



**MONTAJE DE UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ESPUMA FLEXIBLE DE
POLIURETANO PARA EL LABORATORIO DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO DE
COLCHONES Y MUEBLES RELAX.**

Hernán Rafael Lozano Villarreal

Código:20452016649

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Barranquilla, Colombia

2022

**MONTAJE DE UNA PLANTA DE FABRICACIÓN DE ESPUMA FLEXIBLE DE
POLIURETANO PARA EL LABORATORIO DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO DE
COLCHONES Y MUEBLES RELAX.**

Hernán Rafael Lozano Villarreal

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ing. Camilo Fontalvo Calvo, Msc.

Línea de Investigación:

Energía

Grupo de Investigación:

GI-Fourier

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Barranquilla, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Puerto Colombia, 15 de noviembre de 2022

Contenido

Lista de Figuras	9
Lista de Tablas.	11
Resumen.....	12
Abstract	13
Introducción	14
1. Planteamiento del problema	16
2. Objetivos	19
2.1. Objetivo General	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. Justificación	21
4. Marco teórico.....	23
4.1. Espumas flexibles de Poliuretanos.....	23
4.2. Química de los poliuretanos.....	24
4.3. Modelado dinámico de un proceso de fabricación de espuma de poliuretano	28
Balance de masas del Reactor	33
Balance de energía del Reactor.....	34
Balance molar del Reactor	36
4.4. Sistema de Control PID.....	36
5. Diseño Metodológico.....	41
5.1. Selección y acondicionamiento del espacio físico del laboratorio.....	41
5.2. Mantenimiento y modificación de equipos para ajustarlos al tamaño de la instalación experimental.	41

5.3.	Planeación y ejecución del montaje del laboratorio de innovación y desarrollo	42
5.4.	Instrumentación, automatización y control de equipos	42
5.5.	Comprobación del funcionamiento del laboratorio de innovación y desarrollo	42
6.	Resultados y Análisis de resultados	43
6.1.	Adecuación espacial del laboratorio	43
6.1.1.	Instalación de paredes, ventanas y puerta	48
6.1.2.	Instalación de luminarias, aire acondicionado y conexiones eléctricas	49
6.1.3.	Instalación de campana extractora de emisiones	50
6.2.	Adecuación y recuperación de equipos para laboratorio	51
6.2.1.	Recuperar reactor y reducción de dimensiones adecuándolo al laboratorio	51
6.2.2.	Mantenimiento preventivo de motores recuperados de líneas anteriores	54
6.3.	Puesta en marcha del laboratorio	54
6.3.1.	Instalación de tablero eléctrico y sus componentes de control	54
6.3.2.	Instalación de motores en sitio de trabajo	58
6.4.	Evaluación de la funcionalidad del laboratorio	60
6.4.1.	Evaluación del funcionamiento del reactor	60
6.4.2.	Resultados de la experimentación de químicos en el reactor	61
	Conclusiones	63
	Referencias	65
	ANEXO A	70
	ANEXO B	72

ANEXO C.....	73
ANEXO D.....	74
ANEXO E.....	75

Preliminares

Dedicatoria

A mis padres quienes han creído en mí siempre, dándome ejemplo de superación, humildad y sacrificio; enseñándome a valorar todo lo que tengo, a mi hermano que nos hemos pactado triunfar en la vida, lo que ha contribuido la consecución de este logro. Espero contar siempre con su incondicional y valioso apoyo.

Hernán Rafael Lozano Buelvas

Juliana De Loa Reyes Villarreal Iglesias

Harol Enrique Lozano Villarreal

También dedico a mi hija que desde que llego a mi vida se convirtió en mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y ser un gran ejemplo para ella.

Emma Lucia Lozano Romero

Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir con éxito este proyecto

Muchas gracias mis seres queridos que siempre llevo en mi corazón

Agradecimientos

El principal agradecimiento a Dios quien me ha guiado y dado la fortaleza para salir adelante.

Luego agradecer a todas las personas que de alguna manera contribuyeron en la realización de este Trabajo de Grado y aportaron su trabajo, experiencia y apoyo. Especialmente quiero agradecer a:

- Las Directivas de Colchones y Muebles Relax, por permitirme hacer mi Trabajo de Grado en su Empresa y brindarnos todas las condiciones y toda la información necesaria para el mismo.

- Al Ing. Yilmar Maza, jefe de Química de Colchones y Muebles Relax, por la ayuda y el apoyo que nos brindó a lo largo de toda la elaboración del Trabajo.

- Al Ing. Jhon Cuentas, jefe de Mantenimiento de Colchones y Muebles Relax, por ayudarme a estructurar el proyecto.

- A la Ing. Ana Pichon, jefe de Calidad de Colchones y Muebles Relax, que de una u otra forma me dedico su tiempo para aclarar dudas y explicarme el proceso.

- Al Ing. Camilo Fontalvo, director de Proyecto de Grado, por la ayuda que me brindo y el apoyo para lograr el completo desarrollo del Trabajo de Grado.

Lista de Figuras

Figura 1 Reacción de espumado.....	25
Figura 2. Reacción de diisocianato y poliol.....	26
Figura 3. Diagrama esquemático del reactor con sus entradas y salidas	28
Figura 4. Lazo cerrado de control PID	37
Figura 5. Ubicación de Laboratorio de Innovación y Desarrollo en planta.....	43
Figura 6. Laboratorio de innovación y desarrollo 1) mezclador I 2) mezclador II 3) campana extractora 4) máquina universal de ensayos	44
Figura 7. Mezclador I	45
Figura 8. Equipo Mezclador II.....	46
Figura 9. Campana en posición de trabajo.....	47
Figura 10. Máquina Universal de Ensayos	48
Figura 11. Instalación puertas y ventanas laboratorio.....	49
Figura 12. Vista exterior de iluminación del laboratorio de innovación y desarrollo.....	49
Figura 13. Distribución de tomas eléctricos y posición de aire acondicionado	50
Figura 14. Campana extractora de vapores.....	51
Figura 15. Descarga del Reactor	52
Figura 16. Fabricación de tanque reactor.....	53
Figura 17. Motores recuperados para proceso.	54

Figura 18. Tableros Eléctricos, Potencia y Control.....	55
Figura 19. Diagrama esquemático del control automático.	56
Figura 20. Componentes de control automático.....	57
Figura 21. Equipo Reactor.	59
Figura 22. Funcionamiento del Equipo Reactor.....	61
Figura 23. Prueba laboratorio de bloque Espuma viscoelástica.....	62
Figura 24. Prueba Laboratorio Espuma de Compactación.	62
Figura 25. Ensayos mecánicos efectuados.....	63

Lista de Tablas.

Tabla 1. Componentes y proporciones respecto al polioliol de una espuma flexible	27
Tabla 2. Composición de espuma flexible de poliuretano.....	27
Tabla 3. Ficha Técnica PLC.....	58

Resumen

El presente trabajo describe el proceso de adecuación e instalación de un laboratorio de fabricación de poliuretano para una planta de muebles y colchones en la ciudad de Barranquilla, Colombia. El laboratorio tiene como misión principal servir de instalación experimental para el diseño y evaluación de nuevos poliuretanos, a partir de solicitudes formales de clientes o de la intención de innovación de la empresa. En Colchones y Muebles Relax, empresa para la cual se realizó este trabajo, están determinados a implementar métodos controlados de experimentación en la fabricación de espumas que permitan el ajuste de parámetros de fabricación para satisfacer esos requerimientos de clientes o propios, y para ello, se decidió implementar una planta a escala de laboratorio (con todos sus componentes reusados de equipos en desuso), que eliminen el ensayo y error en la producción de espuma flexible de poliuretano, que eviten el desperdicio de grandes cantidades de materia prima y que garanticen la obtención de las propiedades mecánicas deseadas en el poliuretano. En este trabajo se muestra el proceso en el que se desarrolló y puso en marcha el laboratorio de Innovación y Desarrollo de la Planta de Muebles y Colchones Relax, con el propósito de facilitar a los ingenieros químicos e industriales de la planta, planear y obtener poliuretanos fabricados con las especificaciones deseadas para satisfacción de clientes y propias, en instalaciones modernas, automatizadas y seguras.

PALABRAS CLAVE: Instalación experimental, I+D, Poliuretano, fabricación.

Abstract

This paper describes the adaptation and installation process of a polyurethane manufacturing laboratory for a furniture and mattress plant in the city of Barranquilla, Colombia. The laboratory's main mission is to serve as an experimental facility for the design and evaluation of new polyurethanes, based on formal requests from clients or the company's intention to innovate. At Colchones y Muebles Relax, the company for which this work was carried out, they are determined to implement controlled experimentation methods in the manufacture of foams that allow the adjustment of manufacturing parameters to satisfy these customer or own requirements, and for this, they implement a laboratory-scale plant (with all its components reused from disused equipment), that eliminate trial and error in the production of flexible polyurethane foam, that avoid the waste of large amounts of raw material, and that guarantee the obtaining the desired mechanical properties in polyurethane. This work shows the process in which the Innovation and Development Laboratory of the Muebles y Colchones Relax plant was developed and launched, with the purpose of facilitating the plant's chemical engineers, to plan and obtain polyurethanes manufactured with desired specifications for customers, in modern, automated, and safe facilities.

KEY WORDS: Experimental facility, R&D, Polyurethane, manufacturing.

Introducción

El uso de polímeros en distintas aplicaciones del sector industrial, comercial y residencial es innegable y se ha extendido además del campo ya convencional de los envases, a la fabricación de componentes en las industrias de automoción, vivienda, vestido y todo tipo de bienes de consumo (Arandes, Bilbao, & López, 2004). El aumento exponencial del uso de plásticos en general en las primeras décadas del siglo XXI y la diversificación del uso de los distintos aspectos de la vida ha llevado a la producción de plásticos a cerca de 460 millones de toneladas anuales en el mundo, pero que, por asuntos relacionados con el ambiente y regulaciones asociadas a él (con desperdicios cercanos a las 200 millones de toneladas) (La República, 2022), las tasas de crecimiento en el uso de polímeros tiene tendencia negativa constante, sobre todo por la prohibición de plásticos de un solo uso.

Los poliuretanos como material polimérico tienen usos variados en igualmente variadas industrias. La industria del poliuretano contempla el uso de sustancias químicas que son fundamentales para su fabricación, tales como aditivos extractores de humedad, de carga, catalizadores, estabilizadores; disolventes y plastificantes; extendedores de cadenas; isocianatos; polioles y retardantes de llama (Góngora, 2014). Las industrias en las que se usan espumas flexibles de poliuretanos, por sus propiedades mecánicas, térmicas y de confort, requieren de un estricto control de los químicos usados para propiciar las reacciones que darán lugar a poliuretanos con características adecuadas a los distintos usos industriales (García & Morales, 2019) .

Las plantas de fabricación de muebles, colchones, aislantes acústicos y térmicos y otras series de espumas flexibles de poliuretano, es una industria bien establecida por su alto impacto

en la cultura colombiana, y por tanto, las mejoras en los procesos de producción, de investigación e innovación son ampliamente valorados, con altas inversiones económicas y de recursos humanos para lograr mayor competitividad en las empresas. Colchones y muebles Relax, se suma a estos esfuerzos promoviendo la instalación y puesta en marcha del laboratorio de innovación y desarrollo que será descrito en este trabajo.

1. Planteamiento del problema

Colchones y Muebles Relax SA es una empresa con 30 años en el mercado de la ciudad de Barranquilla, que se ha dedicado a la fabricación y comercialización de espuma flexible de poliuretano (espumas flexibles de poliuretano) y productos dedicados al descanso y confort del sector residencial y comercial, tales como: colchones, colchonetas, muebles, somieres; con muy altos estándares de calidad y a petición de una gran variedad de pedidos de sus clientes.

La espuma flexible de poliuretano (PU) es un polímero termo formable que se obtiene de la reacción exotérmica de polimerización por condensación de un polioliol con un isocianato (Correia, Berttiz, Colmenares, & De Sousa, 2010) en presencia de otros aditivos y catalizadores como tensoactivos, agente soplante y/o refrigerante, catalizador amínico, catalizador metálico y otros aditivos para apariencia tales como los colorantes. Las espumas flexibles (Ocampo, 2012) son una red entrecruzada que contiene dos tipos de polímeros: un polímero de uretano formado por la reacción de un polioliol de alto peso molecular con un isocianato proporcionando segmentos suaves (enlaces de uretano con macromoléculas en los lados), el cual genera una red elastomérica estable, elástica y con buenas propiedades mecánicas.

La empresa cuenta con un novedoso sistema discontinuo de producción de espuma flexible de PU, en el que, por medio de un proceso automático de dosificación de las materias primas requeridas a un reactor, se realiza una mezcla homogénea de los productos químicos y se descarga en moldes con las medidas requeridas por clientes o propias, para consumo

interno de la planta y/o como producto terminado para comerciar con los clientes habituales.

La espumas flexibles de poliuretano como producto final cuenta con unas características intrínsecas aportadas por la relación que se tiene entre las materias primas empleadas. Se puede resaltar la obtención de propiedades deseadas del PU como densidad, dureza, elongación, desgarre, permeabilidad y resiliencia, todas enmarcadas dentro de la Norma Técnica Colombiana *NTC 2439 de 2019* Materiales poliméricos celulares flexibles. Espumas de poliuretano para aplicaciones en muebles, colchones y colchonetas y otras especificaciones (ICONTEC, 2022).

Actualmente la empresa cuenta con formulaciones de espumas flexibles de poliuretano que satisfacen las necesidades del cliente desarrolladas por metodología de prueba y error a escala industrial, sin tener la certeza de valores cuantitativos que permitan tener un registro de todas las propiedades de la espumas flexibles de poliuretano. Para cada nueva necesidad del mercado el modo de operación en estos momentos es el mismo, lo cual acarrea incertidumbre en los resultados a obtener, así como también costos elevados en innovación, riesgos latentes de incineración por la naturaleza exotérmica del proceso, tiempos largos de paradas, incremento en mantenimientos correctivos y sin olvidar, no como menos importante, la probabilidad alta de accidentes.

Fabricar espumas flexibles de poliuretano requiere de una caracterización del proceso productivo a escala laboratorio que permita tener una idea del comportamiento del sistema cuando se lleve a escala industrial. Lo anterior con el fin de reducir costos en ensayos de nuevos materiales, evaluación de materias primas alternativas, diseño de nuevos productos

y evaluaciones de mejora. Por esta razón, resulta de vital importancia contar con un sistema piloto de producción experimental, donde se pueda realizar control de variables químicas y mecánicas que puedan tener injerencia en la calidad del producto final.

Sin embargo, las principales dificultades que se presentan en el proceso productivo de espumas flexibles de poliuretano son productos que no cumplen con las especificaciones técnicas impactando negativamente en el cliente final lo que ocasiona reprocesos, pérdidas de clientes, de materias primas, mano de obra directa y costos indirectos de fabricación.

¿Qué ventajas tendrá la instalación y puesta en marcha en el proceso productivo de la planta de fabricación de Espuma Flexible de Poliuretano, de un laboratorio de innovación y desarrollo que conste de los equipos necesarios para la fabricación de espumas flexibles con equipos remanufacturados y a pequeña escala?

2. Objetivos

2.1.Objetivo General

Instalar y poner en marcha los equipos del laboratorio de innovación y desarrollo para la fabricación, evaluación mecánica y corte de espumas flexibles de poliuretano, mediante la adecuación de espacios físicos, recuperación y rediseño de componentes de la línea de producción y colocación de equipos de ensayos en la planta de producción de Colchones y Muebles Relax.

2.2. Objetivos Específicos

- Adecuar el espacio del laboratorio con instalaciones eléctricas, iluminación y acondicionamiento de aire, para la instalación de los equipos de fabricación, evaluación mecánica y corte de espumas flexible de poliuretano, dentro de la planta de producción química de Colchones y Muebles Relax.
- Recuperar y mantener equipos de producción de una planta anterior, para realizar modificaciones y ajustes a los requerimientos del laboratorio de innovación y desarrollo.

- Instalar y poner en marcha los equipos y su automatización, según las necesidades del laboratorio de innovación y desarrollo, atendiendo a criterios de seguridad, ergonomía y calidad de la espuma flexible de poliuretano final.
- Comprobar el funcionamiento de los equipos y sus propósitos, dentro del proceso de fabricación de espuma flexible de poliuretano

3. Justificación

Teniendo en cuenta la importancia de un laboratorio para impulsar el área de desarrollo e innovación dentro de la empresa Colchones y Muebles Relax, la puesta en marcha de un sistema piloto experimental de fabricación de espuma flexible de poliuretano, permite asegurar la calidad, implementar nuevos desarrollos de productos, mejorar los productos existentes, y analizar y evaluar diseños de espumas flexibles de poliuretano para aplicaciones industriales distintas, entre otras muchas ventajas. Un laboratorio de innovación y desarrollo automatizado y con los elementos mínimos y suficientes para realizar la fabricación de espumas, provee resultados en términos de apariencia y resistencia mecánica, similares al comportamiento real del producto, que, antes de ejecutarlo a escala industrial, permite el ahorro de energía, el ahorro de materia prima y la posibilidad de hacer ajustes al proceso que redunden en el mejoramiento de la calidad del producto final.

Definir los parámetros de operación del proceso es crucial para asegurar que se cumplan los requisitos de calidad en la fabricación de espuma flexible de poliuretano. Puesto que los poliuretanos están clasificados según el tipo de polioliol, agentes retardantes y catalíticos, en términos de su estructura celular, densidad, patrón de reacción, absorción de agua, resistencia al fuego y fortaleza compresiva (Sidek, Bakar, Azman, Rahman, & Austin, 2017), las mezclas de polioliol e isocianato en variadas proporciones permiten variar las propiedades mecánicas de la Espuma Flexible de Poliuretano, según comportamientos estudiados por la literatura (Buzzi, Fityus, Sasaki, & Sloan, 2008). La selección de los químicos que harán partes de la reacción, sus proporciones en masa, así como el método de fabricación escogido determinan en gran medida sus propiedades mecánicas y por tanto, el uso final que se le dará.

Asegurar que los factores que afectan negativamente las evaluaciones mecánicas de una espuma flexible de poliuretano recién fabricado estén bajo control, garantiza obtener resultados favorables en la calidad del producto final acorde a las especificaciones definidas en la normas regulatorias y/o solicitadas por el cliente, de modo que el laboratorio de Innovación y Desarrollo se orienta a la reducción de productos no conformes y a la obtención de procesos industriales y productos finales de mayor competitividad en el mercado. El laboratorio de desarrollo e innovación permitirá llevar un registro cuantitativo de las propiedades de la espuma flexible de poliuretano, que favorezca la creación de una estandarización en la fabricación de poliuretanos y que posicione positivamente en el mercado la producción y comercialización de y sus derivados por parte de la empresa.

4. Marco teórico

4.1. Espumas flexibles de Poliuretanos

Las espumas flexibles de poliuretano hacen parte de un grupo mayor de polímeros, que se caracterizan por sus estructuras cerradas entrecruzadas y enlazadas, con propiedades térmicas y mecánicas de interés en una variedad de aplicaciones industriales, residenciales y de construcción (Asim, Abdam, Jawaaid, Nasir, & al, 2015). Durante la fabricación de las espumas, las mezclas de materias primas como isocianatos, polioles, catalizadores, surfactantes y agentes sopladores, en cantidades específicas, producirán la expansión de la espuma de poliuretano durante las reacciones exotérmicas entre los polioles y los isocianatos, con las propiedades mecánicas deseables para la aplicación industrial objetivo (Jabber, Grumo, Alguno, & al, 2021) (Vale, Mateus, & al, 2019).

Comprender la complejidad y enorme variedad de espumas que pueden ser obtenidas por los procesos de fabricación de poliuretanos, así como sus amplias gamas de aplicaciones, es un reto ingenieril que ocupa gran interés en la comunidad científica (Mohammadi & al, 2022) (Kuranchie & al, 2021) (Yu & al, 2019). Las cambiantes proporciones en masa de los isocianatos y polioles (así como la naturaleza química de ellos) es uno de los factores determinantes de las características finales de la espuma resultante, además de otros aspectos como la humedad, temperatura, velocidad de reacción, velocidades de agitación, entre otros, que coadyuvan a la obtención de poliuretanos con propiedades mecánicas deseables para una industria particular (Sarmiento & Alvarez, 2007) (Sidek, Bakar, Azman, Rahman, & Austin, 2017).

4.2. Química de los poliuretanos

La fabricación de espumas flexibles de poliuretano requiere la combinación química de tres materiales fundamentales agua, polioliol e isocianato, que producen las cadenas de polímeros desde las que se forman las espumas flexibles. Para llevar a cabo la combinación de materias primas, se hace necesario incorporar otros elementos estabilizantes de las reacciones como estaño, siliconas, aminas, catalizadores y sustancias expansoras, que garantizarán que la reacción entre el isocianato y el agua produzca la expansión de la estructura molecular, debido a los gases de dióxido de carbono derivados de la misma; y, que la reacción entre isocianato y el polioliol produzca las cadenas largas blandas de las que se forman la espuma final (Vargas & Medina, 2019).

La espuma flexible de poliuretano se forma por estas dos reacciones principales y tres reacciones adicionales secundarias, que aportan diferentes características a las propiedades mecánicas finales de la espuma fabricada (Porras & al, 2012). Una de las reacciones secundarias se da entre los isocianatos y la aminas, que producen los segmentos duros de cadena corta de la espuma. Las aminas aportan cohesión al material de poliuretano, ya que aumentan el grado de conexión molecular por entrecruzamiento de todo el sistema (Samarappuli & Liyanage, 2018) (Jiang & al, 2022).

Por esta razón, los tiempos en los que ocurren estas reacciones son determinantes para la calidad final de la espuma flexible, por lo que la acción de los catalizadores es fundamental para garantizar los periodos de tiempo suficientes para la formación de cada uno de las cadenas de la espuma. Los catalizadores tipo amina son descritos en el párrafo anterior y los catalizadores metálicos en los que se usa estaño como agente regulador de las reacciones químicas (Sarmiento & Alvarez, 2007).

Un ejemplo de composición para una espuma flexible de poliuretano se puede observar en la *Fuente*:

La espuma flexible de poliuretano requiere la acción de tres materias primas principales: un diisocianato, agua y poliol más la acción coadyuvante y estabilizante dada por la acción de otras sustancias químicas como la silicona, los catalizadores, los agentes de expansión físicos y de carga sólida. Interactuando de manera diferencial dentro de la reacción.

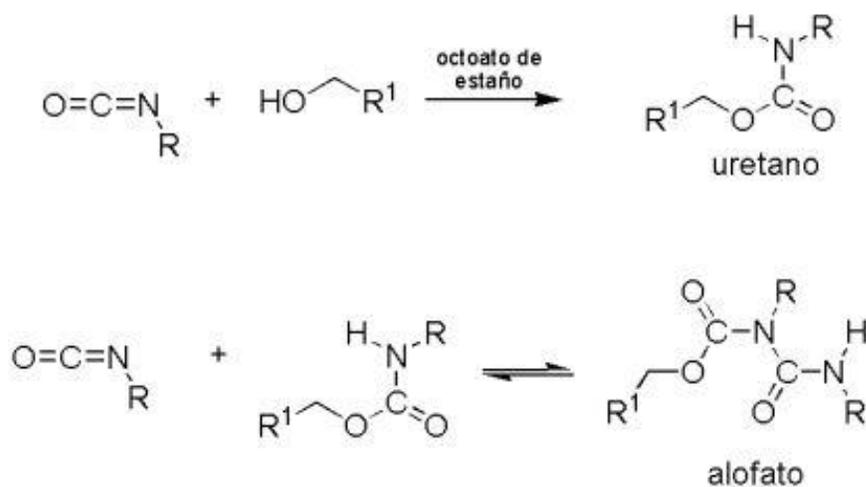
Por un lado, la reacción de expansión se da entre el diisocianato y el agua (*Figura 1*). En ella se produce CO₂ gaseoso que ejerce la función de agente de expansión y una amina primaria que a su vez reactiva con el diisocianato. Por otro lado la reacción de gelificación se lleva a cabo entre el diisocianato y el poliol (*Figura 2*) que producen los grupos de uretano o segmentos blandos de cadena larga.

Tabla 1 y la *Tabla 2*. La *Fuente*:

La espuma flexible de poliuretano requiere la acción de tres materias primas principales: un diisocianato, agua y poliol más la acción coadyuvante y estabilizante dada por la acción de otras sustancias químicas como la silicona, los catalizadores, los agentes de expansión físicos y de carga sólida. Interactuando de manera diferencial dentro de la reacción.

Por un lado, la reacción de expansión se da entre el diisocianato y el agua (*Figura 1*). En ella se produce CO₂ gaseoso que ejerce la función de agente de expansión y una amina primaria que a su vez reactiva con el diisocianato. Por otro lado la reacción de gelificación se lleva a cabo entre el diisocianato y el poliol (*Figura 2*) que producen los grupos de uretano o segmentos blandos de cadena larga.

Figura 2. Reacción de diisocianato y poliol.



Fuente: (Correa, 2003)

La espuma flexible de poliuretano requiere la acción de tres materias primas principales: un diisocianato, agua y poliol más la acción coadyuvante y estabilizante dada por la acción de otras sustancias químicas como la silicona, los catalizadores, los agentes de expansión físicos y de carga sólida. Interactuando de manera diferencial dentro de la reacción.

Por un lado, la reacción de expansión se da entre el diisocianato y el agua (*Figura 1*). En ella se produce CO_2 gaseoso que ejerce la función de agente de expansión y una amina primaria que a su vez reactiva con el diisocianato. Por otro lado la reacción de gelificación se lleva a cabo entre el diisocianato y el poliol (*Figura 2*) que producen los grupos de uretano o segmentos blandos de cadena larga.

Tabla 1. Componentes y proporciones respecto al polioliol de una espuma flexible

Components	Parts per hundred parts of polyol (pphp)
Arcol Polyol 1375	80
Hyperlite E-850	20
1,4-dimethylpiperazine (1,4-DMP) /Tegoamine 33	0.5 -5
Tegostab B 4690	2
Tegoamine DEOA	1.5
Water	3.5
Desmodur CDC ratio	35

Fuente: (Samarappuli & Liyanage, 2018)

Tabla 2. Composición de espuma flexible de poliuretano

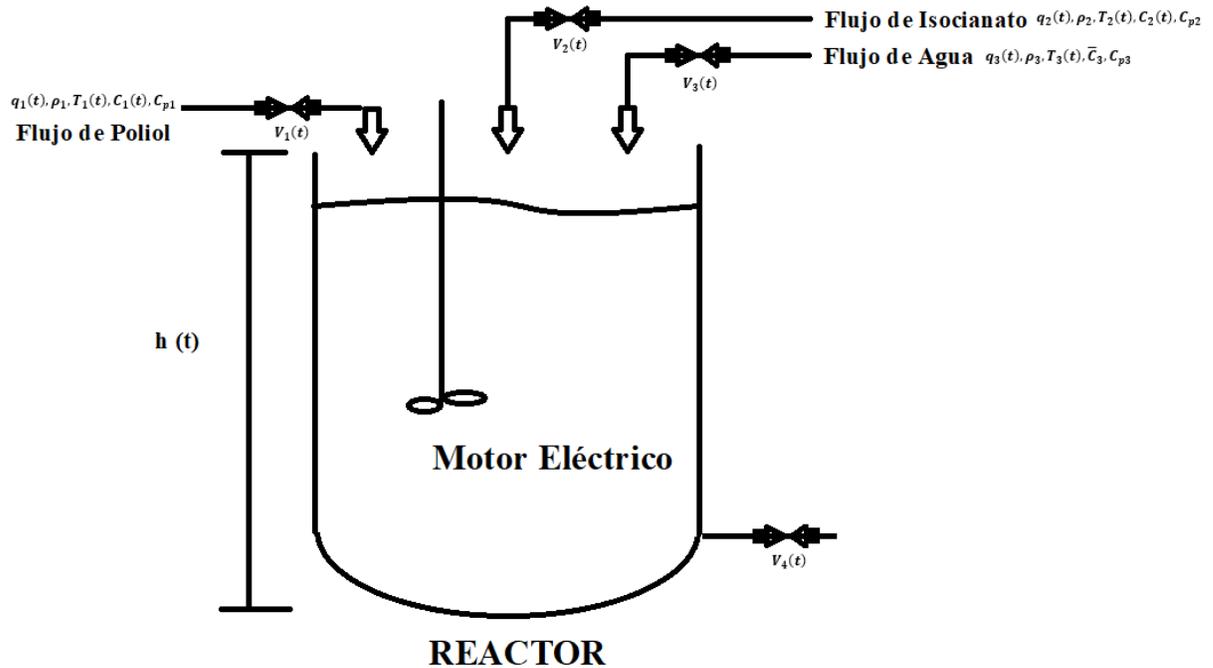
Materia prima	Concentración en la formulación (Pphp*)
Poliol	100
Copolímero Konix KE-878N (Carga solida)	0
Agua	4,5
Cloruro de Metileno	0
Silicona L540	0,9
T9 (estaño)	0,16
Amina Dabco33LX (Catalizador de espumado)	0,03
Diisocianato TDI (índice:1)	52,5
<i>*Pphp: partes en peso por cien partes de polioliol</i>	

Fuente: (Vargas & Medina, 2019)

4.3. Modelado dinámico de un proceso de fabricación de espuma de poliuretano

Sea el reactor con las siguientes condiciones, según la *Figura 3*:

Figura 3. Diagrama esquemático del reactor con sus entradas y salidas



Durante la mezcla se asume que el producto final de las reacciones químicas tiene:

ρ : Densidad del PU, Kg/m^3

C_V : Calor específico a volumen constante, J/KgC

V : Volumen del tanque, m^3

A_T : Área de la base del tanque, m^2

C_P : Calor específico a presión constante, J/KgC

Los tres fluidos agua, diisocianato y polioliol se mezclan en el reactor, las propiedades del polioliol en la entrada del reactor son:

$q_1(t)$: Caudal de polioliol, m^3/h

ρ_1 : Densidad del polioliol, Kg/m^3

$T_1(t)$: Temperatura del polioliol, C

$C_1(t)$: Concentración del polioliol, $Kmol/m^3$

$C_{p1}(t)$: Calor específico a presión constante, J/KgC

Las propiedades del isocianato a la entrada del reactor son:

$q_2(t)$: Caudal del Isocianato, m^3/h

ρ_2 : Densidad del Isocianato, Kg/m^3

$T_2(t)$: Temperatura del Isocianato, C

$C_2(t)$: Concentración del Isocianato, $Kmol/m^3$

$C_{p2}(t)$: Calor específico a presión constante, J/KgC

Las propiedades del agua son:

$q_3(t)$: Caudal del Agua, m^3/h

ρ_3 : Densidad del Agua, Kg/m^3

$T_3(t)$: Temperatura del Agua, C

$C_3(t)$: Concentración del Agua, $Kmol/m^3$

$C_{p3}(t)$: Calor específico a presión constante, J/KgC

Los controles de flujos de entrada y salida se hacen a través de válvulas $V1(t)$, $V2(t)$, $V3(t)$ y $V4(t)$, con coeficientes de válvulas $CV1(t)$, $CV2(t)$, $CV3(t)$ y $CV4(t)$ respectivamente y que obedecen a la formulación matemática:

$$q_v(t) = C_v(V_p(t)) \sqrt{\frac{\Delta P(t)}{G}} \quad (1)$$

Donde:

$q_v(t)$: Caudal a través de la válvula, m^3/h

$C_v(t)$: Coeficiente de la válvula, $(m^3/h)^{1/2}$

$\Delta p(t)$: Caída de presiones de la válvula, Pa .

G : Gravedad específica del líquido que fluye a través de la válvula adimensional.

$V_p(t)$: Posición de válvula (fracción de apertura de la válvula).

El motor eléctrico puede modelarse por el aporte en energía mecánica que hace al sistema, en términos de torque aplicados sobre el mezclador (Cerón - Morales & al, 2012).

La ecuación de un motor eléctrico es,

$$T_m(t) = J \frac{dw(t)}{dt} + B_w(t) \quad (2)$$

donde:

$T_m(t)$: Es el torque aplicado sobre el eje del motor, $N.m$

J : Inercia del motor, $Kg \cdot m^2$

$\omega(t)$: Velocidad angular, rad/s

B : Coeficiente de fricción viscosa en el motor, $N \cdot m \cdot s$

La velocidad angular $W(t)$ es una entrada que se controla con un variador de frecuencia, que hace parte del sistema de control.

Así en el motor eléctrico, se puede relacionar el torque con la corriente eléctrica aplicada con:

$$T_m(t) = K_m \cdot I_a(t) \quad (3)$$

Donde

K_m : Constante de proporcionalidad del torque electromagnético, $\frac{Nm}{A}$

$I_a(t)$: Corriente aplicada al motor, A

Cuando se aplica un voltaje $U_a(t)$, se condiciona la velocidad angular del motor, según la relación:

$$U_a(t) = K_a \omega(t) \quad (4)$$

Donde:

$U_a(t)$: Voltaje inducido, Voltios. V

K_a : Constante de la fuerza contraelectromotriz, $V \cdot S$.

Se asume el coeficiente global de transferencia de calor es U y es constante, J/m^2Ks y se da entre las paredes del tanque y el exterior.

Se asume que el área de transferencia de calor es A, m^2 .

Las reacciones de los componentes químicos son exotérmicas y obedece a correlaciones de Arrhenius, de primer orden así:

Reacción Isocianato - Polioli:

$$r_{AB}(t) = K_{0AB} e^{\frac{E_{AB}}{RT(t)}} * C_1(t)C_2(t), \frac{Kmol PU}{m^3 * h} \quad (5)$$

Donde:

$r_{AB}(t)$: Reacción entre los componentes A y B (Isocianato y Polioli)

K_{0AB} : Factor de frecuencia de la reacción.

E : Energía de activación, J/mol

R : Constante universal de gases, $J/Kmol$

$T(t)$: Temperatura en escala absoluta, K

$C_1(t)$: Concentración del polioli, $Kmol/m^3$

$C_2(t)$ Concentración del Isocianato, $Kmol/m^3$

Se considera que, durante la reacción, el calor producto es constante y se expresa por ΔH_{AB} en $J/Kmol$ de A y B. Los valores de K_0 , E y R son constantes y los dos primeros son características y especificaciones de la reacción.

Reacción Isocianato – Agua:

$$r_{AB}(t) = K_{0AC} e^{\frac{E_{AC}}{RT(t)}} * C_1(t)C_3. \quad (6)$$

Donde $K0_{AC}$, E_{AC} y R tienen los mismos significados de la ecuación anterior. El calor producido por esta reacción es ΔH_{AC} en $J/Kmol$.

Reacción Polioliol – Agua:

$$r_{BC}(t) = K0_{BC} e^{\frac{E_{BC}}{RT(t)}} * C_2(t)C_3. \quad (7)$$

Donde $K0_{BC}$, E_{BC} y R tienen los mismos significados de la ecuación anterior. El calor producido por esta reacción es ΔH_{BC} en $J/Kmol$.

Balance de masas del Reactor

Para el sistema en mención, de la.

$$\sum m_{min} - \sum m_{out} = \frac{d}{dt} (m_{vc})$$

$$P_1 q_1(t) + P_2 q_2(t) + P_3 q_3(t) - P q_4(t) = \frac{d}{dt} [P V_0(t)]$$

$$P_1 q_1(t) + P_2 q_2(t) + P_3 q_3(t) - P q_4(t) =$$

$$P \frac{d}{dt} [A_T h(t)] \quad (8)$$

Donde:

m_{vc} : Masa del volumen de control, Kg

A_T : Area de la base del tanque, m^2

$h(t)$: Altura del fluido en el Reactor, m .

Balance de energía del Reactor

$$\sum \dot{E}_{In} - \sum \dot{E}_{Out} + \sum \dot{E}_{Gen} = \frac{d}{dt} (E_{Vc})$$

$$\begin{aligned} & P_1 C_{P1}(t) q_1(t) T_1(t) + P_2 C_{P2}(t) q_2(t) T_2(t) + P_3 C_{P3}(t) q_3(t) T_3(t) - P C_P(t) q_4(t) T_4(t) \\ & + Vr_{AB}(t) \Delta H_{AB} + Vr_{AC}(t) \Delta H_{AC} + Vr_{BC}(t) \Delta H_{BC} + P_{motor} UA(T_4(t) - T_\infty) = \\ & \rho_{Cv} \frac{d}{dt} [A_T h(t) T_4(t)] \end{aligned} \quad (9)$$

Donde:

$$r_{AB}(t) = K_{0AB} e^{-\frac{E_{AB}}{RT_4(t)}} C_1(t) \cdot C_2(t) \quad (10)$$

$$r_{AC}(t) = K_{0AC} e^{-\frac{E_{AC}}{RT_4(t)}} C_1(t) \cdot \bar{C}_3(t) \quad (11)$$

$$r_{BC}(t) = K_{0BC} e^{-\frac{E_{BC}}{RT_4(t)}} C_2(t) \cdot \bar{C}_3(t) \quad (12)$$

El termino $UA(T_4(t) - T_\infty)$ se refiere a la transferencia de calor desde el tanque hacia los alrededores que están a temperatura ambiente, T_∞ .

La potencia cedida al Reactor por el Motor es:

$$P_{Motor} = T_m(t) \cdot \omega(t) \quad (13)$$

Además, los flujos $q_1(t)$, $q_2(t)$, $q_3(t)$ y $q_4(t)$ son los flujos que pasan por las válvulas, entonces:

$$q_1(t) = C_{V1}(V_{P1}(t)) \sqrt{\frac{P_{B1}(t) - P_{Atm}}{G1}} \quad (14)$$

$$q_2(t) = C_{V2}(V_{P2}(t)) \sqrt{\frac{P_{B2}(t) - P_{Atm}}{G2}} \quad (15)$$

$$q_3(t) = C_{V3}(V_{P3}(t)) \sqrt{\frac{P_{B3}(t) - P_{Atm}}{G3}} \quad (16)$$

$$q_4(t) = C_{V4}(V_{P4}(t)) \sqrt{\frac{P_{gh}(t) - P_{Atm}}{G_4}} \quad (17)$$

Donde:

$P_{B1}(t)$: Posición de salida de la bomba 1, Pa

$P_{B2}(t)$: Posición de salida de la bomba 2, Pa

$P_{B3}(t)$: Posición de salida de la bomba 3, Pa

P_{Atm} : Presión atmosférica, Pa

G_1, G_2, G_3, G_4 : Gravedades específicas de los fluidos, adimensional.

P : Densidad del fluido dentro del reactor, Kg/m^3

g : Gravedad, m/s^2

Las variables $V_{P1}(t), V_{P2}(t), V_{P3}(t)$ y $V_{P4}(t)$ son las variables manipuladas para lograr hacer el control de los flujos de ingreso al reactor, mediante autómatas programables.

La ecuación del motor eléctrico está dada por:

$$T_m(t) = \frac{J d \omega(t)}{dt} + B \omega(t) \quad (18)$$

$$T_m(t) = K_m I_a(t) \quad (19)$$

$$T_m(t) = K_a \omega(t) \quad (20)$$

Donde:

$\omega(t)$: Es la velocidad angular del motor y es una variable controlada, mediante la variación de frecuencias del motor.

Balance molar del Reactor

$$\sum \dot{N}_{In} - \sum \dot{N}_{Out} + \sum \dot{N}_{Gen} = \frac{d}{dt} (N_{Vc})$$

$$q_1(t)C_1(t) + q_2(t)C_2(t) + q_3(t)\bar{C}_3 - q_4(t)C_4(t) + Vr_{AB}(t) + Vr_{AC}(t) + Vr_{BC}(t) =$$

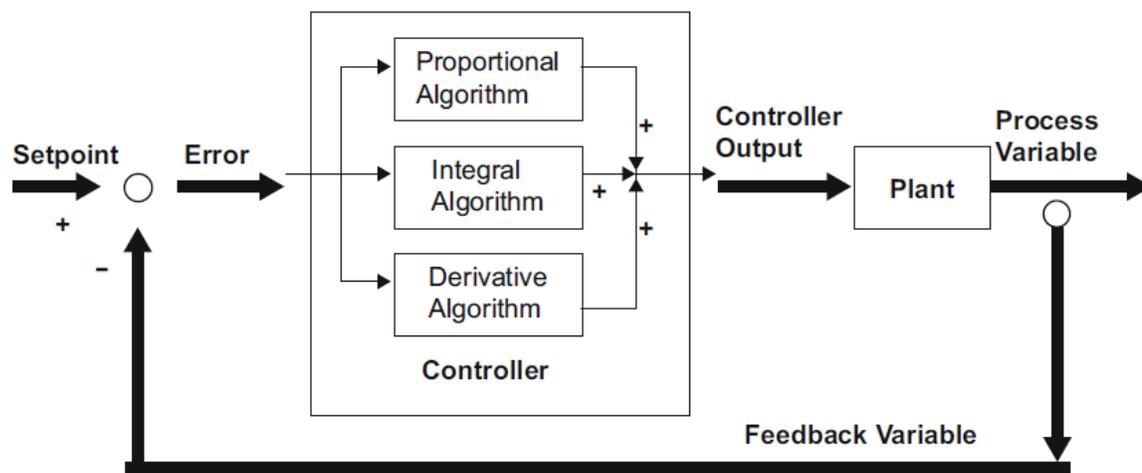
$$N \frac{d}{dt} [A_T h(t)C_4(t)] \quad (21)$$

4.4. Sistema de Control PID.

La acción de control en los controladores PID, implica tres procesos que, combinados, ajustan el proceso industrial a sus puntos de control, por medio de componentes o dispositivos de control específicos. Estos componentes consisten en elementos que cumplen funciones dentro del lazo de control, que garantizan el seguimiento a la variable controlada y el ajuste a la variable manipulada para llevar a la primera al punto de control. Un controlador PID es uno de los componentes de un sistema de control por retroalimentación, en el que se mide con un sensor la variable controlada de un proceso cualquiera y se controla mediante una acción correctiva sobre variable manipulada que afecta directamente la variable controlada mediante un actuador, con el objetivo de mantener la variable controlada en el Punto de Control establecido.

En los controladores PID se usan tres módulos que se pueden implementar individualmente, pero que pueden complementarse para una más efectiva acción de control: módulo proporcional, módulo integral y módulo derivativo como muestra la *Figura 4*.

Figura 4. Lazo cerrado de control PID



Fuente: (Smith & Corripio, 2014)

Módulo Proporcional

El módulo proporcional es el elemento de control más importante que se encarga de comparar la diferencia el Punto de Control y la variable controlada, y establecer si existe desviación o error. Si existe la desviación, aplica los cambios necesarios en los parámetros de control a la salida del controlador para eliminarla. El módulo Integral elimina la desviación persistente entre el Punto de Control y la variable controlada, cuando la acción proporcional no alcance. El módulo derivativo hace seguimiento a la razón de cambio de la variable controlada en el tiempo y realiza modificaciones a la salida del controlador para responder rápidamente ante cambios imprevistos.

En el módulo Proporcional, la medición realizada por el sensor de la variable controlada se envía al controlador, y se compara con el Punto de Control. Si hay diferencia entre ambas, se determina que existe una desviación, por lo que el controlador debe ajustar su señal de salida y

modificar el actuador que modifica la variable manipulada y que está relacionada con la variable controlada en mención.

En el dominio del tiempo, la señal medida del sensor que sensa la variable controlada $C(t)$ es transmitida al controlador P y comparada con la señal del Punto de Control o referencia C^{Ref} . Si existe una diferencia entre ellas, se produce un *error* $e(t)$ y el controlador debe decidir si enviar o no una señal $m(t)$ para generar una modificación en los parámetros del actuador que es proporcional al error detectado, como muestra la ecuación 22 (Smith & Corripio, 2014).

$$e(t) = C(t) - C^{Ref}(t) \quad (22)$$

Donde

$e(t)$ *error* o desviación entre la medición del sensor y punto de control en el tiempo.

$C(t)$ es la señal medida instantánea transmitida desde el sensor que mide la variable controlada.

$C^{Ref}(t)$ es el punto de Referencia en el tiempo.

La señal de salida del controlador en el tiempo, en el control P está dada por la ecuación 23.

$$m(t) = K_p e(t) \quad (23)$$

Donde

$m(t)$ es la señal de salida del controlador P en el tiempo.

K_p es la ganancia o sensibilidad del controlador.

$e(t)$ es el error en el dominio del tiempo.

Módulo Integral

El módulo Integral del controlador proporcional integral PI tiene la misión de eliminar el error de estado estacionario, a través de la suma algebraica de los errores instantáneos que llegan al controlador. Es decir, el módulo integral asegura de sumar mediante integrales, las desviaciones, antes de la acción ejecutada en ese instante, hasta hacer cero la desviación a medida que pasa el tiempo.

La ecuación 24 señala la relación entre la señal de error $e(t)$ y la señal de salida del controlador $m(t)$ en el módulo integral en el dominio del tiempo.

$$m(t) = K_i \int e(t) dt \quad (24)$$

Donde

K_i es la constante integral y se define como $K_i = \frac{K_p}{T_i}$

T_i es el tiempo integral.

El controlador proporcional integral suma las acciones individuales en una acción combinada de control, dada por la ecuación 25 (Smith & Corripio, 2014).

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (25)$$

Módulo Derivativo

El módulo derivativo genera una acción de control correctiva rápida y pronunciada una vez se detecta una desviación del Punto de Control, diferenciando la tendencia de cambio en la señal emitida por el sensor, para producir la eliminación del error tan rápido como sea posible. La

anticipación del módulo derivativo se debe a que la acción correctiva que se aplica es proporcional a la razón de cambio respecto al tiempo de la señal del error.

La ecuación 26 muestra la relación entre el error y la señal de salida del controlador y la ecuación 27 la ecuación de un controlador proporcional derivativo que suma las acciones de los dos módulos.

$$m(t) = K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (26)$$

Donde

T_d es el tiempo derivativo.

$$m(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (27)$$

El controlador Proporcional Integral Derivativo PID, suma las acciones de control de los tres módulos que componen su nombre. De este modo, la ecuación en el tiempo es (Smith & Corripio, 2014),

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (28)$$

5. Diseño Metodológico

El enfoque metodológico de la investigación está enmarcado dentro de la investigación cuantitativa, donde se busca diseñar una instalación experimental para satisfacer una necesidad de una planta industrial. Se busca proveer la instalación experimental o laboratorio en el que los ingenieros químicos y químicos de la planta establezcan correlaciones entre variables que posibiliten la predicción de la calidad de la espuma flexible de poliuretano, a partir de datos obtenidos experimentalmente y basados en la literatura científica. La instalación experimental contará con equipos rediseñados y adecuados para los propósitos de experimentación, por lo que este trabajo se centra en la instalación de los recursos infraestructurales y tecnológicos, que favorezcan la fabricación de espumas flexibles de poliuretano.

El proceso de investigación se llevará así:

5.1. Selección y acondicionamiento del espacio físico del laboratorio.

Por decisión de la empresa se asignó una locación específica dentro de la planta para la instalación del laboratorio y que se adecuará y acondicionará según las necesidades reportadas por el personal encargado de realizar los experimentos de innovación y desarrollo.

5.2. Mantenimiento y modificación de equipos para ajustarlos al tamaño de la instalación experimental.

El laboratorio de innovación y desarrollo contará con equipos modificados para ser usados a escala de laboratorio, provenientes de equipos en desuso o reemplazados por nuevas tecnologías. Estos equipos mantenidos y reparados cumplirán su cometido de servir para la elaboración de

espumas flexibles de poliuretano bajo condiciones controladas, por parte de los ingenieros químicos e industriales encargados.

5.3.Planeación y ejecución del montaje del laboratorio de innovación y desarrollo.

Bajo orientaciones del ingeniero industrial, el ingeniero químico y los responsables de Seguridad en el trabajo de la planta, se hizo una planeación espacial del laboratorio, por lo que al investigador le resta ejecutar el montaje del laboratorio para la fabricación de espumas flexibles de poliuretano.

5.4.Instrumentación, automatización y control de equipos.

Una vez la planta esté colocada con sus equipos en funcionamiento, se procederá a revisar, actualizar e instalar los instrumentos y equipos de automatización y control, para asegurar el control de las variables de interés en el laboratorio.

5.5. Comprobación del funcionamiento del laboratorio de innovación y desarrollo.

Terminado el proceso de automatización y control, se revisará el funcionamiento de cada equipo recuperado o modificado que haga parte de la línea de producción del laboratorio y su utilidad para fabricar espumas flexibles de poliuretano.

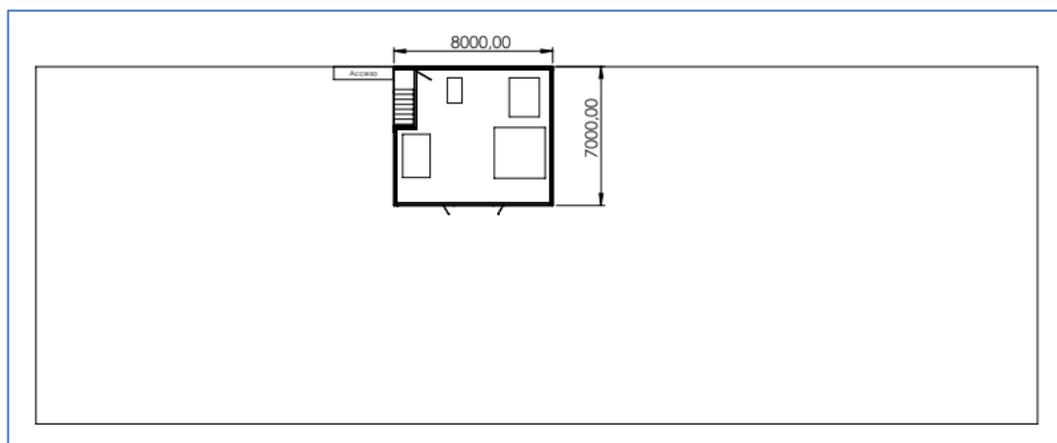
6. Resultados y Análisis de resultados.

6.1. Adecuación espacial del laboratorio.

Objetivo Específico 1: Adecuar el espacio del laboratorio con instalaciones eléctricas, iluminación y acondicionamiento de aire, para la instalación de los equipos de fabricación, evaluación mecánica y corte de espumas flexible de poliuretano, dentro de la planta de producción química de Colchones y Muebles Relax.

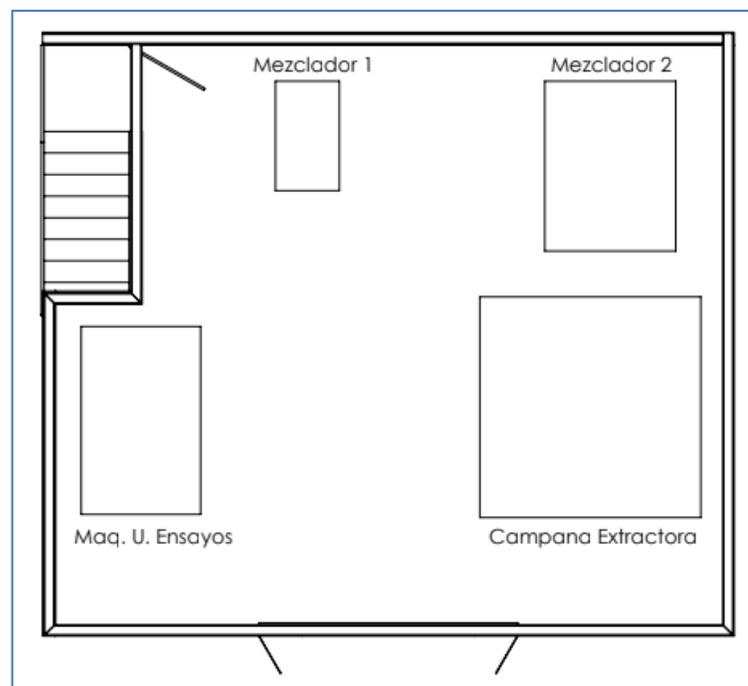
Con el propósito de llevar a cabo la implementación del laboratorio de innovación y desarrollo se determinó un sitio específico en la bodega 3 como lo muestra la Figura 5. con el objetivo de minimizar costos se adecuó en la parte superior de una bodega de almacenamiento que ya contaba con su techo tipo losa, lo que facilitó un espacio con dimensiones de 8 metros de ancho, 7 metros de largo y su altura de 2,5 metros, quedando ubicando en frente de la máquina espumadora y al lado de los tanques de almacenamiento de la materia prima de la planta industrial.

Figura 5. Ubicación de Laboratorio de Innovación y Desarrollo en planta.



En La *Figura 6* se muestra los planos de laboratorio de innovación y desarrollo de Colchones y Muebles Relax en el que se visualizan las ubicaciones de todos los equipos necesarios para el proceso de fabricación de espumas flexibles de poliuretano.

Figura 6. Laboratorio de innovación y desarrollo 1) mezclador I 2) mezclador II 3) campana extractora 4) máquina universal de ensayos



El equipo 1, mezclador de químicos I, se usa para realizar muestras de medidas inferiores a 1 metro el cual no posee reactor y el operador realiza la mezcla en un recipiente de plástico como lo muestra la *Figura 7*.

Figura 7. Mezclador I



El equipo 2, denominado mezclador químicos II posee un reactor equipado con baffles interior que ayudan al eje mezclador a homogenizar la mezcla de los químicos. Es usado para moldes de 1 metro como medida máxima como lo muestra la *Figura 8*.

Figura 8. Equipo Mezclador II



El equipo 3, Campana extractora, se ubica en la parte superior del molde que, al momento de verter la mezcla, desciende manualmente para garantizar extracción de vapores emanados de la reacción química del proceso de formación de las espumas flexibles de poliuretano como se muestra *Figura 9*.

Figura 9. Campana en posición de trabajo



La *Figura 10*, muestra la máquina universal de ensayos donde se realizan pruebas de dureza, elongación, resistencia a la tensión y desgarre. Cada una de estas propiedades mecánicas están listadas en la norma NTC 2019 y son de obligatoria satisfacción para garantizar la calidad del PU. Estas propiedades mecánicas dependen de los materiales usados, la combinación química de los mismos y del proceso de fabricación escogido, según la aplicación para la cual se destina el PU.

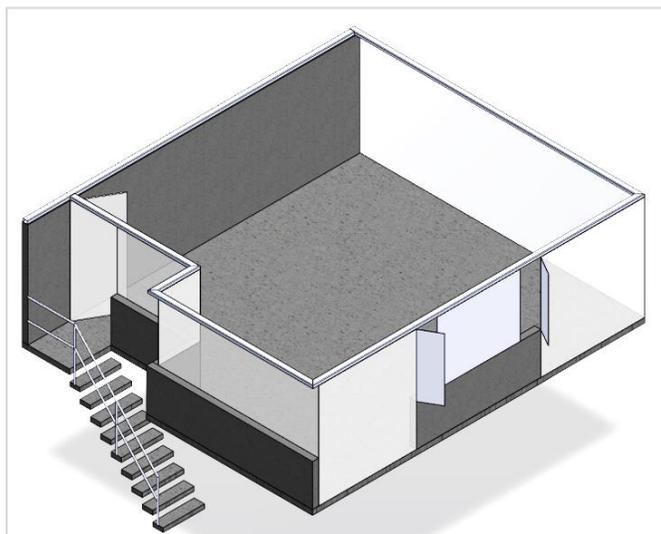
Figura 10. Máquina Universal de Ensayos



6.1.1. Instalación de paredes, ventanas y puerta.

La *Figura 11* muestra el exterior del laboratorio de innovación y desarrollo de poliuretano de la planta Colchones y Muebles Relax. El laboratorio tiene su espacio en el segundo piso de un área de la planta, que se escogió para tal fin, con paredes, ventanas y puerta de vidrio para facilitar su instalación y ahorrar costos. El primer piso se usa para almacenamiento de los químicos usados en el proceso de fabricación y en el segundo piso se realizan los experimentos y pruebas con el poliuretano recién fabricado. El acceso al laboratorio se realiza a través de la escalera metálica y peldaños de concreto.

Figura 11. Instalación puertas y ventanas laboratorio.



6.1.2. Instalación de luminarias, aire acondicionado y conexiones eléctricas.

Se instalan 9 paneles LED de 25x25cm, distribuidas de tal forma que garanticen la iluminación necesaria para el desarrollo de las actividades del Laboratorio de innovación y desarrollo de la planta Colchones y Muebles Relax como lo muestra la *Figura 12*

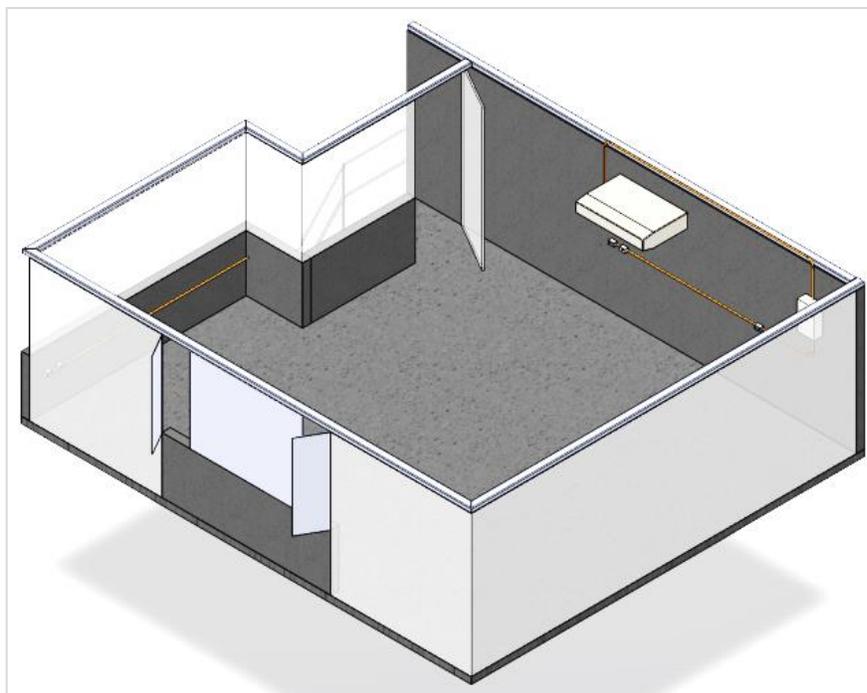
Figura 12. Vista exterior de iluminación del laboratorio de innovación y desarrollo



Ubicación de aire acondicionado y Diferentes puntos de conexión de 110V y 220V como lo muestra *Figura 12*, para el uso de cualquier equipo o componente diferente de los equipos del proceso ya que su conexión proviene directamente del tablero de distribución y control

Figura 13. Distribución de tomas eléctricas y posición de aire acondicionado

6.1.3.



Instalación de campana extractora de emisiones.

Es un equipo provisto de un ventilador que desciende manualmente al molde cuya función es garantizar la captura de la mayor cantidad de emisiones en forma de vapores o material particulado, generadas durante la reacción para la producción de espuma flexible de poliuretano; los cuales en altas concentraciones pueden llegar a provocar alteraciones al ambiente y principalmente afectaciones en la salud de los operarios e ingenieros. La instalación de este equipo garantiza la reducción de agentes contaminantes en el espacio de trabajo lo que se traduce en un área segura de operación. La instalación de campana extractora se ubica seguida al reactor justo

encima del molde de descarga para la eliminación inmediata de las emisiones generadas, como muestra la *Figura 14*.

Figura 14. Campana extractora de vapores



6.2. Adecuación y recuperación de equipos para laboratorio

Objetivo Especifico 2: Recuperar y mantener equipos de producción de una planta anterior, para realizar modificaciones y ajustes a los requerimientos del laboratorio de innovación y desarrollo.

6.2.1. Recuperar reactor y reducción de dimensiones adecuándolo al laboratorio.

Para disponer de un equipo idóneo, se presentaron algunas alternativas para la consecución de un reactor que debe satisfacer un conjunto de especificaciones. Se encontró que la mejor opción para minimizar costos y darle uso a equipos y material desmantelado de una sección de trabajo anterior adecuamos un tanque de almacenamiento. Se presentaron diferentes alternativas de diseño y algunos detalles de construcción, tales como:

1. Sello de la compuerta de descarga.

El sistema de agitación del reactor químico está energizado por un motor eléctrico de 2Hp y su función es mantener homogenizada la mezcla de materiales por un tiempo mientras ocurre la reacción química del PU. El sello de la parte inferior del equipo busca evitar el escape o derrame de la mezcla. La *Figura 15* Es una compuerta con un cilindro de doble efecto con accionamiento neumático es la alternativa seleccionada para la descarga de la mezcla la cual debe contar con agitación durante la operación, es preciso contar con un buen sellado de manera que no se escape el líquido.

Figura 15. Descarga del Reactor



2. Forma de abrir y cerrar el reactor

Se utilizaron barras roscadas que se atornillan sobre las tapas. Para hacer fácil el desensamblado, se maquinaron muescas sobre la tapa superior que dan acceso a las barras, y éstas, se construyeron de dos tramos articulados, de modo que es posible desensamblar el reactor sin necesidad de destornillar las barras de la tapa inferior.

3. Movimiento del agitador

Se recurrió al uso de una flecha flexible de transmisión. Tal arreglo permitió colocar el motor perpendicularmente al eje del agitador y a una distancia adecuada del reactor. El proceso de construcción del reactor para el laboratorio, como se muestra en la *Figura 16*.

Figura 16. Fabricación de tanque reactor.



6.2.2. Mantenimiento preventivo de motores recuperados de líneas anteriores.

Cada motor eléctrico cuenta con piezas que son susceptibles de desgaste debido a la interacción con otros componentes o elementos del medio ambiente. Por ello, se hizo una inspección visual a 2 motores de un proceso desmantelado con anterioridad. Se detectó comportamientos normales en un mantenimiento de motores eléctricos, como sobrecalentamientos, corrosión, olores fuera de lugar, y vibraciones excesivas. Se le dio la respectiva solución realizando el procedimiento de secado al horno y barnizado a los estatores, cambio de rodamientos y pintura exterior ya que cumplen con las especificaciones requeridas para el proceso en el laboratorio como lo muestra la

Figura 17.

Figura 17. Motores recuperados para proceso.



6.3. Puesta en marcha del laboratorio.

Objetivo Especifico 3: Instalar y poner en marcha los equipos y su automatización, según las necesidades del laboratorio de innovación y desarrollo, atendiendo a criterios de seguridad, ergonomía y calidad de la espuma flexible de poliuretano final.

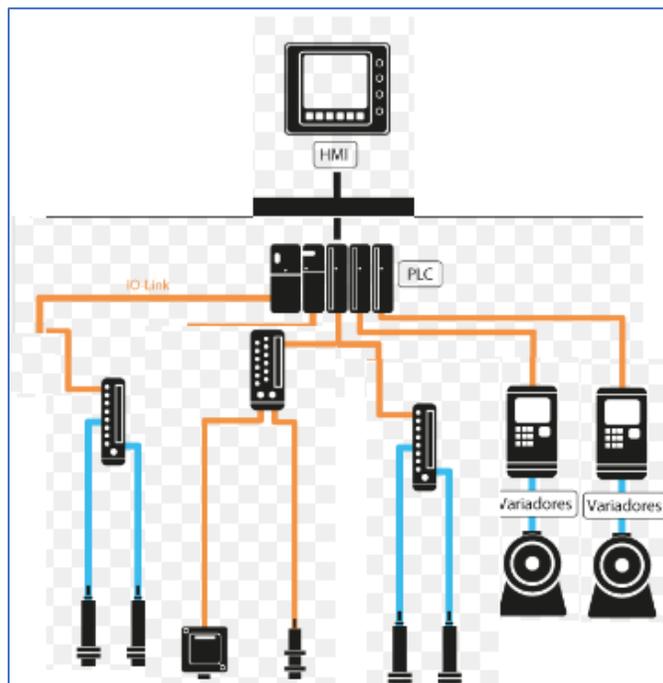
6.3.1. Instalación de tablero eléctrico y sus componentes de control.

Se instala una caja o gabinete que contiene dispositivos de conexión, maniobra, comando ,protección, señalización y medición para realizar una tarea específica dentro de un sistema eléctrico. Este tablero de control en el laboratorio cuenta con 2 variadores de velocidad, 3 controladores de tiempo digitales, PLC con una pantalla táctil, donde se realizan las maniobras automatizadas del proceso de fabricación, entre las que se encuentran: la apertura de válvulas de dosificación tanto de alimentación de químicos como descarga de mezcla; el control de la agitación en 3 ciclos de tiempo con variación de velocidades de giro del motor, según lo requiera el proceso para homogenización de los químicos dentro del reactor. El tablero de mando de los sistemas de control, como lo muestra la *Figura 18*.

Figura 18. Tableros Eléctricos, Potencia y Control



Figura 19. Diagrama esquemático del control automático.



El esquema de control automático *Figura 19*, consiste en un PLC programado bajo las funciones necesarias en el proceso, variadores de frecuencia para regular las revoluciones por minuto de los motores requeridas en los batidos, siendo regulados por potenciómetros de $10K\Omega$, electroválvulas para los accionamientos del cilindro neumático de apertura y cierre de la descarga denominada Rasera y un actuador neumático que controla una válvula tipo mariposa para la dosificación del TDI.

El proceso consta de 3 ciclos, en cada uno tenemos diferentes tiempos y velocidades de giro como variables principales para controlar. El hardware del sistema de control que se construyó se puede ver en la *Figura 20* cuyo componente principal es el PLC cuyas especificaciones técnicas pueden verse en la *Tabla 3*. El primer ciclo se da en un batido de la mezcla de poliol y agua con 35 segundos de agitación a 250rpm, luego se adicionan los aditivos y secantes de manera manual poniendo en

marcha el segundo ciclo a 20 segundos y una agitación a 300rpm, finalizado el tiempo envía una señal que activa el actuador neumático dando apertura a la válvula para la dosificación del TDI, añadiendo el ciclo final con 5 segundos a 900rpm. De igual forma al finalizar el tiempo se activa una señal que acciona la electroválvula dando apertura a la rasera por medio de un cilindro neumático el cual descarga la mezcla en el molde de espuma a utilizar.

Figura 20. Componentes de control automático



Tabla 3. Ficha Técnica PLC

PLC S7 12000	
Modelo	SIMATIC S7-1200, CPU 1214C,
Tipo	DC/DC/DC
Numero de parte	6ES7 214-1AG40-0XB0
Versión firmware	V4.1
Entradas Entregadas	14 DI 24V DC (6 HSC (H.S))
Salidas Integradas	10 DO 24 V DC;
Entradas Analógicas	2 AI DE 0 - 10V DC,
Voltaje de Alimentación	DC 20,4 - 28,8 V DC,
Memoria de Programa/Datos	100KB
Tipo de Interfaz	PROFINET
Forma Física	ETHERNET

6.3.2. Instalación de motores en sitio de trabajo

Los problemas de humedad hacen necesarios ciertos cuidados especiales, es por eso que los 2 motores en el proceso están ubicados en lugares libres de humedad y polvo, soportados en una base rígida nivelada para tener vibraciones mínimas y la alineación correcta entre los motores y sus cargas.

La revisión de estos equipos se realiza de manera periódica con un enfoque proactivo. La meta es prevenir averías antes de que se presenten, y evitar que se interrumpa el funcionamiento del motor de manera inesperada. Este mantenimiento es realizado de manera planificada, verificando que los ajustes, lubricación, y que reposición de piezas sea la recomendada por el fabricante, con relación a la carga de trabajo del motor.

Para minimizar costos elevados en reparaciones y mantenimiento es esencial que los motores y sus cargas estén bien alineadas en las condiciones y temperaturas reales de funcionamiento, como lo muestra la *Figura 21*.

Figura 21. Equipo Reactor.



6.4. Evaluación de la funcionalidad del laboratorio.

- Objetivo Especifico 4: Comprobar el funcionamiento de los equipos y sus propósitos, dentro del proceso de fabricación de espuma flexible de poliuretano.

6.4.1. Evaluación del funcionamiento del reactor.

Para la producción de espuma flexible de poliuretano que satisfaga las necesidades planteadas se requiere de una mezcla homogénea de los reactivos a las velocidades, tiempos y orden definidos. El reactor construido es un recipiente en forma cilíndrica con sección cónica en el fondo, lugar donde se instalaron baffles internos para mejorar la homogeneidad de la mezcla mediante un agitador en el centro del equipo, y que finaliza con una compuerta de apertura y cierre para la descarga del producto. En la parte superior del reactor se tiene un reservorio para la carga del agente iniciante de reacción (producto que una vez llega al concentrado de los demás químicos inicia el proceso) controlado por una válvula de mariposa.

La mezcla de las materias primas se realiza a una velocidad constante de agitación mientras se van agregando por etapas; en principio una premezcla de los polioles con la carga mientras se dosifica el isocianato (iniciante de reacción) al reservorio, en la primera batida donde se agregan agente tensoactivo, soplante y catalizador amínico; en la segunda batida se adiciona el agente soplante y catalizador metálico; en la última batida se añade el isocianato para la mezcla final se da apertura de la compuerta y descarga al molde. Todo lo anterior en un sistema semiautomático etapa por etapa como se muestra en el anexo D y E.

Realizada la descarga en el molde se procede a cerrar y encender la campana extractora de emisiones, donde se espera hasta que finalice el proceso de reacción y un tiempo post-reacción, que garantice una concentración baja de contaminantes en el ambiente, y se espera

aproximadamente 5 minutos. Pasado este tiempo se procede al desmote del producto final abriendo las compuertas del molde como se muestra en la *Figura 22*.

Figura 22. Funcionamiento del Equipo Reactor.



6.4.2. Resultados de la experimentación de químicos en el reactor.

De las experimentaciones realizadas del proceso de producción de espuma a escala laboratorio, permite predecir características del producto final y realizar los ajustes correspondientes para alcanzar la satisfacción deseada. Prueba de lo anterior, es el desarrollo de nuevas formulaciones como los bloques de espuma viscoelástica *Figura 23* y de compactación *Figura 24*, mediante los ensayos necesarios a escala piloto en la definición de los valores óptimos para las variables de proceso. Los ingenieros químicos encargados logran llevar a producción industrial los nuevos productos, alcanzando los niveles de aceptación requeridos por el cliente. Con lo que se abarca nuevos portafolios de productos y captación de nuevos mercados antes no incursionados por la empresa, como puede verse en los Anexos D y E.

Figura 23. Prueba laboratorio de bloque Espuma viscoelástica.

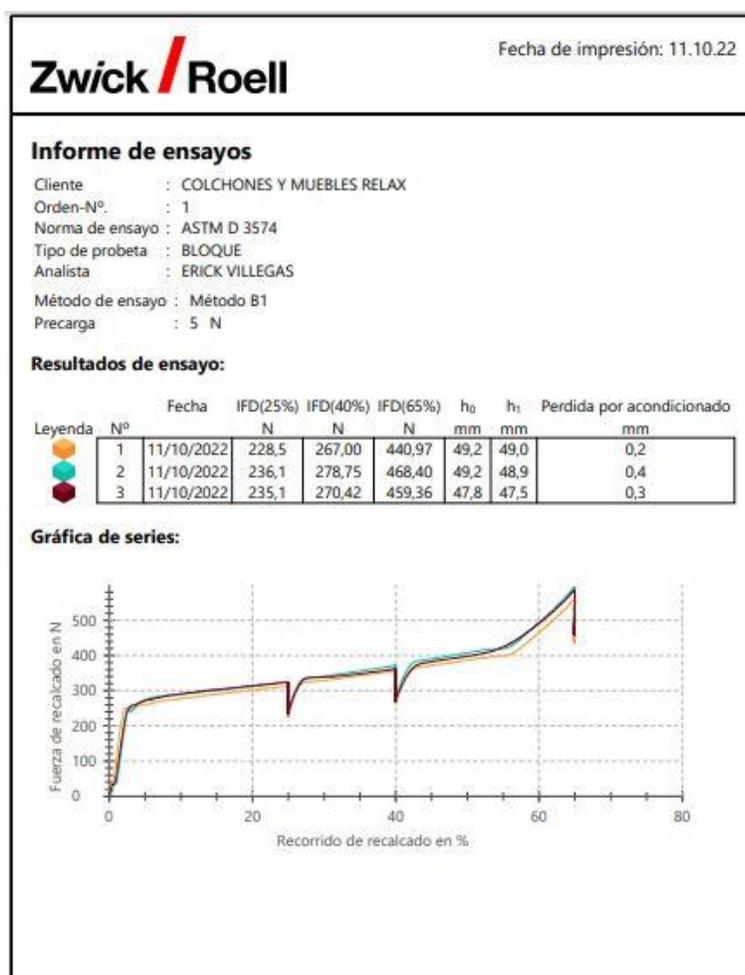


Figura 24. Prueba Laboratorio Espuma de Compactación.



De conformidad de los resultados y validación de los ensayos realizados de las pruebas mecánicas efectuadas en la máquina universal de ensayos, se verifica que la línea de equipos rediseñados, adaptados y mantenidos para el proceso de producción de espuma a escala de laboratorio, han cumplido con su propósito, tal como se presenta en el anexo A, B y C. En la *Figura 25*, se observa el resultado de una de las pruebas mecánicas aplicadas a espuma flexible de poliuretano según el estándar ASTM D 3574, normativa regulatoria para medir la calidad del producto, usando la línea de equipos que se instaló y puso en marcha en la ejecución de este trabajo.

Figura 25. Ensayos mecánicos efectuados



Conclusiones

- Se adecuó un área dentro de la planta de fabricación Colchones y Muebles Relax, desde el levantamiento de paredes, instalación de ventanas, techos y puerta, con las instalaciones eléctricas necesarias para la alimentación de los equipos de fabricación, iluminación y acondicionamiento de aire que harán parte de los equipos de la línea de producción de poliuretanos a escala de laboratorio.
- Se realizó el rediseño del reactor químico a partir de un tanque de almacenamiento de materia prima de un proceso desmantelado y se construyó la campana de extracción de vapores móvil.
- Se realizó revisión de funcionamiento, cumplimiento de requerimientos mecánicos necesarios y mantenimientos correctivos de 2 motores de 1,5Hp y 2Hp.
- Se instalaron los tableros de control y potencia para el control automático de los procesos de fabricación de espuma de poliuretanos en el laboratorio de innovación y desarrollo. El sistema de control PLC se diseñó e instaló con todos sus componentes electrónicos, para controlar variables cruciales del proceso de fabricación como velocidades de giro de motores, tiempos de agitación, dosificación de químicos y descargas de mezclas.
- Se comprobó mediante ensayo en sitio el funcionamiento de los equipos instalados para el proceso de fabricación de espuma de poliuretano individualmente, y el funcionamiento de su automatización.
- Se comprobó el desempeño del laboratorio de innovación y desarrollo en su conjunto y se valoró su utilidad como espacio para promover la experimentación y el desarrollo de los productos de espumas flexibles de poliuretano, a partir de resultados de pruebas mecánicas sobre espumas fabricadas en el laboratorio por los

ingenieros químicos e industriales encargados de los procesos y los equipos de mediciones de propiedades mecánicas.

Referencias

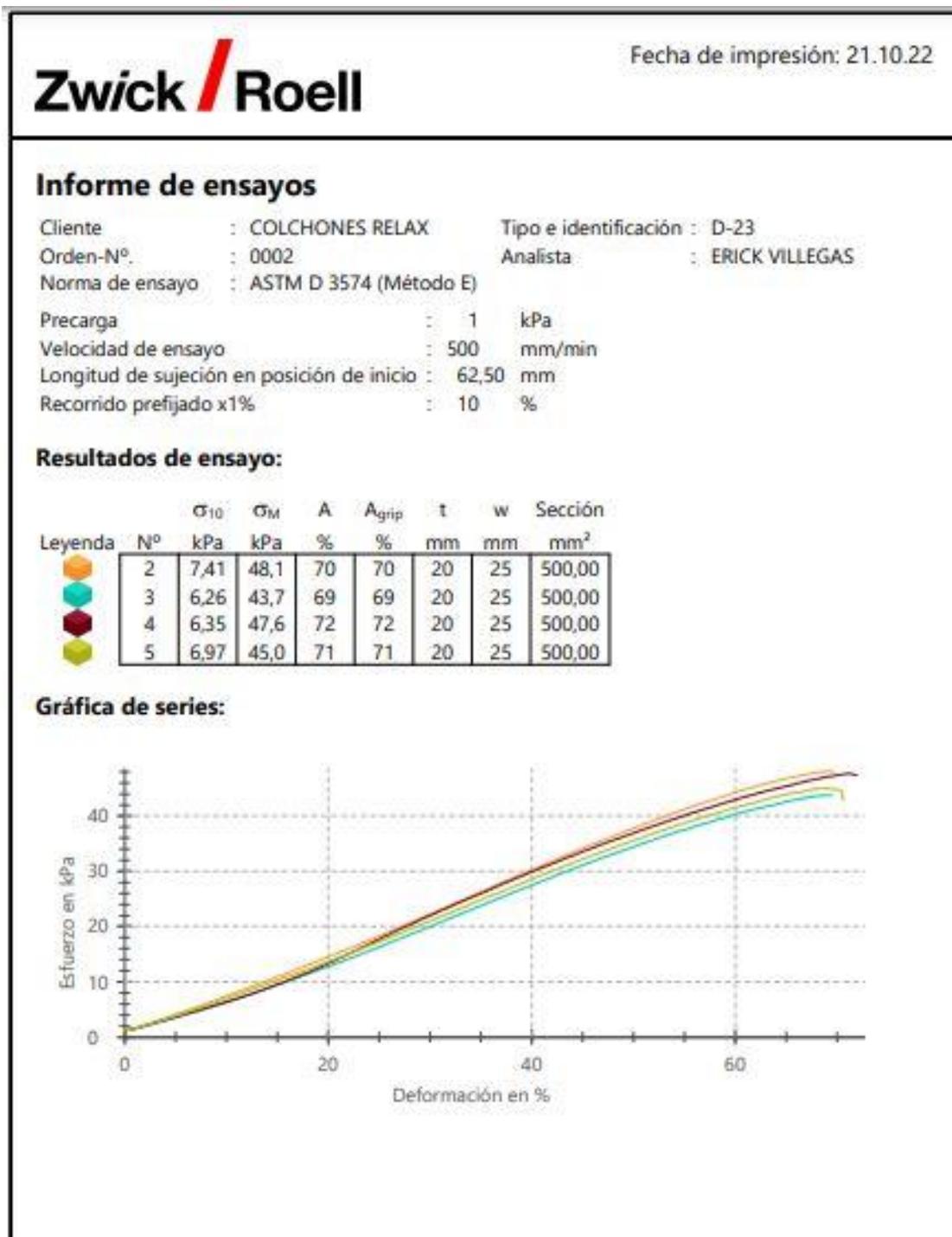
Arandes, J., Bilbao, J., & López, D. (2004). Reciclaje de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de polímeros*, 5, 28 - 45.

- Asim, M., Abdam, K., Jawaid, M., Nasir, M., & al, e. (2015). A Review on Pineapple Leaves Fibre and Its Composites. *International journal of polymer science*, 1 - 16.
- Buzzi, o., Fityus, S., Sasaki, Y., & Sloan, S. (2008). "Structure and properties of expanding polyurethane foam in the context of foundation remediation in expansive soil. *Mechanic of Materials*, 1012 - 1021.
- Cerón - Morales, I., & al, e. (2012). Modelo matemático de un motor de corriente continua separadamente excitado: Control de velocidad por corriente de armadura. *Latinamerican journal of phisical education*, 155 . 161.
- Correa, A. (2003). *Desarrollo de una formulación para espuma flexible de poliuretano de baja resiliencia*. Bogotá: Repositorio Uni Andes.
- Correia, A., Bertiz, O., Colmenares, M., & De Sousa, C. (2010). Propuesta de un sistema de control de emisiones atmosféricas para el proceso de fabricación de moldeados de poliuretano. *Revista de Ingeniería UC*, 40 - 48.
- Corripio, A., & Smith, C. (1997). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. Limusa.
- García, D., & Morales, L. (2019). *Caracterización de las propiedades mecánicas de tensión y flexión de un material elaborado de residuo de cuero y resina de poliuretano*. Bogota: Repositorio Universidad Distrital Francisco José de caldas.
- Góngora, J. (2014). La industria del plástico en México y el mundo. *Comercio Exterior*, 64(5), 6 - 9.
- ICONTEC. (27 de Septiembre de 2022). <https://tienda.icontec.org/gp-materiales-polimericos-celulares-flexibles-determinacion-de-la-dureza-tecnica-de-indentacion-ntc-iso2439-2019.html>. Obtenido de icontec: <https://tienda.icontec.org/>

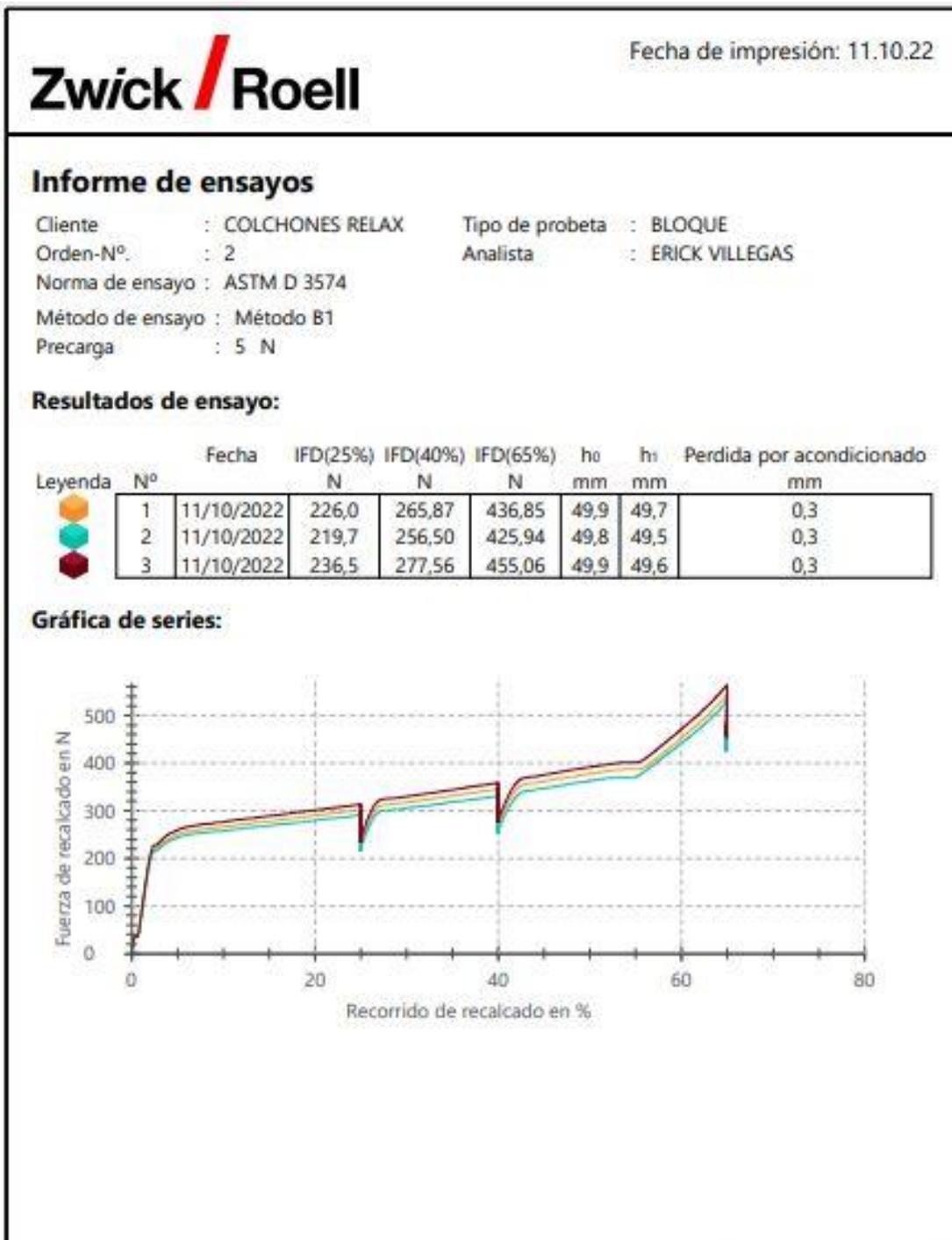
- Jabber, L., Grumo, J., Alguno, A., & al, e. (2021). Influence of cellulose fibers extracted from pineapple (*Ananas comosus*) leaf to the mechanical properties of rigid polyurethane foam. *Materials Today: Proceedings*, 1735 -1739.
- Jiang, K., & al, e. (2022). Effect of bio-based polyols and chain extender on the microphase separation structure, mechanical properties and morphology of rigid polyurethane foams. *European Polymer Journal*, 1 - 11.
- Kuranchie, C., & al, e. (2021). The effect of natural fibre reinforcement on polyurethane composite foams – A review. *Scientific African*, 1 . 10.
- La República. (25 de Febrero de 2022). *La República Versión digital*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/globoeconomia/hoy-en-dia-se-produce-el-doble-de-desechos-plasticos-en-el-mundo-que-hace-20-anos-3310507#:~:text=La%20generaci%C3%B3n%20global%20de%20desechos,de%20consumo%20y%2011%20%25%20prendas>.
- Mohammadi, B., & al, e. (2022). Mechanical and sound absorption properties of open-cell polyurethane foams modified with rock wool fiber. *Journal of Building Engineering* , 1 - 17.
- Ocampo, J. (2012). *Criterios de formulación de espumas flexibles de poliuretano MDI basados en la evaluación cualitativa de propiedades finales realizadas a nivel laboratorio*. Bogotá: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11135>.
- Porras, M., & al, e. (2012). OBTENCIÓN DE ESPUMAS DE POLIURETANO CON MATERIALES LIGNOCELULÓSICOS. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 93 - 102.

- Samarappuli, I., & Liyanage, N. (2018). Evaluation of the Suitability of 1,4-dimethylpiperazine as a Substitute Catalyst in Polyurethane Foam Production. *Moratuwa Engineering Research Conference*, 282 - 287.
- Sarmiento, M., & Alvarez, O. (2007). *Producción de espuma flexible de poliuretano con celda grande y abierta*. Bogotá: Tesis Repositorio UniAndes.
- Sidek, N., Bakar, I., Azman, A., Rahman, A., & Austin, W. (2017). Strength Characteristic of Polyurethane with Variation of Polyol to Isocyanate Mix Ratio : A Numerical Analysis. *IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems*, 31 - 34.
- Smith, C., & Corripio, A. (2014). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. México: Limusa Wiley.
- Vale, M., Mateus, M., & al, e. (2019). Replacement of petroleum-derived diols by sustainable biopolyols in one component polyurethane foams. *Journal of Cleaner Production*, 1036 - 1043.
- Vargas, X., & Medina, J. (2019). *Formulación de espuma flexible de poliuretano basada en TDI resistente al envejecimiento a escala laboratorio*. Bogotá: Repositorio UniAndes.
- Yu, C., & al, e. (2019). Fabrication of thermoplastic polyurethane (TPU) / thermoplastic amide elastomer (TPAE) composite foams with supercritical carbon dioxide and their mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 127 - 136.
- Zhang, P. (2010). *Advanced Industrial Control Technology*. Oxford: Elsevier Inc.

ANEXO A



ANEXO B



ANEXO C

Zwick / Roell

Fecha de impresión: 21.10.22

Informe de ensayos

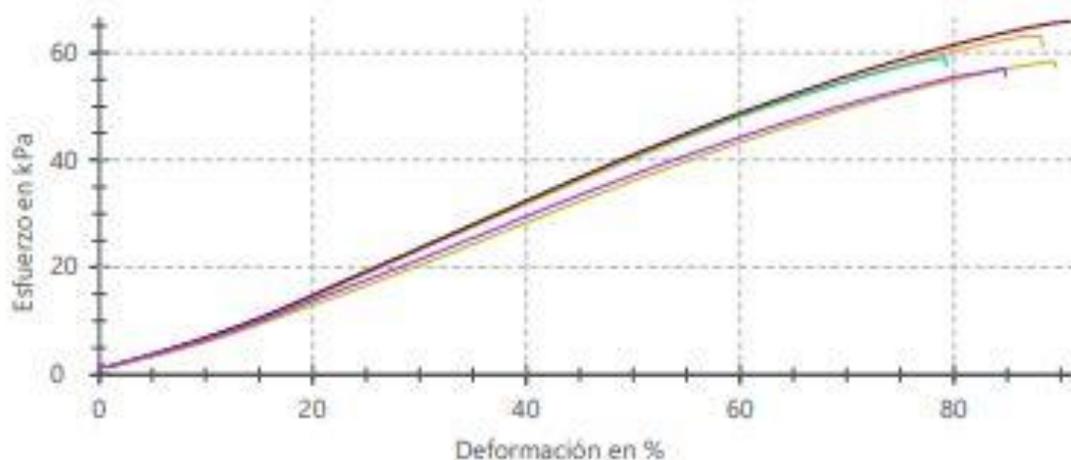
Cliente : COLCHONES RELAX Tipo e identificación : D-26
 Orden-Nº. : 0003 Analista : ERICK VILLEGAS
 Norma de ensayo : ASTM D 3574 (Método E)

Precarga : 1 kPa
 Velocidad de ensayo : 500 mm/min
 Longitud de sujeción en posición de inicio : 62,50 mm
 Recorrido prefijado x1% : 10 %

Resultados de ensayo:

Leyenda	Nº	σ_{10} kPa	σ_M kPa	A %	A_{grip} %	t mm	w mm	Sección mm ²
	1	6,73	63,1	88	88	20	25	500,00
	2	6,70	59,1	79	79	20	25	500,00
	3	6,89	65,9	91	91	20	25	500,00
	4	6,13	58,4	89	89	20	25	500,00
	5	6,43	57,0	85	85	20	25	500,00

Gráfica de series:



ANEXO D

	FORMATO ENSAYO DE ESPUMA LABORATORIO	ASG-GMP-FT-009 SEPTIEMBRE 2022 VERSIÓN 1.0
---	---	--

FECHA miércoles, 26 de octubre de 2022 DENSIDAD 23
 RESPONSABLE ERICK VALLEJO. CONSECUTIVO _____

DESCRIPCIÓN

FÓRMULA			
QUÍMICOS	REFERENCIA	TEÓRICO (gr)	REAL (gr)
POLIOL	COVESTRO	3.634,58	3.631,61
POLIMÉRICO	DOW	5.451,87	5.447,47
CaCO ₃	-	2.725,93	2.723,71
PREMEZCLA	-	6.360,51	
TDI	BASF	5.006,63	5.002,54
AGUA	-	363,46	363,16
SILICONA	2370	104,22	104,14
AMINA	A33	1,59	1,89
ESTAÑO	T9	29,99	23,77
ORTEGOL	204	-	
CLORURO	-	181,73	181,58
		23.860,51	

RESULTADOS		
TEMPERATURA (°C)	PREMEZCLA	
	POLIMÉRICO	
	TDI	

TIEMPOS (seg)	CREMA	
	CRECIMIENTO	
	1ra BATIDA	35
	2da BATIDA	20
	3ra BATIDA	5

VELOCIDAD (rpm)	1ra BATIDA	500
	2da BATIDA	600
	3ra BATIDA	900

ADITIVOS 1			
ADITIVOS 2			
ADITIVOS 3			

DENSIDAD (Kg/m ³)	
ALTURA (cm)	

OBSERVACIONES

ANEXO E

	FORMATO ENSAYO DE ESPUMA LABORATORIO	ASG-GMP-FT-009 SEPTIEMBRE 2022 VERSIÓN 1.0
---	---	--

FECHA miércoles, 26 de octubre de 2022 DENSIDAD 26
 RESPONSABLE ERICK VALEJO CONSECUTIVO _____

DESCRIPCIÓN

FÓRMULA			
QUÍMICOS	REFERENCIA	TEÓRICO (gr)	REAL (gr)
POLIOL	COVESTRO	3.889,68	3.886,28
POLIMÉRICO	DOW	5.834,52	5.829,40
CaCO ₃	-	1.944,84	1.943,14
PREMEZCLA	-	5.834,52	
TDI	BASF	5.124,65	5.120,17
AGUA	-	369,52	369,20
SILICONA	2370	109,49	109,40
AMINA	A33	1,70	17,00
ESTAÑO	T9	31,12	24,67
ORTEGOL	204	-	
CLORURO	-	194,48	194,31
		23.334,52	

RESULTADOS		
TEMPERATURA (°C)	PREMEZCLA	
	POLIMÉRICO	
	TDI	

TIEMPOS (seg)	CREMA	
	CRECIMIENTO	
	1ra BATIDA	35
	2da BATIDA	20
	3ra BATIDA	5

VELOCIDAD (rpm)	1ra BATIDA	500
	2da BATIDA	600
	3ra BATIDA	900

ADITIVOS 1			
ADITIVOS 2			
ADITIVOS 3			

DENSIDAD (Kg/m ³)	
ALTURA (cm)	

OBSERVACIONES
