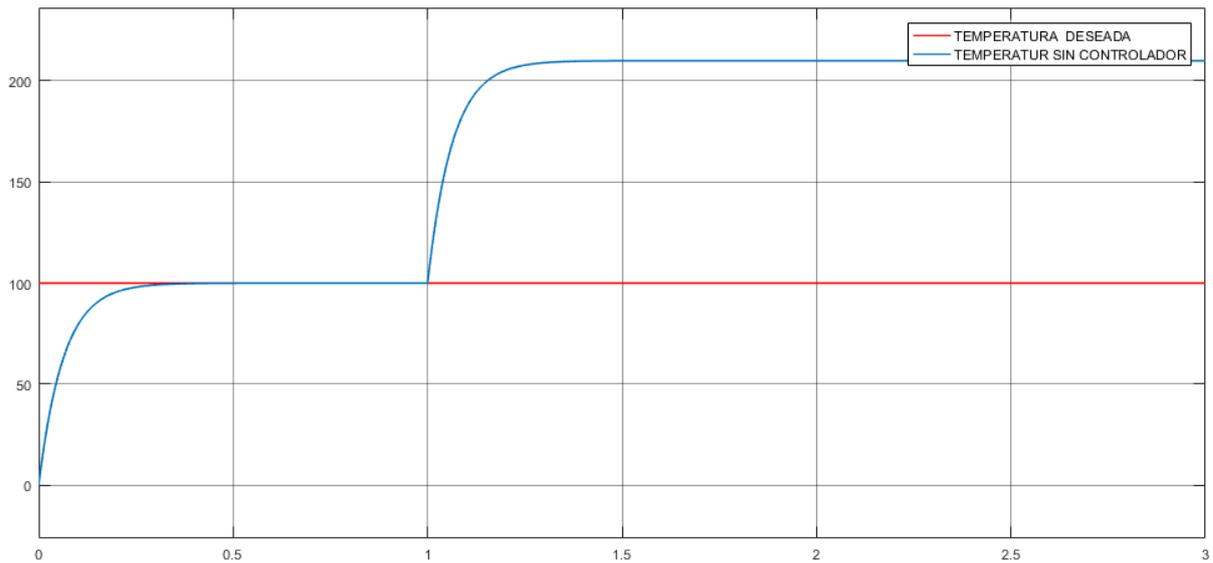
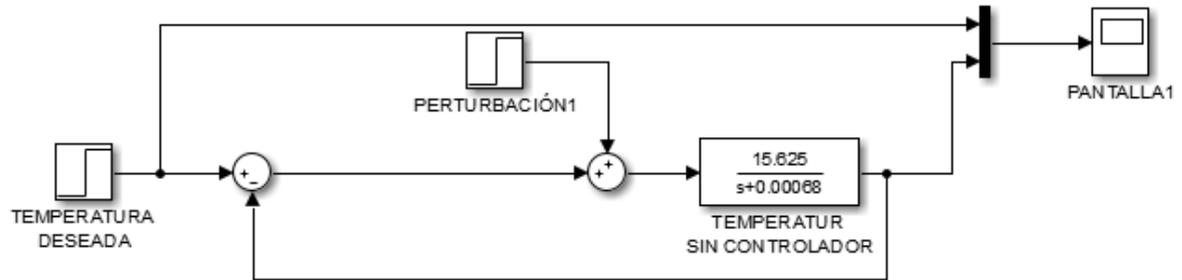


Figura 27. Gráficas del sistema sin controlador simulado en Simulink de Matlab.

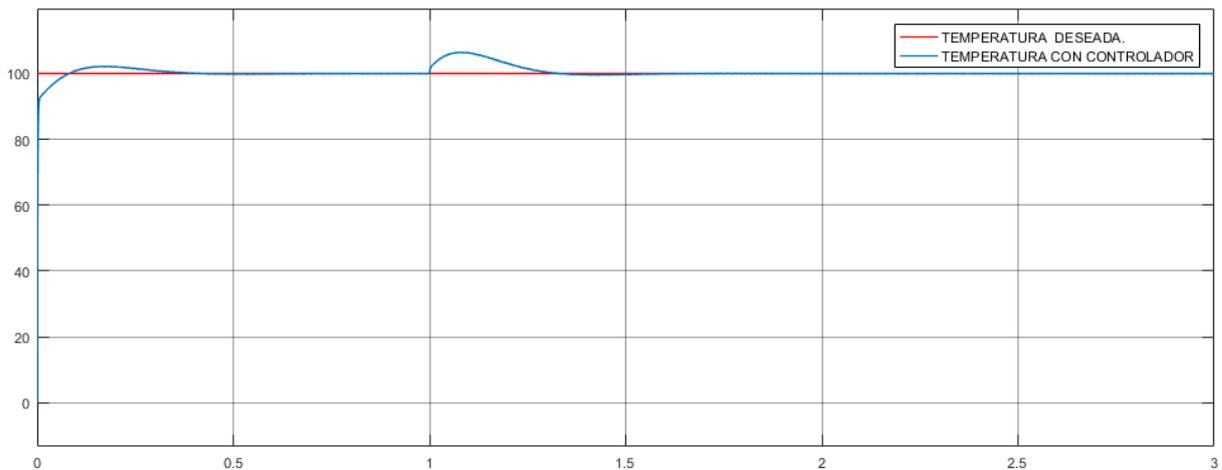
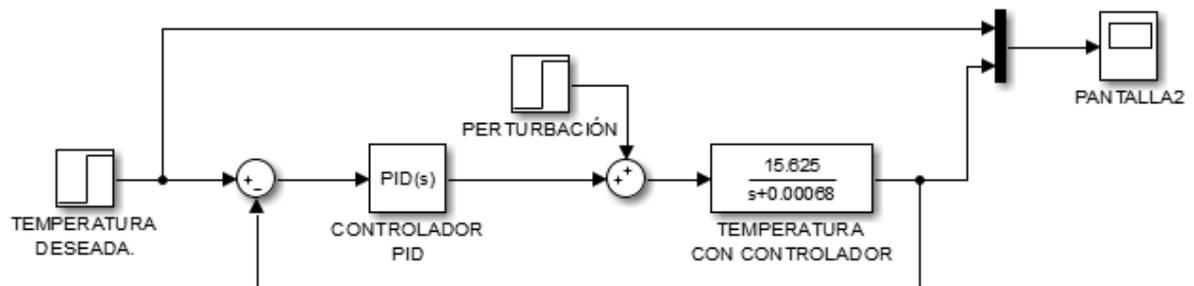


Figura 28. Gráficas del sistema implementando un controlador PID simulado en Simulink de Matlab.

6.3.6.1. Módulo de programación Siemens PID_Compact

La instrucción PID_Compact se utiliza para controlar procesos técnicos con variables continuas de entrada y salida, permitiendo la implementación de un controlador PID universal con optimización automática; es decir, calcula los parámetros P, I y D que brinden un mejor desempeño en el proceso, y pueden ser sintonizados de forma manual si es requerido [53].

En la Figura 29 se muestra el bloque de programación PID_Compact con sus diferentes entradas y salidas. El Setpoint es el valor que se desea que tome la variable controlada; el Input es el valor real de la variable que se controla y el Output_PWM brinda una salida tipo PWM para el control de la variable.

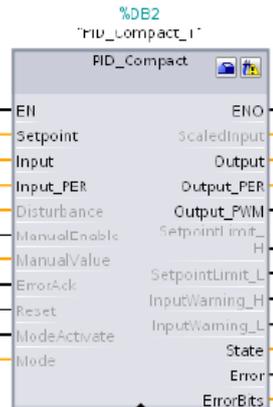


Figura 29. Módulo tecnológico de programación Siemens PID_Compact [53].

6.3.6.2. Termocupla

El control de temperatura de los tanques es realizado mediante una termocupla tipo J de la marca TCP modelo 1118-J-SE-U2-S2-W158-A-F-B, mostrada en la Figura 30, por el tipo de conexión NPT de $\frac{1}{2}$ pulgada que posee, brindando una conexión directa al tanque (Anexo B.12) [54].

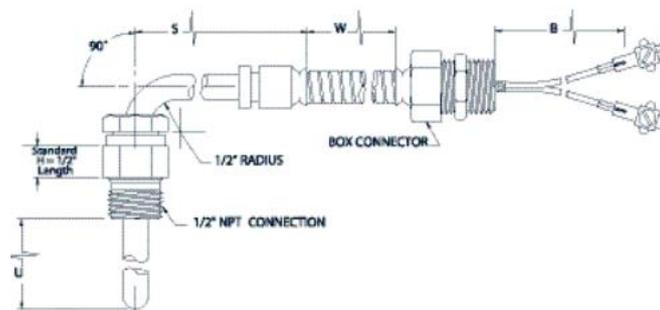


Figura 30. Termocupla tipo J modelo 1118 de la marca TCP [54].

6.3.6.3. Relé de estado sólido

El relé de estado sólido, conocido también como SSR (por sus siglas en inglés de *Solid State Relay*) permite el control de temperatura de los tanques, por medio de PWM.

El PWM generado por el módulo de control PID del PLC, modifica el VRMS que es aplicado a las resistencias; de esta manera se aumenta o disminuye la potencia efectiva que se transmite a los tanques. El SSR escogido mostrado en la Figura 31, es de la marca RELEQUICK modelo RS1A0P032DC480025R por sus características principales mostradas en la Tabla 35. En el Anexo B.13 se muestra la hoja de datos técnica.

Tabla 35. Características principales de SSR RELEQUICK [55].

Características	Descripción
Voltaje de control	3 - 32 [VDC]
Voltaje de operación	40 – 480 [VAC]
Corriente de operación	25 [A]
Frecuencia de operación	47 – 63 [Hz]



Figura 31. Relé de estado sólido de la marca RELEQUICK [55].

6.3.7. CABLEADO

Los cables son seleccionados dependiendo de la corriente nominal que deben soportar. En la Tabla 36 se detalla las diferentes conexiones requeridas, con el calibre mínimo de cable seleccionado en base al estándar AWG (Anexo A.7).

Tabla 36. Conexiones requeridas con su respectivo calibre AWG.

Conexión	Cantidad	Potencia c/u [W]	Voltaje [V]	Corriente c/u [A]	Calibre AWG
Resistencia	3	500	220	2,28	17
Variador de frecuencia	3	111,55	220	5,08	14
Controlador de capacidad (ECCA)	2	44	220	0,2	26
Bomba de vacío	1	1.463	220	6,65	13
Medidor de flujo másico	2	11	220	0,05	33
PLC	1	147,4	220	0,67	23
Electroválvulas y contactores	8	20	220	0,09	31
Total		6.736,05	220	17,67	8
Cables de control		48	24	2	18

Para unificar la adquisición de los cables y evitar el sobrecalentamiento por los picos de corriente en el arranque de los equipos, se decide emplear un cable calibre 12 AWG para todas las conexiones de 220 [V]; a excepción de los sensores, controladores, actuadores y elementos de control donde se escoge el calibre 18 AWG. El calibre de cable sugerido para la alimentación principal de toda la máquina es 8 AWG.

6.3.8. PROTECCIONES ELÉCTRICAS

La función principal de las protecciones eléctricas es proteger las líneas eléctricas contra:

- Sobrecargas: intensidades superiores a las nominales, que al mantenerse por un período de tiempo largo provocan un sobrecalentamiento.
- Cortocircuitos: intensidades muy altas, casi instantáneas, que deterioran las líneas y pueden dañar los equipos o componentes conectados a ellas [58].

La primera condición para el diseño de un fusible es la mostrada en la inecuación (29).

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (29)$$

Donde

I_b : Corriente de diseño del circuito, en A;

I_n : Corriente nominal del fusible, en A;

I_z : Corriente máxima admisible del conductor protegido, en A.

La segunda condición mostrada en la inecuación (30), expresa que los cables son capaces de soportar sobrecargas transitorias de hasta un 145% de la intensidad máxima admisible térmicamente sin presentar deterioros [58].

$$I_f \leq 1,45 I_z \quad (30)$$

Donde

I_f : Corriente que garantiza el desempeño efectivo de la protección, en A;

I_z : Corriente máxima admisible del conductor protegido, en A.

En la Tabla 37 se puede visualizar las condiciones para el cálculo de la corriente que garantiza el desempeño efectivo de la protección.

Tabla 37. Cálculo de la corriente de fusión dependiente de la corriente nominal del fusible [58].

I_n (A)	Tiempo convencional (h)	I_f Corriente convencional de fusión
$I_n \leq 4$	1	2,1 I_n
$4 < I_n \leq 16$	1	1,9 I_n
$16 < I_n \leq 63$	1	1,6 I_n
$63 < I_n \leq 160$	2	1,6 I_n
$160 < I_n \leq 400$	3	1,6 I_n
$400 < I_n$	4	1,6 I_n

La corriente de diseño para un sistema trifásico es calculada con (31).

$$I_b = \frac{P}{\sqrt{3} \times U \times \text{Cos}\varphi} \quad (31)$$

Donde

I_b : Corriente de diseño del circuito, en A;

P : Potencia del tramo a proteger, en W;

U : Voltaje RMS del circuito, en V;

$\text{Cos } \varphi$: Factor de potencia.

Reemplazando los valores se obtiene:

$$I_b = \frac{6.736,05 [W]}{\sqrt{3} \times 220 [V] \times 1}$$

$$I_b = 17,67 [A]$$

Aplicando la primera condición (29) se selecciona el fusible comercial de 20 [A].

$$I_n = 20 [A]$$

$$17,67 [A] \leq I_n \leq 24 [A]$$

La segunda condición (30) es calculada con los valores obtenidos de la Tabla 37, tomando en cuenta que el valor de corriente nominal del fusible seleccionado, se encuentra en el rango de $16 < I_n \leq 63$ y el cable posee un calibre 8 AWG ($I_z = 24$ [A]).

$$1,6 (20) \leq 1,45 (24)$$

$$32 \leq 34,8$$

Comprobando que se cumple ambas condiciones, el fusible seleccionado es de tipo cilíndrico gG-gL de 22 x 58 [mm] con una corriente nominal de 20 [A] y 220 [V].

6.3.9. TABLERO DE CONTROL

Tomando en cuenta las normativas descritas en la sección 6.2, referentes a la construcción de tableros eléctricos, y las dimensiones aproximadas de los componentes, se selecciona el armario de dimensiones 600 x 800 x 250 [mm] de la marca LOHMEIER [59] modelo AE-1040 con un grado de protección IP65, mostrado en la Figura 32.



Figura 32. Tableros de control tipo mural de la marca LOHMEIER [59].

El tablero es seleccionado de acuerdo a las dimensiones de los componentes mostrados en la Tabla 38.

Tabla 38. Dimensiones de los componentes eléctricos / electrónicos.

	Cantidad	Dimensiones [mm] (W/H/D)
Contactador 3 polos, bobina 24 VDC	5	57 x 86 x 135
Disyuntor	2	54 x 83 x 74
Portafusible	3	17,78 x 77,72 x 59,18
Variador de frecuencia	3	140 x 242 x 149
CPU 1214C PLC	1	110 x 100 x 75
Módulo SM 1232, 4 AQ	1	45 x 100 x 75
Módulo SM 1231, 4 TC	1	71,2 x 80 x 62
Módulo SM 1222 DQ 8 Rly	1	45 x 100 x 75
Relé de estado sólido (SSR)	2	44 x 57x 23
Pulsador (NA)	5	25 x 25 x 96
Pulsador (NC)	1	25 x 25 x 96
Paro de emergencia	1	40 x 40 x 96
Selector	1	67 x 70 x 96
Luz piloto	2	29 x 29 x 52
Canaleta	4	40 x 1.000 x 40

6.4. PROGRAMACIÓN

Las funciones o procesos que realiza la máquina inyectora de poliuretano son:

1. Control de temperatura de las recámaras de los tanques.
2. Cálculo del tiempo de inyección según la pieza ingresada.
3. Cálculo de la masa requerida de cada componente según el %NCO y el peso de la pieza ingresado.
4. Control del caudal de las bombas según la masa requerida.
5. Control de encendido y apagado de las bombas
6. Control de apertura de la válvula de inyección y encendido del cabezal de mezcla.
7. Desgasificación del tanque de prepolímero + pigmento.
8. Inyección del poliuretano listo en el molde.
9. Envío de señal requerida en la etapa de limpieza.

6.4.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROGRAMACIÓN

El diagrama de flujo de programación, mostrado en la Figura 33, es una herramienta importante al momento de entender e implementar una lógica adecuada durante la programación de las diferentes rutinas y condiciones de funcionamiento.

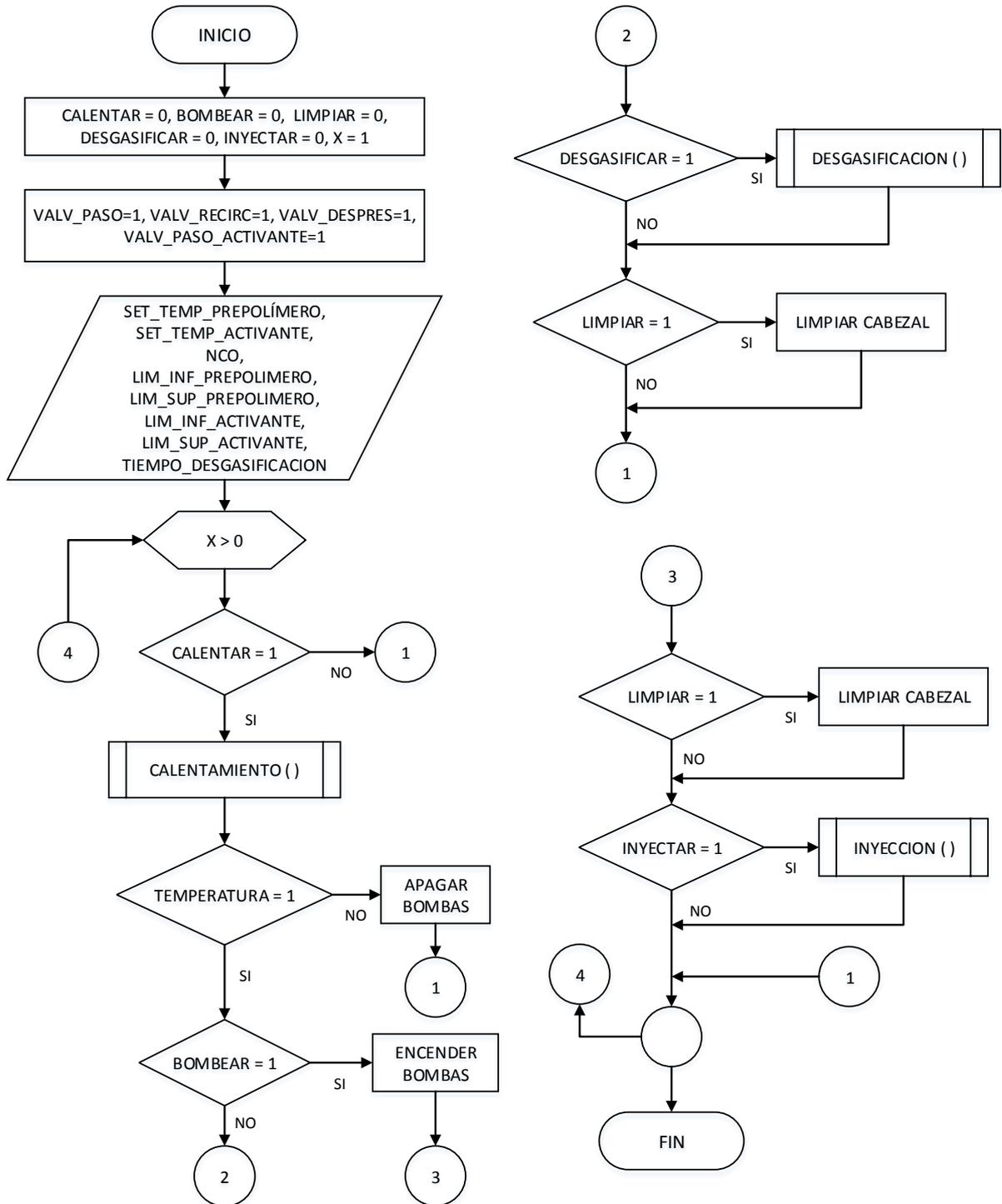


Figura 33. Diagrama de flujo de programación principal.

6.4.2. DISEÑO DE INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

La HMI permite el monitoreo y control de la máquina en tiempo real, permitiendo al operador configurar las diferentes variables requeridas durante el proceso. La programación en escalera (Ladder) del PLC y la HMI se lleva a cabo en el software TIA PORTAL V14; en el Anexo C.13 se muestran las diferentes rutinas implementadas.

La primera pantalla de inicio, mostrada en la Figura 34, incluye los diferentes logotipos de las empresas inmersas en el proyecto, y consta de dos botones que realizan las siguientes acciones:

1. Visualización de la pantalla “Variables del proceso”.
2. Apagado de la pantalla y visualización de las configuraciones principales de la HMI.



Figura 34. Pantalla principal de la HMI de la máquina inyectora de poliuretano.

La segunda pantalla, mostrada en la Figura 35, permite al operador configurar los diferentes parámetros del proceso, los cuales son:

1. **Set temperatura prepolímero:** Temperatura requerida para el procesamiento del prepolímero y el pigmento.

2. **Tolerancia temperatura prepolímero:** Tolerancia de temperatura aceptada en el procesamiento del prepolímero y el pigmento, el valor ingresado crea un rango de +/- entre el set de temperatura y la tolerancia.
3. **Set temperatura moca:** Temperatura requerida para el procesamiento del prepolímero y el pigmento.
4. **Tolerancia temperatura moca:** Tolerancia de temperatura aceptada en el procesamiento de la moca, el valor ingresado crea un rango de +/- entre el set de temperatura y la tolerancia.
5. **Peso pigmento + prepolímero ingresado:** Cantidad de gramos ingresados en el tanque de la mezcla entre el prepolímero y el pigmento.
6. **Peso moca ingresado:** Cantidad de gramos ingresados en el tanque de activante.
7. **% NCO:** Número adimensional presente en cada caneca de prepolímero.
8. **Tiempo de desgasificación:** Tiempo de encendido que se requiere de la bomba de vacío.

VARIABLES DEL PROCESO	
LLENAR TODOS LOS CAMPOS	
SET TEMPERATURA PREPOLÍMERO	100.0 °C
TOLERANCIA TEMPERATURA PREPOLÍMERO	4.0 °C
SET TEMPERATURA MOCA	116.0 °C
TOLERANCIA TEMPERATURA MOCA	2.0 °C
PESO PIGMENTO + PREPOLÍMERO INGRESADO	0.0 g
PESO MOCA INGRESADO	0.0 g
% NCO	3.20
TIEMPO DE DESGASIFICACIÓN	0 s

Figura 35. Pantalla de las variables del proceso de la HMI de la máquina inyectora de poliuretano.

En caso de un ingreso incorrecto del valor o que se encuentre fuera de los rangos permitidos, la pantalla indica en la parte inferior el tipo de error y los cuadros de ingreso de datos se tornan de color amarillo, si se encuentra debajo del rango, o de color rojo, si se encuentra sobre el rango.

Además consta de dos botones que realizan las siguientes acciones:

1. Visualización de la pantalla “Proceso”.
2. Retroceso hacia la pantalla de inicio.

La tercera pantalla, mostrada en la Figura 36, permite al operador monitorear las diferentes variables como la temperatura, el caudal, la cantidad de material restante y el estado de los diferentes dispositivos. En esta pantalla se ingresa el peso de la pieza a inyectar, con el cual se calcula el tiempo de inyección aplicando el caudal de 60 [g/s].

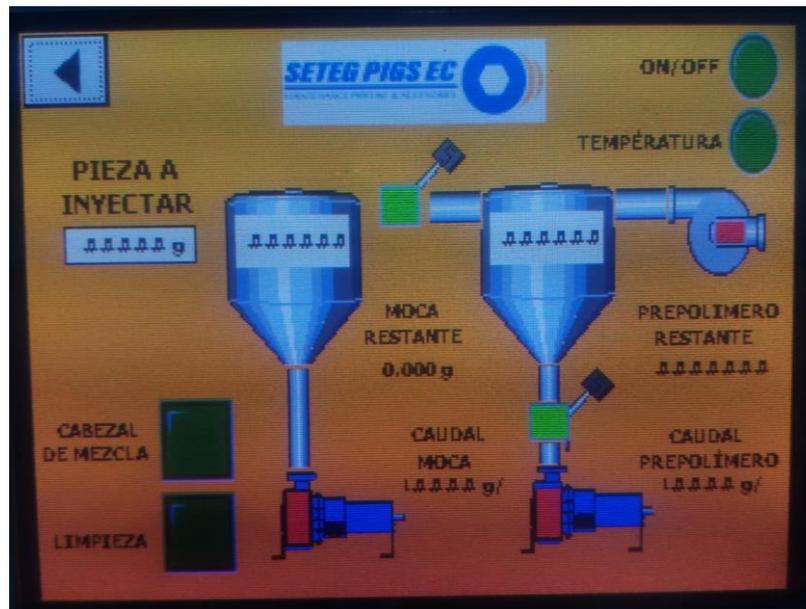


Figura 36. Pantalla de proceso de la HMI de la máquina inyectora de poliuretano.

Adicionalmente consta con un botón para regresar a la pantalla de “Variables del proceso”.

7. CONCLUSIONES

- La máquina inyectora de poliuretano semiautomática diseñada para la empresa SETEG PIGS EC, cumple con los requerimientos técnicos y tiene unas dimensiones generales 2065 x 1587 x 1197 [mm], posee una capacidad de inyección aproximada de 26000 [g] con un caudal de inyección de 60 [g/s], y permite la mezcla de 2 componentes con una presión máxima de operación de 1,5 [MPa].

- Como metodología y referencia para el diseño se investigó las máquinas de inyección de poliuretano disponibles comercialmente y las características técnicas de los componentes del poliuretano utilizado por la compañía.
- Considerando que el tiempo de vertido manual en una molde de 10000 [g] tarda aproximadamente 6 minutos y, con la implementación de la máquina inyectora se estima una duración de 2 minutos y 47 segundos, reduciendo en un 53% el tiempo de inyección de dicho molde y garantizando la estequiometría final de la mezcla.
- La máquina diseñada consta de una estructura metálica móvil diseñada por rigidez dentro del rango de precisión moderada, siendo seleccionado el perfil rectangular de 40x80x3 [mm] de acero A500 alcanzando un factor de seguridad de 9,59. En la estructura se instalan los diferentes equipos y partes e incluyen, un tanque de 40 [lt] de capacidad para el prepolímero y pigmento, un tanque de 3[lt] para el activante, dos bombas de dosificación, una bomba de vacío, un cabezal de mezcla, y elementos mecánicos, eléctricos y de instrumentación requeridos, un tablero de control, PLC y una pantalla HMI que permite al operador ingresar el valor de los parámetros de inyección, de acuerdo a los requerimientos técnicos de los productos elaborados por la empresa con la cual la máquina calcula automáticamente el porcentaje de cada componente y el tiempo de inyección.
- La capacidad de la bomba de dosificación, modelo CNIT 1088-04055, seleccionada para el bombeo del prepolímero + pigmento se encuentra entre el 56,8% - 60,8%; mientras que la bomba de dosificación de activante, modelo CNIT 1044-04055, se encuentra entre 38,4% - 64,2%; cumpliendo rangos adecuados de trabajo.
- Los medidores de flujo másico de la marca Tricor modelo TCM 1550 / TCE 8000/8100 permiten el control redundante de la temperatura y caudal de los componentes previo al ingreso a la recámara de mezcla del cabezal de mezcla, compensando la caída de temperatura en el recorrido de las mangueras.
- La temperatura de los componentes es controlada por medio del módulo de programación PID_Compact, estableciendo por medio de la HMI que el prepolímero + pigmento se deben mantener en 100 [°C] con un rango

permisible de ± 3 [°C], mientras que el activante se debe mantener en 116 [°C] con un rango permisible de ± 1 [°C].

- El control semiautomático de la máquina es realizado por medio de una programación en escalera (Ladder) y el módulo tecnológico Pid_Compact con una resolución máxima de 14 bits; se implementa 12 salidas digitales, 4 entradas digitales, 2 salidas analógicas y 4 entradas analógicas.

8. RECOMENDACIONES

- Para la construcción se recomienda mantener las tolerancias dimensionales en la fabricación de las piezas estructurales, enfatizando una mayor precisión en los agujeros; una tolerancia excesiva puede afectar en el armado de los diferentes elementos. El ensamblaje de las partes que constituyen las recámaras de aislamiento se debe realizar de adentro hacia afuera, es decir comenzar con los elementos que constituyen los tanques hasta terminar con los paneles aislantes exteriores.
- Se recomienda generar por parte del constructor los manuales de operación y mantenimiento de la máquina, prestando atención a la limpieza de los tanques de almacenamiento y mangueras después de cada jornada de trabajo para evitar el taponamiento y acumulación de residuos en el interior de los mismos.
- El presente estudio se enfoca en la parte técnica y se recomienda realizar un estudio económico previo a la construcción del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Diseño, fabricación y comercialización de herramientas para la conservación interna de ductos.” setegpigs.com. <http://www.setegpigs.com> (accedido Jul. 18, 2019)
- [2] J. Walker, “Elastomer Engineering Guide” James Walker, Surrey, Inglaterra, 2017. Accedido: Jul. 19, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.jameswalker.biz/de/pdf_docs/148-elastomer-engineering-guide
- [3] I. Clemitson, “Chemistry,” in *Castable Polyurethane Elastomers*, Boca Ratón, Florida, USA: CRC Press, 2008. Accedido: Jul. 18, 2019. [Online]. Disponible en: https://zodml.org/sites/default/files/%5BI.R._Clemitson%5D_Castable_Polyurethane_Elastomers_0.pdf
- [4] Polyurethane elastomer composition, por L. Fui-Tseng y J. Green. (1985, Nov. 26). U.S. Patent 4,555,562 [Online]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US4555562A/en>
- [5] *Adiprene LF 1900A*, Chemtura, Middlebury, CT, USA, 2007.
- [6] *Adiprene LF 1800A*, Chemtura, Middlebury, CT, USA, 2007.
- [7] C. Nalepa, W. Brown y J. Simon. “A New Curative for Cast Elastomers,” en *Polyurethanes World Congress*, 1987. [Online]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.902.2365&rep=rep1&type=pdf>
- [8] Baulé, Romans cedex, Francia. *BLUE COLOURING AGENT (5013)*, (2007). Accedido: Oct. 01, 2019. [Online]. Disponible en: http://www.siliconasyquimicos.com/media/k2/attachments/BlueColouringAgent_ang.pdf
- [9] “STANDARD MODEL OF METERING, MIXING AND DISPENSING MACHINE FOR POLYURETHANE ELASTOMERS.” annovi.it. <http://www.annovi.it/en/products/colatrici/characteristics-casting-machin/> (accedido Jul. 20, 2019).

- [10] "TDI system elastomer casting machine for elastomer tire." alibaba.com. https://www.alibaba.com/product-detail/TDI-system-elastomer-casting-machine-for_60481970788.html?spm=a2700.details.maylikever.10.46a9560f8l8daR (accedido Jul. 21, 2019).
- [11] "CASTING MACHINES for PU ELASTOMERS Models: ELASTOMIX." pumixplant.com. <http://www.pumixplant.com/en/machines-plant/elastomer-casting-machines-elastomix/> (accedido Jul. 21, 2019).
- [12] Hennecke, Sankt Augustin, Alemania. *ELASTOLINE*. Accedido: Jul. 21, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.hennecke.com/sites/default/files/downloads/elastoline_de_en.pdf
- [13] Sonderhoff, Dornbirn, Austria. *DM50 / DM70*. sonderhoff.com. https://www.sonderhoff.com/fileadmin/assets/images/infopool/Broschueren/sonderhoff_dm_50_70_en.pdf (accedido Jul. 22, 2019).
- [14] "DM 402/403." Accedido: Jul. 22, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.sonderhoff.com/fileadmin/assets/images/infopool/Broschueren/sonderhoff_dm_402_403_en.pdf
- [15] "Low-Pressure Metering Equipment." americanchemistry.com. <https://polyurethane.americanchemistry.com/Low-Pressure-Metering-Equipment/> (accedido Jul. 22, 2019).
- [16] "Hennecke Mixhead Technology." hennecke.com. <https://www.hennecke.com/en/products/mixheads/overview> (accedido Jul. 23, 2019).
- [17] "Mixing heads." sonderhoff.com. <https://www.sonderhoff.com/en/solutions/engineering-systems/mixing-heads/> (accedido Jul. 24, 2019).
- [18] Edge-Sweets Co., USA. *PU Processing*. Accedido: Dic. 02, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.edge-sweets.com/specs/ESCO_Mixheads_Brochure_MQ.pdf

- [19] Milton Roy, Ivyland, PT, USA. *Milton Roy Metering Pump Technology*. Accedido: Oct. 05, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.miltonroy.com/wp-content/uploads/Metering-Pump-Technology.pdf>
- [20] PSG Co., Grand Terrace, CA, USA. *Sizing and Selecting Metering Pumps*. Accedido: Oct. 16, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.psgdover.com/docs/default-source/neptune/guides/sizing-and-selecting-metering-pumps.pdf?sfvrsn=7166cf56_10
- [21] "Planning for Your Chemical Metering Pump's Application (#1 of 8)." aquflow.com. <https://aquflowpumps.com/metering-pumps-tips/planning-for-your-chemical-metering-pumps-application-1-of-8/> (accedido Oct. 16, 2019).
- [22] Gast Manufacturing, Inc., Benton Harbor, MI, USA. *Vacuum and Pressure Systems*, revised electronic ed., Accedido: Oct. 03, 2019. [Online]. Disponible en: <http://www.moundtop.com/vacuum/Vacuum-Pressure-Handbook.pdf>
- [23] Chemtura, Middlebury, CT, USA. *MOCA/MBOCA*, (2015). Accedido: Agos. 12, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.chemtura.com/deployedfiles/CorporateV2/CorporateV2-en-US/Documents/Product%20Stewardship/PSS_URE-MOCA-MBOCA_Feb2015-FINAL.PDF
- [24] "4,4'-METHYLENE BIS(2-CHLOROANILINE)." osha.gov. <https://www.osha.gov/chemicaldata/chemResult.html?RecNo=22> (accedido Agos. 12, 2019).
- [25] Baulé, Romans cedex, Francia. *YELLOW COLOURING AGENT (1023)*, (2007). Accedido: Oct. 01, 2019. [Online]. Disponible en: http://www.siliconasyquimicos.com/media/k2/attachments/YellowColouringAgent_an_g.pdf
- [26] *Plastics and rubber machines— Injection moulding machines— Safety requirements*, ISO/DIS 20430.2, 2017. [Online]. Disponible en: <https://dgn.isolutions.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:20430:dis:ed-1:v2:en>
- [27] Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII Div. 1 Rules for Construction of Pressure Vessels, ASME, USA, 2010.

- [28] *Positive Displacement Pumps – Controlled Volume*, API Standard 675, Oct. 1994. [Online]. Disponible en: https://kupdf.net/download/api-675pdf_599b8794dc0d60502453a1fc_pdf
- [29] S. Stazzone. *Industrial Control Panel Design Guide: Schematics, Standards, Design Considerations & More*. (2019). Accedido: Oct. 20, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.mpofcinci.com/blog/industrial-control-panel-design-guide/>
- [30] Legrand, Santiago, Chile. *IEC-61439*. Accedido: Oct. 20, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.legrand.cl/catalogos/nuevos/cat_tan/files/assets/common/downloads/page0005.pdf
- [31] R. Mott, *Diseño de Elementos de Máquina*, 4ta ed. México: Pearson Educación, 2006.
- [32] R. Budynas y J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, 8va ed. México: McGraw-Hill, 2008.
- [33] COIM, Italia. *Imuthane Processing*. Accedido: Sept. 22, 2019. [Online]. Disponible en: <http://www.duraflex-d.com/wp-content/uploads/2015/07/Coim-Processing-Presentation-May-2012.pdf>
- [34] P. González, et al., “Planta de producción de ácido fórmico,” Ing. Thesis, Dep. Ing. Quim., Univ. Barcelona, Barcelona, España, 2016. [Online]. Disponible en: <https://ddd.uab.cat/record/168385>
- [35] Q. Boixader, et al., “Planta de producción de acetato de vinilo,” Ing. Thesis, Dep. Ing. Quim., Univ. Barcelona, Barcelona, España, 2016. [Online]. <https://ddd.uab.cat/record/148700>
- [36] Carbone, Ciudad de Panamá, Panamá. *Ficha Técnica del Acero Inoxidable*. Accedido: Oct. 25, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>
- [37] “Planchas de acero inoxidable.” [dipacmanta.com](http://www.dipacmanta.com). <http://www.dipacmanta.com/planchas-inoxidables> (accedido Oct. 26, 2019).

- [38] “Bocas de hombre.” zimmerlin-spain.com. <http://www.zimmerlin-spain.com/> (accedido Dic. 10, 2019).
- [39] “Fondos conformados en frío” fondeyur.com. <http://www.fondeyur.com/fondos-klopper.aspx> (accedido Oct. 26, 2019).
- [40] “Vacuum Pumps.” beckerpumps.com. <https://beckerpumps.com/vacuum-pumps/> (accedido Oct. 12, 2019).
- [41] AquFlow, Irvine, CA, USA. *Metering Pumps & Systems*. Accedido: Oct. 18, 2019. [Online]. Disponible en: <https://aquflowpumps.com/wp-content/uploads/2014/08/AquFlow-Brochure-2014.pdf>
- [42] AquFlow, Irvine, CA, USA. *Series 3000*. Accedido: Oct. 19, 2019. [Online]. Disponible en: <https://aquflowpumps.com/wp-content/uploads/2014/06/Series-3000-Manual.pdf>
- [43] Walchem, Iwaki America Inc., Holliston, MA, USA. *Metering Pumps*. Accedido: Oct. 18, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.walchem.com/Literature/Pumps/180186_LK_Brochure.pdf
- [44] ORK, Osaka Rasenkan Kogyo Co., Ltd., Tokio, Japón. *Teflon hoses*. Accedido: Oct. 22, 2019. [Online]. Disponible en: <http://www.ork-flex.com/catalog/pdf/e-catalog6.pdf>
- [45] F. Incropera y D. De Witt, *Fundamentos de Transferencia de Calor*, 4ta ed. México: Prentice Hall, 1999.
- [46] Romeral, Sociedad Industrial Romeral S.A., Santiago, Chile. *Lana de Vidrio y Lana Mineral*. Accedido: Nov. 01, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.romeral.cl/es-ES/download/file/es/24ae3e8854584e9cbbd4a6480123a873/lana-de-vidrio-manual-de-instalacion?rev=0a89e7c6-6c1b-4a43-85e6-ffef20784eee>
- [47] “Industrial - Medium Duty.” tellurerota.com. <https://www.tellurerota.com/en/product-range/industrial-medium-duty/series-60-st> (accedido Nov. 3, 2019).

- [48] AquFlow, Irvine, CA, USA. *ECCA*. Accedido: Nov. 15, 2019. [Online]. Disponible en: http://www.newin-tech.com/upload_file/product/10084_002.pdf
- [49] “Variable Frequency Drive – AC (HydroDrive).” [aquflowpumps.com](https://aquflowpumps.com/products/controls/variable-frequency-drive/). <https://aquflowpumps.com/products/controls/variable-frequency-drive/> (accedido Nov. 6, 2019).
- [50] “Process Valves for Air, Water, Liquids, and Steam.” [stcvalve.com](https://www.stcvalve.com/Process_Valves.htm). https://www.stcvalve.com/Process_Valves.htm (accedido Dic. 3, 2019).
- [51] Tricor Coriolis Technology, Oak Creek, WI, USA. *CLASSIC Series TCM 5500 Coriolis Mass Flow Meter*. Accedido: Dic. 5, 2019. [Online]. Disponible en: https://tricorflow.com/wp-content/uploads/2018/04/TCM_5500_CLASSIC_F_EN_180720_E005.pdf
- [52] M. Saldivár y O. Vázquez “Diseño y construcción de un control de temperatura para el experimento de Franck - Hertz,” Ing. Tesis, UNAM, México, 2012. [Online]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/627>
- [53] Siemens, Berlín, Alemania. *Controlador programable S7-1200 v4.2*. (2016). Accedido: Nov. 15, 2019. [Online]. Disponible en: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/593/109741593/att_895707/v1/s71200_system_manual_es-ES_es-ES.pdf
- [54] Thermo-Couple Products Co., Newell, WV, USA. *Engine Thermocouples*. Accedido: Nov. 04, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.marshbellofram.com/thermo-couple/files/2012/07/TCP_Engine_TCs33-39.pdf
- [55] Relequick S.A., Madrid, España. *Solid State Relays*. Accedido: Dic. 06, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.iessyria.com/wp-content/uploads/2015/02/Solid-state-relays.pdf>
- [56] Siemens AG. *SIMATIC S7-1200*. Accedido: Nov. 24, 2019. [Online]. Disponible en: <https://www.paratrasnet.ro/pdf/automatizari-industriale/S7-1200.pdf>
- [57] Siemens AG. *SIMATIC HMI*. Accedido: Nov. 24, 2019. [Online]. Disponible en: <https://c4b.gss.siemens.com/resources/images/articles/dffa-b10135-02-7600.pdf>

[58] A. Martínez, V. Blanca, N. Castilla y R. Pastor. *Cálculo de Fusibles de una Instalación Eléctrica en Baja Tensión*. Accedido: Dic. 05, 2019. [Online]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10765/FUSIBLES.pdf>

[59] Box Point, Barcelona, España. *Cajas y Armarios Eléctricos Lohmeier*. Accedido: Dic. 08, 2019. [Online]. Disponible en: https://www.box-point.com/themes/default-bootstrap/downloads_pdf/catalogo_lohmeier_web.pdf