



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA-DISEÑO MECÁNICO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO  
CONCEPTUAL PARA EL SELLADO CONTINUO DE  
PELÍCULAS MULTICAPA DE POLIPROPILENO  
BIORIENTADO.

TESIS:

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

VICTOR MANUEL OCAMPO GALVIS

TUTOR PRINCIPAL

DR.ALEJANDRO CUAUHTÉMOC RAMÍREZ REIVICH,  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, CD.MX. Septiembre 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **Dr. Barba Pingarrón Arturo**

Secretario: **Dr. Borja Ramírez Vicente**

1er Vocal: **Dr. Ramírez Reivich Alejandro C.**

2do Vocal: **Dra. Corona Lira María Del Pilar**

3er Vocal: **M.en I. Velázquez Silva Anahí**

**CIUDAD DE MÉXICO, MÉXICO.**

**TUTOR DE TESIS**

**DR. ALEJANDRO CUAUHTÉMOC RAMÍREZ REIVICH**

---

**FIRMA**

*Dedicado a  
Dios porque gracias a su poder y magnificencia me encuentro  
adquiriendo nuevos conocimientos en tan prestigiosa  
institución como la UNAM, el es mi fuente de vida y sabiduría,  
por otro lado también le quiero agradecer a mi familia que con  
todo su apoyo y amor me dan fuerzas para seguir adelante.*

# Agradecimientos

- Especialmente a la Universidad Nacional Autónoma De México por permitirme realizar esta maestría, al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.
- Al Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich por su valioso apoyo e ideas para la realización de este trabajo de tesis.
- Al Dr. Enrique Gimenez Torres del Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales de la Universidad Politécnica de València en España por la asesoría, apoyo, recibimiento y gran cooperación en el préstamo de los equipos de laboratorio para poder culminar este trabajo de tesis durante la estancia de mi investigación.
- A todos los doctores que fueron mis profesores durante los estudios de mi maestría por el conocimiento y apoyo que obtuve de ellos, a mis compañeros de laboratorio y de la maestría por su amistad y valiosas ideas.
- A toda mi familia y amigos por la motivación y ánimos que me brindaron.

# Índice general

Agradecimientos	II
Lista de figuras	VII
Lista de tablas	XI
Nomenclatura	XII
Resumen	XIV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>5</b>
2.1. Objetivos específicos . . . . .	5
2.2. Alcances . . . . .	6
<b>3. Antecedentes</b>	<b>7</b>
3.1. Tipos de termoplásticos . . . . .	7
3.1.1. Polipropileno biorientado (BOPP) . . . . .	9
3.2. Importancia del termosellado . . . . .	11
3.2.1. Proceso de sellado térmico . . . . .	13
3.2.2. Tipos de sellado térmico . . . . .	14
3.2.3. Definición de Peel Seal y Tear seal . . . . .	15

3.2.4.	Método de ensayo estándar para la determinación de la resistencia del sello de materiales de barrera flexible (prueba peel test) . . . . .	18
3.3.	Conceptos básicos del diseño de experimentos . .	21
3.3.1.	Diseño de experimentos factorial $3^k$ . . . .	27
3.4.	Diseños de máquinas selladoras . . . . .	29
3.4.1.	Sello de relleno de forma vertical (VFFS) .	29
3.4.2.	Sello de relleno de forma horizontal (HFFS)	30
<b>4.</b>	<b>Metodología</b>	<b>42</b>
4.1.	Definición general . . . . .	43
4.1.1.	Explicación del problema . . . . .	43
4.1.2.	Matriz de priorización . . . . .	43
4.1.3.	Necesidades, requerimientos y especificaciones . . . . .	46
4.2.	Diseño del banco de prueba y de las mordazas . .	49
4.2.1.	Información recopilada . . . . .	49
4.2.2.	Explicación de las opciones de solución generadas y del proceso de selección . . . .	53
4.2.3.	Prototipos en el diseño del banco de pruebas para sellado . . . . .	54
4.3.	Descripción de diseño de los componentes y partes del banco de prueba para sellado continuo, prototipo final . . . . .	56
4.3.1.	Descripción general de las partes del banco de prueba para sellado . . . . .	56
4.3.2.	Sistema mecánico . . . . .	57
4.3.3.	Sistema de sellado y medición de fuerza . .	59
4.3.4.	Diseño conceptual para posicionar los sensores de medición de fuerza . . . . .	62
4.3.5.	Sistema electro neumático . . . . .	66
4.3.6.	Sistema electrónico, eléctrico y de control .	67

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	V
4.4. Proceso de manufactura. . . . .	72
4.4.1. Descripción de los procesos realizados para manufacturar los componentes del banco de pruebas para sellado continuo . .	72
4.5. Equipo de trabajo . . . . .	75
<b>5. Puesta a punto, preparación del diseño experimental</b>	<b>76</b>
5.1. Instrumentos utilizados y materiales . . . . .	76
5.1.1. Prototipo final banco de pruebas para sellado continuo de películas multicapa . .	76
5.1.2. Mordazas . . . . .	77
5.1.3. Película multicapa BOPP. . . . .	78
5.2. Puesta a punto del banco para sellado continuo .	79
5.2.1. Nivel del sistema de mordazas y de la estructura principal . . . . .	79
5.2.2. Orientación de los elementos móviles y el sistema de sellado . . . . .	80
5.3. Posicionamiento del material para el sellado . . .	81
5.4. Diseño experimental . . . . .	82
5.4.1. Hipótesis para el diseño experimental . . .	82
5.4.2. Factores y niveles del experimento . . . . .	83
5.4.3. Aplicación del diseño experimental . . . . .	85
5.4.4. Ensayos de pelado en máquina de ensayos universales INSTRON 4204 . . . . .	89
<b>6. Resultados</b>	<b>92</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>109</b>
7.1. Trabajo a futuro sugerido . . . . .	112
7.2. Lecciones aprendidas . . . . .	112
<b>Bibliografía</b>	<b>114</b>

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VI
<b>A. Anexo I: Plano electroneumático</b>	<b>117</b>
<b>B. Anexo II: Plano eléctrico</b>	<b>118</b>
<b>C. Anexo III: Plano Servo pack kollmorgen</b>	<b>119</b>
<b>D. Anexo IV: Plano termopares K</b>	<b>120</b>
<b>E. Anexo V: Diagrama Adquisición de información</b>	<b>121</b>
<b>F. Anexo VI: Planos mecánicos del banco de sellado continuo</b>	<b>122</b>
<b>G. Anexo VII: Máquina de ensayos mecánicos INSTRON 4204</b>	<b>129</b>
<b>H. Anexo VIII: Tabla puntos críticos al 5 % de la distribución</b>	
<b>F</b>	<b>130</b>
<b>I. Anexo IX: Resultados de las 270 muestras, resistencia de sellado</b>	<b>131</b>

# Índice de figuras

3.1. Ejemplos de productos [7] . . . . .	11
3.2. Adhesión en micro escala [1] . . . . .	12
3.3. Cambio de la resistencia a la tracción en películas selladas por calor[1] . . . . .	16
3.4. Adhesión en el sellado interfacial y por fusión [1] .	16
3.5. Medios de falla del sellado interfacial y por fusión [1] . . . . .	17
3.6. Mecanismos moleculares en el termosellado [9] y [10] . . . . .	18
3.7. Prueba de pelado en T [11] . . . . .	20
3.8. Ejemplo de gráfica generada durante la prueba de pelado (Peel Test) [11] . . . . .	20
3.9. Tipos de sellados en bolsas [3] . . . . .	29
3.10. Máquina de sello de relleno de forma vertical [3] .	30
3.11. Máquina de sello de relleno de forma horizontal [3]	31
3.12. Máquina de sello horizontal secciones [14]. . . . .	31
3.13. Máquina general sello lateral [14] . . . . .	38
3.14. Mecanismos y componentes sello lateral [14] . . .	38
3.15. Máquina general sello de fondo o inferior [14] . . .	39
3.16. Mecanismos y componentes sello de fondo[14] . .	39
3.17. Máquina general sello de fondo o inferior [14] . . .	40
3.18. Mecanismos y componentes sello de fondo [14] . .	40
3.19. Máquina general sello de fondo o inferior [14] . . .	41
3.20. Mecanismos y componentes sello de fondo [14] . .	41

4.1. Diagrama de la metodología de diseño . . . . .	42
4.2. Tipos de montajes de alambre de nicromo . . . . .	50
4.3. Tipos de bancos de prueba para sellado encontrados en el Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT) . . . . .	51
4.4. Mecanismo para un sellado tipo fondo[19] . . . . .	52
4.5. Prototipos de funcionalidad limitada . . . . .	54
4.6. Prototipos bancos de prueba para sellado . . . . .	55
4.7. Prototipo final para sellado continuo de películas multicapa . . . . .	56
4.8. Componentes del sistema mecánico . . . . .	57
4.9. Componentes del sistema de sellado y medición de fuerza . . . . .	59
4.10. Mordazas para el sellado . . . . .	62
4.11. Primer propuesta con celda de carga tipo viga . .	63
4.12. Segunda propuesta con celda de carga tipo botón a compresión . . . . .	64
4.13. Tercera propuesta con celda de carga tipo botón de compresión o tensión . . . . .	65
4.14. Componentes del sistema electro neumático . . .	66
4.15. Componentes del sistema electrónico y eléctrico .	67
4.16. Interfaz hombre máquina en labview . . . . .	69
4.17. Diagrama equipos para la medición de la fuerza .	70
4.18. Equipos para el control del movimiento del servomotor . . . . .	70
4.19. Controlador PID en HMI . . . . .	71
4.20. Diagrama adquisición de datos . . . . .	72
4.21. Diagrama del proceso de manufactura . . . . .	73
5.1. Prototipo final para sellado continuo de películas multicapa . . . . .	77
5.2. Mordazas en aleación de aluminio 6061 fabricadas en CNC . . . . .	78

5.3. Película de polipropileno biorientado. . . . .	78
5.4. Esquema de muestras para sellar . . . . .	79
5.5. Nivel de las mordazas . . . . .	80
5.6. Alineación de los elementos móviles . . . . .	81
5.7. Esquema del enhebrado de las muestras . . . . .	82
5.8. Enhebrado en el prototipo final . . . . .	82
5.9. Material de 6 metros marcado para realizar los sellados para el diseño experimental . . . . .	87
5.10. Random realizado para el orden de sellado . . . . .	87
5.11. 27 tiras selladas de forma continua . . . . .	88
5.12. Marcado de las muestras selladas . . . . .	89
5.13. Muestras cortadas y separadas . . . . .	90
5.14. Muestras posicionadas ensayo peeling en T . . . . .	90
5.15. Primer Random realizado para el orden de los 27 experimentos . . . . .	91
5.16. Segundo Random realizado para el orden de las 270 muestras . . . . .	91
6.1. Respuesta de la temperatura en las mordazas . . . . .	93
6.2. Detalle de la temperatura en las mordazas . . . . .	94
6.3. Desplazamiento del cilindro de sellado, medición con el sensor láser . . . . .	95
6.4. Desplazamiento del cilindro de sellado, medición con la celda de carga . . . . .	96
6.5. Efectos principales resistencia de sellado . . . . .	99
6.6. Interacción de los tres parámetros principales para la resistencia de sellado . . . . .	100
6.7. Contorno resistencia de sellado interacción entre temperatura y tiempo de sellado . . . . .	101
6.8. Contorno resistencia de sellado interacción entre temperatura y Presión de sellado . . . . .	102
6.9. Contorno resistencia de sellado interacción entre tiempo y presión de sellado . . . . .	103

6.10. Gráfica durante la prueba de peeling en máquina de ensayos universales INSTRON 4204, experimento #23 muestra #3 . . . . .	104
6.11. Experimento #1 muestra #3 . . . . .	105
6.12. Experimento #14 muestra #3 . . . . .	106
6.13. Experimento #27 muestra #9 . . . . .	106
6.14. Experimento #9 muestra #19 . . . . .	107
6.15. Experimento #14 muestra #6 . . . . .	107
6.16. Experimento #20 muestra #19 . . . . .	108

# Índice de cuadros

4.1. Matriz de priorización para tipos de sellado . . . . .	45
4.2. Especificaciones del banco de prueba para sellado continuo . . . . .	48
4.3. Especificaciones de las mordazas . . . . .	49
4.4. Componentes de bancos de prueba para sellado (a) y(b) . . . . .	51
4.5. Proceso de manufactura de los principales elementos que conforman el banco de prueba para sellado continuo . . . . .	74
4.6. Detalle de las actividades del equipo de trabajo . . . . .	75
5.1. Presión en el área de sellado . . . . .	84
5.2. Resumen de los principales parámetros y niveles para el diseño experimental . . . . .	85
5.3. Corridas experimentales con sus factores . . . . .	86
6.1. Promedio valores de resistencia de sellado . . . . .	97
6.2. Cuadro ANOVA para el análisis de las hipótesis . . . . .	97

# Nomenclatura

<i>BOPP</i>	—————	Polipropileno Biorientado.
<i>PLA</i>	—————	Ácido poliláctico.
<i>PP</i>	—————	Polipropileno.
<i>FDM</i>	—————	Fused deposition modeling .
<i>NBR</i>	—————	Nitrile Butadiene Rubber .
<i>EPDM</i>	—————	Etileno Propileno Dieno tipo M .
<i>CNC</i>	—————	Control numérico por computadora.
<i>Tg</i>	—————	Temperatura de transición vítrea.
<i>C</i>	—————	Grados Celsius.
<i>s</i>	—————	Segundo.
<i>psi</i>	—————	Libras por pulgada cuadrada.
<i>kPa</i>	—————	Kilopascal.
<i>UV</i>	—————	Rayos ultravioleta.
<i>VFD</i>	—————	Variable frequency drive.
<i>CC</i>	—————	Corriente continua.
<i>PID</i>	—————	Controlador proporcional, integral y derivativo.
<i>RPM</i>	—————	Revolución por minuto.
<i>REV/seg</i>	—————	Revolución por segundo .
<i>Kgf</i>	—————	Kilo gramo fuerza.
<i>gr</i>	—————	gramos.
$\Delta T$	—————	Delta T.
<i>I</i>	—————	Corriente.
<i>t</i>	—————	tiempo.
$\alpha$	—————	Alpha.
$\Omega$	—————	Ohmios.

<i>HP</i>	—————	Caballo de fuerza.
<i>VDC</i>	—————	Voltaje de corriente directa.
<i>HMI</i>	—————	Interfaz hombre maquina.
<i>PWM</i>	—————	Pulse width modulation.
<i>Khz</i>	—————	Kilo hertz.
$\mu\text{m}$	—————	Micrómetros .
<i>TC</i>	—————	Termopar.

# Resumen

El presente trabajo de investigación comprende el diseño y construcción de un banco de pruebas para el sellado continuo (100 golpes/minuto) de dos películas multicapa de polipropileno biorientado lo cual permitió estudiar los parámetros principales en el fenómeno del sellado. Se diseñó, construyó, automatizó e instrumentó el banco de pruebas para evaluar tiras de (12 metros de largo y 9mm de ancho para realizar sellados en áreas de 8x5mm) para que se logrará sellar de forma continua, se conjuntó la integración de distintos sistemas que permitieron identificar los parámetros que intervienen en el proceso de sellado .

El desarrollo del trabajo de investigación incluye una descripción de los tipos de termoplásticos, procesos de sellado térmico, tipos de sellado térmico y diseños de máquinas selladoras, la información anteriormente mencionada ayudó a entender la importancia del equipo a diseñar, además se realizaron pruebas físicas con prototipos de funcionalidad limitada con el fin de encontrar las características ideales para el diseño del banco de pruebas para sellado.

Para construir el banco de pruebas para sellado se realizó una investigación sobre otros dispositivos existentes en el Centro de Diseño Mecánico e Innovación tecnológica (CDMIT) de la Universidad Nacional Autónoma De México, se tendrán en consideración unos requerimientos y unas métricas para diseñar los diferentes componentes. Con el estudio de los parámetros principales a través del banco de sellado y el diseño de un

experimento, además de microscopia electrónica de barrido se obtendrán nuevos resultados en el comportamiento de los parámetros principales en el fenómeno de sellado.

Los resultados presentados son útiles para entender el comportamiento de los principales parámetros de sellado como la temperatura, presión de sellado y tiempo de permanencia con (150 °C, 180 psi y 0.3 s) se obtuvo una resistencia de sellado alta de 2.2 N/mm y una buena calidad en el sellado.

# Capítulo 1

## Introducción

Desde hace años el empaquetado ha sido importante para la preservación y transporte seguro de diversos productos, los empaques y envases flexibles deben cumplir unos requerimientos fundamentales: preservar el producto en su interior desde el momento en que es envasado y empacado, durante el transporte, almacenamiento, distribución y exhibición hasta el momento en que es abierto por el consumidor. Los distintos agentes en ese ciclo, afectan las propiedades físicas y químicas de los productos, de ahí surge la necesidad de los empaques flexibles. Muchas de las propiedades deseables obtenibles en los empaques y envases flexibles están íntimamente relacionadas con las propiedades de los plásticos. Desde el punto de vista en sus aplicaciones, algunas propiedades importantes son:

- Resistencia mecánica a la tracción, a la perforación, y a las bajas temperaturas
- Barrera a gases y vapores, al oxígeno, a la luz, a los aromas
- Sellabilidad
- Imprimibilidad
- Versatilidad de fabricación
- Durabilidad

- Costo.

En otras palabras el empaquetado sirve para envolver y sellar completamente los productos en el interior, donde el sellado es un método de cerrado en empaques con el fin de obtener unas condiciones satisfactorias, aprovechando las propiedades de flujo adhesión/cohesión de un material plástico, de tal manera que en la adhesión interfacial el polímero no está completamente difundido a la interfaz de unión, contrario a la adhesión por fusión donde el adherente está bien difundido[1].

El sellado se puede obtener mediante una tecnología cuyo principio de funcionamiento es transferir energía y calentar la interfaz de sellado para generar un cambio de fase y después de enfriamiento a temperatura ambiente generar una junta de las dos películas de polímero[2]. Además, existen varios métodos para suministrar esta energía: mordazas calientes, impulso, inducción, ondas de radiofrecuencia, fricción y vibración ultrasónica[3].

Conviene subrayar que para el termosellado por mordazas calientes se tienen en cuenta tres variables que principalmente afectan a la resistencia del sellado, las cuales son la temperatura de sellado, la presión que ejercen las mordazas calientes al ser cerradas para sellar el empaque y el tiempo en que éstas permanecen cerradas, aunque una variable poco estudiada es la presión que ejercen las mordazas sobre las películas a sellar que según algunas investigaciones tiene un efecto reducido sobre la resistencia del sellado[4] y [5].

No obstante, debido a la flexibilidad en las tecnologías de sellado, existen una gran diversidad de máquinas y prototipos en la industria plástica con muchos tipos de sistemas automatizados y mecanismos que permiten realizar el sellado en diferentes procesos industriales; pero en una gran cantidad de máquinas el control y supervisión de la presión y medición del tiempo de sellado no se tienen en consideración debido a que el objetivo

principal apunta solamente a la producción en cantidad, lo cual puede desencadenar en una mala calidad del sellado y a desperdicios inadecuados en la puesta a punto del sellado y el proceso como tal.

De acuerdo a lo anterior en el presente trabajo, se estudiará la fuerza ejercida sobre las mordazas y el tiempo de sellado, sin dejar de lado la temperatura los cuales son parámetros fundamentales que afectan la resistencia del sellado. Considerando lo anterior se ajustarán los parámetros experimentalmente a través del diseño y construcción de un banco de prueba para sellado continuo, además la calidad del sellado será corroborado por la pruebas en T obtenidas y mediante el diseño de un experimento. En consecuencia, el estudio se limitará solo al sellado con mordazas calientes y se implementará el concepto de la medición de fuerza en el momento del sellado, además se analizará como la influencia de este nuevo sistema afecta la resistencia en el sellado. Así que es necesario explorar analíticamente y experimentalmente los nuevos diseños para obtener más información de la resistencia en el sellado de películas multicapa.

- Este documento se divide en las siguientes secciones:
- El capítulo 2 corresponde a los objetivos y alcances de este trabajo de tesis
- El capítulo 3 consiste en los antecedentes sobre tipos de termoplásticos, importancia del termosellado, tipos de máquinas selladoras; además se realiza una descripción detallada de las máquinas horizontales que se encuentran de forma general en la mayoría de las industrias del sector plástico y se presentarán los conceptos del método estadístico (DOE) de diseño de experimentos factorial  $3^k$  que se utilizará para los ensayos experimentales

- En el capítulo 4 se describirá el prototipo de funcionalidad limitada y las interacciones de prototipado en el diseño y construcción del banco de prueba para sellado continuo utilizado para ajustar los parámetros de temperatura, presión y tiempo de permanencia, además el concepto del nuevo diseño para posicionar los sensores de medición de fuerza o presión para prototipos o máquinas y las características específicas necesarias para llevar a cabo, también se discuten medidas de precisión
- El capítulo 5 describe el diseño de experimentos realizado y los procedimientos para llevar a cabo los ensayos de resistencia (pelado) y sellado.
- En consecuencia, en el capítulo 6 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado y un modelo que relaciona la resistencia del sellado con sus parámetros de temperatura, tiempo de permanencia y presión, además de las diferentes curvas obtenidas de las variables principales antes mencionadas, también se analizaran las imágenes obtenidas de la microscopía.
- Por último, en el capítulo 7 las conclusiones, trabajo a futuro sugerido y lecciones aprendidas.

# Capítulo 2

## Objetivos

Diseñar e implementar un banco de pruebas para el sellado continuo de dos películas multicapa de polipropileno biorientado a través de lo cual permita estudiar los parámetros principales en el fenómeno del sellado que sirva como base para iniciar el diseño de un esquema conceptual de una maquina completa

### 2.1. Objetivos específicos

- Proponer varios diseños para posicionar los sensores de medición de fuerza en el banco de pruebas.
- Implementar una fuente de calor en las mordazas para que en el momento de sellar se tenga la menor variación posible de temperatura.
- Diseñar y construir las mordazas para el sellado y encontrar las mejores características de funcionamiento.
- Lograr el funcionamiento continuo del banco de pruebas para sellado.
- Realizar un diseño de experimentos basado en el método científico que permita obtener las mejores condiciones de sellado del material estudiado.

- Trabajar con un grupo interdisciplinario en el desarrollo del trabajo de investigación.
- Tener la posibilidad de hacer movilidad con la Universidad Politécnica De Valencia en España para realizar las pruebas de peeling y microscopia electrónica de barrido para validar los resultados obtenidos con el banco de pruebas para sellado.

## 2.2. Alcances

A continuación se indican los alcances requeridos:

- Diseñar y construir un banco de pruebas, en donde se implementará una tecnología, con la cual se pretende ajustar los principales parámetros de sellado, estos son el tiempo de permanencia, la presión y la temperatura de sellado, de acuerdo a los resultados de la tecnología se realizará la selección o se investigará una diferente
- Se efectuará una serie de pruebas con el banco y la tecnología seleccionada y de este modo serán comprobadas a través de un diseño experimental.

# Capítulo 3

## Antecedentes

Existe una basta cantidad de información en libros, artículos y trabajos de tesis relacionados con la investigación del termo sellado. A nivel nacional se encuentran gran cantidad de compañías dedicadas a la producción de plásticos y procesos de empaque, pero son muy cuidadosas con la información y se reservan demasiado los avances obtenidos en procesos o nuevas tecnologías, por tal razón se describirá de manera detallada lo más importante de la información actual:

### 3.1. Tipos de termoplásticos

Es de vital importancia conocer los tipos de termo plásticos para tener un mejor panorama de los polipropilenos biorientados. Por tal razón se toman las definiciones de [6] quien trabajo en “la obtención de los parámetros de sellado de un empaque resellable”.

- Polietileno de alta densidad (HDPE): El más sencillo de todos los polímeros, es bastante cristalino, posee una buena barrera para el vapor de agua. Se utiliza en la elaboración de botellas, jarras y vasos.
- Polietileno de baja densidad (LDPE): Es el polímero más

comúnmente utilizado para sellado, es de bajo costo y utiliza bajas temperaturas de sellado, su olor es bajo si se procesa correctamente. Mantiene la presión/ peso de los sólidos, líquidos y gases.

- Polietileno de baja densidad lineal (LLDPE): Es realmente un copolímero, es más fuerte y resistente que el LDPE, pero ligeramente más costoso.
- Polipropileno (PP): Es más costoso que el LDPE, y presenta más resistencia en Hot Tack (mientras está todavía caliente el sellado) que el LDPE. Debido a su mayor temperatura de fusión, el LDPE permite su utilización en otras aplicaciones como retort y autoclave.
- Polipropileno orientado (OPP): Tiene una buena barrera para el vapor de agua para productos secos (snacks). Las propiedades y características de la película son controlables por medio de recubrimientos y coextrusión. Posee buenas características de hot tack para líneas de alta velocidad.
- Policloruro de vinilo (PVC): Tiene una excelente malla de termoformado, es un polímero amorfo con alta transparencia, principalmente es utilizado en blisters y clamshells, también se utiliza en sellado en películas, laminaciones y papeles recubiertos con agentes de sellado de policloruro de polivinilo.
- Teraftalato de polietileno (PET): Es un polímero semicristalino. Existen varios tipos como son el orientado PET, APET, CPET. Puede ser claro u opaco dependiendo del porcentaje de cristalinidad y el tamaño del cristal. Se utiliza para películas, vasos, bandejas, botellas.

### 3.1.1. Polipropileno biorientado (BOPP)

El material utilizado en este trabajo es el polipropileno biorientado el cual tiene como características principales la rigidez, alta resistencia a la tracción, excelente óptica y excelentes propiedades de barrera de agua. Van de 12 a 60 micras y son más comunes los espesores de 15 a 40 micras. Estas películas de embalaje de BOPP son estructuras coextruídas y pueden ser transparentes, opacas o metalizadas. También tienen la ventaja de ser no tóxico y totalmente reciclables. Proporcionan una excelente protección contra los rayos UV, humedad, aroma y barreras de luz. Las Películas de BOPP tienen una alta resistencia aún a bajos espesores, planicidad, claridad y excelente capacidad de impresión. Ellos pueden ser tratados con revestimientos acrílicos y PVDC para otorgarle mejores propiedades de barrera y sellabilidad. Las películas de BOPP utilizan principalmente PP homopolímero, copolímero o terpolímero de PP [7].

Aplicaciones:

- Las películas de BOPP son buenas para la impresión y laminados para uso en máquinas verticales y horizontales
- Las películas de BOPP también se pueden utilizar con fines decorativos
- Se utilizan en muchos tipos de aplicaciones de embalaje flexible, cintas autoadhesivas, etiquetas, artículos de papelería, metalización, productos de consumo.
- Las películas de BOPP son ampliamente utilizadas para envolturas de regalos y flores, laminación de papel, embalajes de textiles, películas desmoldantes para la fabricación de placas de melamina

- Estas películas también se utilizan como recubrimiento anti-falsificación en los envases. Varios productos de embalaje como pouches, envases para productos de electrónica, embalajes industriales son producidos con películas de BOPP
- El BOPP (polipropileno biorientado) se ha convertido en un material de película de alto crecimiento, debido a su extrema versatilidad.

Presentaciones:

TRANSPARENTE:

- Uso General
- Deslizamiento a alta temperatura
- Sello a baja temperatura
- Alto coeficiente de Fricción (COF).

BLANCO:

- Blanco sólido (no cavitado)
- Blanco perlado
- Blanco perlado con baja temperatura de sello.

METALIZADO:

- Barrera normal y alta barrera
- Baja temperatura de sellado
- Perlado Blanco metalizado.

ETIQUETAS:

- Transparente de alto brillo

- Blanco perlado
- Blanco perlado metalizado.

Figura 3.1: Ejemplos de productos [7]



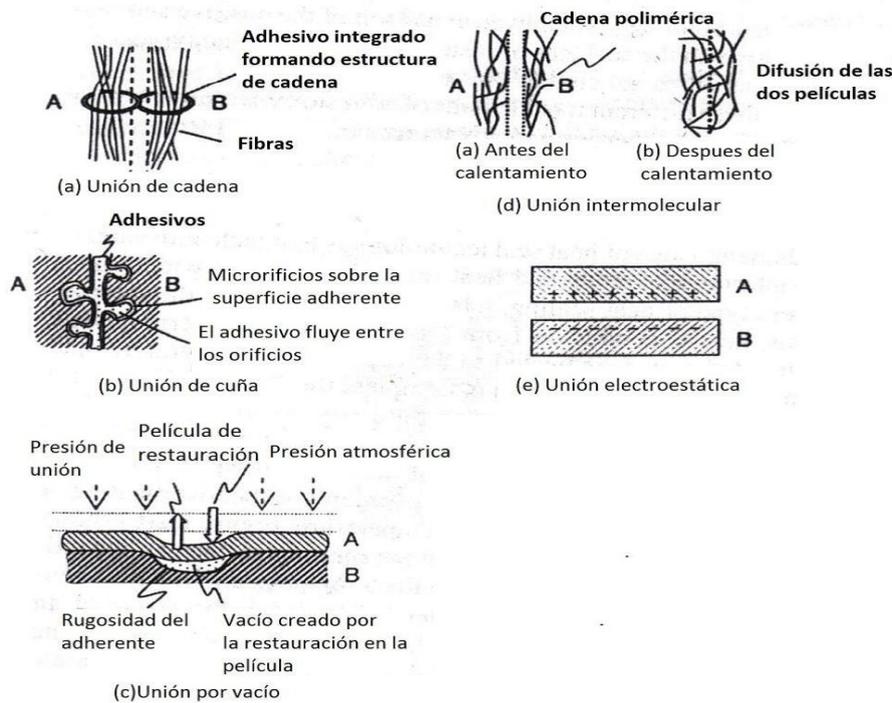
### 3.2. Importancia del termosellado

El termosellado como proceso de soldado entre dos termoplásticos es uno de los procesos referentes en la industria plástica, de la cual nacen infinidad de productos que la sociedad actual utiliza frecuentemente debido a la necesidad del embalaje y transporte de productos como alimentos u objetos. Para entender mejor un poco el tema de termo sellado y empaque, se describirán conceptos básicos, procesos y propiedades del termosellado. Cada uno de los conceptos se tomaron de[1] y [3].

- **Bases de adherencia.** Hay dos métodos diferentes para adherir dos objetos. Uno involucra suministrando pegamento a la superficie adherida. El otro consiste

en calentar materiales poliméricos termoplásticos, fundiéndolos, presionándolos entre sí y luego enfriándolos rápidamente, un proceso similar a la soldadura de metales. La tecnología de sellado térmico utiliza este último método para adherir películas de termoplástico. En la figura 3.2 se muestran los diferentes mecanismos de adhesión en micro escala.

Figura 3.2: Adhesión en micro escala [1]



De los mecanismos de adhesión representados en la figura 3.2 el de mayor interés por ser el caso de estudio es la “Unión intermolecular”. Este es el mecanismo de unión que se utiliza en la tecnología de sellado por calor. Esta tecnología utiliza la unión intermolecular que existe entre dos materiales adherentes fusionados. Comparada con otras uniones, es más fácil obtener una excelente adhesión y enlazado a escala molecular. Figura 1(d)

### 3.2.1. Proceso de sellado térmico

La idea fundamental en la tecnología de sellado térmico es unir ambos lados, en donde se adhieren dos termoplásticos y se calientan. La efectividad del sellado térmico depende de tres factores principales según [8]. Estos son:

#### 3.2.1.1. Tiempo de sellado

El tiempo de permanencia de sellado es el tiempo durante el cual los elementos mecánicos conocidos como barras de sellado están en contacto real con la película multicapa. Las opciones aquí son limitadas ya que esto depende de la sincronización con otras máquinas de producción. Un rango de sellado de temperatura más amplio sin duda ayuda a ampliar los tiempos de permanencia.

#### 3.2.1.2. Presión de sellado

Presión a la cual se unen y mantienen juntas dos películas para formar el sello del empaque, esto en la mayoría de los casos depende de los ajustes de un operador experto, ya que una presión baja o excesiva puede llevar a imperfectos en el sellado. La presión en sí misma en todos los casos depende de la película o laminado y el espesor utilizado. Con mayor presión, la contracción se produce en el área de sellado, dando como resultado el adelgazamiento de la capa sellante.

#### 3.2.1.3. Temperatura de sellado

Para tener un buen desempeño del sello se necesita una temperatura por arriba de la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) para activar el sellador de la capa interior de la película multicapa. El exceso de temperatura puede resultar en:

- Desorientación de la película

- Desglose del laminado
- Pegándose en las mordazas de sellado
- Sellos frágiles
- Adelgazamiento de la capa de sellado y contracción de la película.

### 3.2.2. Tipos de sellado térmico

Hay diferentes métodos de sellado térmico a continuación se describirán los más comunes:

- **Mordaza de sellado**

El selle con mordazas o barras es el método más utilizado para el sellado. Las mordazas calientes presionan a la superficie exterior de las dos películas estas se unen por calor el cual es transferido por las mandíbulas a través de la película, derritiendo la interfaz. Las mordazas se retiran y el área de sellado se deja enfriar. Una o ambas mordazas pueden calentarse, la superficie de las mordazas puede estar recubierta con teflón u otra superficie anti adherente para evitar que se pegue a la interfaz de la película. Las mandíbulas pueden tener un diseño con crestas para obtener una mayor resistencia de sellado [1].

- **Sellado por inducción**

En el sellado por inducción se hace pasar un pulso eléctrico por un alambre conductor, transformando éste en calor. El sellado en esta tecnología solo se da en películas que sean conductoras. Otro de los inconvenientes es el espesor de la película que debe ser el adecuado para una rápida conducción del calor evitando la pérdida de calor por el medio ambiente[2].

- **Sellado por ultrasonido** Esta tecnología es la más actual reportada en artículos de investigación y folletos de maquinaria. La tecnología se promociona como una tecnología en frío, cuando las películas se colocan entre las mordazas empieza un movimiento de oscilación longitudinal generando fricción en la interfaz película-película que forma la unión. Las altas frecuencias a las que los inductores longitudinales se desplazan provocan su desalineamiento, fusionando también al espesor de la película, la junta se obtiene en películas de espesor delgado. En películas de espesores considerables las altas frecuencias no son suficientes para generar un cambio de fase en la interfaz película-película[2].
- **Sellado por impulsos**

En el sellado por impulso, la barra está cubierta con silicona, caucho y una cinta de nicrom sobre una o ambas superficies. La cinta está cubierta con un teflón impregnado de paño. La corriente eléctrica se envía a través de la cinta para calentar la superficie, el enfriamiento ocurre con agua re circulante. El sellado por impulso es más lento que el sellado por mordaza o barra caliente[1].

### 3.2.3. Definición de Peel Seal y Tear seal

Según la obra de [1]. Para películas selladas con calor existen dos tipos de sellados que dependen de la temperatura de calentamiento. La primera es interfacial /pseudo-adhesión (“Peel Seal”), la cual muestra un incremento en la resistencia con el incremento de la temperatura de sellado. La segunda es la de fusión/cohesiva-adhesión (“Tear Seal”), cuyo valor de resistencia alcanza un valor máximo. Como se puede ver en la imagen 3.3, existe una relación entre la temperatura en el punto

de fusión de la superficie y la resistencia a la tracción del sellado caliente de la película plástica. La pendiente del incremento de la resistencia con el aumento de la temperatura de calentamiento es dependiente del tipo de película termoplástica y de su peso las diferencias entre un sellado interfacial (“Peel Seal”) y un sellado por fusión (“Tear Seal”). En la figura 3.4 se observa el sellado interfacial por fusión.

Figura 3.3: Cambio de la resistencia a la tracción en películas selladas por calor[1]

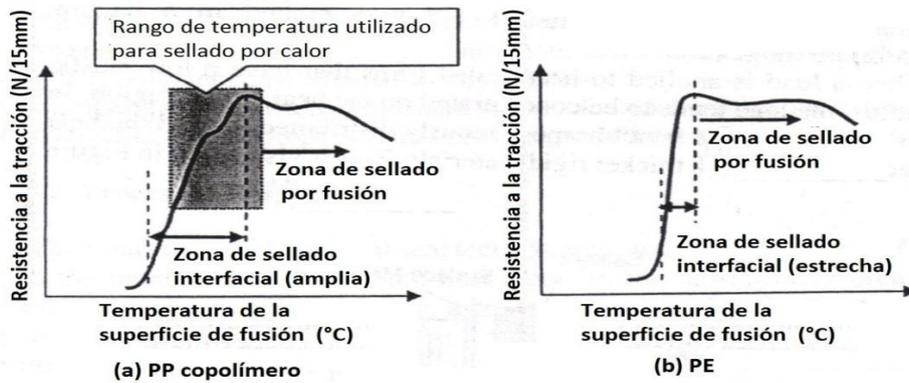
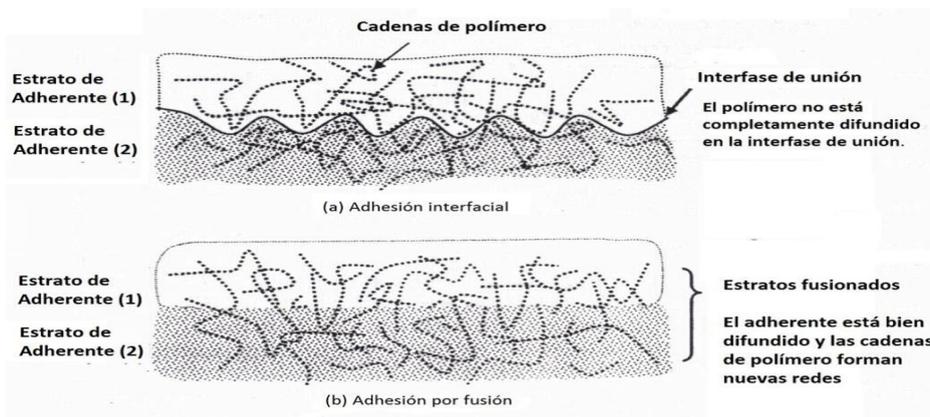


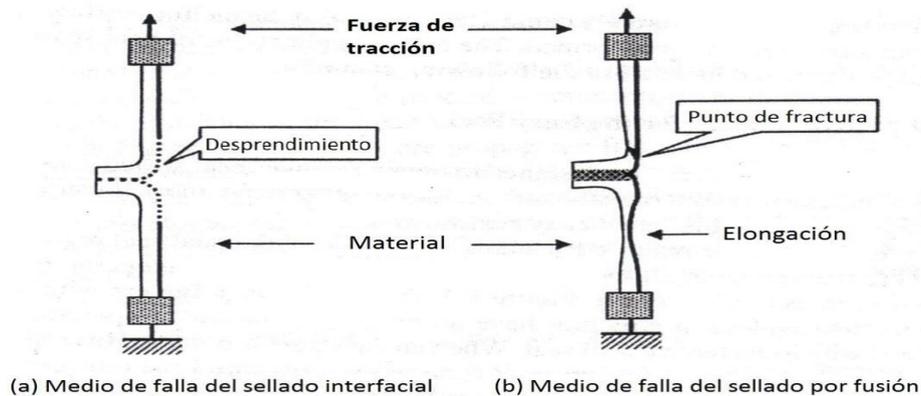
Figura 3.4: Adhesión en el sellado interfacial y por fusión [1]



La figura 3.5 muestra la diferencia entre un sello de desprendimiento y un sello de desgarre, cuando el ensayo de

tracción se realiza para películas termoselladas para un sellado interfacial, las películas termoselladas se deslaminan, ya que las moléculas de polímero no son completamente difundidas y la interfaz de las dos películas sigue siendo idéntica. Por otro lado, para un sellado por fusión, se observa un comportamiento plástico después de un esfuerzo más grande que la resistencia a la tracción de la película en la que se aplica el calor. En ese punto, la muestra experimental falla cerca de la región sellada. La razón es que en el sellado por fusión las moléculas de polímero están difundidas entre sí, el sellado interfacial tiene una fuerza más débil que el sellado por fusión sin embargo, el sellado interfacial tiene el potencial de resolver a fondo los problemas en la tecnología de sellado térmico convencional.

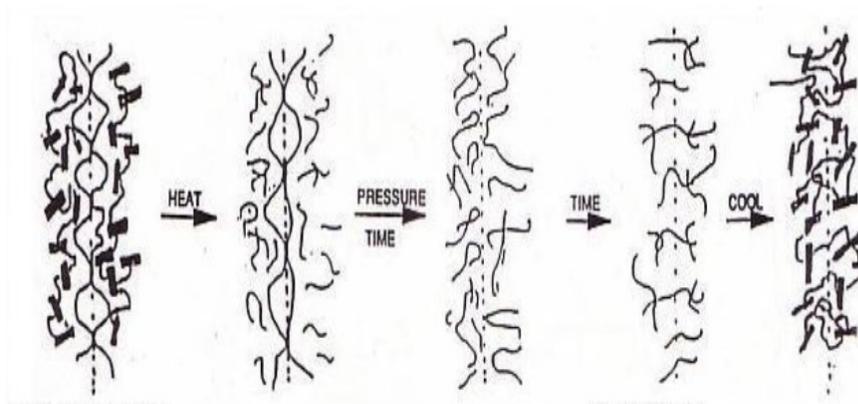
Figura 3.5: Medios de falla del sellado interfacial y por fusión [1]



Otros autores como [9] y [10] describieron los mecanismos moleculares involucrados en el termosellado de una película de una sola capa de polímeros semicristalinos. Como se ilustra en la figura 3.6, ambas películas se ponen en contacto y se calientan a través de las mordazas. Los cristales se funden y la presión aumenta el contacto molecular de las dos superficies. Si el tiempo de permanencia es suficiente, las cadenas de polímero de las dos superficies se difunden a través de la interfaz y crean enredos.

La interfaz del sello se fortalece mediante la interpenetración de cadenas moleculares a través de la interfaz. Solo después el polímero se derrite por completo, se produce una penetración suficiente para garantizar la máxima resistencia del sellado [9] y [10]. Finalmente, el enfriamiento y la cristalización fortalecen el ensamblaje.

Figura 3.6: Mecanismos moleculares en el termosellado [9] y [10]



#### 3.2.4. Método de ensayo estándar para la determinación de la resistencia del sello de materiales de barrera flexible (prueba peel test)

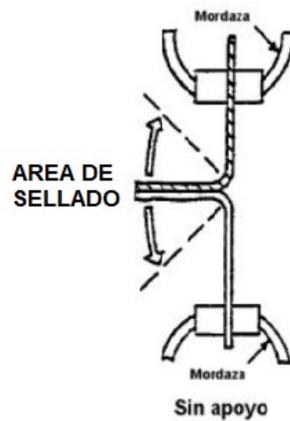
Es importante conocer el método de prueba (peel test) y la norma aplicada en las pruebas destructivas para validar la calidad de la resistencia del sellado por lo cual la norma nos indica que la resistencia del sello es una medición cuantitativa para usarse en la validación del proceso, control del proceso y capacidad. La resistencia del sello no sólo es pertinente a la fuerza de apertura y la integridad del embalaje, sino que también lo es a la medición de la capacidad de los procesos de embalaje para producir sellos consistentes. La resistencia del sello en un nivel mínimo es un requerimiento necesario del embalaje y a veces es deseable limitar la resistencia del sello para facilitar la

apertura. La prueba de pelado es un método regulado por la Sociedad Americana para el Ensayo y Materiales (ASTM por sus siglas en inglés) bajo la norma F88, [11]. Los aspectos que regula esta prueba son los siguientes:

- El acondicionamiento de las películas durante un periodo de tiempo bajo una temperatura y humedad relativa (24 [h], 23 [°C] y 50[%] respectivamente)
- El aspecto a condiciones bajo las cuales se realizará el sellado por barra caliente:
  - Ancho de la barra de sellado
  - Temperatura de sellado
  - Tiempo de permanencia
  - Presión de sellado
  - Barra caliente superior, inferior o ambas inclusive.

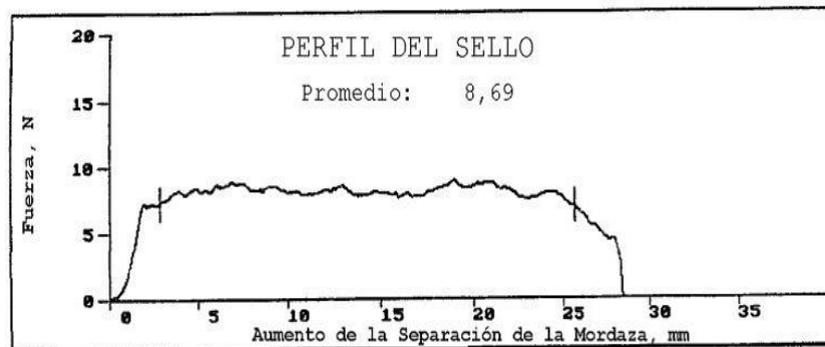
La prueba de pelado se realizará con una máquina de ensayo de tracción. Esta deberá estar equipada con un sistema de pesaje que se mueva una distancia máxima del 2% de la extensión del espécimen dentro del intervalo que se está midiendo. La máquina deberá estar equipada con un dispositivo para registrar la carga de tracción y la cantidad de separación de las mordazas; estos sistemas de medición deberán tener una precisión del  $\pm 2\%$ . La velocidad de separación de las mordazas deberá ser uniforme y capaz de realizar un ajuste de aproximadamente 200 a 300 mm (8 a 12 pulg.)/min. “El sistema de sujeción deberá ser capaz de minimizar el deslizamiento del espécimen y aplicar una distribución uniforme del esfuerzo al espécimen”. La muestra se debe posicionar como se muestra en la figura 3.7.

Figura 3.7: Prueba de pelado en T [11]



La Figura 3.8 ilustra el ejemplo de una prueba de pelado y se reporta como fuerza del sellado dividida por el ancho de la muestra.

Figura 3.8: Ejemplo de gráfica generada durante la prueba de pelado (Peel Test) [11]



#### 3.2.4.1. Parámetros de sellado citados en investigaciones

A continuación se presentan algunos parámetros utilizados en algunos trabajos de investigación [8] y [3]:

- **Temperatura de sellado:** La temperatura de sellado depende mucho del tipo de material y de la temperatura

de transición vítrea ( $T_g$ ). Sin embargo, en algunos reportes de investigaciones relacionadas con películas (BOPP) se reportan temperaturas de 120 °C hasta 130°C [8].

- **Tiempo de permanecía:** de 0.25 a 3 [s], siendo 0.5 [s] el tiempo de permanencia más comúnmente utilizado. Por lo general se ajusta a modo de que se pueda imitar el tiempo que se tiene en una línea de envasado. Se reportan tiempos de 0.17 - 5.87 segundos[8].
- **Presión de sellado:** de 20 a 70 [psi] (0.14-0.48 [Mpa]). Este rango por lo general es el mínimo que se necesita para tener un buen contacto entre la placa de prensado y la película.

### 3.3. Conceptos básicos del diseño de experimentos

En el presente trabajo se realizará un diseño de experimentos el cual se pretende aplicar de forma correcta por lo tanto el **diseño estadístico de experimentos** consiste en determinar las pruebas pertinentes y el método para obtener datos, que al analizarlos estadísticamente, conduzcan a conclusiones válidas y objetivas [12]. El diseño de experimentos está basado en la determinación y estudio de todas las variables de interés que pueden afectar el proceso del fenómeno de estudio.

#### **Aplicaciones del diseño experimental:**

- Evaluación y comparación de diseños básicos
- Evaluación de materiales alternativos
- Selección de parámetros de diseño con el fin de mejorar un sistema.

**Motivos de un experimento :**

- Determinar las causas de variación en la respuesta
- Comparar las respuestas en diferentes niveles de observación de variables controladas
- Obtener un modelo estadístico matemático que permita hacer predicciones de respuestas futuras.

Para que los datos obtenidos en un proceso experimental sean útiles para responder a las preguntas de investigación, se apoyan en los siguientes principios:

**Aleatoriedad:** la asignación (selección) del material experimental, como el orden en que se realizan las pruebas individuales o ensayos se determinan aleatoriamente ayuda a cancelar los efectos de factores extraños que pudieran estar presentes.

**Repetición o réplica:** correr más de una vez un tratamiento o combinación de factores permite obtener una estimación del error experimental, que es básica para determinar si las diferencias observadas en los datos son estadísticamente significativas.

### **Lineamientos para el diseño de experimentos:**

1. Planteamiento del problema de investigación
2. Selección de la variable de respuesta
3. Selección de factores, niveles y rango
4. Selección del diseño del experimento
5. Realización del experimento
6. Análisis estadístico de los resultados
7. Conclusiones y recomendaciones.

**Selección de la variable de respuesta:**

- Se deben seleccionar las que mejor reflejen el problema
- Se eligen las variables de respuesta que serán medidas en cada punto del diseño y verificar que se mide de manera confiable
- La Variable de respuesta o dependiente : es la que refleja los resultados de un estudio de investigación. Es la característica del producto cuyo valor interesa mejorar (o analizar) mediante el diseño de experimentos
- Se determinan los factores a estudiar de acuerdo a la supuesta influencia que tienen en la respuesta.

**Variabes:** La “**respuesta y**” de un experimento puede tener una o más variables observables. Algunas variables del proceso o tratamiento y propiedades de los materiales con los cuales se opere son controlables, mientras que otras variables son no controlables.

Los objetivos de un experimento incluyen:

1. Determinar cuáles variables son las que más influyen en la “**respuesta y**”
2. Determinar dónde fijar la variable influyente “**x**” tal que la “**respuesta y**” esté casi siempre cerca del valor nominal deseado
3. Determinar dónde fijar la variable influyente “**x**” tal que sea pequeña la variabilidad de la “**respuesta y**”
4. Determinar dónde fijar la variable influyente “**x**” tal que los efectos de las variables no controladas sean mínimos.

### Selección de factores, niveles y rango

**Variable independiente:** representa los tratamientos, factores o condiciones que el investigador controla para probar los efectos en la variable dependiente.

1. **Factores a estudiar:** son variables independientes que se investigan en el experimento para observar cómo afectan o influyen en la variable respuesta.
2. **Niveles de un factor :** son los diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño de experimental.
3. **Tratamiento :** cada una de las combinaciones de niveles de los diferentes factores.

Los factores que pueden influir en el desempeño del proceso en estudio pueden clasificarse en:

- factores potenciales de diseño (aquellos que se desea variar en el experimento)
- factores de ruido (extraños o de interferencia).

Los factores potenciales de diseño, a su vez, pueden clasificarse como:

- **factores de diseño:** son las variables seleccionadas a ser estudiadas en el experimento
- **factores constantes:** son variables que pueden ejercer algún efecto en la respuesta, pero para los propósitos del experimento no son de interés o no es factible/difícil variar en el experimento y se mantendrán a un nivel específico, un valor típico que se mantiene constante durante el experimento

- **factores variables:** serán aquellos para los cuales se quiere conocer el efecto que tienen diferentes niveles del factor en la variable respuesta.

Los factores de ruido pueden tener efectos relevantes en la respuesta y deberán de considerarse.

Los **factores de ruido controlables** son aquellos a los que se puede establecer el o los niveles a evaluar en el experimento.

El **principio de bloqueo en el diseño de experimentos** es muy útil en el manejo de los factores de ruido controlables. Si el factor de ruido es no controlable pero se puede medir, entonces el análisis de covarianza puede usarse para compensar sus efectos.

En este caso el objetivo es comúnmente encontrar los ajustes de los factores de diseño controlables que minimizan la variabilidad transmitida por el factor de ruido. A este procedimiento se le denomina un estudio de robustez o un problema de diseño robusto [12].

Una vez seleccionados los factores debe determinarse:

- Rango de valores dentro de los cuales los factores van a variar
- Niveles específicos que se usarán en las corridas o ensayos del experimento
- Identificar como estos factores serán controlados en los ensayos a los valores deseados y como serán medidos.

Es necesario conocer a profundidad cómo funciona el proceso o sistema. Cuando el objetivo del estudio es la selección de factores o la caracterización de un proceso, es recomendable seleccionar pocos niveles para los factores.

### **Selección del diseño del experimento**

En general ensayar con dos niveles funciona muy bien en estudios de selección de factores, siendo importante la selección

de la región de interés, que deberá ser relativamente amplia. De manera que conforme se avance en el conocimiento y comprensión de cuáles variables son importantes y cuáles niveles producen los mejores resultados, entonces la región de interés podrá ser menos amplia, más acotada.

Recomendaciones generales o Actitud ante el diseño de un experimento :

1. Usar todo el conocimiento no estadístico del problema de investigación
2. Optar por un diseño de experimentos y análisis estadísticos tan simples como sea posible
3. Reconocer la diferencia entre la significancia práctica y la estadística
4. El proceso experimental es iterativo y secuencial.

### **TIPOS DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

Según [12] :

- Diseño con 1 factor
- Diseño con 2 factores o diseño de bloque completamente al azar: Diseño Cuadrado Latino Diseño Greco Latino
- Diseño factorial con 2 factores y n réplicas
- Diseño factorial con 3 factores
- Diseño  $2^k$  factorial, factorial  $3^k$
- Diseño de Superficies de respuesta.

### 3.3.1. Diseño de experimentos factorial $3^k$

Modelo que considera  $k$  factores con tres niveles cada uno y tiene  $3^k$  tratamientos. Este diseño requiere de mayor cantidad de pruebas que el diseño  $2^k$ . El diseño factorial  $3^k$  considera  $k$  factores con tres niveles cada uno y tiene  $3k$  tratamientos. La primera desventaja de los diseños  $3k$  es que al aplicarse requieren mayor cantidad de pruebas que el diseño  $2^k$ . Por ejemplo, si se quieren estudiar cuatro factores, y se considera sólo una repetición, el diseño  $3^4$  requiere en total 81 pruebas, una para cada tratamiento; mientras que el diseño  $2^4$  sólo necesita 16 pruebas. De esta forma, cuando se tienen muchos factores, cuatro o más, prácticamente es prohibitivo pensar en correr un diseño  $3^k$ .

Sin embargo, cuando se tienen pocos factores, tres como máximo, o en el peor de los casos cuatro, hay algunas situaciones prácticas en las que el diseño  $3^k$  es una buena alternativa [13].

#### 3.3.1.1. Modelo estadístico para un diseño de experimentos factorial $3^k$ .

El modelo estadístico de efectos para el diseño factorial de TRES factores A, B y C con  $a$  niveles del factor A,  $b$  niveles del factor B,  $c$  niveles del factor C y hay  $n$  réplicas del experimento completo es el siguiente según [13]:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \xi_{ijkl} \quad (3.1)$$

$$(i = 1, 2, \dots, a).(j = 1, 2, \dots, b).(k = 1, 2, \dots, c).(l = 1, 2, \dots, n)$$

Donde:

- $\mu$ : Media general.
- $\tau_i$  : Efectos producidos por el nivel  $i$ -ésimo del factor A  
 $\sum_i \tau_i = 0$

- $\beta_j$  : Efectos producidos por el nivel j-ésimo del factor B  
 $\sum_j \beta_j = 0$
- $\gamma_k$  : Efectos producidos por el nivel k-ésimo del factor C  
 $\sum_k \gamma_k = 0$
- $\xi_{ijkl}$ : Error aleatorio de la combinación ijkl .
- $(\tau\beta)_{ij}$ : Efectos producidos por las interacciones A X B.
- $(\tau\gamma)_{ik}$ : Efectos producidos por las interacciones A X C.
- $(\beta\gamma)_{jk}$ : Efectos producidos por las interacciones B X C.
- $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ : Efectos producidos por las interacciones A X B X C.

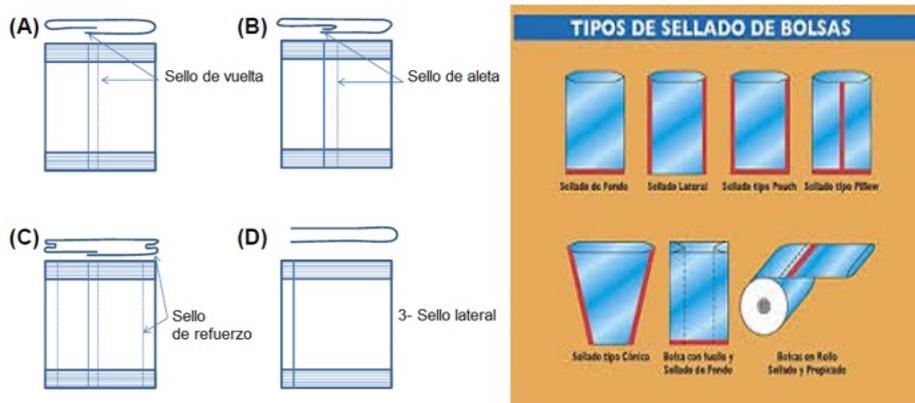
**Las hipótesis para este modelo son:**

- $H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $\tau_i \neq 0$
- $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $\beta_j \neq 0$
- $H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_c = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $\gamma_k \neq 0$
- $H_0: (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = \dots = (\tau\beta)_{ab} = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $(\tau\beta)_{ij} \neq 0$
- $H_0: (\tau\gamma)_{11} = (\tau\gamma)_{12} = \dots = (\tau\gamma)_{ac} = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $(\tau\gamma)_{ik} \neq 0$
- $H_0: (\beta\gamma)_{11} = (\beta\gamma)_{12} = \dots = (\beta\gamma)_{bc} = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $(\beta\gamma)_{jk} \neq 0$
- $H_0: (\tau\beta\gamma)_{11} = (\tau\beta\gamma)_{12} = \dots = (\tau\beta\gamma)_{abc} = 0$  .....  $H_1$ : al menos un  $(\tau\beta\gamma)_{ijk} \neq 0$

### 3.4. Diseños de máquinas selladoras

Las bolsas vienen en una amplia variedad de formas como paquetes tipo almohada, paquetes reforzados de fuelles y paquetes ligeros. Los estilos de bolsa se diferencian unos a otros por su sellado. Algunos tipos generales se describen en la figura 3.9. Los paquetes tipo almohadas tienen sellos rectos superior e inferior o sellos finales con un sello largo en el lado. El sello lateral puede ser un sello de vuelta donde la superficie exterior de la película sellada hacia la superficie interior es la misma película, o un sello de aleta donde el interior sella hacia adentro. En un sello final con refuerzo, la película se dobla a lo largo de los lados para proporcionar un perfil más rectangular.

Figura 3.9: Tipos de sellados en bolsas [3]



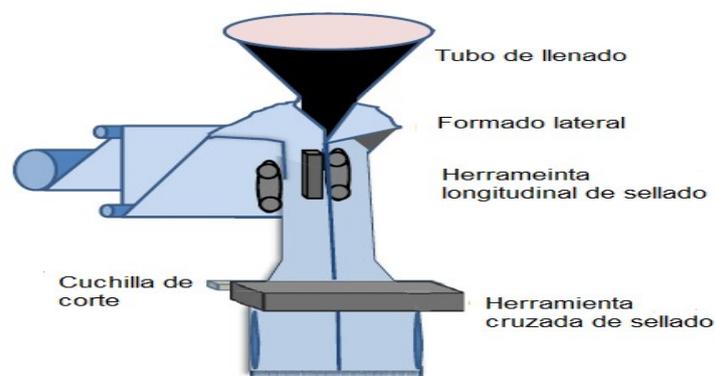
Las máquinas de bolsa vienen en una amplia variedad de diseños pero generalmente se encuentran en dos categorías: sello de relleno de forma vertical (VFFS) o sello de relleno de forma horizontal (HFFS).

#### 3.4.1. Sello de relleno de forma vertical (VFFS)

Como se muestra en la figura 3.10, en una (VFFS) se monta una película flexible sobre un mandril en un tubo. El fondo y el

lado de la película esta sellada, el producto se deja caer desde arriba y en la parte superior es sellada (al mismo tiempo que el sello inferior del siguiente paquete) además, se corta el material sellado. La bolsa sellada cae en una cinta transportadora para embalaje secundario y envío.

Figura 3.10: Máquina de sello de relleno de forma vertical [3]



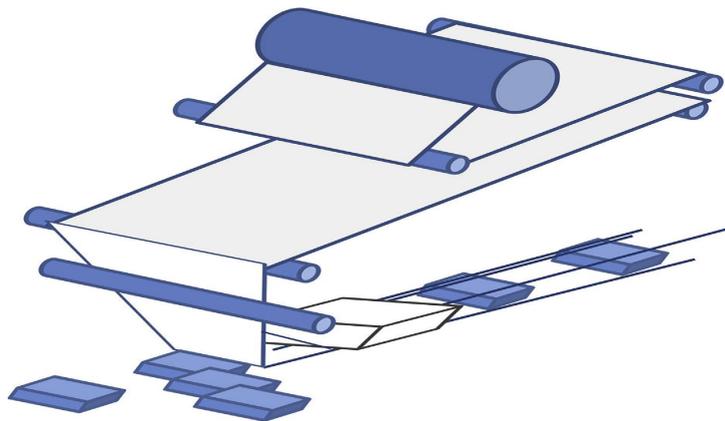
Las velocidades de embalaje son de hasta 100 bolsas por minuto que es lo más común. Los tamaños de las bolsas varían de 5 a 25 pulgadas. (13 - 64 cm) para envases de alimentos, e incluso más largas para paquetes no alimenticios. Una consideración importante en las (VFFS), es la fuerza y resistencia del sello inferior o de fondo el cual debe soportar el peso del producto durante el llenado. En este punto el sellado debe tener preferiblemente un (“Tear Seal”) o sellado de fusión cohesiva.

### 3.4.2. Sello de relleno de forma horizontal (HFFS)

En una máquina de envoltura de flujo horizontal, la película es formada alrededor de un mandril en la dimensión horizontal, llenada con el producto, sellada y cortada. Esto es representado en la figura 3.11. Estas líneas de alta velocidad corren hasta 3200

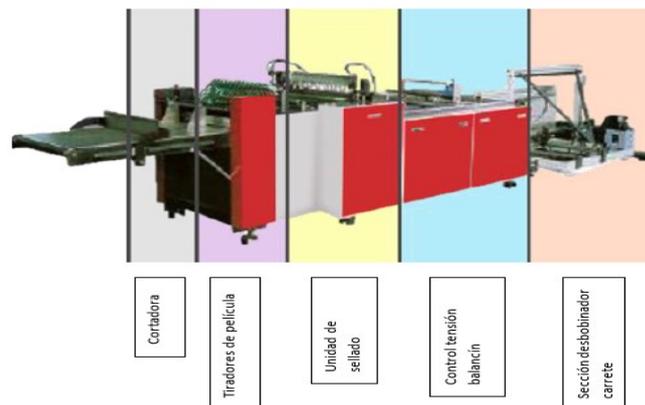
pulgadas (81 m) por minuto, 200 paquetes / min para unas 8 pulgadas (0.2 m) embalaje con paquetes de 5 a 16 pulg. (0.13 - 0.4 m) de largo y 1/2 a 7 pulg. (0.013 - 0.18 m) de ancho. Puede haber múltiples carriles para aumentar el número de paquetes por minuto. El relleno puede ser automatizado o manual.

Figura 3.11: Máquina de sello de relleno de forma horizontal [3]



### 3.4.2.1. Descripción de máquinas horizontales (HFFS)

Figura 3.12: Máquina de sello horizontal secciones [14].



La fabricación de bolsas generalmente tiene ciertas funciones principales que consisten en la alimentación, sellado, corte y apilamiento del material [14].

- **En la sección Alimentación.** La película de embalaje flexible alimentada por rollo se desenrolla de un rodillo alimentador. Los rodillos de alimentación se utilizan para mover la película a través de la máquina para llevar a cabo las operaciones requeridas. La alimentación suele ser una operación intermitente y otras operaciones como el sellado y el corte se llevan a cabo cuando la alimentación se ha detenido. Los sistemas de balancín se utilizan para mantener una tensión constante en la banda de la película. Se requieren alimentadores y balancines para mantener la tensión y la precisión de alimentación.
- **En la sección de sellado.** Los elementos de sellado con temperatura controlada se ponen en contacto con la película durante un período de tiempo específico para sellar adecuadamente el material. La temperatura de sellado y el tiempo de sellado dependen del tipo de material y deben mantenerse constantes para diferentes velocidades de la máquina. La configuración del elemento de sellado y, por lo tanto, el formato de la máquina depende del tipo de sellado dictado por el diseño de la bolsa. En la mayoría de los formatos de máquina, el sellado se acompaña de corte y ambos se llevan a cabo solo cuando se detiene la alimentación.
- **En las operaciones de corte y apilamiento.** El sellado se realiza normalmente durante el tiempo sin alimentación del ciclo de la máquina. Similar al sellado, el corte y el apilamiento también determinarían el formato de máquina ideal. Además de estas funciones básicas, se pueden llevar a cabo operaciones adicionales como cremallera, perforadora, perforadora manual, sello a prueba de manipulaciones, boquilla, tapa, etc., según el diseño de la bolsa. Los accesorios conectados a la máquina base se utilizan para

llevar a cabo las operaciones adicionales.

#### 3.4.2.2. Secciones de las máquinas

- **Desbobinador.** El desenrollado de película es responsable de desenrollar la película en forma de lámina en la máquina mientras se mantiene la tensión de la película. En ciertas máquinas, las secciones de desenrollado pueden ser de tipo mandril estático (sin motor) y utilizar un freno neumático o un freno de fricción para controlar la acción de desenrollado y proporcionar la tensión de película aplicable. En otras máquinas, el mandril de desenrollado requerirá control de frecuencia variable (VFD), control de servo o control de tipo de motor de engranaje de (CC). Puede ser una configuración de superficie o central. En la sección de desenrollado, a menudo hay características de cambio de rollo, como mandriles dobles, elevadores de rollo. La sección de desenrollado también incluirá la tensión y / o el balancín en la película. El balancín puede proporcionar una retroalimentación de velocidad (analógica o discreta) al circuito de control de desenrollado, así como un área de acumulación de película para fines de índice de bolsa.
- **El balancín.** Mantiene la tensión cuando el movimiento continuo de la película se cambia a movimiento intermitente. La tensión mantenida debido a la ayuda del balancín es muy importante para la función de la máquina, principalmente la alimentación precisa de la película. El balancín tiene dos juegos de rodillos, uno de los cuales es estacionario y el otro es móvil. La película se encamina alternativamente entre los juegos de rodillos estáticos y móviles. El movimiento del juego de rodillos móviles se restringe mediante el uso de resortes lineales, sistemas

neumáticos o servo que ayudan principalmente a mantener la tensión requerida. Se utilizan transductores lineales, potenciómetros o sensores capacitivos para proporcionar la retroalimentación de posición de los juegos de rodillos.

- **Control de posición de borde (EPC).** El (EPC) mantiene la posición del borde de la película durante el proceso de fabricación de la bolsa. Los fabricantes de máquinas obtienen el (EPC) de terceros y lo integran en su máquina. La tensión de la película mantenida por el balancín es crítica para el rendimiento óptimo del (EPC). Según el fabricante del que proceda, está disponible en formato horizontal o vertical. Generalmente tiene un sensor especial para detectar el borde de la película y un mecanismo para ajustar la posición de la misma. Este mecanismo en ciertas máquinas puede mover el rollo de desenrollado adecuadamente para lograr el control del borde.
- **En la alimentación.** La alimentación de entrada es responsable dar forma al material de la sección de desbobinado y pasarlo a la sección de alimentación. Esto es especialmente crítico en máquinas donde el desbobinador es un mandril estático. Ayuda a aislar el movimiento continuo de la sección de desenrollado del movimiento intermitente de alta dinámica de la sección de alimentación. Esto consiste en dos rodillos revestidos de goma que se presionan entre sí mediante cilindros neumáticos y el material se toca entre los rodillos. Los rodillos que están acoplados por engranajes en sus extremos son accionados en direcciones opuestas por un solo motor. Por lo general, son controlados por control (VFD), pero en ciertas máquinas de muy alta velocidad son controlados por servo control.

- **Control de alimentación.** El material de la alimentación / desenrollado es alimentado a selladores y cortadores por los alimentadores. Los alimentadores aseguran que las bolsas den la longitud correcta y se alimenten en el momento adecuado. También responden a la retroalimentación de los sensores de marcas de impresión para garantizar que la película impresa se alimente a la posición correcta. Los alimentadores deben mover la película solo cuando el cortador / sellador está en posición abierta. También trabajan en conjunto para mantener la tensión entre ellos, de modo que todos los accesorios montados entre ellos puedan funcionar bien. El alimentador consta de dos rodillos revestidos de goma que se presionan entre sí mediante cilindros neumáticos. El material pasa entre los rodillos y es retenido por la presión ejercida entre los rodillos. Estos rodillos que están acoplados por engranajes en sus extremos son accionados en direcciones opuestas por un solo motor. Normalmente son accionados por servomotores, ya que necesitan una alta dinámica [alta velocidad y alta aceleración / desaceleración] y una alta precisión.
- **Control de la tensión.** La tensión de la película en diferentes ubicaciones de la máquina se mantiene mediante diversos mecanismos. La tensión de la película entre los alimentadores se mantiene ajustando la relación de alimentación entre los alimentadores. Los balancines facilitan mantener la tensión en ciertos lugares. Algunos materiales tienden a estirarse cuando están calientes. La tensión de la película a veces se alivia / reduce después de los selladores para evitar el estiramiento.
- **Control de marca de impresión.** El control de la marca de impresión funciona en los alimentadores al ayudar

a colocar las bolsas correctamente debajo del cortador y los selladores. Esta sección incluye el sensor de registro de película y los mecanismos de ajuste de colocación. El registro de la película se utiliza en películas con gráficos o información preimpresa. Las variaciones del proceso de impresión, el estiramiento de la película, el deslizamiento de la película durante la aceleración y otros factores pueden permitir que los gráficos se alejen de la ubicación ideal de la marca en cada bolsa terminada. La marca de registro proporciona un método para realizar pequeños ajustes en la colocación final real del sello y cortar una bolsa. Cuando no hay impresión o gráficos en la bolsa, el proceso se define únicamente en longitud.

- **Control de corte / sellado.** Los cortadores / selladores se mueven hacia arriba y hacia abajo durante la producción de la bolsa. Esta sección es el corazón de un proceso de fabricación de bolsas ya que la bolsa se sella y / o corta aquí. El diseño de esta sección determinará el tipo de máquina. El movimiento oscilatorio a veces se logra utilizando una leva mecánica accionada por un motor de inducción. En estas máquinas, este es el eje primario con el que se sincronizan todos los demás ejes. Es crítico en tales lugares obtener la retroalimentación de posición de la leva mecánica usando un encoder auxiliar acoplado a la leva. En ciertas configuraciones, se utiliza la combinación de servomotor y accionamiento para lograr este movimiento. La solución servo proporciona mayor flexibilidad, precisión y velocidad en comparación con la solución (VFD).
- **Control de temperatura.** Los selladores se mantienen a la temperatura adecuada para que el sellado de las bolsas sea de la calidad adecuada. La temperatura se mantiene mediante el uso de hardware independiente o mediante el

uso de instrucciones especiales adicionales que controlan los bucles (PID). La temperatura de sellado está determinada principalmente por el material de las bolsas y en cierta medida, por el diseño de la bolsa. En ciertas máquinas, se utilizan unidades de enfriamiento similares en construcción a los selladores o rodillos de enfriamiento para reducir la temperatura del material después de la operación de sellado. El agua fría que fluye a través de los enfriadores se usa para bajar la temperatura.

- **Apilador / Transportador.** Las bolsas son apiladas y transportadas por estos módulos al final de la máquina. Tienen una configuración variada basada en el diseño de la bolsa y el requisito de diseño aguas abajo. En ciertas máquinas, este módulo apila bolsas individuales y se transporta como una pila aguas abajo o se requiere la intervención del operador para retirar la pila. En otros lugares, las bolsas pueden transferirse individualmente a la siguiente máquina. Pueden ser (VFD) o servo impulsados o una combinación de ambos en función del requerimiento.

#### 3.4.2.3. Configuraciones en máquinas de sellado horizontal

Hay muchas configuraciones de máquinas disponibles basadas en el tipo de bolsa y la industria del usuario final en la que se usan las bolsas. Algunos formatos de máquina comunes se describen brevemente en la siguiente sección.

- **Tipo 1: Sello lateral**

Figura 3.13: Máquina general sello lateral [14]

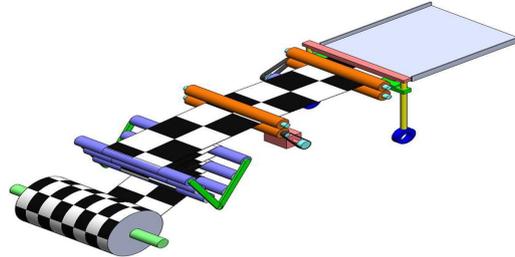
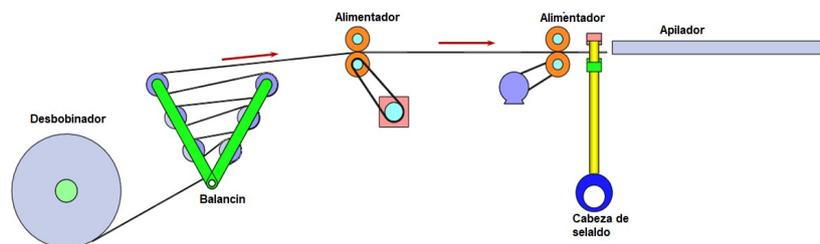


Figura 3.14: Mecanismos y componentes sello lateral [14]



Este es el tipo de máquina más común. El material del desbobinador se dobla en dos y se introduce en la máquina. El material se corta típicamente usando una mordaza caliente que sella y corta simultáneamente. Las bolsas están selladas solo en los lados y de ahí el nombre de máquina de sellado lateral. El fondo de la bolsa está cerrado debido a la operación de plegado y la parte superior de la bolsa se puede dejar abierta o cerrada mediante una cremallera o accesorio similar. La configuración simple de este tipo tiene servos solo para los alimentadores y (VFDs) para todos los demás ejes. Puede producir bolsas de hasta 500 mm a 200 bolsas / min. En máquinas avanzadas, los servos se utilizan para los alimentadores, selladores y apiladores que pueden producir bolsas de hasta 300 por minuto.

- **Tipo 2: Sello de fondo o inferior**

Figura 3.15: Máquina general sello de fondo o inferior [14]

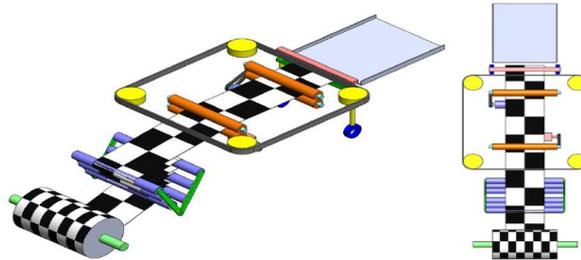
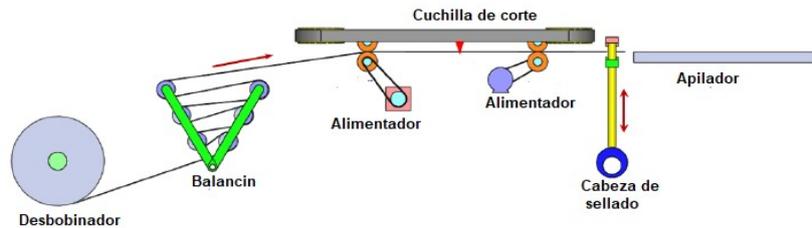


Figura 3.16: Mecanismos y componentes sello de fondo[14]



Este tipo se usa típicamente para bolsas largas de hasta 2000 mm a 120 bolsas / minuto. El material que está en forma de tubo (dos capas) se alimenta desde el desbobinador. El material se alimenta utilizando uno o dos juegos de alimentadores servoaccionados. Una leva mecánica principal accionada por un motor de inducción accionará la cabeza del sello, la cuchilla móvil y el apilador. El corte volador consiste en una cuchilla que está unida a un cinturón y cuando el cinturón gira, la cuchilla corta el material. El tubo se sella y se hace un corte debajo del sello, de modo que se forma un tubo con el fondo cerrado y de ahí el nombre de máquina de sellado inferior. En los tipos de sellado inferior de mayor velocidad, se utilizan dos servoalimentadores y un cortador Flying servo para alcanzar 180 bolsas / minuto.

- **Tipo 3: bolsa**

Figura 3.17: Máquina general sello de fondo o inferior [14]

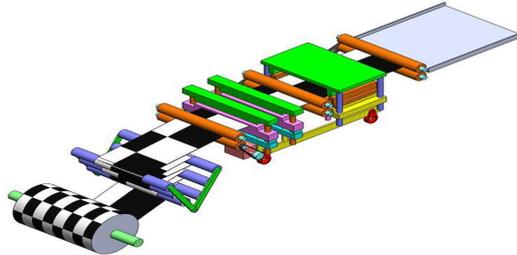
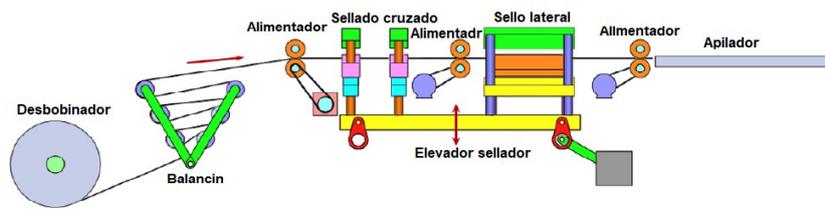


Figura 3.18: Mecanismos y componentes sello de fondo [14]



Las máquinas que producen bolsas son las máquinas de fabricación de bolsas más versátiles y sofisticadas. Se alimentan hasta cuatro capas de material de desenrolladores independientes para producir bolsas de pie. Estas máquinas suelen tener dos o tres juegos de alimentadores servoaccionados. Los selladores cruzados y los selladores laterales se usan para sellar hasta cuatro lados de la bolsa. En máquinas simples, la parte superior de todos los selladores se mueve mediante un solo motor de inducción, mientras que la parte inferior de los selladores está estacionaria. En diseños sofisticados, las partes superior e inferior de los selladores se mueven entre sí mediante un servomotor. Puede producir bolsas a 200 bolsas / minuto.

- **Tipo 4: Saco y rollo**

Figura 3.19: Máquina general sello de fondo o inferior [14]

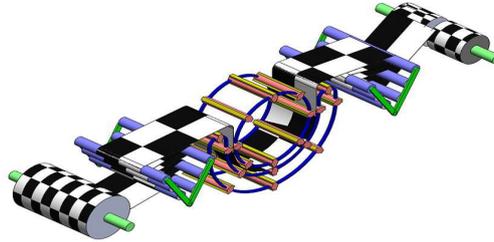
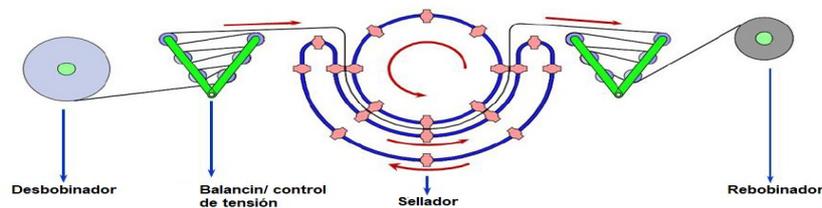


Figura 3.20: Mecanismos y componentes sello de fondo [14]



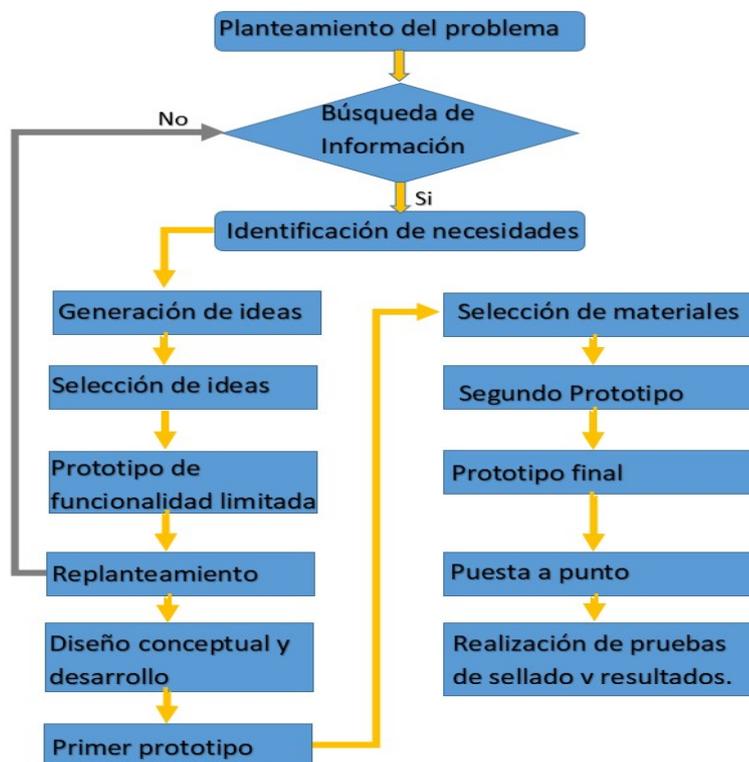
Este es un tipo de fabricante de bolsas de movimiento continuo. El material del desbobinador se pliega y se envía a través de cabezales de sellado giratorios. A diferencia de otros tipos de fabricantes de bolsas, aquí la alimentación no se detiene durante la etapa de sellado. Las cabezas de sellado pueden tener cuchillos especiales para perforar las bolsas durante el sellado. La salida ahora se enrolla para formar rollos. La forma más simple utiliza un (VFD) para rotar los selladores rotativos mientras que todas las demás operaciones se realizan por medios neumáticos.

# Capítulo 4

## Metodología

Para empezar se describe la metodología utilizada en este trabajo de investigación, con base en algunos conceptos obtenidos de [15] y [16] y de acuerdo a la información recopilada durante la investigación este es el esquema utilizado:

Figura 4.1: Diagrama de la metodología de diseño



En el diagrama representado en la figura 4.1 se puede observar una secuencia utilizada mediante los indicadores de color naranja que indican cada una de las etapas de cómo se desarrolló este trabajo de investigación, en la etapa del replanteamiento hay un retorno en color gris en caso de que los prototipos de funcionalidad limitada no cumplan con su objetivo, de esta manera se inicia de nuevo desde la etapa de búsqueda de información hasta obtener un aprendizaje que pueda ser utilizado en los 2 prototipos siguientes para culminar con el prototipo final y así empezar a justificar los objetivos anteriormente mencionados.

## 4.1. Definición general

### 4.1.1. Explicación del problema

Se debe diseñar y construir un banco de pruebas con sus respectivas mordazas para el sellado continuo de películas multicapa, de acuerdo a unos alcances establecidos y unos resultados esperados.

### 4.1.2. Matriz de priorización

Para seleccionar el tipo de sellado más idóneo se implementó una herramienta, la cual es también conocida en el ámbito de la calidad como **Diagrama de Priorización y Análisis de Datos Matriciales** la cual es una herramienta adecuada para elegir una opción entre varias disponibles. Es una combinación del diagrama de árbol y el diagrama matricial, que se utiliza para priorizar ideas, actividades, características, o simplemente opciones o alternativas de acción. El objetivo fundamental al usar esta herramienta es tomar una decisión entre varias posibles, lo cual se hace evaluando las alternativas que haya con

base en determinados criterios. Suele aplicarse en situaciones como la de elegir una oportunidad de mejora en un proceso, cuando se busca la mejor opción para solucionar algún problema, o cuando se desarrollará un nuevo producto y se escoge la mejor alternativa según [17]. En el cuadro 4.1 se compara criterio por criterio a través de un valor de evaluación donde (1) indica un criterio malo, (3) un criterio regular y (5) un criterio excelente. Al final se realiza una suma total de los valores y se ponderan para conocer las mejores y las peores opciones en el tipo de sellado que se pueden seleccionar.

Cuadro 4.1: Matriz de priorización para tipos de sellado

Calificación de 1...5	MORDAZA DE SELLADO	SELLADO POR INDUCCIÓN	SELLADO POR ULTRASONIDO	SELLADO POR IMPULSOS
	Valor de evaluación	Valor de evaluación	Valor de evaluación	Valor de evaluación
Bajo costo de inversión	5	2	1	5
Bajo costo de operación y mantenimiento	4	3	2	4
Desempeño	4	3	3	2
Peso ligero	4	4	3	4
Fácil manufactura/ construcción	5	3	2	4
Facilidad de servicio o cambio de piezas	5	3	2	3
Fácil operación	4	4	5	4
Compra de materiales de fácil acceso en el mercado	4	4	3	4
Baja vibración y poco ruido	5	5	2	5
Que cumpla su función	4	3	3	3
Suma total	44	34	26	38
Ponderación	4.4	3.4	2.6	3.8

Según el cuadro 4.1 y de acuerdo a los criterios seleccionados el tipo de sellado más adecuado es por mordaza de sellado o barras calientes con una ponderación de 4.4. De esta manera se selecciona este tipo de tecnología para el diseño del banco para sellado continuo.

### 4.1.3. Necesidades, requerimientos y especificaciones

**Necesidades observadas:** Según la información encontrada en los antecedentes previos de este trabajo y a las recomendaciones o desafíos observados se describirán a continuación las necesidades:

- El sistema mecánico de las levas deben ser un movimiento más suave para reducir el ruido y las sacudidas de las máquinas para garantizar una vida útil más larga a los elementos mecánicos
- Control de temperatura integrado para la unidad de sellado
- Tiempo de sellado constante independiente de la velocidad de la máquina para garantizar la calidad del producto
- Equilibrio entre el rendimiento de la máquina y el costo de la máquina
- Se debe tener monitoreo de variables y control de elementos actuadores durante el proceso
- Se deben controlar las variables físicas que intervienen en el sellado térmico.(temperatura, presión y tiempo)
- Tener medición de la presión en el sistema mecánico de las mordazas además que este se pueda regular
- Es necesario tener la disipación de calor en los elementos que no deben ser afectados por este.

#### **Requerimientos del banco de pruebas:**

1. Bajo costo
2. Fácil de transportar
3. Estable

4. Resistente
5. Que no ocupe mucho espacio
6. Control de temperatura
7. Control de tiempo de sellado
8. Regulación presión de aire comprimido
9. Que se desplacen las muestras
10. Se pueda medir el desplazamiento de los cilindros
11. Se pueda medir la fuerza en el sellado.

**Requerimientos de las mordazas:**

1. Estable
2. Liviano
3. Que no ocupe mucho espacio
4. Que no aisle la temperatura
5. Fácil de calentar
6. Que soporte calor
7. Que aisle la electricidad.

**Especificaciones del banco de pruebas:**

Cuadro 4.2: Especificaciones del banco de prueba para sellado continuo

Métrica N°	Req.	Descripción	Importancia	Unidad	Valor Marginal	Valor Ideal	Valor real
1	1	Costo de construcción (materiales y fabricación)	9	MXN	<8000	5000	4000
2	3	El banco debe estar soportado al menos en 4 puntos.	1	Adim.	>3	4	4
3	4.2	Construcción del banco en perfil estructural cuadrado aluminio	2	mm	<60	40	40
4	2	Masa	11	Kg	<7	6	5.8
5	5	Área total del banco	12	mm <sup>2</sup>	<180mil	170mil	150mil
6	6	Regulación de temperatura durante el sellado.	3	°C	<250	175	125-180
7	7	Regulación de tiempo para los actuadores.	4	miliseg	<5000	250ms	0-900
8	8	Regulación presión neumática	5	psi	<110	100	80-100
9	9	Velocidad de desplazamiento	8	REV/SEG	<2	1.2	0.9
10	10	Posicionamiento	7	mm	<500	40	40
11	11	Carrera máxima cilindro	10	mm	<6	5	4.9
12	12	Fuerza máxima en las mordazas	6	Newton	<100	70	66

**Especificaciones de las mordazas:**

Cuadro 4.3: Especificaciones de las mordazas

Métrica N°	Req.	Descripción	Importancia	Unidad	Valor Marginal	Valor Ideal	Valor real
1	1	Puntos de fijación	1	Adim.	>1	2	2
2	2	Masa	2	gr	<3	2	1.7
3	3	Volumen total de la mordaza	4	$mm^3$	<800	700	661
4	4	Conductividad térmica	3	w/m°C	<200	150	1,46
5	5	Perforaciones para el alambre nicromo	5	Adim.	<4	3	2
6	6	Temperatura máxima de la mordaza	3	°C	<500	300	220
7	7	Rigidez dieléctrica (DC)	6	Kv/mm	<200	100	100

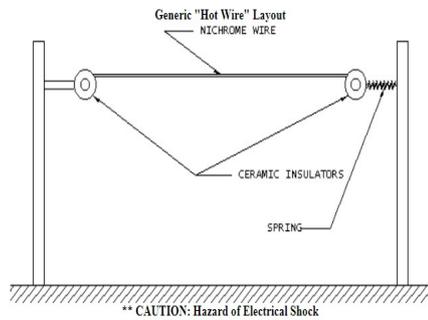
## 4.2. Diseño del banco de prueba y de las mordazas

### 4.2.1. Información recopilada

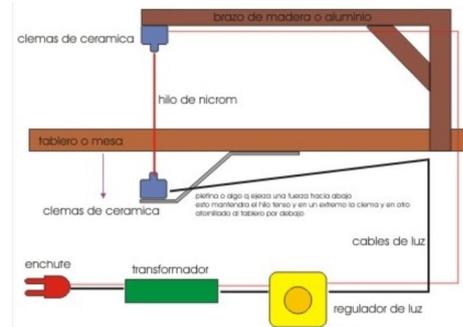
Se consultaron fuentes de información de diferentes autores como se observa a continuación:

- Inspección por microscopía electrónica en tiempo real de procesos de alta temperatura en W cables fijos [18]
- Principios básicos de transferencia de calor y ejemplos de ingeniería en el mundo real[19]
- Cables[20]
- Alambre nichromel [21].

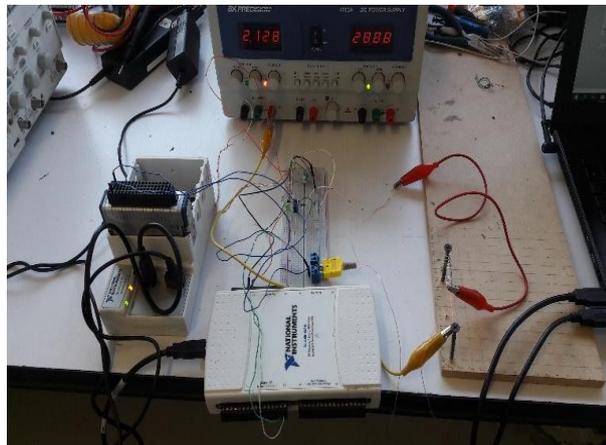
Figura 4.2: Tipos de montajes de alambre de nicromo



(a) Montaje prototipo #1 alambre de nicromo



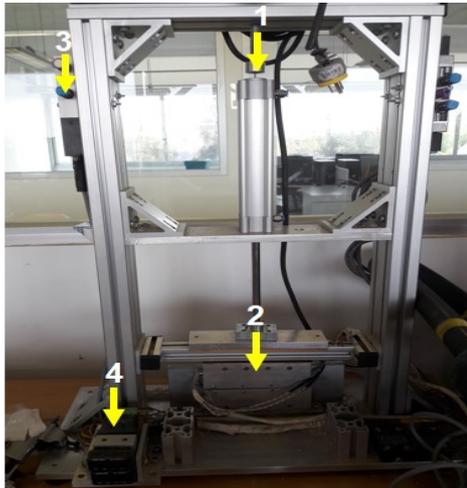
(b) Circuito eléctrico y montaje prototipo #2 alambre nicromo



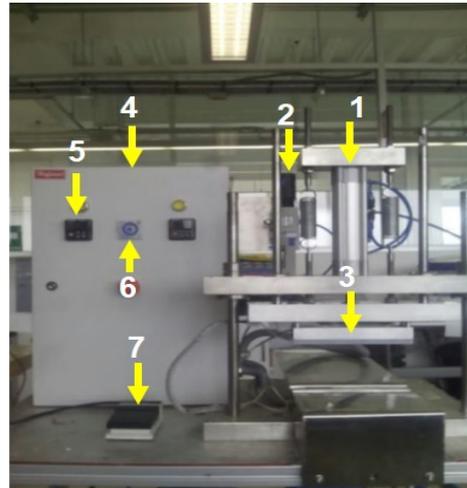
(c) Prueba experimental con alambre de nicromo

La información de la figura 4.2 se investigó y se implementó para determinar la fuente de calentamiento que deben llevar las mordazas para realizar el sellado, lo cual arrojo como resultado utilizar alambre de nicromo. Además de acuerdo a la información recopilada en relación a bancos de prueba y máquinas para sellado se obtuvo lo siguiente:

Figura 4.3: Tipos de bancos de prueba para sellado encontrados en el Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica (CDMIT)



(a) Prototipo para sellado #1 ubicado en el CDMIT



(b) Prototipo para sellado #2 ubicado en el CDMIT

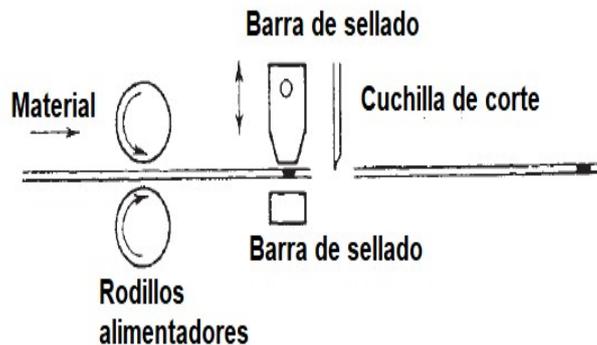
Cuadro 4.4: Componentes de bancos de prueba para sellado (a) y(b)

Componentes del 1 prototipo CDMIT.	Componentes del 2 prototipo CDMIT.
1. Cilindro neumático doble efecto	1. Cilindro neumático doble efecto
2. Mordazas de aluminio	2. Regulador de presión de aire
3. Electroválvula 5/2 vías	3. Mordazas de aluminio
4. Controlador de temperatura digital	4. Tablero eléctrico.
	5. Controlador de temperatura digital
	6. Temporizador regulable de tiempo multifuncional
	7. Pedal eléctrico

### Análisis de aspectos importantes en los prototipos (a) y (b):

Como se observa en la figura 4.3 actualmente en el laboratorio del Centro de Diseño Mecánico e Innovación Tecnológica de la Universidad Autónoma de México hay dos prototipos de bancos para sellado de películas plásticas, estos son de tipo horizontal con una estructura fija para el sellado de muestras de forma manual, ambos prototipos son robustos y solo se pueden montar mordazas de un tamaño relativamente grande con unas dimensiones de 16cm de longitud y 1.5 cm de ancho aproximadamente, además los prototipos poseen controladores de temperatura que solo funcionan para realizar control de temperatura pero no para la adquisición de datos de una variable física primordial en el proceso del sellado como lo es la temperatura, hay muchos más aspectos de ingeniería que se pueden destacar en este tipo de bancos y los cuales fueron de mucha ayuda para el nuevo diseño del banco de pruebas para sellado continuo.

Figura 4.4: Mecanismo para un sellado tipo fondo[19]



El sistema expuesto por [22] en la figura 4.4, es uno de los tipos de mecanismo que se pudieron observar en la sección 3.4.2.3 **Configuraciones en máquinas de sellado**

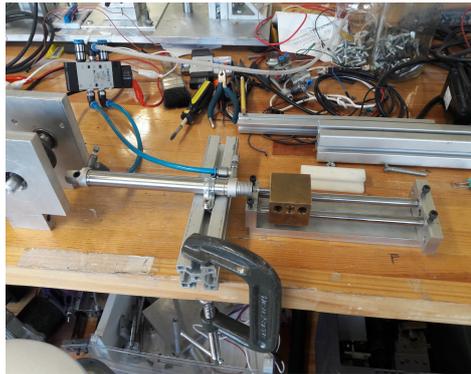
**horizontal** en donde como principio de diseño se tiene un sistema de movimiento mediante rodillos para no romper el material plástico y permitir el movimiento fluido del mismo. Por lo general este tipo de rodillos están contruidos con un alma de acero y recubiertos por un caucho, entre los tipos de cauchos más comunes se encuentran: NBR, Silicona, EPDM, poliuretano y caucho natural

#### **4.2.2. Explicación de las opciones de solución generadas y del proceso de selección**

En las opciones de solución generadas de acuerdo a la investigación en libros y trabajos de tesis relacionados con prototipos de bancos para sellado de películas multicapa, se analizó cada posible solución planteada las cuales fueron implementadas con el objetivo de tener una retroalimentación de aprendizaje de cada una de ellas. Además, se consideraron variables como: el tiempo, costo, probabilidad de funcionamiento y simplicidad. Este procedimiento se realizó para cada una de las opciones consultadas , y como se mencionó en el apartado 4.1.2 en la matriz de priorización el tipo de tecnología más idóneo es **por barras calientes o mordaza de sellado** de acuerdo a la cantidad de ventajas que posee con respecto a los otros sistemas ya mencionados.

### 4.2.3. Prototipos en el diseño del banco de pruebas para sellado

Figura 4.5: Prototipos de funcionalidad limitada



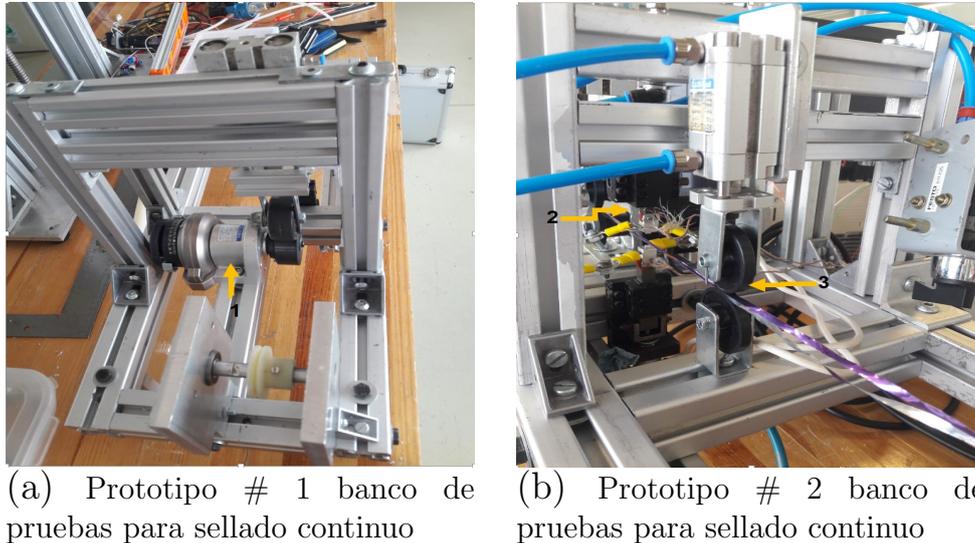
(a) Montaje prototipo funcionalidad limitada horizontal



(b) Montaje prototipo funcionalidad limitada vertical

En la figura 4.5 se representan dos prototipos de funcionalidad limitada para obtener un mejor panorama de un diseño conceptual en un banco de pruebas para sellado, fueron necesarios para entender mejor el principio físico de movimiento en el arrastre de las muestras que se deben sellar, el resultado del montaje de estos dispositivos permitió aterrizar la idea principal lo cual dio como resultado poder tener una base en el diseño de los prototipos presentados en la figura 4.6, por lo tanto fue un aprendizaje necesario para poder avanzar con los próximos diseños.

Figura 4.6: Prototipos bancos de prueba para sellado

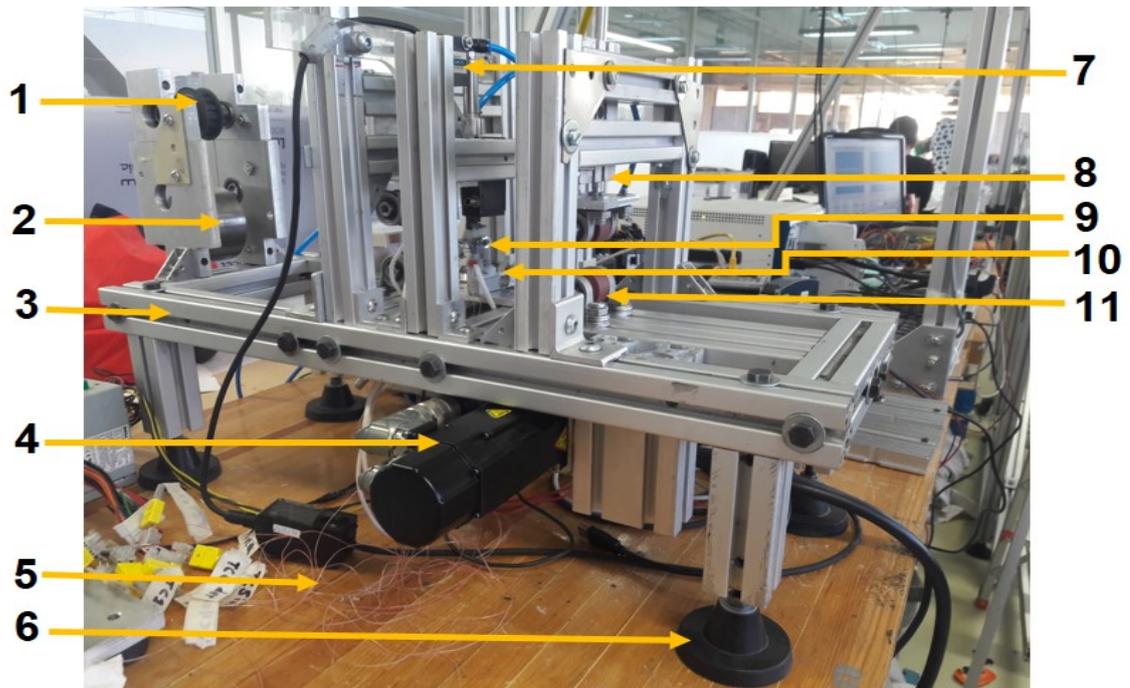


En la figura 4.6(a) está el prototipo # 1 el cual tiene un (1) Rotic de giro a 180° marca **Festo® FLSR -25-R** con el cual se pretende el movimiento de la película, pero debido a la restricción de giro se observó que el desplazamiento es lento y no es preciso en la consecución del movimiento de la película, por otro lado en el prototipo # 2 figura 4.6(b) se implementó un servomotor (2) marca **Yaskawa® SGMJV** de 6000 RPM, pero debido a la antigüedad de la referencia del servo motor el software de control ya es obsoleto para sistemas operativos de última generación además el sistema de guías plásticas que se observan (3) en los prototipos no permitió orientar la película plástica de forma adecuada. Con lo mencionado anteriormente se logró experimentar con los prototipos para entender el comportamiento de las películas mediante un sistema móvil, con lo cual se pudo observar y aprender de errores y problemas en el manejo de las películas mediante un sistema de arrastre mecánico, todas estas observaciones fueron de gran ayuda para determinar y diseñar de una manera óptima el prototipo final.

### 4.3. Descripción de diseño de los componentes y partes del banco de prueba para sellado continuo, prototipo final

#### 4.3.1. Descripción general de las partes del banco de prueba para sellado

Figura 4.7: Prototipo final para sellado continuo de películas multicapa



1. Desbobinador.
2. Contrapeso.
3. Estructura principal.
4. Servomotor.

5. Termopares.
6. Niveladores.
7. Sensor láser.
8. Cilindro de doble efecto.
9. Mordazas en aleación de aluminio.
10. Celda de carga.
11. Rodillos alimentadores.

Con la retroalimentación y el aprendizaje de los prototipos de funcionalidad limitada y los dos primeros prototipos más la experiencia recopilada se concluyó con el prototipo final de la figura 4.7.

#### 4.3.2. Sistema mecánico

Figura 4.8: Componentes del sistema mecánico



1. Polea GT2 en aleación de aluminio serie 2000 de 60 dientes y 37.6mm de diámetro con barreno de 8mm.
2. Correa dentada 2GT 250MM.
3. Chumacera KP08.
4. Servo motor kollmorgen® AKM22E-ANB2C-00 de 0.87 N/M .
5. Polea 2GT en aleación de aluminio serie 2000 de 30 dientes y de diámetro 18.6mm con barreno de 9mm.
6. Cilindro compacto ADVUL-16-25-P-A Festo®.
7. Guía de 14mm en PLA .
8. Rodillo en caucho natural con eje de 8mm.
9. Electroválvula 5/2 vías referencia CPE14-M1BH-5L1/8 Festo®.
10. Estructura principal en perfil estructural de 40mm x40mm.
11. Desbobinador.

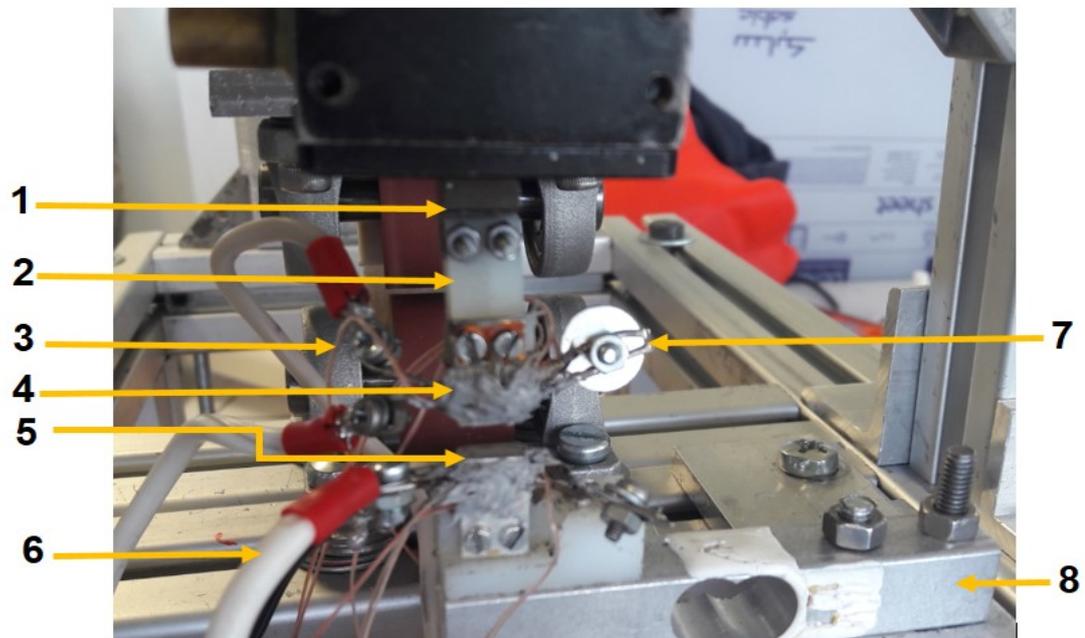
**Funcionamiento:**

El sistema mecánico se compone de varios elementos y sub sistemas que permiten transformar el movimiento en otro por la acción de una fuerza. Pero los sistemas mecánicos por lo general van integrados con otros sistemas como el eléctrico, neumático y electrónico. Como se aprecia en la figura 4.8 la función principal del servo motor(4) es transmitir el movimiento al conjunto del sistema de poleas(1,2,5) el cual reduce la velocidad 2:1 para evitar sobrecargas directas sobre el eje del servo motor de tal forma que el movimiento se transforma y es aplicado al sistema de rodillos(8) los cuales se encargan de alimentar la película a una longitud exacta desde el desbobinador(12).

Todos los componentes se encuentran posicionados y ajustados sobre una estructura principal construida en perfil estructural de 40mm x 40 mm.

#### 4.3.3. Sistema de sellado y medición de fuerza

Figura 4.9: Componentes del sistema de sellado y medición de fuerza



1. Portamordaza superior.
2. Base soporte en nylon.
3. Termopar tipo k de 0.05mm de diámetro.
4. Mordaza superior en aleación de aluminio 6061.
5. Mordaza inferior en aleación de aluminio 6061.

6. Cables alimentación de energía.
7. Alambre de nicromo(aleación compuesta de 80 % de níquel y un 20 % de cromo) de 1mm de diámetro .
8. Celda de carga tipo viga de 10 kgf.

**Funcionamiento:** Este es el corazón del banco de pruebas para sellado, debido a que la función principal del sistema de sellado es sellar las películas multicapa a través de un sistema de mordazas fabricadas en aleación de aluminio 6061(4 y 5), a éstas se les transmite el calor generado por el alambre de nicromo(7), además en cada una de las mordazas van instalados 4 termopares tipo k (3) los cuales tienen como función principal medir la temperatura que alcanzan las mordazas, para evitar el calentamiento de los otros elementos se construyeron unas bases en nylon (2) las cuales evitan la transferencia de calor. Adicionalmente se instaló una celda de carga tipo viga(8) como soporte para la mordaza inferior y con la función principal de medir directamente la fuerza vertical producida por la mordaza inferior en el momento del sellado, este sistema de medición de fuerza también da como resultado el tiempo real de sellado durante el contacto de ambas mordazas.

#### 4.3.3.1. Diseño de las mordazas

Para el diseño de las mordazas se consideraron los principios de diseño propuestos por [2], para lo cual se definieron los requerimientos y métricas establecidas en el cuadro 4.3, el cual se puede encontrar en el capítulo 4.1 de este documento.

Es importante conocer la cantidad de calor que se necesita para elevar la temperatura de 1.7 gr de aleación de aluminio 6061, desde 20°C hasta 180°C, el cual tiene un calor específico de 1300 joule/(kilogramo\*°C), por lo tanto, la ecuación de calor

número #1 propuesta por [19] es la siguiente:

$$Q = m * Ce * \Delta T \quad (4.1)$$

La cantidad de calor requerida  $Q = 353.6$  Joule, con esta premisa podemos seleccionar nuestra fuente de calor, por facilidad en el maquinado para la nueva mordaza seleccionamos un alambre de nicromo de 1 mm de diámetro, realizando el cálculo de calor generado por el alambre tenemos la ecuación #2 para el cálculo de la nueva resistencia del alambre y la ecuación número 3 de la cantidad de calor:

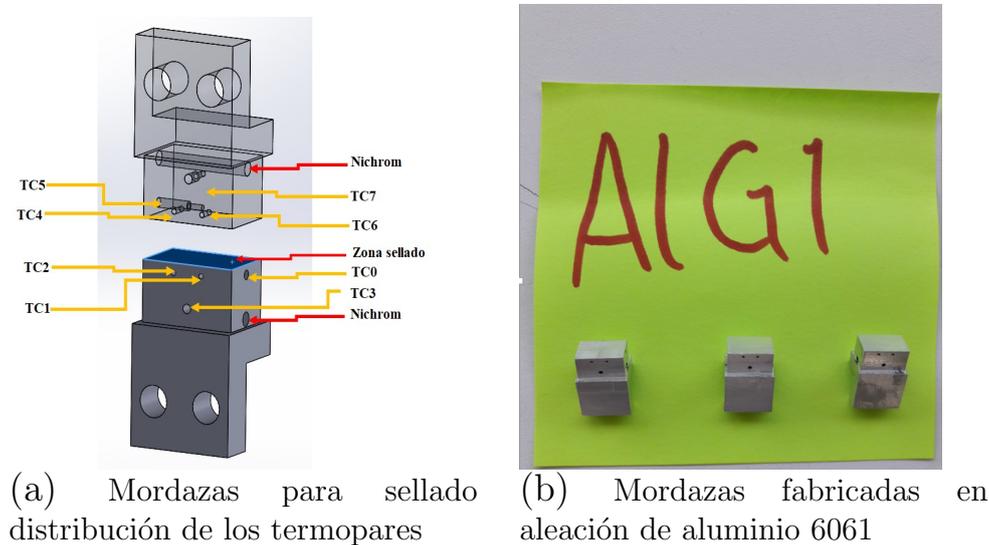
$$R2 = R1(1 + (\alpha * \Delta T)) \quad (4.2)$$

$$Q = R2 * I^2 * t \quad (4.3)$$

- Donde:
- $R2 = 1.07 \Omega$
- $R1 =$  A temperatura ambiente  $1.2 \Omega$
- $\alpha = 0.0004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
- $\Delta T = 180^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}$
- $I = 15$  Amperios.
- $t = 60$  segundos

De tal manera que el calor generado por el alambre es  $Q = 14.445$  Joule en un tiempo de 60 segundos según la ecuación número #3, lo cual indica que el elemento calefactor tiene la potencia suficiente para calentar la masa de la aleación de aluminio 6061.

Figura 4.10: Mordazas para el sellado



#### 4.3.4. Diseño conceptual para posicionar los sensores de medición de fuerza

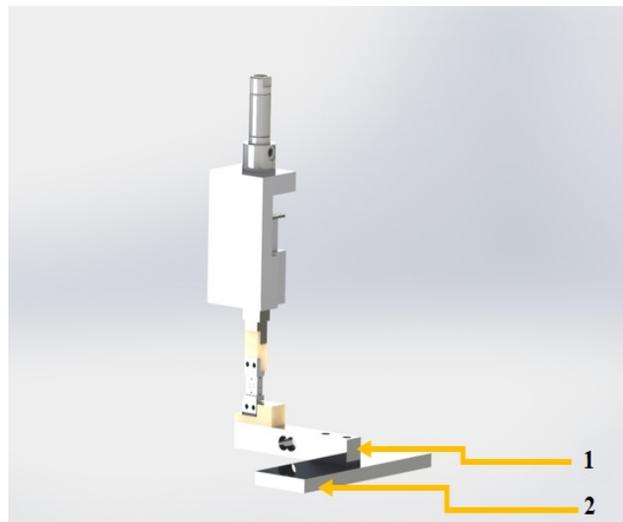
En la mayoría de máquinas industriales y prototipos para sellado de películas multicapa el concepto de medir directamente la fuerza en el momento del sellado no se tiene en mucha consideración debido a que este parámetro, como se encuentra en la literatura y en artículos de investigación no afecta demasiado la resistencia y la calidad del sellado de los productos, pero de acuerdo a las observaciones apreciadas medir la fuerza en el momento que se produce el sellado sirve para tener mucha más precisión en la medición del tiempo de permanencia en el sellado, parámetro fundamental que si afecta la calidad de un buen sellado y que en muchas máquinas industriales y diversos procesos tampoco se tiene en consideración o simplemente se mide de una forma poco exacta, es por tales motivos que se decide presentar varios diseños conceptuales para posicionar los sensores que miden la fuerza y los cuales se puedan implementar

en maquinaria industrial y prototipos de uso general en el ámbito de la investigación.

■ **Primer diseño conceptual propuesto medición de fuerza con celda de carga tipo viga:**

En el primer diseño propuesto se implementó una celda de carga tipo viga de 10 kgf, debido a la fuerza producida por el cilindro superior de sellado el cual puede alcanzar una fuerza máxima teórica calculada de 55.44 Newtons a una presión de 100 psi, con lo cual se seleccionó el rango de la celda de carga, hay que tener en cuenta que la celda de carga por ser tipo viga no se puede suprimir con soportes en donde se aplica la fuerza, a continuación en la figura 4.11 se describe el modelo propuesto

Figura 4.11: Primer propuesta con celda de carga tipo viga



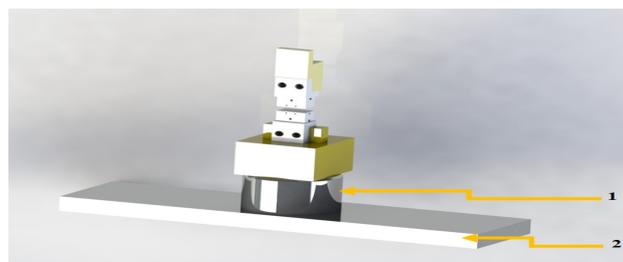
Este sistema se seleccionó como primera opción para implementar en el banco de sellado automático debido al bajo costo de los elementos como la celda de carga, teniendo como premisa la funcionalidad de la celda de carga y con la desventaja de una posible flexión en el momento del sellado

la cual se tendrá que medir y conocer con los resultados próximos de este trabajo para ver su impacto en la calidad de la resistencia en el sellado. A continuación se describen los elementos principales:

1. Celda de carga de 10 Kgf.
  2. Platina en aluminio de 7 mm de espesor.
- **Segundo diseño conceptual propuesto medición de fuerza con celda de carga tipo botón de compresión y un control en lazo cerrado de fuerza con un sistema electro neumático:**

Para investigaciones futuras con el banco de sellado automático o para diseño de nueva maquinaria esta propuesta de diseño conceptual es la ideal para medir directamente la fuerza en el sistema de sellado debido a que se utiliza una celda de carga tipo botón a compresión como se observa en la figura 4.12 , con este sistema no se tendrá demasiada flexión en el soporte inferior de la mordaza de sellado, además mediante un control en lazo cerrado y una válvula reguladora de aire proporcional que incluya el sensor de medición de presión en conjunto con la celda de carga se puede obtener un control de presión muy exacto sobre el elemento final o cilindro neumático del sistema de sellado superior.

Figura 4.12: Segunda propuesta con celda de carga tipo botón a compresión

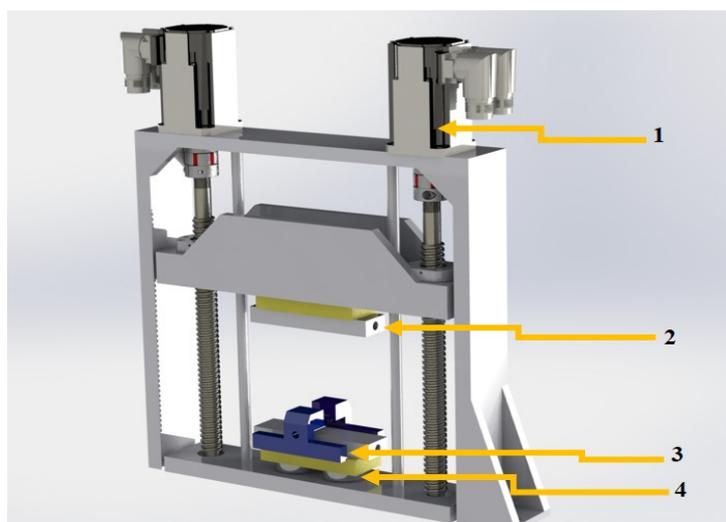


Elementos principales:

1. Celda de carga tipo botón de 100 Kgf.
  2. Platina en aleación de aluminio de 7 mm de espesor.
- **Tercer diseño conceptual propuesto medición de fuerza con celda de carga tipo botón de compresión o tensión y un control en lazo cerrado para el control de fuerza con servomotores o motores de paso:**

Por último se propone un diseño conceptual muy compacto con celdas de carga tipo botón a compresión o tensión y con un sistema mecánico lineal de tornillos con control de movimiento para los servomotores o motores paso a paso, este sistema se caracteriza por las velocidades de movimiento en el eje z para realizar sellados de precisión, además se puede utilizar el sistema para realizar las respectivas pruebas en T o de pelado en un solo sistema, es una propuesta ambiciosa pero de gran versatilidad, a continuación se puede observar en la figura 4.13.

Figura 4.13: Tercera propuesta con celda de carga tipo botón de compresión o tensión

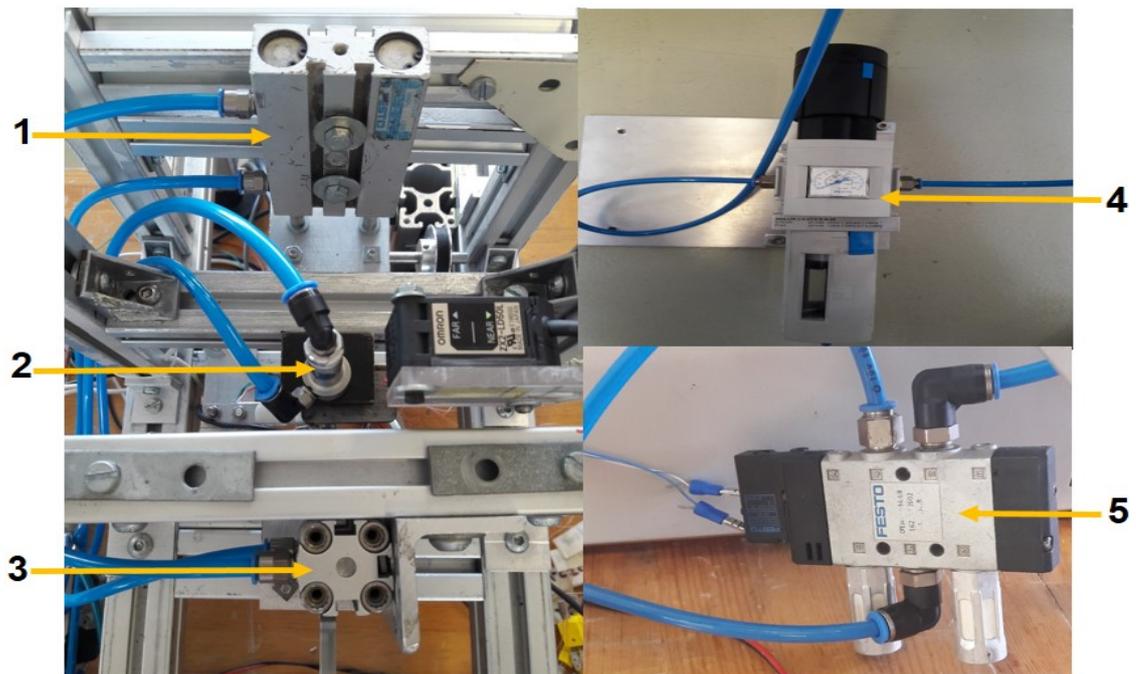


Elementos principales:

1. Servomotores.
2. Placa de sellado superior.
3. Mordazas de sujeción desmontables para realizar las pruebas de pelado en T.
4. Celdas de carga tipo botón de compresión o tensión.

#### 4.3.5. Sistema electro neumático

Figura 4.14: Componentes del sistema electro neumático



1. Cilindro de doble efecto DPZ-16-25-P-A.
2. Cilindro de doble efecto.
3. Cilindro compacto ADVUL-16-25-P-A Festo®.

4. Regulador de presión de aire MS6-LFR-1/4-D7-E-R-M-AS Festo®.
5. Electrovalvula 5/2 vías referencia CPE14-M1BH-5L1/8 Festo®.

**Funcionamiento:**

La Presión del aire permaneció constante a 7 [kPa] debido a que se usó un compresor 3.2 [HP] con capacidad de 151.5 [litros], con el regulador de presión(4)se ajustaron las presiones en el cilindro de doble efecto(2) encargado de mover la mordaza superior y de esta manera lograr el contacto con la mordaza inferior y la película, el accionamiento de este cilindro se logra mediante una electro válvula (5), los cilindros (1 y 3) cumplen la función de mantener en contacto la película que pasa a través de los rodillos alimentadores.

**4.3.6. Sistema electrónico, eléctrico y de control**

Figura 4.15: Componentes del sistema electrónico y eléctrico

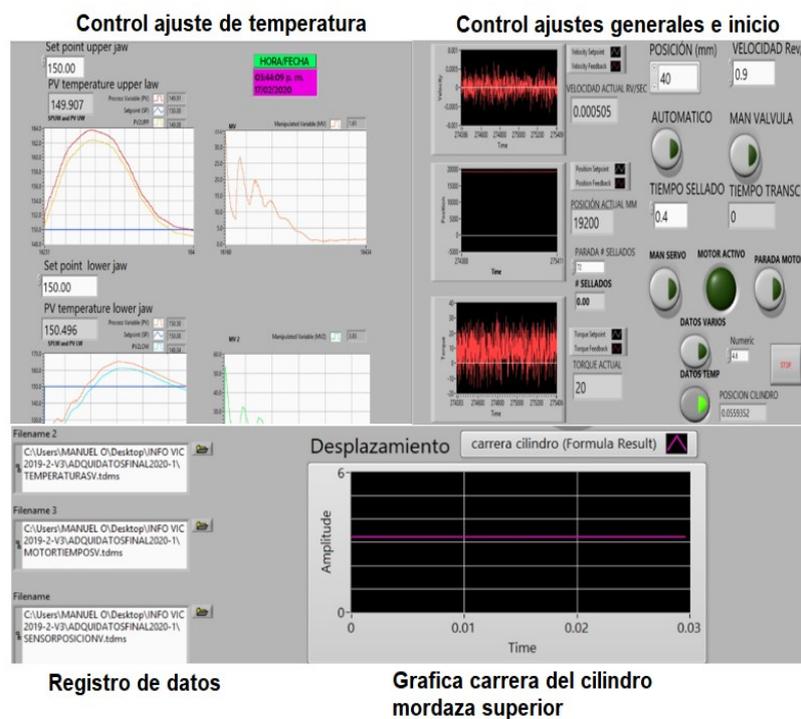


1. Temporizador.
2. Tarjeta de 4 relevos.
3. Fuente de tensión de 24VDC Siemens®.
4. Fuente de tensión regulada SCB-68A de 30 Amperios hasta 24VDC.
5. Controlador Ni USB 6216 National Instruments®.
6. Circuito divisor de tensión para sensor láser.
7. Circuito para optocoplar para salidas de pulsos.
8. Mosfet Irf 2807.
9. Disipador de calor.
10. Ni cDAQ 9174 y tarjeta para medir termopares tipo (k) NI 9213. National Instruments®.
11. Sensor láser Omron® ZX2-LD50L.
12. Tarjeta NI PXIe-6363 de *National Instruments®*. Con esta computadora industrial se realizó la adquisición de datos de sensores y temperatura, además se generaron señales PWM a través de otro elemento.

**Funcionamiento:** El control se hace desde una tarjeta Ni USB 6216(5) en la cual se programa una interfaz hombre-máquina (HMI) en el software LabView® 2017 x32. La HMI se puede observar en la figura 4.16. Se utilizan las salidas de pulsos de la tarjeta NI USB 6216(5), a través de la cual las señales del PWM se generarán a 20 Khz para excitar la electrónica de potencia que controla las corrientes en los alambres de nicromo que calientan las mordazas, de la NI USB 6216 se utiliza una salida digital para activar la tarjeta de relés modelo SRD-05VCD-SL-C(2) la

cual controla una electroválvula neumática modelo FESTO® CPE14-M1BH-5L1 / 8 por medio de la cual se activa el cilindro para sellar. Con la tarjeta NI 9213(10) se miden las señales de los termopares Omega® tipo [K] los cuales miden la temperatura. Con 2 salidas digitales de la tarjeta NI USB 6216 se detectan flancos ascendentes que genera el sensor láser(11) y con una entrada análoga se detecta una tensión de 0 a 5 VDC que cumple la función de detectar la posición del cilindro de sellado.

Figura 4.16: Interfaz hombre máquina en labview



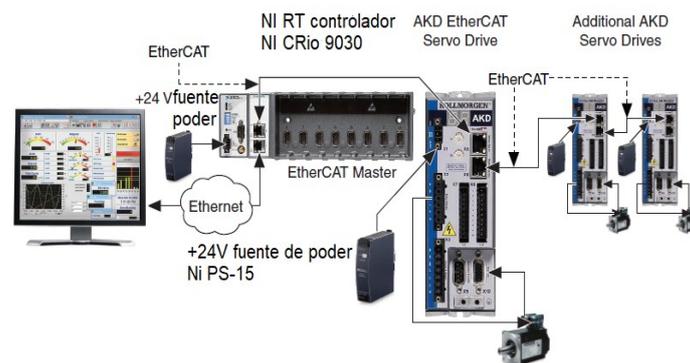
Por otro lado, con un ordenador industrial con chasis NI PXIe-1082 con 8 ranuras PXI- Express y una tarjeta NI TB 4330 se miden las señales de fuerza en el momento del sellado las cuales son detectadas por la celda de carga.

Figura 4.17: Diagrama equipos para la medición de la fuerza



El movimiento de material se realiza mediante un controlador NI cRIO 9030 el cual por comunicación Ethercat controla el servo pack Kollmorgen® AKD y su respectivo servomotor los cuales aseguran la longitud correcta de las muestras a sellar.

Figura 4.18: Equipos para el control del movimiento del servomotor



La alimentación de tensión para la potencia es suministrada por la fuente Sorensen® XPD 18-30 de 30 Amperios, mientras que la alimentación para los sistemas de control y sensores es

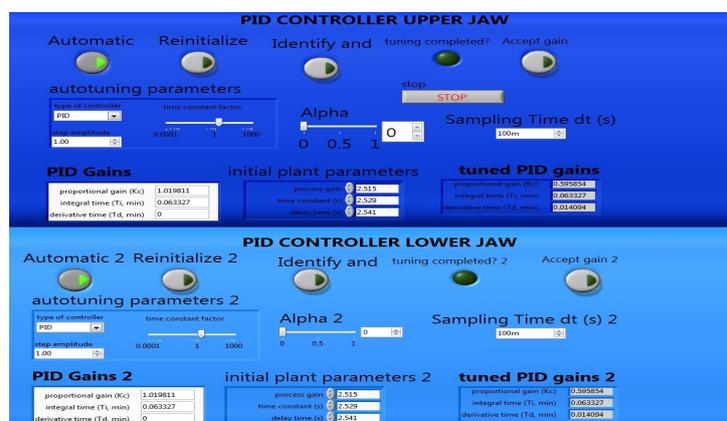
suministrada por las fuentes de 24 VDC y una fuente regulada de 5 VDC.

#### 4.3.6.1. Control PID

El tipo de control que se programó en el software LabView® 2017 x32 fue un control PID, este tipo de control mejor conocido como (proporcional, integral y derivativo) y con la combinación de estas tres consignas lo hacen un controlador que tiene una reducida variación en el error y decrece la tendencia de producir oscilaciones.

Usando el controlador PID y la señal PWM generada se realiza un control en lazo cerrado con los termopares de temperatura, la salida generada del PWM pasa a través de la electrónica de control y potencia la cual energiza los dos cables de nichromo alimentados a 24 VDC, la demanda de estos en carga es de 30 Amperios por la desviación existente entre la variable del proceso (PV) y el set point (SP) de modo que la salida en el controlador es del 100%, luego de estabilizarse la variable del proceso (PV) cerca al (SP) las corrientes aproximadas en los cables de nicromo son de 5.7 Amperios con un 19% en la salida del controlador.

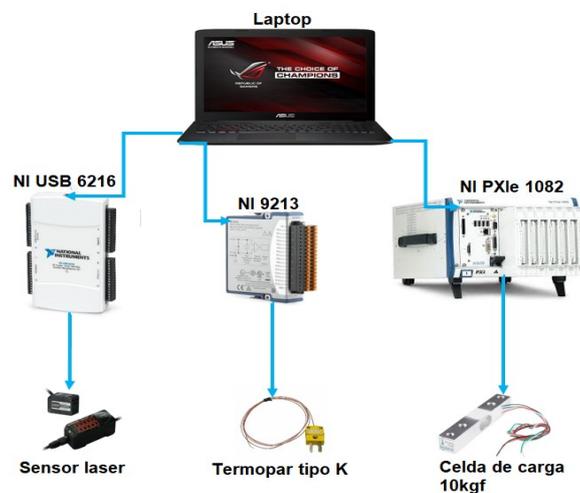
Figura 4.19: Controlador PID en HMI



#### 4.3.6.2. Adquisición de datos

La adquisición de datos está representada en la figura 4.20. Con estos equipos industriales de altas resoluciones se obtuvieron los datos de las tres variables principales como la temperatura, fuerza en el sistema de sellado y posición del sistema mecánico de sellado.

Figura 4.20: Diagrama adquisición de datos

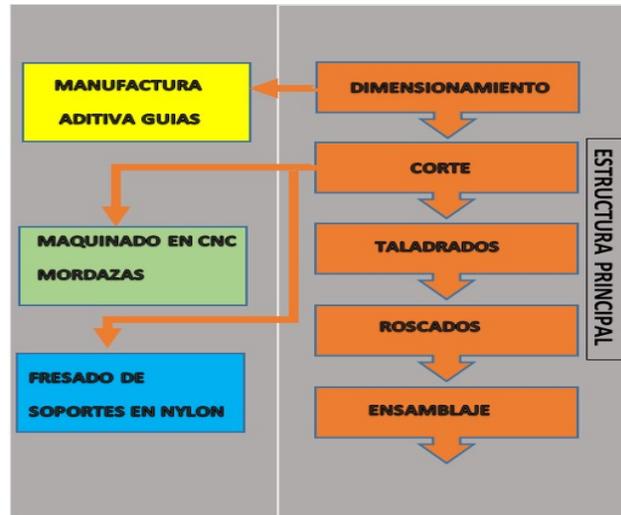


## 4.4. Proceso de manufactura.

### 4.4.1. Descripción de los procesos realizados para manufacturar los componentes del banco de pruebas para sellado continuo

Para materializar la idea seleccionada durante las etapas anteriores en el proceso de diseño, se llevaron a cabo una serie de actividades, dentro de las que destacan:

Figura 4.21: Diagrama del proceso de manufactura



Cada una de las actividades que se muestran en el esquema anterior agrupan un pequeño cúmulo de actividades, sin embargo, en cada fase se describen de forma general bajo el esquema mostrado. A continuación se presenta un breve explicación de las actividades realizadas en cada fase:

- **Dimensionamiento:** En esta primera etapa se especifican las cifras que expresan un valor numérico de longitud, ángulo, diámetro u otros, de algún elemento geométrico. La anotación se realiza sobre el material mediante alguna herramienta de dibujo o rayado.
- **Corte:** En esta segunda parte del proceso se realizaron las operaciones de corte y tronzado de cada uno de los elementos según los requerimientos, para ello se recurrió a las marcas de dimensionamiento previamente realizadas. Para estas operaciones se usó el arco sierra, y la máquina tronzadora para el corte de los perfiles.
- **Taladrado:** En esta tercera etapa del proceso se realizaron las operaciones de taladrado sobre los diferentes elementos

que requerían de este mecanizado. Para todos ellos se usó un taladro de banco y un taladro manual.

- **Roscado:** Para poder llegar al ensamblaje se necesitaron roscas de 3mm y 8 mm en la estructura principal para esto se utilizó un volvedor y machuelos de 8mm y 3mm.
- **Ensamblaje:** Esta fase consistió en la unión o acoplamiento de cada una de las partes que conforman la estructura principal del banco. Dentro de las operaciones que se realizan en esta etapa se encuentran: unión mediante pernos y unión con soportes.
- **Maquinado en CNC de las mordazas:** En un centro de mecanizado se fabricaron las mordazas en aleación de aluminio 6061 para realizar el sellado.
- **Fresado:** Este proceso de mecanizado se empleó exclusivamente en la elaboración de una pieza (los soportes en material de nylon).
- **Manufactura aditiva guías:** Mediante manufactura aditiva y por FDM se fabricaron las guías para orientar la película a sellar. La máquina utilizada fue una *CREATOR PRO*

Cuadro 4.5: Proceso de manufactura de los principales elementos que conforman el banco de prueba para sellado continuo

Descripción	Dimensionamiento	Cortes	Taladros	Roscado	Ensamble	CNC	FDM	Fresado
Estructura en perfil cuadrado	X	X	X	X	X			
Soportes	X	X	X					X
Guías	X				X		X	
Mordazas	X	X			X	X		

Los detalles sobre las dimensiones y especificaciones de las partes que conforman el prototipo final se presentan en la sección del anexo VI.

## 4.5. Equipo de trabajo

Se trabajo de forma conjunta y colaborativa con dos compañeros en el trabajo de investigación en diversas etapas de la metodología y construcción de los prototipos, los cuales aportaron valiosas ideas y tiempo de desarrollo en diversas actividades, a continuación se describirán las tareas realizadas en el cuadro 4.6:

Cuadro 4.6: Detalle de las actividades del equipo de trabajo

Nombre completo	Perfil profesional	Responsabilidades	Tiempo de permanencia
Jorge Enrique Uribe	Estudiante de doctorado	Valiosos aportes en la construcción de los prototipos, en el diseño y fabricación de las mordazas, en la realización de las pruebas de sellado y en conceptos generales de investigación y diseño, además de algunas pruebas de peeling	3 semestres desde junio del 2018 hasta diciembre del 2019
Saúl Alejandro Valdez	Estudiante de ingeniería	Valioso aportes en el diseño y fabricación de las mordazas, desarrollo de planos CAD, realización de las pruebas de sellado y corte del material.	1.25 semestres desde septiembre del 2019 hasta marzo del 2020

# Capítulo 5

## Puesta a punto, preparación del diseño experimental

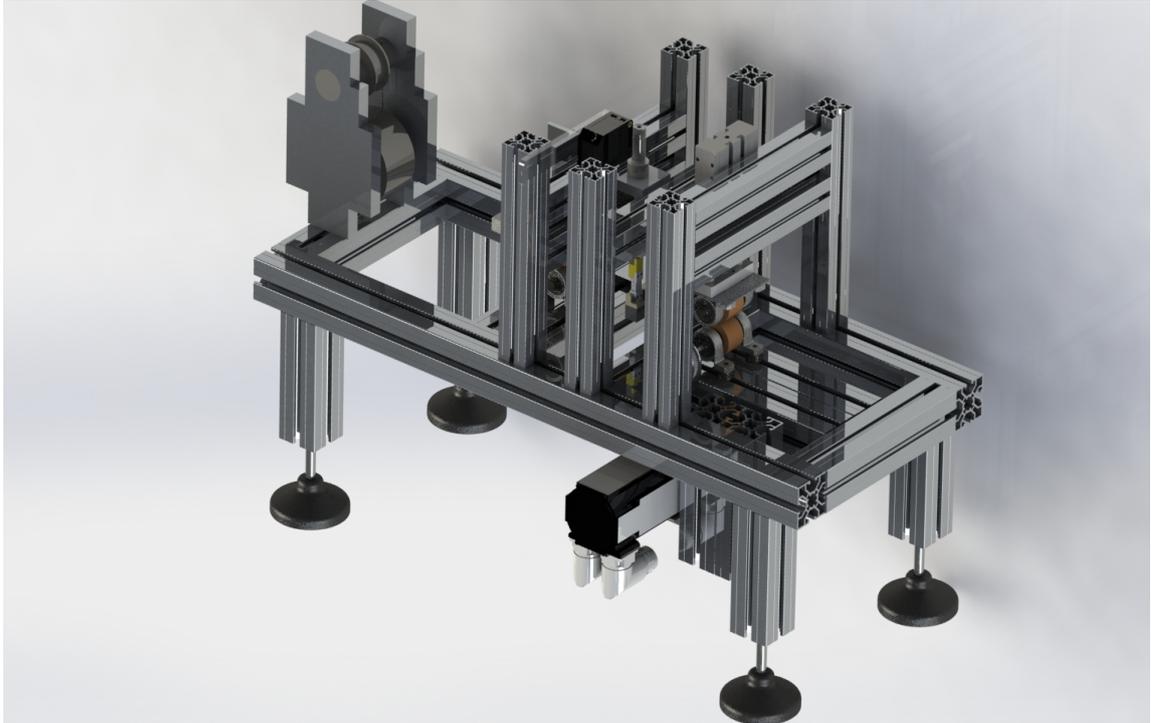
### 5.1. Instrumentos utilizados y materiales

A continuación, se describen los elementos utilizados en el diseño de experimentos y la puesta a punto la cual es muy importante para garantizar una buena repetibilidad en el proceso y de esta manera obtener buenos resultados.

#### 5.1.1. Prototipo final banco de pruebas para sellado continuo de películas multicapa

La descripción funcional de este banco se realiza de una manera muy detallada en el apartado 4.3 de igual manera se representa en la figura 5.1:

Figura 5.1: Prototipo final para sellado continuo de películas multicapa

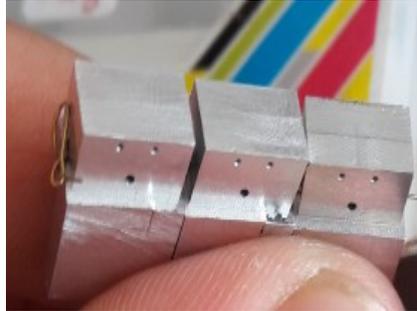


### 5.1.2. Mordazas

Para este banco se cuenta con 1 juego de mordazas. A continuación se describen algunas propiedades importantes de estas:

1. Material: Aleación de aluminio 6061.
2. Dimensiones: 13.55[mm]x8.75[mm]x7[mm]
3. Geometría: Plana

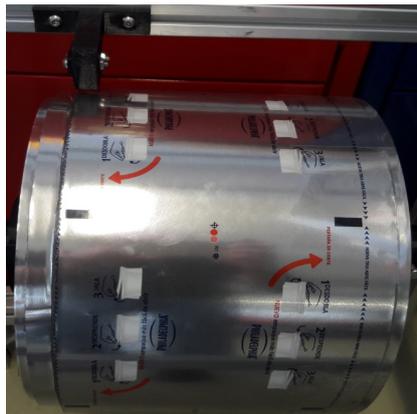
Figura 5.2: Mordazas en aleación de aluminio 6061 fabricadas en CNC



### 5.1.3. Película multicapa BOPP.

Para obtener las muestras de sellado (unidades experimentales) se utilizó una película de polipropileno biorientado que consta de dos capas laminadas. La capa externa es de aluminio la cual tiene 23  $[\mu\text{m}]$  de espesor que ayuda a aumentar la resistencia y también sirve como barrera contra la luz. La capa interna es de polipropileno (PP) con un espesor de 21  $[\mu\text{m}]$ . Ver la figura 5.3

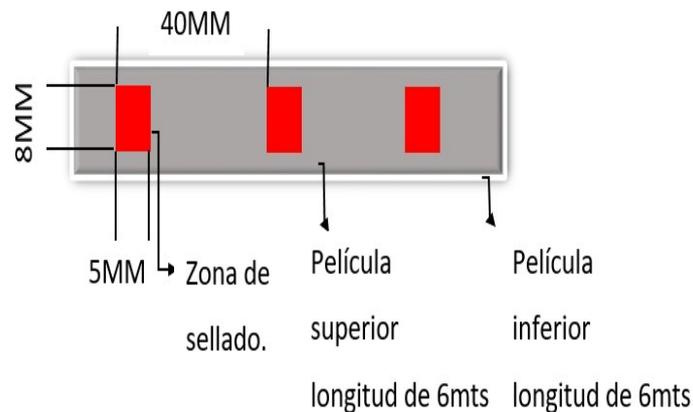
Figura 5.3: Película de polipropileno biorientado.



De la bobina de material que se observa en la figura 5.3 se obtuvieron 30 tiras de 12 mts de longitud con un ancho de 9mm

para realizar un sellado cada 40 mm. Estas tiras se doblaron y quedaron dos películas de 6mts cada una, a continuación se representan en la figura 5.4.

Figura 5.4: Esquema de muestras para sellar



## 5.2. Puesta a punto del banco para sellado continuo

Es de suma importancia realizar la puesta a punto del banco para sellado continuo, por tal motivo se procede a la nivelación de las mordazas, la estructura principal, la orientación de los rodillos alimentadores y el sistema de sellado .

### 5.2.1. Nivel del sistema de mordazas y de la estructura principal

A continuación se describe cual fue el procedimiento utilizado para garantizar un nivel en las mordazas de sellado y en la estructura principal :

1. Se utiliza el protactor de nivel digital Pro 3600

2. Se ajustan los niveladores que posee la estructura además de los tornillos sujetadores de las portamordazas
3. Se busca una aproximación del cero
4. Se finaliza la nivelación una vez encontrado el cero como se muestra en la figura 5.5.

Figura 5.5: Nivel de las mordazas



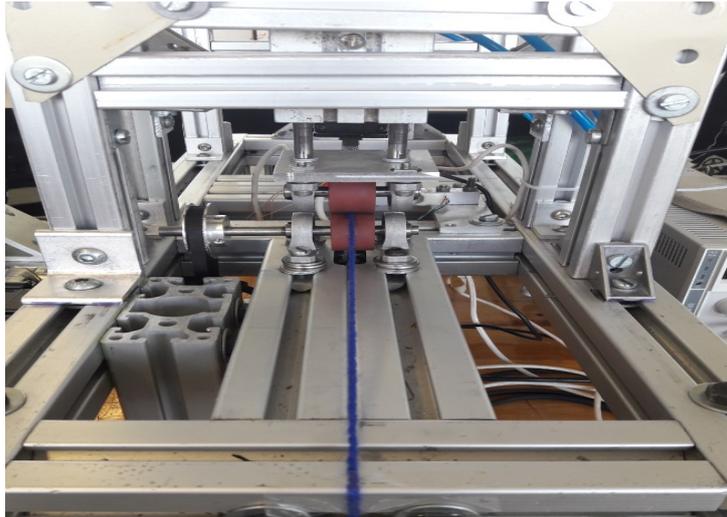
### 5.2.2. Orientación de los elementos móviles y el sistema de sellado

Es primordial posicionar los rodillos que alimentarán el material desde el desbobinador, además la posición del sistema de sellado debe quedar alineado con estos elementos, a continuación se describirá la forma como se realizó:

1. Se utiliza una cuerda o hilo
2. Se ajusta la cuerda en un extremo de la estructura principal que coincida con el centro de la estructura y luego se ajusta al otro extremo atravesando todo el banco, así como se ilustra en la figura 5.6

3. Se desplazan los elementos y se posicionan de forma alineada.

Figura 5.6: Alineación de los elementos móviles



### 5.3. Posicionamiento del material para el sellado

La tira doble de 6 mts de longitud se enrolla en el desbobinador (1) luego se sujeta el extremo de la muestra la cual se desplaza por el interior de la guía (2) a continuación se atraviesa el sistema de sellado (3) y por último se adhiere con cinta el extremo que se posiciona sobre el rebobinador o rodillo alimentador (4) de esta manera se realiza el enhebrado de las muestras ver la imagen 5.7 y 5.8.

Figura 5.7: Esquema del enhebrado de las muestras

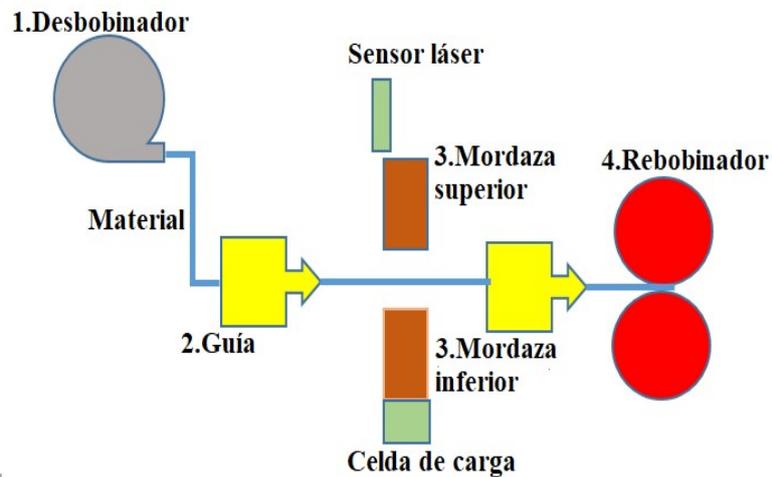


Figura 5.8: Enhebrado en el prototipo final



## 5.4. Diseño experimental

### 5.4.1. Hipótesis para el diseño experimental

Puede tenerse una variación en la calidad de la resistencia del sellado (Y) en muestras de película multicapa de polipropileno

biorientado, si se varían las temperaturas de sellado, la presión y los tiempos de permanencia.

**Las hipótesis para este experimento son:**

- $H_{0(A)}$  = La relación entre la temperatura de las mordazas y la resistencia del sello es nula
- $H_{0(B)}$  = La relación entre la presión de sellado y la resistencia del sello es nula
- $H_{0(C)}$  = La relación entre el tiempo de permanencia de sellado y la resistencia del sello es nula
- $H_{0(AB)}$  = La interacción entre la temperatura de las mordazas y la presión de sellado en la resistencia del sello es nula
- $H_{0(AC)}$  = La interacción entre la temperatura de las mordazas y el tiempo de permanencia en la resistencia del sello es nula
- $H_{0(BC)}$  = La interacción entre la presión de sellado y el tiempo de permanencia en la resistencia del sello es nula
- $H_{0(ABC)}$  = La interacción entre la temperatura de las mordazas, la presión de sellado y el tiempo de permanencia en la resistencia del sello es nula.

#### **5.4.2. Factores y niveles del experimento**

A partir de la hipótesis se describirán los tres factores y niveles principales con los cuales se realizó el diseño experimental.

#### 5.4.2.1. Temperatura en las mordazas

Se solicitó al instituto de investigaciones en materiales de la Universidad Nacional Autónoma De México realizar la calorimetría de la película de BOPP la cual se programó y ejecuto del 6 al 17 de Septiembre del 2019 con el equipo DSC Q2000 TA instruments que se encuentra ubicado en sus instalaciones, de esta manera se determinó la temperatura de transición vítrea para el BOPP que se utilizó en este trabajo la cual fue de 121.32 °C, de acuerdo a lo anterior, las temperaturas se establecieron en tres niveles de la siguiente manera:

- Nivel bajo: 125 [°C]
- Nivel medio: 150 [°C]
- Nivel alto: 175 [°C]

#### 5.4.2.2. Presión de sellado.

Se establecieron mediante el regulador de presión tres ajustes 80, 90 y 100 psi, pero la presión en el área de sellado la cual fue calculada ver el cuadro 5.1:

Cuadro 5.1: Presión en el área de sellado

Diametro interno del cilindro (in)	Presión de entrada (psi)	Fuerza del cilindro (lbf)	Área de sellado en mordaza ( $in^2$ )	Presión en area de sellado (psi)
0,42	80	9,972	0,062	160
0,42	90	11,27	0,062	180
0,42	100	12,46	0,062	200

De acuerdo a lo anterior se establecieron los tres niveles:

- Nivel bajo: 160 [psi]
- Nivel medio: 180 [psi]

- Nivel alto: 200 [psi]

#### 5.4.2.3. Tiempo de sellado o permanencia

Para determinar y controlar los tiempos de permanencia reales en los cuales el sistema de mordazas está en contacto en el momento del sellado se implementó un sensor láser para medir la posición real del cilindro que mueve la mordaza superior y posibles deformaciones en el material sellado, además en el sistema de la mordaza inferior se instaló directamente una celda de carga para medir la presión real en el sellado y a la vez detectar el tiempo de permanencia. Los tiempos de permanencia se establecieron con los siguientes niveles:

- Nivel bajo: 0.2 [s]
- Nivel medio: 0.3 [s]
- Nivel alto: 0.4 [s]

En el cuadro 5.2 se presentan los factores y niveles que se trabajaron en el diseño experimental.

Cuadro 5.2: Resumen de los principales parámetros y niveles para el diseño experimental

Nivel	Temperatura en mordazas [°C]	Presión de sellado [psi]	Tiempo de permanencia [s]
-1	125	160	0.2
0	150	180	0.3
1	175	200	0.4

#### 5.4.3. Aplicación del diseño experimental

El diseño experimental realizado se compone de dos tipos de pruebas. La primera es el sellado de las muestras y la segunda las pruebas de pelado para obtener la resistencia de sellado.

## 5.4.3.1. Pruebas de sellado en el banco de prueba

El sellado de las muestras de película multicapa se realizó corriendo 27 experimentos ver figura 5.9 en cada uno de los cuales se ejecutó de forma continua 72 sellados para los que se aplicaron los 3 niveles correspondientes de cada factor. Ver el cuadro 5.3 :

Cuadro 5.3: Corridas experimentales con sus factores

Temperatura [°C]	Presión [psi]	Tiempo [s]	Número de experimento	Número de sellados
-1	-1	-1	1	72
-1	-1	0	2	72
-1	-1	1	3	72
-1	0	-1	4	72
-1	0	0	5	72
-1	0	1	6	72
-1	1	-1	7	72
-1	1	0	8	72
-1	1	1	9	72
0	-1	-1	10	72
0	-1	0	11	72
0	-1	1	12	72
0	0	-1	13	72
0	0	0	14	72
0	0	1	15	72
0	1	-1	16	72
0	1	0	17	72
0	1	1	18	72
1	-1	-1	19	72
1	-1	0	20	72
1	-1	1	21	72
1	0	-1	22	72
1	0	0	23	72
1	0	1	24	72
1	1	-1	25	72
1	1	0	26	72
1	1	1	27	72

Figura 5.9: Material de 6 metros marcado para realizar los sellados para el diseño experimental



Con el objetivo de eliminar posibles errores como lo indica la literatura de diseños experimentales, en el momento de realizar cada uno de los experimentos se ejecutó un solo random para iniciar el proceso de sellado con los parámetros establecidos en el cuadro 5.2, Ver la figura 5.10 del orden aleatorio utilizado en las pruebas experimentales.

Figura 5.10: Random realizado para el orden de sellado

```

Command Window

    10    9    6    7    8

>> Vector1(randperm(27,27))=1:27

Vector1 =

Columns 1 through 17
    26    21    3    19    12    6    23    7    27    5    11    24    18    10    25    14    16

Columns 18 through 27
    13    20    22    9    15    4    17    1    8    2|

fx >>
    
```

#### 5.4.3.2. Descripción de la operación del banco de pruebas para el sellado de las muestras

Como se explicó en el apartado 5.3 cada una de las tiras o muestras fueron posicionadas en el banco de sellado, en el

cual se programan todos los parámetros de funcionamiento en la pantalla (HMI) y se empieza a realizar la adquisición de datos, se programan las temperaturas establecidas, el tiempo de permanencia, y la presión de sellado la cual es ajustada desde un regulador de presión, estos parámetros se modifican de acuerdo al experimento seleccionado en el random, empezando desde el experimento #26 hasta finalizar el experimento #2, los demás parámetros como la longitud de la muestra se establece en 40 mm y la velocidad del sistema en 0.9 Rev/seg, después que la temperatura alcanza el set point ajustado se oprime el botón de automático y empieza el proceso continuo de sellado de cada experimento.

Figura 5.11: 27 tiras selladas de forma continua



#### 5.4.4. Ensayos de pelado en máquina de ensayos universales INSTRON 4204

Con las 27 tiras ya selladas se procedió a marcar cada una de las muestras como se ve en la figura 5.12.

Figura 5.12: Marcado de las muestras selladas



Además se cortó cada una de las muestras figura 5.13 para realizar los ensayos de pelado en T, también se fabricó una guía para alinear cada una de las muestras de forma correcta y eliminar posibles errores de posicionamiento ver la figura 5.14, cada una de las pruebas se realizó bajo la norma ASTM-F88 [11] con la máquina de ensayos universales INSTRON 4204 descrita en el Anexo VII . El orden de las pruebas se realizó mediante dos randoms, de las 72 muestras selladas se utilizaron solo las primeras 32 muestras de cada experimento, el primer random fue para los 27 experimentos ya sellados figura 5.15 y el segundo random fue para las 32 primeras muestras selladas de cada experimento, además se seleccionaron las primeras 10 posiciones del segundo random figura 5.16 y de esta manera obtener un mínimo de 10 repeticiones para las pruebas de pelado en T con un total de 270 repeticiones para los 27 experimentos.

Figura 5.13: Muestras cortadas y separadas



Figura 5.14: Muestras posicionadas ensayo peeling en T

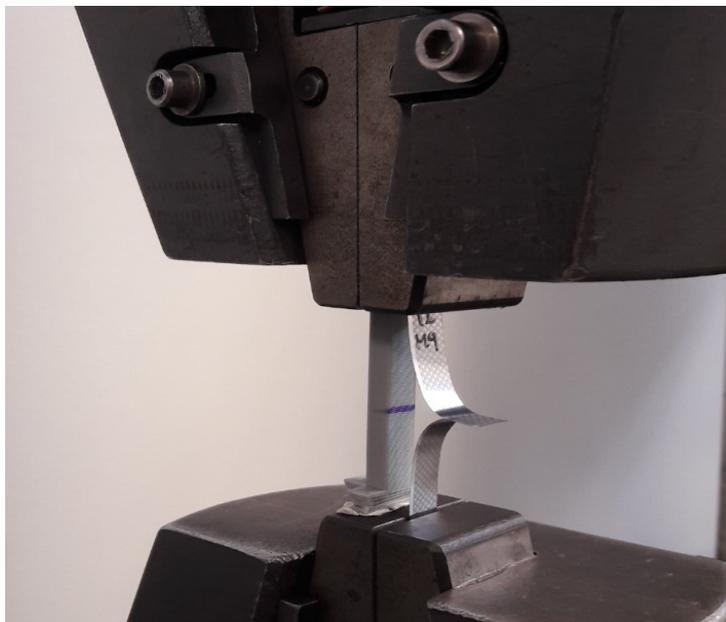
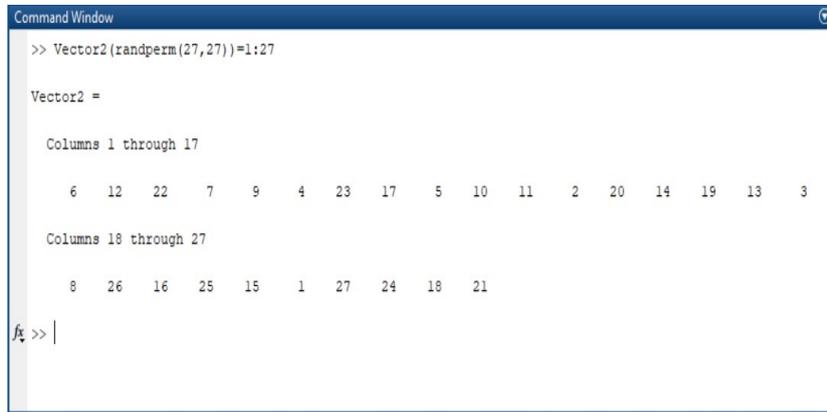
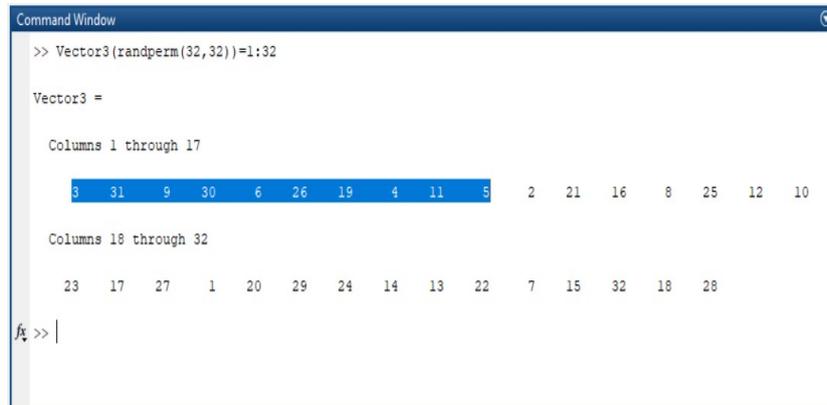


Figura 5.15: Primer Random realizado para el orden de los 27 experimentos



```
Command Window
>> Vector2(randperm(27,27))=1:27
Vector2 =
Columns 1 through 17
     6    12    22     7     9     4    23    17     5    10    11     2    20    14    19    13     3
Columns 18 through 27
     8    26    16    25    15     1    27    24    18    21
fx >> |
```

Figura 5.16: Segundo Random realizado para el orden de las 270 muestras



```
Command Window
>> Vector3(randperm(32,32))=1:32
Vector3 =
Columns 1 through 17
     3    31     9    30     6    26    19     4    11     5     2    21    16     8    25    12    10
Columns 18 through 32
    23    17    27     1    20    29    24    14    13    22     7    15    32    18    28
fx >> |
```

# Capítulo 6

## Resultados

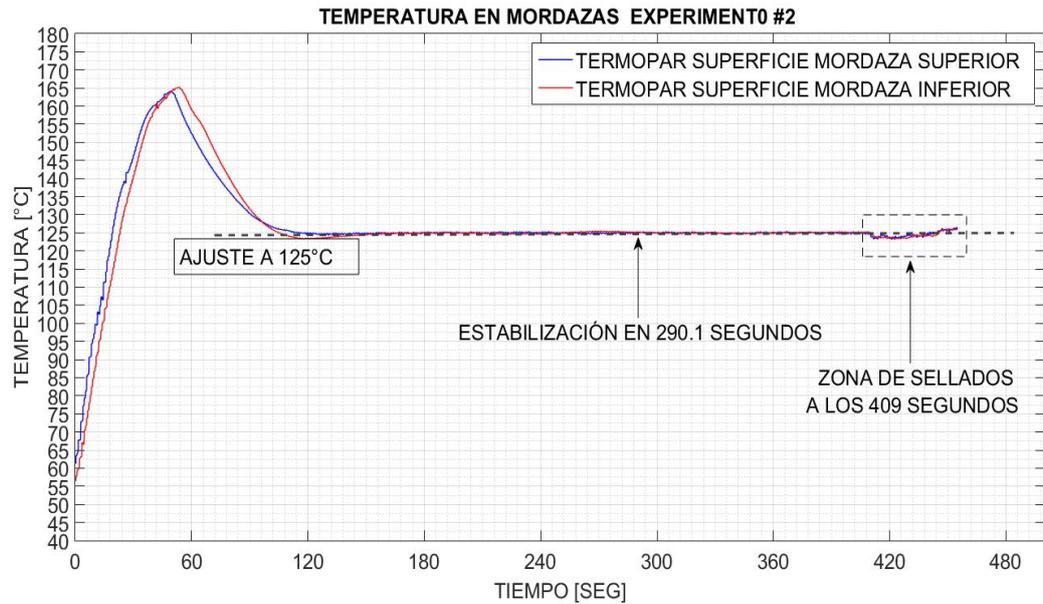
Los resultados se dividen en tres secciones la primer sección fueron los datos que se obtuvieron con la instrumentación implementada en el banco de sellado continuo, la segunda sección son los datos que se obtuvieron con las pruebas de pelado en la máquina de ensayos universales INSTRON 4204 ubicada en el instituto de materiales en la Universidad Politécnica De Valencia más el diseño experimental y la tercer sección contiene las imágenes de algunas muestras después del peeling, estas imágenes fueron procesadas en un microscopio estereoscópico Nikon SMZ800 y con microcopia electrónica de barrido de campo (FESEM) ZEISS ULTRA 55 ubicados en los laboratorios del instituto de materiales en la Universidad Politécnica De Valencia.

### **1. Primera sección datos obtenidos a partir de la instrumentación**

Cada prueba realizada en la máquina de pruebas de sellado continuo proporciona un gráfico de temperaturas de las mordazas, desplazamiento del cilindro y presión de sellado. Para cada una de los 27 experimentos hay un gráfico. En estos podemos identificar tiempos de permanencia, temperaturas y fuerzas en las muestras selladas. En la figura

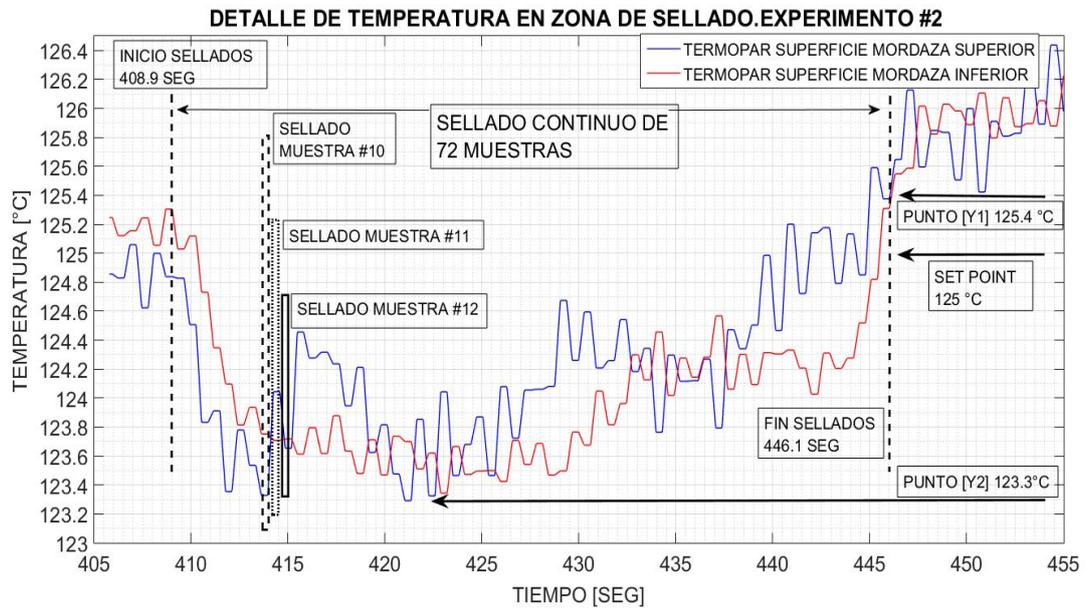
6.1 podemos apreciar la respuesta de la temperatura en ambas mordazas.

Figura 6.1: Respuesta de la temperatura en las mordazas



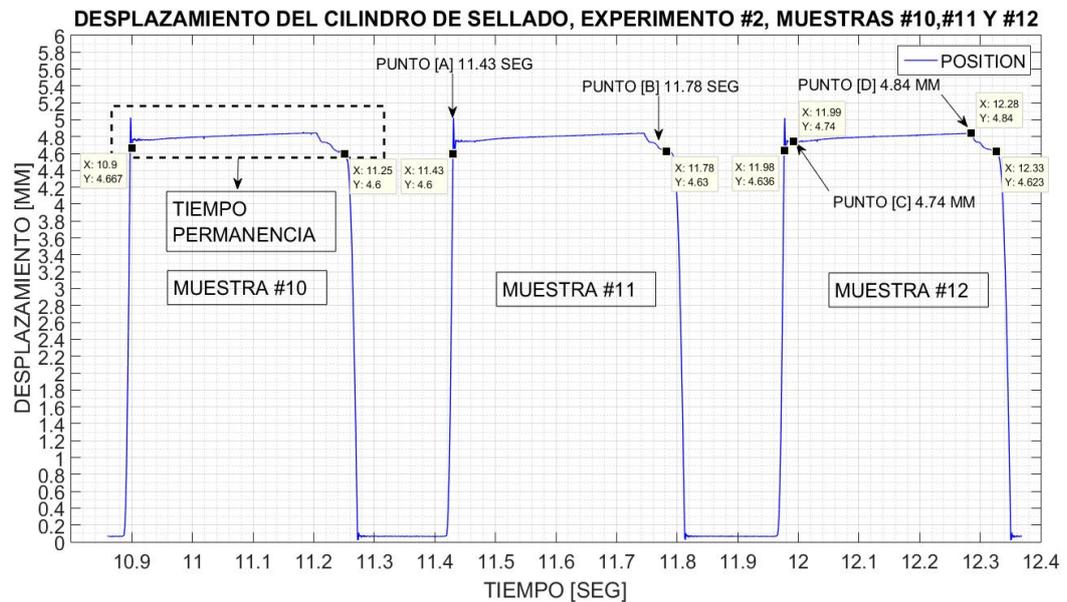
Las temperaturas se estabilizan para ambas mordazas en los 290.1 segundos alcanzando el set point establecido de 125 °C. En la figura 6.2 se observa de una forma más detallada el fenómeno ocasionado por la temperatura en cada una de las mordazas, después de la estabilización de la temperatura se aprecia el comportamiento que tuvo en el momento de realizarse los 72 sellados continuos para el experimento #2 el cual inicio a los 408.9 s y término 446.1 s= 37.2 s el ciclo de sellado , se reflejan gradientes de temperatura de 1.7 °C por debajo del set point = 125° C y 0.4°C por encima entre los puntos (Y1) y (Y2).

Figura 6.2: Detalle de la temperatura en las mordazas



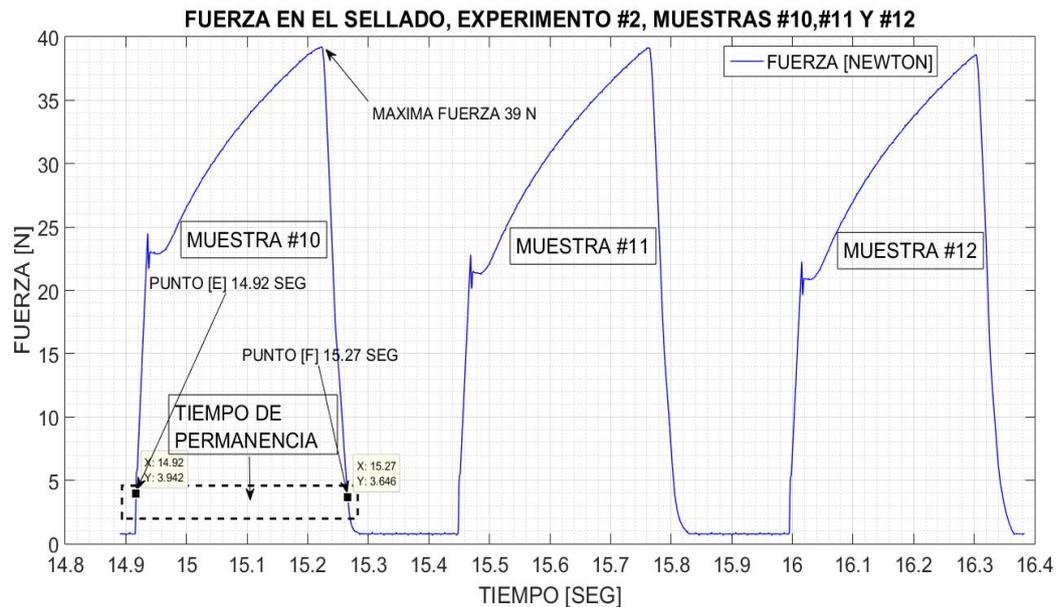
Con el sensor láser se detectó la curva de posición del cilindro neumático de sellado como se puede ver en la figura 6.3. Como se observa entre las muestras selladas #10, #11 y #12 hay una respetabilidad de la señal, además se puede analizar el tiempo de permanencia real en el cual el cilindro con la mordaza superior permaneció haciendo contacto con la mordaza inferior, entre el punto (A) = 11.43 segundos y el punto (B) = 11.78 segundos para la muestra #12 en la figura 6.3 se aprecia un tiempo de permanencia de 0.35 segundos. Entre los puntos (C) y (D) se tiene una diferencia de desplazamiento = 0.1 mm los cuales son ocasionados por la deformación que se presenta en la celda de carga en el momento del contacto entre ambas mordazas.

Figura 6.3: Desplazamiento del cilindro de sellado, medición con el sensor láser



Con la celda de carga se midió la fuerza en el sistema en el momento del sellado como se ve en la figura 6.4, además de mediar la fuerza también proporciona el tiempo de permanencia real durante el proceso, ver lo puntos (E) y (F) allí se detallan los tiempos durante los cuales el sistema de mordazas estuvo en contacto, tiempo de permanencia =  $P(F) - P(E) = 15.27 - 14.92 = 0.35$  segundos obsérvese que los tiempos de permanencia de la muestra # 10 coinciden con los tiempos de permanencia de la muestra # 12 en la figura 6.3. Además, la fuerza de contacto va aumentando de manera exponencial hasta alcanzar su punto máximo.

Figura 6.4: Desplazamiento del cilindro de sellado, medición con la celda de carga .



## 2. Segunda sección datos obtenidos a partir de la las pruebas de pelado en T con máquina de ensayos universales INSTRON 4204

Como se mencionó anteriormente, se realizaron 270 pruebas de pelado para los 27 experimentos correspondientes ver los resultados de las fuerzas de rotura en el Anexo IX, también se obtuvo el valor promedio para cada experimento el cual tiene 10 repeticiones, estos valores se pueden observar en el cuadro 6.1.

Mediante el análisis de la varianza se determinó el comportamiento de la resistencia en el sellado de acuerdo a las hipótesis establecidas anteriormente, además se obtuvieron los parámetros más influyentes en la calidad de un buen sellado para los experimentos realizados, ver el cuadro 6.2:

Cuadro 6.1: Promedio valores de resistencia de sellado

A:TEMP [°C]	Y: RESISTENCIA DE SELLADO [N/mm]								
	B: PRESIÓN DE SELLADO [psi]								
	160			180			200		
	C:TIEMPO[s]			C:TIEMPO[s]			C:TIEMPO[s]		
	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
125	1.655	1.636	1.756	1.562	1.642	1.746	1.730	1.690	1.628
150	2.032	2.035	1.854	1.950	2.226	1.886	2.129	2.207	2.277
175	1.842	2.134	2.053	2.071	2.074	2.263	2.048	1.999	2.152

Cuadro 6.2: Cuadro ANOVA para el análisis de las hipótesis

FACTORES	GL	SC	MC	Valor F	Valor segun tabla	Valor p	Conclusión
A	2	9.4477	4.723	104.75	3	0	Rechazada
B	2	0.4152	0.207	4.6	3	0	Rechazada
C	2	0.2762	0.138	3.06	3	0	Rechazada
A X B	4	0.7359	0.183	4.08	2.37	0.003	Rechazada
A X C	4	0.5963	0.149	3.31	2.37	0.012	Rechazada
B X C	4	0.1577	0.039	0.87	2.37	0.48	Aceptada
A X B X C	8	1.0719	0.133	2.97	1.94	0.003	Rechazada
Error	243	10.958	0.045				
Total	269	23.659					

- A = Temperatura de sellado [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- B = Presión de sellado [psi]
- C = Tiempo de permanencia [s]
- GL= Grados de libertad
- SC= Suma de cuadrados
- MC= Cuadrado medio
- Valor F= Estadístico de prueba
- Valor F según tabla puntos críticos al 5 % = Ver anexo VIII
- Valor p= Significancia observada

De acuerdo al cuadro 6.2 y el análisis de la varianza para determinar si una hipótesis es aceptada o rechazada se puede verificar de dos maneras. La primera comparando el valor p con la significancia prefijada para nuestro diseño el cual es  $\alpha = 0.05$ , por lo tanto si el Valor  $p < \alpha$  se rechaza la hipótesis y otra forma es si el Valor  $F >$  al Valor F según tabla, de igual manera se rechaza la hipótesis.

Por lo tanto se concluye que son significativos los factores: [A, B, C (Valor según tabla  $F_{0,05,2,243}=3$  )] además las combinaciones [[A X B], [A X C ](Valor según tabla  $F_{0,05,4,243}=2.37$  )] y [[A X B X C] (Valor según tabla  $F_{0,05,8,243}=1.94$  )] y no significativo el factor [[B X C ]en donde ( Valor  $p=0.48 > \alpha=0.05$  )]

De tal manera que se aceptan las siguientes hipótesis alternativas :

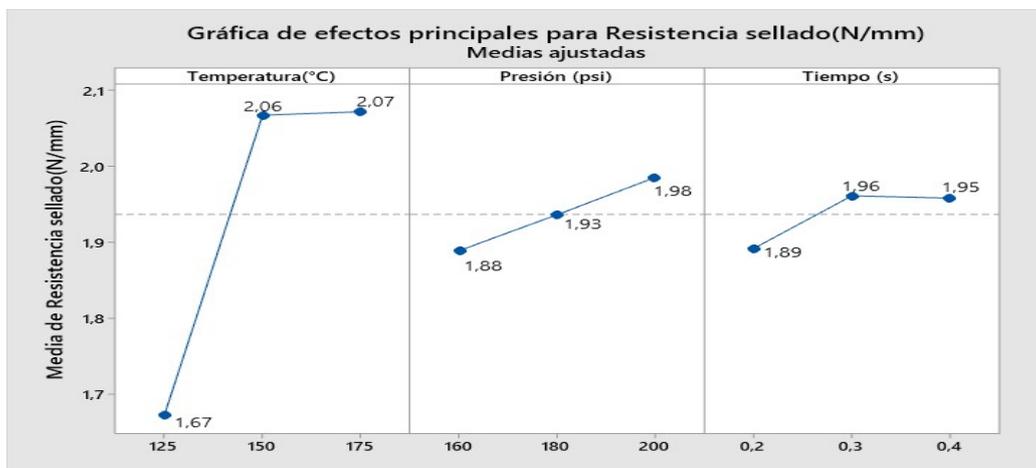
- $H_{1(A)}$ = Existe una relación entre la temperatura de las mordazas y la resistencia del sello.
- $H_{1(B)}$ = Existe una relación entre la presión de sellado y la resistencia del sello.

- $H_{1(C)}$  = Existe una relación entre el tiempo de permanencia de sellado y la resistencia del sello.
- $H_{1(AB)}$  = Existe una interacción entre la temperatura de las mordazas y la presión de sellado en la resistencia del sello.
- $H_{1(AC)}$  = Existe una interacción entre la temperatura de las mordazas y el tiempo de permanencia en la resistencia del sello.
- $H_{1(ABC)}$  = Existe una interacción entre la temperatura de las mordazas, la presión de sellado y el tiempo de permanencia en la resistencia del sello.

Con las anteriores hipótesis aceptadas se demuestra que los tres factores principales como la temperatura, presión y tiempo de permanencia si influye en la resistencia del sellado en las películas multicapa, además confirma la hipótesis principal de este trabajo.

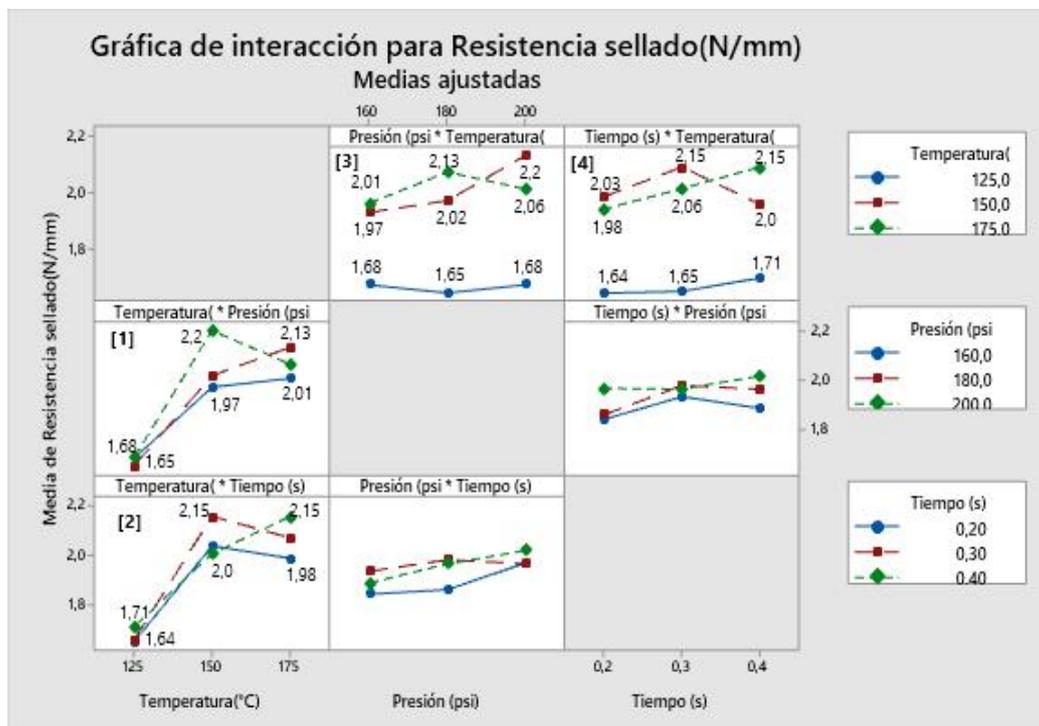
A continuación se analizaran las gráficas estadísticas obtenidas del diseño experimental factorial  $3^K$  información que fue procesada mediante el software Minitab 19 versión trial.

Figura 6.5: Efectos principales resistencia de sellado



En la figura 6.5 uno de los parámetros más influyente fue la temperatura con la cual se obtuvo una resistencia promedio en su punto máximo de 2.071 Newton, seguido por la presión con una fuerza promedio de 1.98 Newton y el tiempo de permanencia con una fuerza promedio de 1.96 Newton , ambos parámetros muy cercanos en sus valores y alejados en fuerza al parámetro de la temperatura.

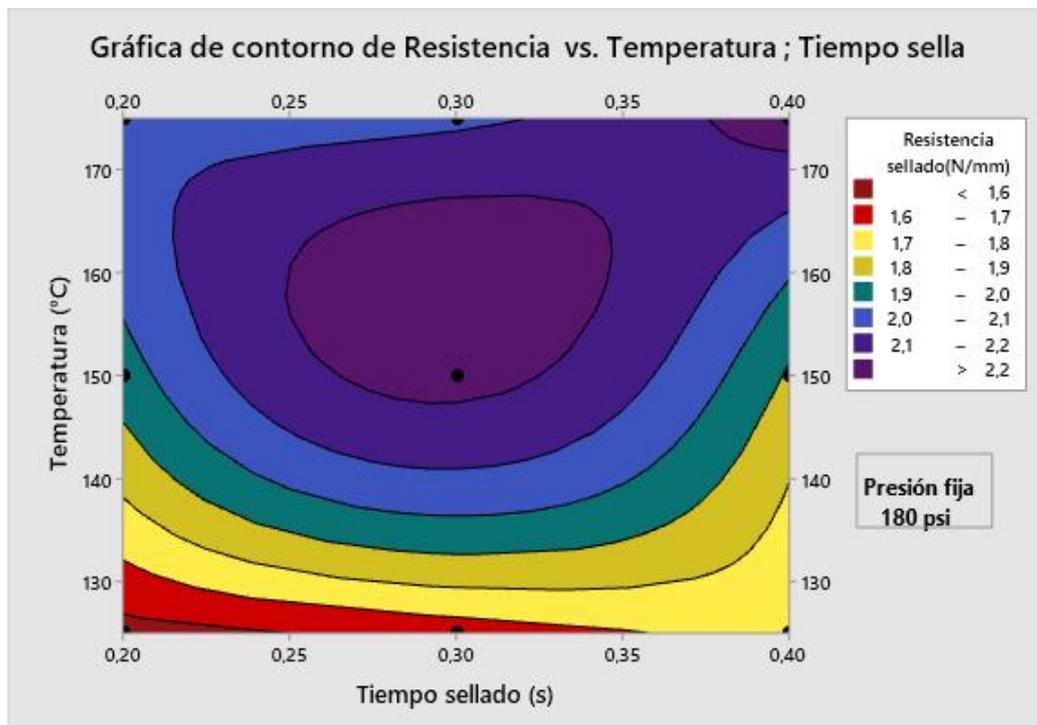
Figura 6.6: Interacción de los tres parámetros principales para la resistencia de sellado



En la figura 6.6 hay varios análisis para discutir como es el caso de la curva de color azul en las subfiguras (3) y (4) las cuales indican los tres parámetros de más bajo nivel, como temperatura=125, presión=160 y tiempo de permanencia=0.2 fueron los tres parámetros de menor incidencia con una resistencia de sellado de 1.68 hasta 1.71

Newton, también se observa como el comportamiento en cada una de las gráficas tiende a tener mas dispersión con temperaturas de 175 °C, presión de 200 psi y Tiempo de permanencia de 0.4 s.

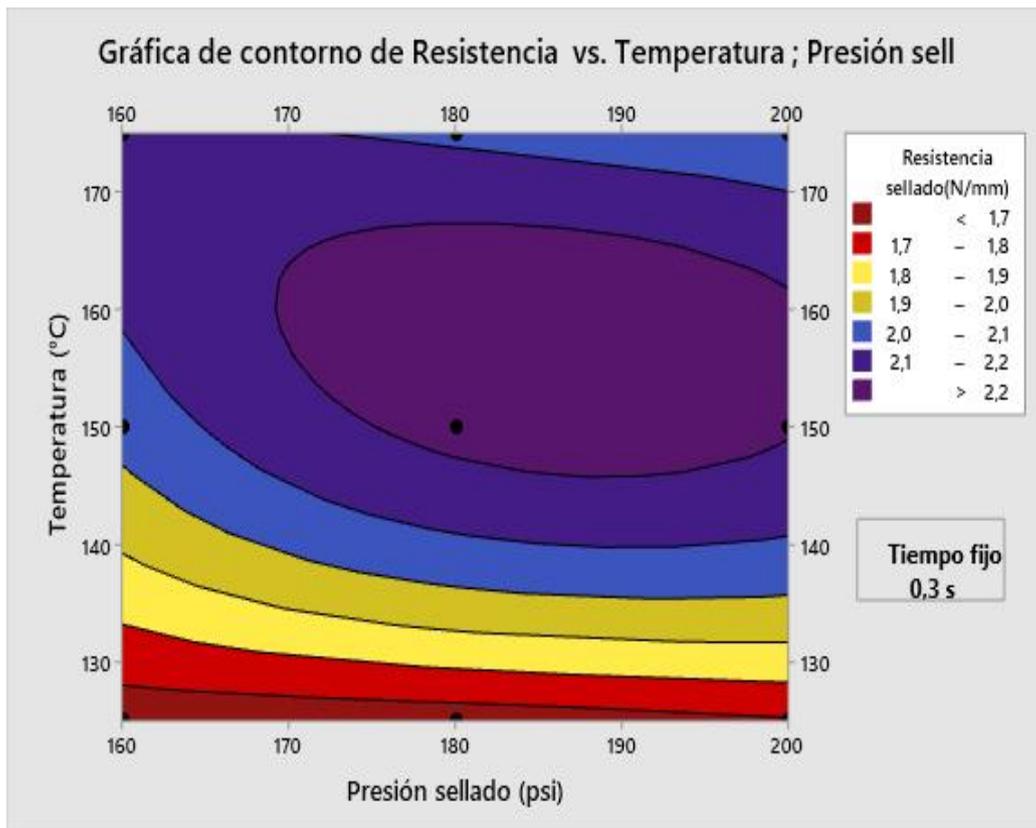
Figura 6.7: Contorno resistencia de sellado interacción entre temperatura y tiempo de sellado



En el sellado térmico de una película lo ideal es tener una amplia ventana de sellado. La figura 6.7 de contorno de la temperatura y el tiempo a una presión fija de 180 (psi), da como resultado una resistencia de sellado mayor a una temperatura y un tiempo de sellado intermedios. Con una presión de sellado fija a 180 (psi), se tiene una resistencia de sellado alta de 2.2 (N/mm) en la cual se tienen 2 opciones. A un tiempo de sellado de 0.25 (s) con temperatura superior a 150 (°C), así como a mayor tiempo de sellado de 0.30

(s) con temperatura por debajo de 150 (°C). La resistencia de sellado más alta es de 2.2 (N/mm) se obtiene con una combinación (temperatura 148 (°C), 0.30 (s) y presión de 180 (psi). Con un tiempo de sellado por debajo de 0.20 (s), la difusión de los extremos de la cadena no es suficiente, [4] por lo que la resistencia de sellado varía, además a un tiempo de sellado de 0.4 (s) y una temperatura por encima de 170 (°C) tiene un pico de resistencia de sellado alta de 2.2 (N/mm), pero es muy pequeña así que no se tiene en consideración.

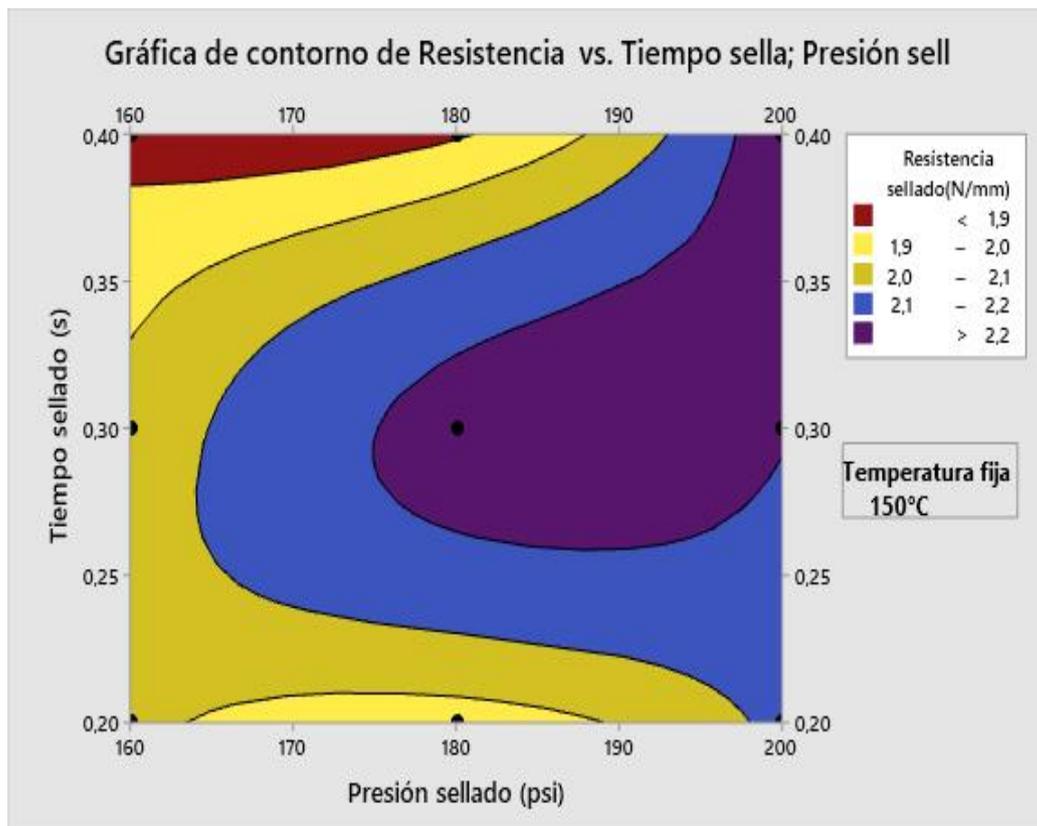
Figura 6.8: Contorno resistencia de sellado interacción entre temperatura y Presión de sellado



En la figura 6.8 de contorno de la temperatura y presión

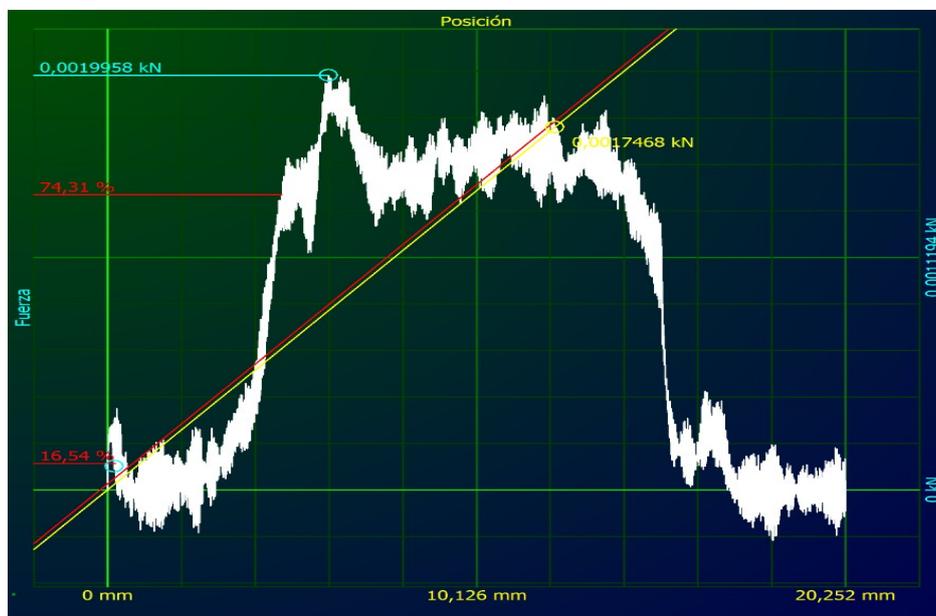
de sellado a un tiempo de sellado fijo de 0.3 (s), da como resultado una resistencia de sellado mayor a una temperatura y una presión de sellado intermedios. Con un tiempo de sellado fijo a 0.3 (s), se tiene una resistencia de sellado alta de 2.2 (N/mm) en la cual se tienen 2 opciones. A una presión de sellado de 170 (psi) con temperatura superior a 150 (°C), así como a mayor presión de sellado de 190 (psi) con temperatura por debajo de 150 (°C). La resistencia de sellado más alta es de 2.2 (N/mm) se obtiene con una combinación (temperatura 148 (°C), 180(psi) y tiempo de 0.3 (s).

Figura 6.9: Contorno resistencia de sellado interacción entre tiempo y presión de sellado



La figura 6.9 de contorno del tiempo de sellado y presión de sellado a una temperatura fija de 150 (°C), da como resultado una resistencia de sellado mayor a un tiempo y una presión de sellado intermedios. El análisis es similar al de las graficas 6.7 y 6.8 relacionado con los rangos, pero se puede observar que el comportamiento en el centro de la grafica es diferente a las dos graficas anteriores 6.7 y 6.8 , la resistencia de sellado se encuentra más dispersa y recordemos que mediante el análisis de la varianza en el cuadro ANOVA 6.2 una de las hipótesis aceptadas fue la interacción entre la presión de sellado y el tiempo de permanencia (sellado) en la resistencia del sello es nula [B XC], por lo tanto esta grafica confirma el enunciado anterior.

Figura 6.10: Gráfica durante la prueba de peeling en máquina de ensayos universales INSTRON 4204, experimento #23 muestra #3



Se obtuvieron 270 imágenes para las 270 muestras, en la

figura 6.10 se ilustra una de las pruebas de peeling, se observa que la máxima fuerza de rotura es de 1.99 Newton, el 74% de las imágenes que se obtuvieron tienen una similitud y se parecen a las gráficas que se encuentran en la norma ASTM F88 [11] y en otros trabajos de investigación [23].

### 3. Tercera sección imágenes procesadas a través de microscopía estereoscópica y microscopía electrónica de barrido (SEM).

Como se mencionó, las imágenes en algunas muestras fueron obtenidas después de realizarse las pruebas destructivas en la máquina de ensayos mecánicos de tracción INSTRON 4204, las siguientes fueron tres muestras obtenidas y analizadas en el microscopio estereoscópico NIKON SMZ800:

Figura 6.11: Experimento #1 muestra #3

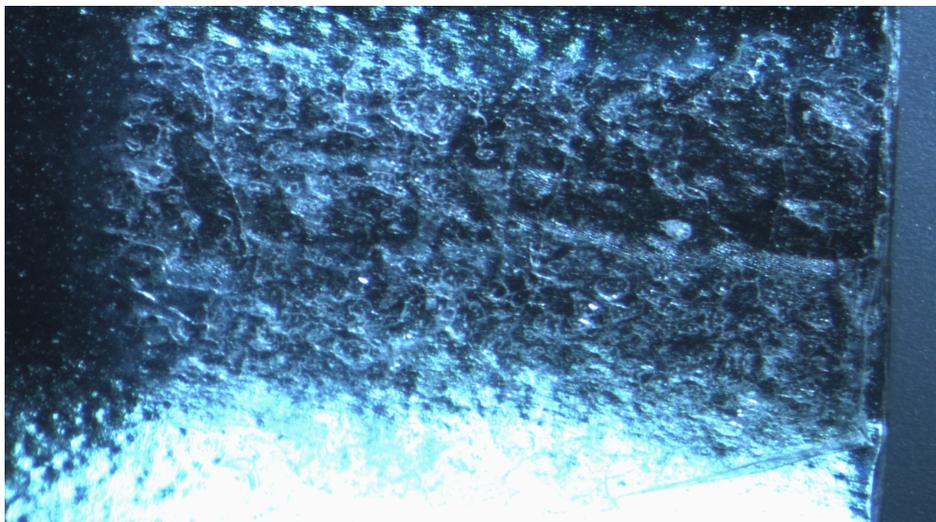


Figura 6.12: Experimento #14 muestra #3

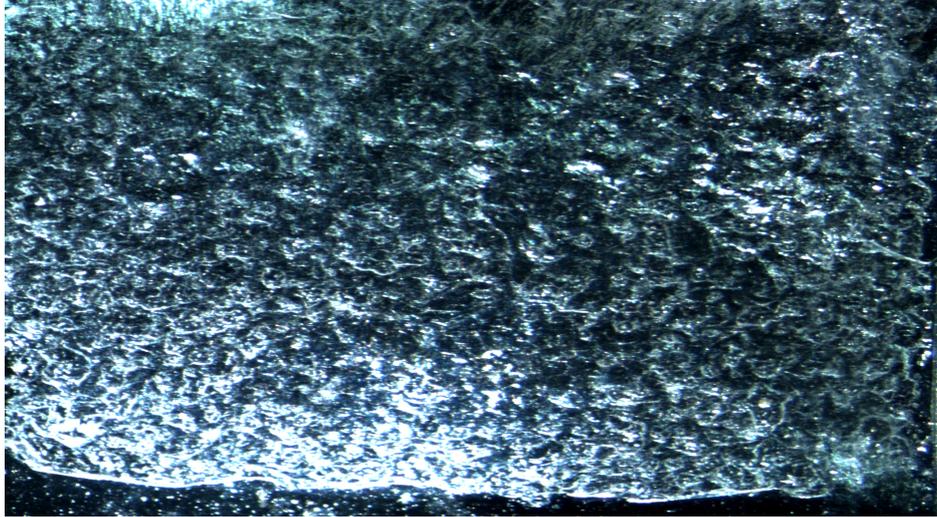
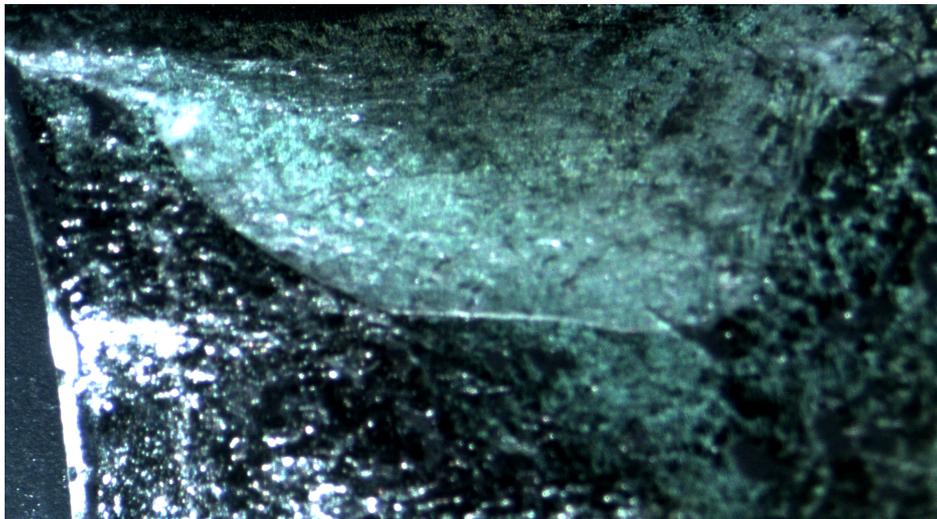


Figura 6.13: Experimento #27 muestra #9

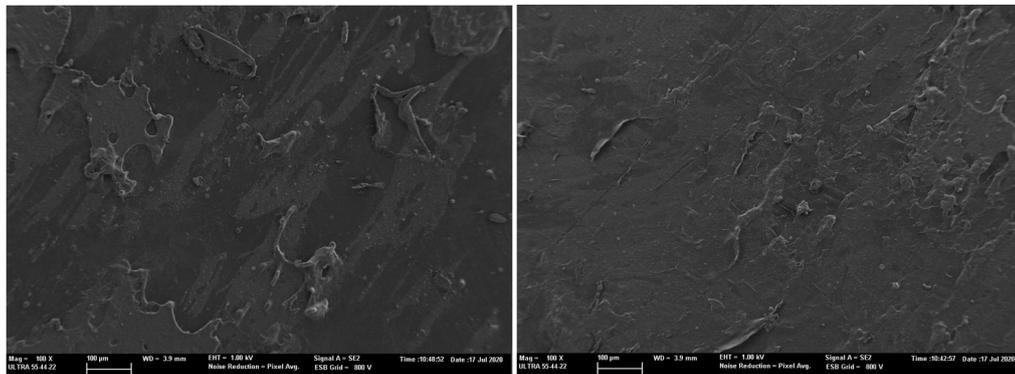


En las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se observan las imágenes procesadas con el microscopio estéreo a 10 aumentos 10X, los experimentos #1 y #14 dejan entre ver una compactación más junta del área adhesiva sin mostrar signos de deslaminación, además el experimento #1 fue

sellado a  $125^{\circ}\text{C}$  y el experimento #14 fue sellado a  $150^{\circ}\text{C}$  de temperaturas respectivamente, el experimento #27 de la figura 6.13 expone una morfología más cristalina y se puede ver que hubo cierta deslaminación en la parte superior de la imagen. El experimento #27 fue sellado a una temperatura de  $175^{\circ}\text{C}$ .

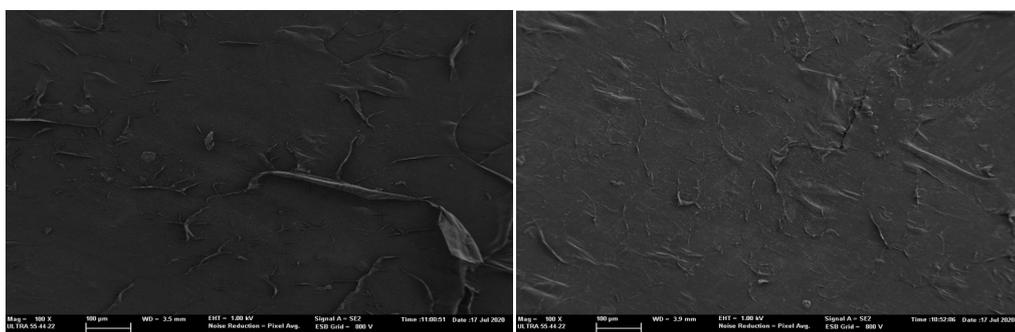
También se obtuvieron imágenes en microscopia electrónica de barrido de campo (FESEM) a continuación se muestran las más importantes:

Figura 6.14: Experimento #9 muestra #19



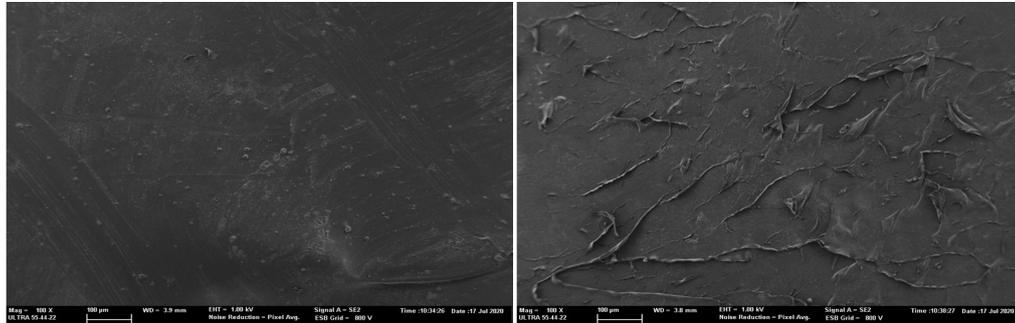
(a) Lado marcado de la muestra (b) Lado sin marcar de la muestra

Figura 6.15: Experimento #14 muestra #6



(a) Lado marcado de la muestra (b) Lado sin marcar de la muestra

Figura 6.16: Experimento #20 muestra #19



(a) Lado marcado de la muestra      (b) Lado sin marcar de la muestra

El experimento #9 fue sellado con un parámetro de temperatura de  $125^{\circ}\text{C}$ , se observa en la figura 6.14 como el adhesivo en ambos lados está disperso y plastificado a diferencia de la figura 6.15 con el experimento #14 que fue sellado con un parámetro de temperatura de  $150^{\circ}\text{C}$  en el cual se empieza a notar algunas crestas del adhesivo o rasgaduras similares al experimento #20 en el lado b en la figura 6.16, el cual fue sellado con un parámetro de temperatura de  $175^{\circ}\text{C}$ , estas imágenes nos muestran la morfología y el comportamiento a diferentes niveles de temperatura y como empieza a transformarse el adhesivo, cada una de las imágenes se realizaron con un aumento de 100 X por medio de (FESEM) con electrones secundarios (SE2) a 1KV de potencia.

# Capítulo 7

## Conclusiones

- El diseño y construcción del banco de pruebas para el sellado continuo de películas multicapa se pudo realizar y de esta forma se ajustaron los parámetros principales y se obtuvo una gran cantidad de información de las muestras selladas gracias a la instrumentación utilizada.
- Con los principios de diseño se visualizó y se establecieron unos diseños conceptuales en la medición de la fuerza en el momento del sellado lo cual se aplicó y se ajustó en el banco de pruebas para, de esta forma, obtener un parámetro de presión que según los resultados del diseño de experimentos si afecta la resistencia en el sellado, esto puede ser a que se implementaron parámetros de presión altos de 160, 180 y 200 psi.
- La medición del tiempo de permanencia en el sellado se logró por medio de la instrumentación con la célula de carga y el sensor láser, con estos dos elementos se comprueba el tiempo real de permanencia para obtener información más verídica y sin demasiado desfase con lo ideal.
- Los tres parámetros principales como la temperatura, tiempo de permanencia y presión generaron un efecto dentro de la resistencia del sellado en la película multicapa

de polipropileno biorientado, lo cual pudo ser analizado mediante el diseño experimental en el contexto científico.

- A partir del diseño de experimentos y las gráficas obtenidas de manera estadística en la figura 6.6 (TIEMPO DE PERMANENCIA X TEMPERATURA ),(PRESIÓN X TEMPERATURA ),( TEMPERATURA X PRESIÓN X TIEMPO DE PERMANENCIA) se obtuvo una fuerza promedio por encima de 2 hasta 2.5 Newton , mientras que la (PRESIÓN X TIEMPO DE PERMANENCIA ) da como resultado una fuerza promedio inferior a 2 Newton, estos datos solo indican con cuales parámetros se obtuvieron mayores fuerzas.
- Como se mencionó en la conclusión anterior los datos obtenidos y la interpretación de las gráficas nos indican los rangos de fuerza que se obtuvieron a través del diseño experimental , pero para comprender mejor con cuales parámetros se logró tener mejor calidad en la resistencia del sellado, es importante ver las imágenes obtenidas de las microscopias realizadas las cuales muestran que con temperaturas de sellado entre 125 °C y 150°C se obtuvieron morfologías más compactas en la adhesión , mientras que con temperatura entre los 160°C y 175 °C hubo des laminación y mucha cristalización lo cual indica un fenómeno de cohesión.
- Al activarse el cilindro neumático el movimiento de este corta el flujo de aire ocasionando perturbaciones, es decir influyen en el cambio de la temperatura en la superficie de las mordazas .
- Con la mordaza inferior fija los cambios de temperatura fueron de menor proporción.

- El controlador PID auto sintonizado corrige rápidamente perturbaciones, además el consumo de energía en los elementos finales se reducen a un 31 % cuando las señales empiezan a estabilizarse, la medición se realizó mediante un amperímetro digital.
- La mordaza inferior adiciona temperatura a la mordaza superior cuando se está realizando el sellado en la película.
- Con el tipo de mordazas que se diseñaron e implementaron en el banco de prueba continuo, se observó que por ser de dimensiones de 13.55mm x 8.75 mm x 7 mm, se tiene una masa pequeña y áreas de contacto reducidas lo cual se aprovechó al máximo para que las perturbaciones del ambiente no ocasionaran demasiados gradientes en el instante del sellado.
- Tener el banco con un movimiento automático ayuda a tener más repetibilidad del proceso pero ocasiona desgaste en los elementos finales de sellado como las mordazas, lo cual se debe considerar en el momento del diseño.
- Para finalizar el desarrollo de todo este trabajo cumplió con los objetivos propuestos y lo que se deseaba alcanzar, se obtuvo información muy valiosa para próximas investigaciones y la programación e instrumentación se realizó de una manera muy técnica, se aplicaron conceptos de metodologías en el diseño y construcción de prototipado y principios de ingeniería, el conjunto de todos los resultados obtenidos desde lo estadístico hasta las pruebas de laboratorio, microscopias, demuestran que la mejor calidad de sellado se obtuvo con los parámetros de nivel intermedio y que la presión si es importante medirla cuando se trabaja con valores relativamente mayores de 160 psi, además no solo se debe analizar el sistema de sellado como

un solo elemento, si no que se deben de tener en cuenta todos los sistemas que componen una línea en el sellado de plásticos, desde donde está montado el material hasta el corte o apilamiento final, todo es un conjunto y no se deben de aislar por separado por que un sistema depende de otro.

## 7.1. Trabajo a futuro sugerido

Se recomienda realizar y desarrollar los siguientes puntos para que la investigación con este tipo de bancos automáticos de sellado siga arrojando información y nuevos descubrimientos con estos tipos de materiales plásticos y su comportamiento:

- Implementar la propuesta dos y tres de diseños conceptuales que se encuentran en la sección 4.3.4 para medir la fuerza en nuevos bancos para sellado y de esta manera obtener parámetros importantes como el tiempo de permanencia y la presión de sellado en el momento que se produce el contacto de las mordazas con las películas multicapa.
- Para tener un mejor control de la tensión en la película se propone diseñar un sistema mecánico con un control de tensión en el desbobinador donde está el rollo de material a sellar.
- Investigar otro tipo de materiales conductores de calor para la fabricación y pruebas con mordazas de sellado.

## 7.2. Lecciones aprendidas

- Con el trabajo en equipo aprendí a escuchar a mis compañeros, a respetar sus ideas y a debatir en grupo lo

cual fue fundamental para alcanzar los objetivos del trabajo de investigación.

- Los ensayos de prototipado, diseño, montaje y desmontaje fueron de gran importancia para mejorar el diseño final.
- Se conocieron limitaciones como no haber diseñado y construido el sistema de sellado y de peeling en un solo montaje, el aislamiento de la electricidad en las mordazas. Todo lo anterior cuando se ejecuta el diseño presentado.
- Realizar un diseño de experimentos sirvió para realizar los ensayos de forma correcta y organizada aplicando el método científico para concluir el trabajo de investigación.
- Se adquirieron habilidades en la programación como la adquisición de datos mediante un bloque productor-consumidor, puesta a punto y configuración del servomotor de arrastre, ajuste del control PID, lo anterior fue mediante el software LabVIEW® y N cRIO 9030.
- El ajuste y puesta a punto como nivelar un banco, la coordinación de movimientos, el ajuste de los tiempos mecánicos, la orientación del material la velocidad de funcionamiento es una labor de constancia, paciencia y dedicación.
- Se aprendió a controlar y programar máquinas de ensayos mecánicos, con sus respectivas celdas de carga y tipo de prueba mecánica.

# Bibliografía

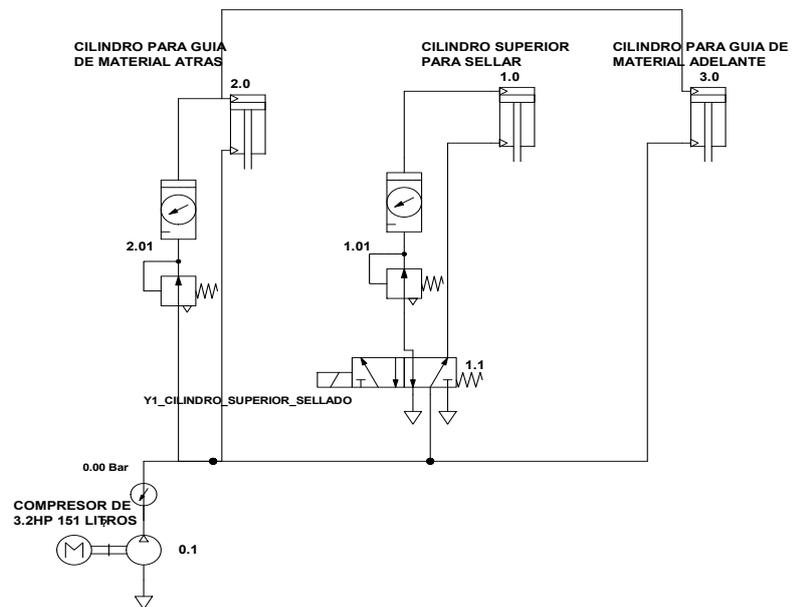
- [1] Hishinuma, K. (2007). Heat Sealing Technology and Engineering for Packing: Principles and Applications. DEStech Publications, Inc., 1er edición.
- [2] Uribe, J., Ramirez, A., Corona, P., & Mendoza, C. (2017). Problemáticas en las tecnologías de sellado. Proceso de diseño como solución. Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM.
- [3] Morris, B. (2017). The Science and technology of flexible packaging: Multilayer Films from Resin and Process to End Use. William Andrew, 1er edición.
- [4] Theller, H. W. (1989). Heatsealability of flexible web materials in hot-bar sealing applications. *J. Plastic Film & Sheeting*, 5:66-93.
- [5] Nicastro LC, Paik JS, Keown RW, et al. Change in crystallinity during heat sealing of cast polypropylene film. *J Plast Film Sheeting* 1993J. *Plast Film Sheet*.
- [6] Quezada, A. (2012). Obtención de los parámetros de sellado en un empaque resellable. Tesis, Universidad Nacional Autónoma De México, Maestría en Diseño Mecánico.
- [7] Appglobe. Polipropileno biorientado (BOPP). Recuperado [www.apgglobe.com](http://www.apgglobe.com)

- [8] Aiyengar ,R.,Divecha,J. (2012). Experimental and statistical analysis of the effects of the processing parameters on the seal strength of heat sealed, biaxially oriented polypropylene film for flexible food packaging applications. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, (1), pp.1-13
- [9] Meka, P. & Stehling, F. C. Heat sealing of semicrystalline polymer films. I. Calculation and measurement of interfacial temperatures: Effect of process variables on seal properties. *J. Appl. Polym. Sci.* 51, 89-103 (1994).
- [10] Stehling, F. C. & Meka, P. Heat sealing of semicrystalline polymer films. II. Effect of melting distribution on heat-sealing behavior of polyolefins. *J. Appl. Polym. Sci.* 51, 105-119 (1994).
- [11] ASTM F88/ F88-15. (2015).: Standard Test for Seal Strength of Flexible Barrier Mate-rials. ASTM International. West Conshohocken PA. Recuperado de: <https://www.astm.org/Standards/F88.htm>, el día10 de septiembre de 2017.
- [12] Navarro, I.(2018). Diseño de Experimentos y Análisis de Varianza ANOVA.Material de apoyo UNAM.
- [13] Gutiérrez, H. (2009). Análisis y diseño de experimentos. Mc Graw Hill., 2da edición.
- [14] Rockwell Automation.(2013). Bag Making Machine Reduce Design Time and Improve Performance for Bag Making Manufacturers
- [15] Karl T. Ulrich & Steven D. Eppinger(2013). DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS.Mc Graw Hill.,5ta edición

- [16] ] Pahl and Beitz(2007).Engineering Design: A Systematic Approach. Springer., 3ra edición.
- [17] Web.Matriz Priorización,Recuperado.[https://www.researchgate.net/publication/328979923Matriz de Priorizacion](https://www.researchgate.net/publication/328979923Matriz_de_Priorizacion)
- [18] Gómez,J,(1993).Inspección por microscopía electrónica en tiempo real de procesos de alta temperatura en W cables fijos.American Institute of Physics,p.3.
- [19] Yunus A. Cengel (2007) “TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA ”.Principios básicos de transferencia de calor y ejemplos de ingeniería en el mundo real.Mc Graw Hill.,3ra edición
- [20] Web.Wire,Recuperado.<https://www.shoptronica.com/hilos-de-cobre-mallas/3297-cables-de-nicron-8944748433794.html>.
- [21] Web.Recuperado.<https://www.heatersplus.com/nichrome.html>.
- [22] KIT L. YAM. (2009). Sealing, Heat. Wiley Encyclopedia of packaging technology. 3rd ed. John Wiley & Sons, 93-95.
- [23] Nikhil P, David M. Parks, Alexander H. Slocum, and Bernhardt L. Trout. (2016). Enhancing the Performance of the T-Peel Test for Thin and Flexible Adhered Laminates. Scientific Instruments, (87), pp.1-24,

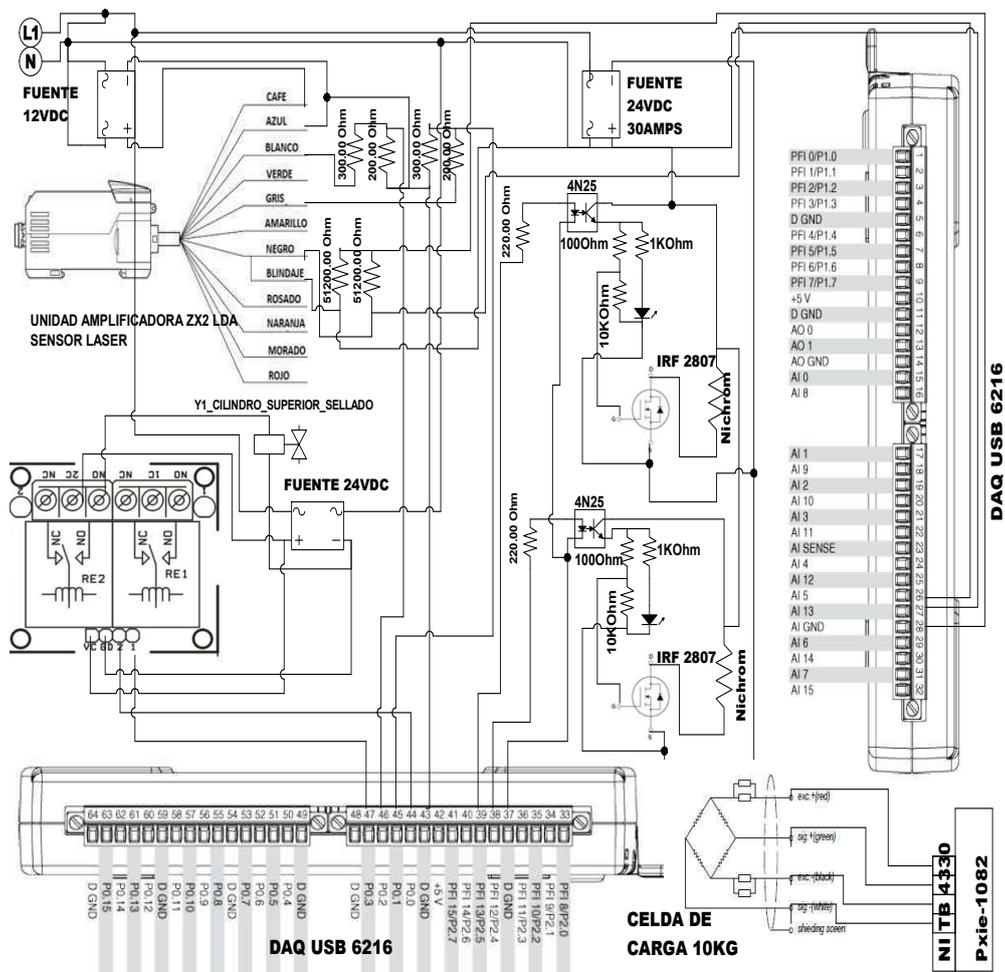
# Anexos A

## Anexo I: Plano electroneumático



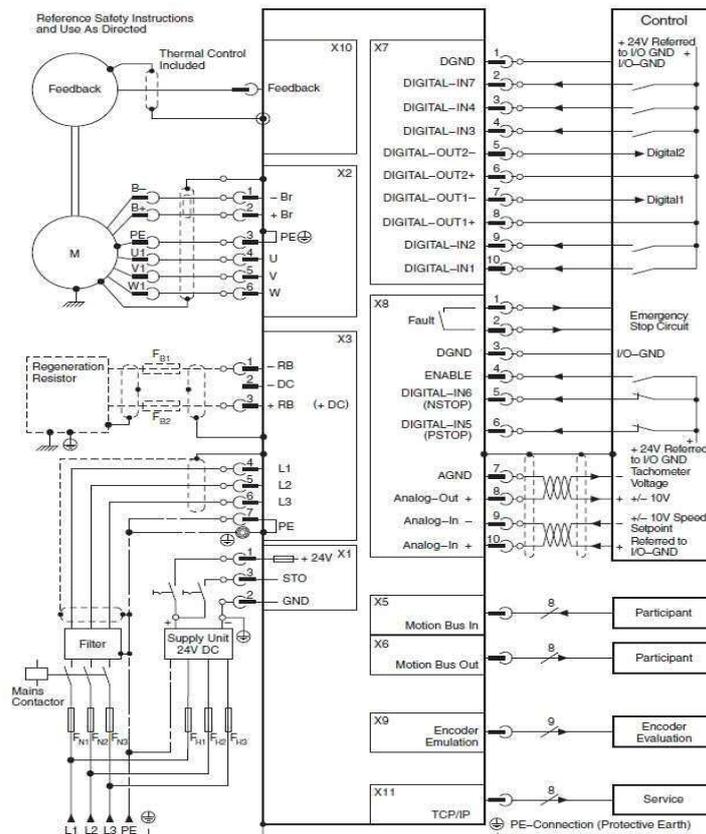
# Anexos B

## Anexo II: Plano eléctrico



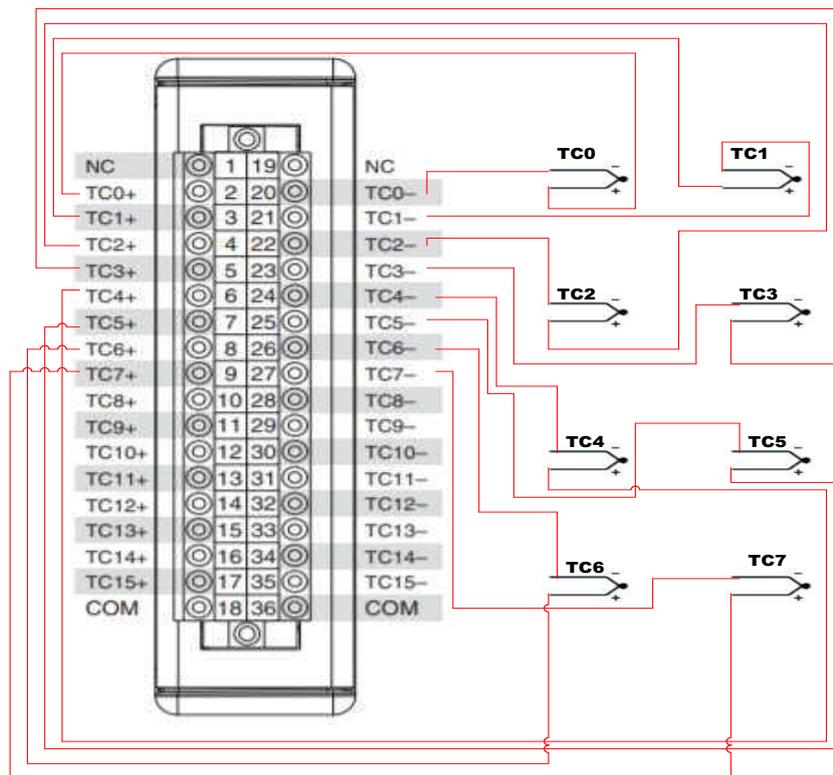
# Anexos C

## Anexo III: Plano Servo pack kollmorgen



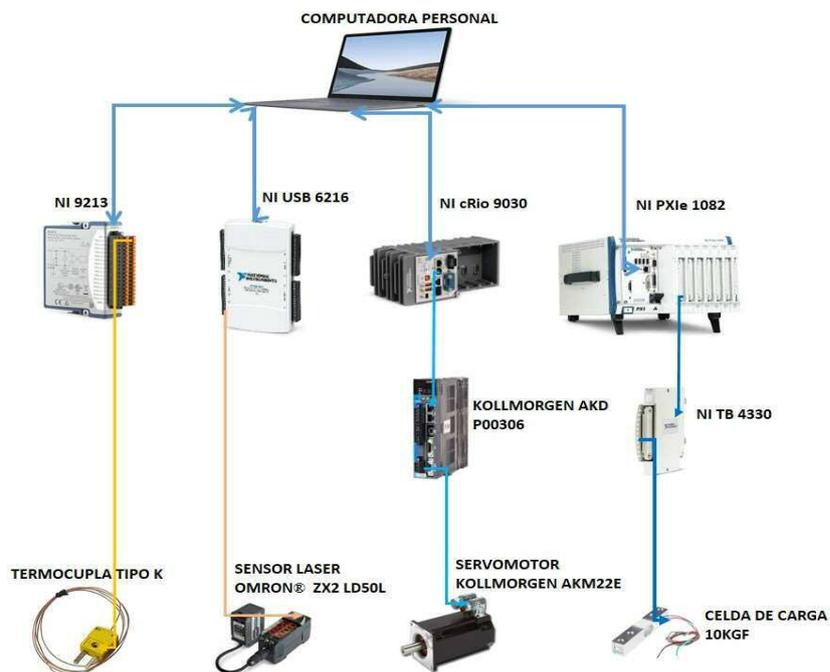
# Anexos D

## Anexo IV: Plano termopares K



# Anexos E

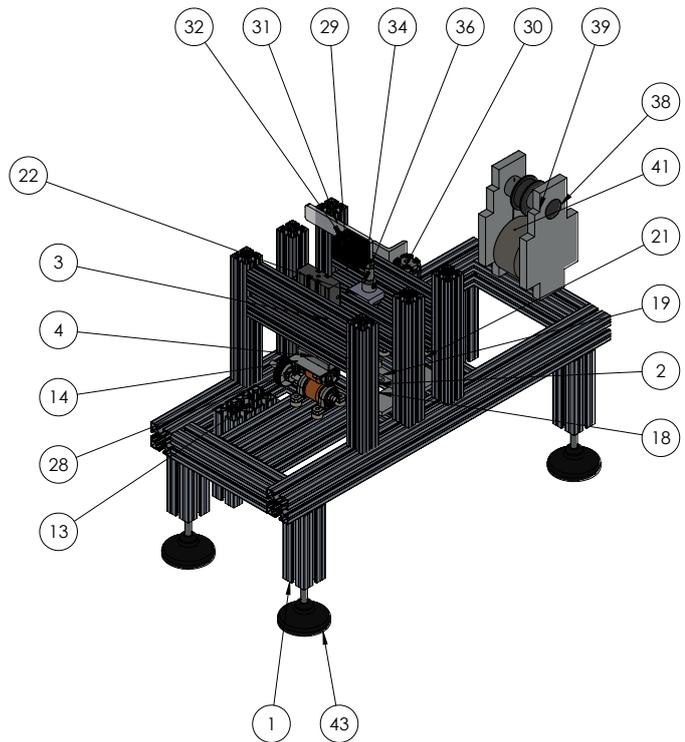
## Anexo V: Diagrama Adquisición de información



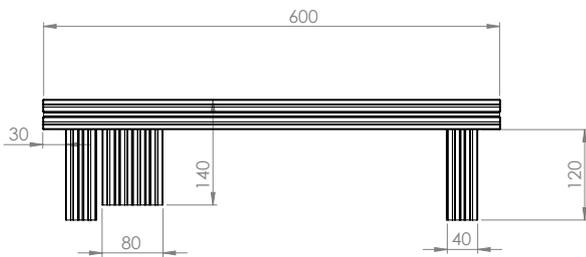
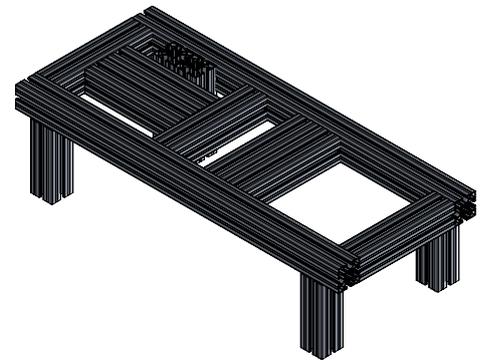
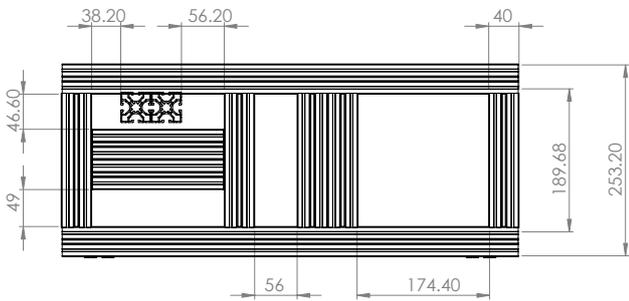
# Anexos F

Anexo VI: Planos mecánicos del banco de sellado continuo

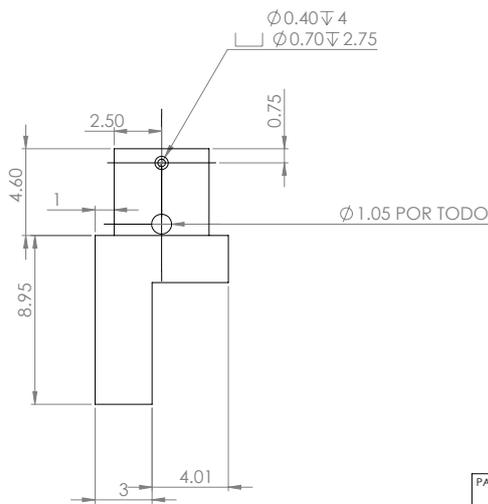
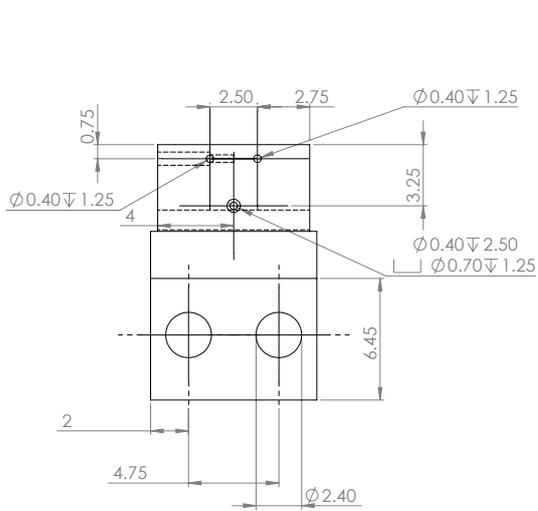
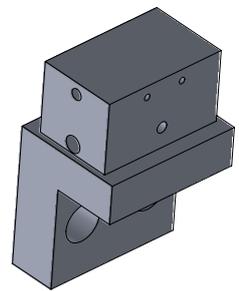
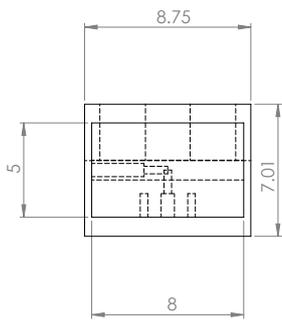
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	ESTRUCTURA	1
2	SOPORTE CILINDRO SERVO	1
3	32687 DPZ-16-25-P-A--(Z)	1
4	32687 DPZ-16-25-P-A--(K)	1
5	150928 ZBS-5	4
6	DIN-439-B - M5(F)	1
7	Hexagon bolt DIN 933 - M5x16	1
8	_AKM21X_ACBNR_00_part1_2	1
9	_akm_conn_conn_4	2
10	_conn_connector_6	2
11	SOPORTESERVOMOTOR	1
12	POLEA GT2 DE 30 DIENTES	1
13	BASE CHUMACERAS	2
14	CHUMACERA KP08	8
15	608RS	8
16	GUIA DE CAUCHO SECUNDARIA	3
17	CAUCHO EJE	4
18	PLATINA CELDA DE CARGA	1
19	CELDA DE CARGA 10KGF	1
20	SOPORTE NYLON INFERIOR	1
21	SOPORTE CILINDROS SELLADO	1
22	BASE PORTAMORDAZA SUPERIOR	1
23	PORTAMORDAZA SUPERIOR	1
24	GUIA BASE PORTAMORDAZA	1
25	SOPORTE NYLON SUPERIOR	1
26	SOPORTES CHUMACERAS	8
27	GUIA DE CAUCHO PRINCIPAL	1
28	POLEA GT2 DE 60 DIENTES	1
29	SOPORTE CILINDROS PRESION	1
30	SOPORTECILINDROGUIAATRAS	1
31	SOPORTE SENSOR LASER	1
32	SENSOR LASER ZX2 LD50L	1
33	010_011_D_3	1
34	010_011_D_7	1
35	010_011_D_9	1
36	010_011_D_11	1
37	BASE GUIA SENSOR LASER	1
38	SOPORTES LATERALES DESBOBINADOR	2
39	RODILLO DESBOBINADOR	1
40	GUIA NUEVA MATERIAL ADELANTE	1
41	CONTRAPESO DE 1KG	1
42	CUERDA PARA CONTRAPESO	1
43	NIVELADOR DE CAUCHO	4
44	Pieza1^ENSAMBLAJEPRINCIPALBANCOSELLADO	1
45	MORDAZASOK	2



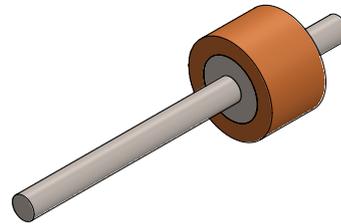
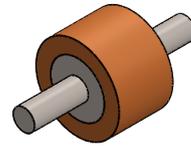
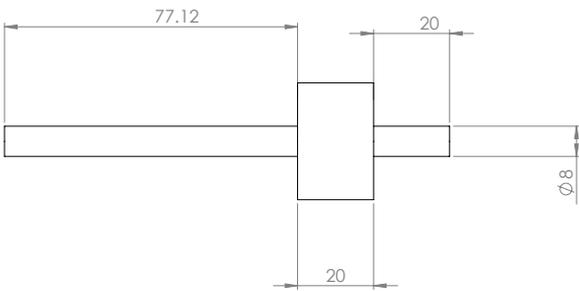
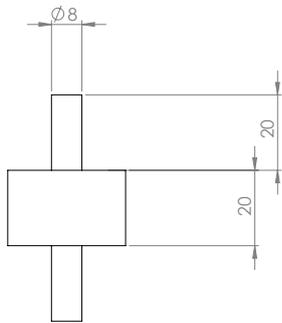
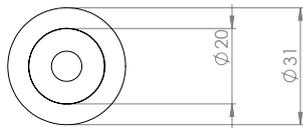
PARTE/PRODUCTO:			
CONJUNTO BANCO PARA SELLADO			
EQUIPO/PROYECTO:			
ENSAMBLE PRINCIPAL BANCO DE SELLADO			
PROYECCION:	TOLERANCIAS:	MATERIAL: Aluminio, acero, caucho	
LINEALES: $\pm 0.10$	ANGULARES: $\pm 0.10$	CANTIDAD: 1	DIBUJO: Manuel Ocampo
MEDIDAS: mm	TRATAMIENTO/ACABADO:	DISÑO: Manuel Ocampo	
ESCALA: 1:5	FECHA: 16/04/2020	REVISO: Manuel Ocampo	
	CODIGO:	APROBO: Manuel Ocampo	



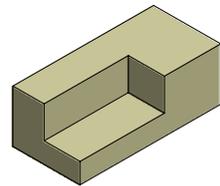
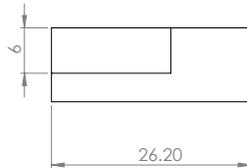
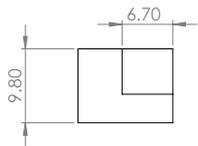
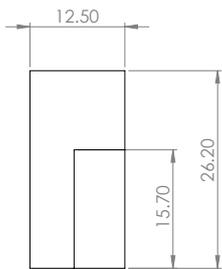
PARTE/PRODUCTO: ESTRUCTURA PRINCIPAL			
EQUIPO/PROYECTO: ENSAMBLE PRINCIPAL BANCO DE SELLADO			
PROYECCION: 	TOLERANCIAS: LINEALES: $\pm 0.10$ $\pm 0.10$ ANGULARES: $\pm 0.10$	MATERIAL: ALUMINIO	CANTIDAD: 1
	MEDIDAS: (mm)	TRATAMIENTO/ACABADO	DISEÑO: MANUEL OCAMPO
	ESCALA: 1:5		REVISO: MANUEL OCAMPO
	FECHA: 16/04/2020	CODIGO:	APROBO: MANUEL OCAMPO



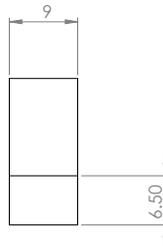
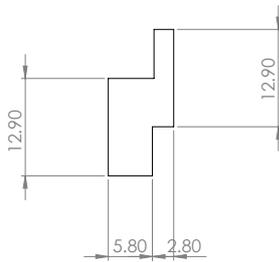
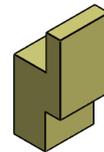
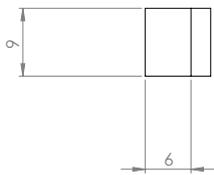
PARTE/PRODUCTO:				MORDAZA	
EQUIPO/PROYECTO:				ENSAMBLE PRINCIPAL BANCO DE SELLADO	
PROYECCION:	TOLERANCIAS	MATERIAL:	ALUMINIO 6061	CANTIDAD:	1
	LINEALES: $\pm 0.10$	ANGULARES: $\pm 0.10$		DIBUJO:	MANUEL OCAMPO
	MEDIDAS:	mm	TRATAMIENTO/ACABADO	DISENO:	MANUEL OCAMPO
	ESCALA:	5:1		REVISO:	MANUEL OCAMPO
	FECHA:	16/04/2020	CODIGO:	APROBO:	MANUEL OCAMPO



PARTE/PRODUCTO: RODILLOS ALIMENTADORES					
EQUIPO/PROYECTO: ENSAMBLE PRINCIPAL BANCO DE SELLADO					
PROYECCION: 	TOLERANCIAS		MATERIAL: CAUCHO NATURAL		
	LINEALES: $\pm 0.10$	ANGULARES: $\pm 0.10$	CANTIDAD: 1	DIBUJO:	MANUEL OCAMPO
	MEDIDAS: mm	TRATAMIENTO/ACABADO		DISENO:	MANUEL OCAMPO
	ESCALA: 1:1			REVISO:	MANUEL OCAMPO
	FECHA: 16/04/2020	CODIGO:		APROBO:	MANUEL OCAMPO



PARTE/PRODUCTO: SOPORTE PARA MORDAZA INFERIOR			
EQUIPO/PROYECTO: ENSAMBLAJE BANCO DE SELLADO			
PROYECCION: 	TOLERANCIAS: LINEALES: $\pm 0.10$ ANGULARES: $\pm 0.10$	MATERIAL: NYLON CANTIDAD: 1	DIBUJO: MANUEL OCAMPO
	MEDIDAS: mm	TRATAMIENTO/ACABADO	DISÑO: MANUEL OCAMPO
	ESCALA: 2:1		REVISO: MANUEL OCAMPO
	FECHA: 02/05/2020	CODIGO:	APROBO: MANUEL OCAMPO



PARTE/PRODUCTO:			
SOPORTE PARA MORDAZA SUPERIOR			
EQUIPO/PROYECTO:			
ENSAMBLAJE BANCO DE SELLADO			
PROYECCION: 	TOLERANCIAS:	MATERIAL: NYLON	
	LINEALES: $\pm 0.10$	ANGULARES: $\pm 0.10$	CANTIDAD: 1
	MEDIDAS: (mm)	TRATAMIENTO/ACABADO	DISEÑO: MANUEL OCAMPO
	ESCALA: 2:1		REVISO: MANUEL OCAMPO
	FECHA: 02/05/2020	CODIGO:	APROBO: MANUEL OCAMPO

# Anexos G

## Anexo VII: Máquina de ensayos mecánicos INSTRON 4204



# Anexos H

## Anexo VIII: Tabla puntos críticos al 5% de la distribución F

**Tabla A4** Puntos críticos al 5% de la distribución  $F$ ,  $P(X > x) = 0.05$ .

		Grados de libertad en el numerador																											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30	40	50	75	100	∞					
Grados de libertad en el denominador	1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	248	249	250	251	252	253	253	254					
	2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5	19.5				
	3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.58	8.56	8.55	8.53					
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	5.68	5.66	5.63					
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.44	4.42	4.41	4.37					
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.75	3.73	3.71	3.67					
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.32	3.29	3.27	3.23					
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.02	2.99	2.97	2.93					
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.80	2.77	2.76	2.71					
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	2.60	2.59	2.54					
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.47	2.46	2.41					
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	2.37	2.35	2.30					
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.21					
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	2.21	2.19	2.13					
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.18	2.14	2.12	2.07					
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	2.09	2.07	2.01					
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.08	2.04	2.02	1.96					
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	2.00	1.98	1.92					
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	1.96	1.94	1.88					
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	1.93	1.91	1.84					
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.90	1.88	1.81					
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.91	1.87	1.85	1.78					
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.88	1.84	1.82	1.76					
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.86	1.82	1.80	1.73					
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.14	2.11	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.80	1.78	1.71					
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.82	1.78	1.76	1.69					
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.10	2.08	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.81	1.76	1.74	1.67					
	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.79	1.75	1.73	1.65					
	29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.08	2.05	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.77	1.73	1.71	1.64					
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.76	1.72	1.70	1.62					
	40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.97	1.95	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.66	1.61	1.59	1.51					
	60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.89	1.86	1.84	1.75	1.69	1.65	1.59	1.56	1.51	1.48	1.39					
	100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.89	1.85	1.82	1.79	1.77	1.68	1.62	1.57	1.52	1.48	1.42	1.39	1.28					
∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.79	1.75	1.72	1.69	1.67	1.57	1.51	1.46	1.40	1.35	1.28	1.25	1.03						

# Anexos I

Anexo IX: Resultados de las 270 muestras, resistencia de sellado

EXPERI- MENTO #	MUES- TRA #	TEMPE- RATURA (°C)	PRE- SIÓN (psi)	TIEMPO DE SELLADO (s)	CARGA DE ROTURA (N)	PROMEDIOS CARGA DE ROTURA , RESITENCIA SELLADO(N/ mm)
1	3	125	160	0,2	1,598	1,655
2	3	125	160	0,3	1,472	1,6362
3	3	125	160	0,4	1,998	1,7564
4	3	125	180	0,2	1,385	1,5627
5	3	125	180	0,3	1,864	1,6425
6	3	125	180	0,4	1,603	1,746
7	3	125	200	0,2	1,566	1,7309
8	3	125	200	0,3	1,515	1,6909
9	3	125	200	0,4	1,68	1,6286
10	3	150	160	0,2	1,707	2,0323
11	3	150	160	0,3	1,978	2,035
12	3	150	160	0,4	1,598	1,8549
13	3	150	180	0,2	1,681	1,9508
14	3	150	180	0,3	1,992	2,2269
15	3	150	180	0,4	1,783	1,8863
16	3	150	200	0,2	1,827	2,129
17	3	150	200	0,3	1,815	2,2073
18	3	150	200	0,4	2,369	2,2775
19	3	175	160	0,2	1,535	1,8428
20	3	175	160	0,3	1,903	2,1343
21	3	175	160	0,4	2,188	2,0535
22	3	175	180	0,2	2,198	2,0713
23	3	175	180	0,3	1,995	2,0744
24	3	175	180	0,4	3,024	2,2638
25	3	175	200	0,2	1,912	2,0484
26	3	175	200	0,3	2,243	1,9996
27	3	175	200	0,4	2,675	2,1526
1	4	125	160	0,2	1,772	
2	4	125	160	0,3	1,751	
3	4	125	160	0,4	1,678	
4	4	125	180	0,2	1,301	
5	4	125	180	0,3	1,705	
6	4	125	180	0,4	2,196	
7	4	125	200	0,2	1,986	
8	4	125	200	0,3	1,845	
9	4	125	200	0,4	1,399	
10	4	150	160	0,2	2,317	
11	4	150	160	0,3	1,892	
12	4	150	160	0,4	1,567	
13	4	150	180	0,2	1,718	
14	4	150	180	0,3	2,493	
15	4	150	180	0,4	1,85	
16	4	150	200	0,2	2,216	

17	4	150	200	0,3	2,425	
18	4	150	200	0,4	2,506	
19	4	175	160	0,2	2,125	
20	4	175	160	0,3	2,007	
21	4	175	160	0,4	2,13	
22	4	175	180	0,2	1,844	
23	4	175	180	0,3	2,297	
24	4	175	180	0,4	2,598	
25	4	175	200	0,2	1,787	
26	4	175	200	0,3	2,32	
27	4	175	200	0,4	2,358	
1	5	125	160	0,2	1,738	
2	5	125	160	0,3	1,69	
3	5	125	160	0,4	1,612	
4	5	125	180	0,2	1,287	
5	5	125	180	0,3	1,872	
6	5	125	180	0,4	1,68	
7	5	125	200	0,2	1,886	
8	5	125	200	0,3	1,765	
9	5	125	200	0,4	1,527	
10	5	150	160	0,2	1,911	
11	5	150	160	0,3	2,221	
12	5	150	160	0,4	1,812	
13	5	150	180	0,2	1,734	
14	5	150	180	0,3	2,494	
15	5	150	180	0,4	2,112	
16	5	150	200	0,2	2,084	
17	5	150	200	0,3	1,976	
18	5	150	200	0,4	2,336	
19	5	175	160	0,2	1,795	
20	5	175	160	0,3	2,071	
21	5	175	160	0,4	1,798	
22	5	175	180	0,2	1,713	
23	5	175	180	0,3	2,187	
24	5	175	180	0,4	2,6	
25	5	175	200	0,2	2,15	
26	5	175	200	0,3	1,733	
27	5	175	200	0,4	1,905	
1	6	125	160	0,2	1,471	
2	6	125	160	0,3	1,522	
3	6	125	160	0,4	1,64	
4	6	125	180	0,2	2,021	
5	6	125	180	0,3	1,345	
6	6	125	180	0,4	1,851	
7	6	125	200	0,2	1,507	
8	6	125	200	0,3	2,002	
9	6	125	200	0,4	1,986	
10	6	150	160	0,2	2,02	
11	6	150	160	0,3	2,327	
12	6	150	160	0,4	1,976	
13	6	150	180	0,2	1,981	

14	6	150	180	0,3	2,449	
15	6	150	180	0,4	1,9	
16	6	150	200	0,2	1,914	
17	6	150	200	0,3	2,291	
18	6	150	200	0,4	2,04	
19	6	175	160	0,2	1,637	
20	6	175	160	0,3	2,063	
21	6	175	160	0,4	1,948	
22	6	175	180	0,2	2,077	
23	6	175	180	0,3	1,991	
24	6	175	180	0,4	2,213	
25	6	175	200	0,2	1,9	
26	6	175	200	0,3	2,098	
27	6	175	200	0,4	1,904	
1	9	125	160	0,2	1,628	
2	9	125	160	0,3	1,505	
3	9	125	160	0,4	2,017	
4	9	125	180	0,2	1,643	
5	9	125	180	0,3	1,937	
6	9	125	180	0,4	1,747	
7	9	125	200	0,2	1,729	
8	9	125	200	0,3	1,447	
9	9	125	200	0,4	1,535	
10	9	150	160	0,2	2,047	
11	9	150	160	0,3	2,144	
12	9	150	160	0,4	2,206	
13	9	150	180	0,2	1,987	
14	9	150	180	0,3	2,121	
15	9	150	180	0,4	1,721	
16	9	150	200	0,2	2,316	
17	9	150	200	0,3	2,218	
18	9	150	200	0,4	2,214	
19	9	175	160	0,2	1,897	
20	9	175	160	0,3	2,408	
21	9	175	160	0,4	1,89	
22	9	175	180	0,2	1,944	
23	9	175	180	0,3	1,718	
24	9	175	180	0,4	2,023	
25	9	175	200	0,2	2,233	
26	9	175	200	0,3	2,035	
27	9	175	200	0,4	1,865	
1	11	125	160	0,2	1,544	
2	11	125	160	0,3	1,698	
3	11	125	160	0,4	1,79	
4	11	125	180	0,2	1,626	
5	11	125	180	0,3	1,606	
6	11	125	180	0,4	1,738	
7	11	125	200	0,2	1,692	
8	11	125	200	0,3	1,629	
9	11	125	200	0,4	1,458	
10	11	150	160	0,2	2,445	

11	11	150	160	0,3	1,951	
12	11	150	160	0,4	1,791	
13	11	150	180	0,2	1,928	
14	11	150	180	0,3	2,291	
15	11	150	180	0,4	1,966	
16	11	150	200	0,2	2,135	
17	11	150	200	0,3	2,523	
18	11	150	200	0,4	2,237	
19	11	175	160	0,2	2,057	
20	11	175	160	0,3	2,05	
21	11	175	160	0,4	2,091	
22	11	175	180	0,2	2,092	
23	11	175	180	0,3	2,016	
24	11	175	180	0,4	2,019	
25	11	175	200	0,2	1,694	
26	11	175	200	0,3	1,951	
27	11	175	200	0,4	2,913	
1	19	125	160	0,2	1,661	
2	19	125	160	0,3	1,676	
3	19	125	160	0,4	1,52	
4	19	125	180	0,2	1,451	
5	19	125	180	0,3	1,631	
6	19	125	180	0,4	1,844	
7	19	125	200	0,2	1,698	
8	19	125	200	0,3	1,71	
9	19	125	200	0,4	1,255	
10	19	150	160	0,2	1,962	
11	19	150	160	0,3	1,954	
12	19	150	160	0,4	1,891	
13	19	150	180	0,2	2,609	
14	19	150	180	0,3	2,013	
15	19	150	180	0,4	1,901	
16	19	150	200	0,2	2,199	
17	19	150	200	0,3	2,239	
18	19	150	200	0,4	2,203	
19	19	175	160	0,2	1,995	
20	19	175	160	0,3	2,384	
21	19	175	160	0,4	2,014	
22	19	175	180	0,2	2,556	
23	19	175	180	0,3	2,404	
24	19	175	180	0,4	2,138	
25	19	175	200	0,2	2,217	
26	19	175	200	0,3	1,94	
27	19	175	200	0,4	1,911	
1	26	125	160	0,2	1,965	
2	26	125	160	0,3	1,665	
3	26	125	160	0,4	1,715	
4	26	125	180	0,2	1,737	
5	26	125	180	0,3	1,311	
6	26	125	180	0,4	1,614	
7	26	125	200	0,2	1,705	

8	26	125	200	0,3	1,857	
9	26	125	200	0,4	2,084	
10	26	150	160	0,2	1,753	
11	26	150	160	0,3	2,169	
12	26	150	160	0,4	2,182	
13	26	150	180	0,2	2,13	
14	26	150	180	0,3	1,908	
15	26	150	180	0,4	1,845	
16	26	150	200	0,2	2,087	
17	26	150	200	0,3	2,029	
18	26	150	200	0,4	2,357	
19	26	175	160	0,2	1,881	
20	26	175	160	0,3	2,304	
21	26	175	160	0,4	2,052	
22	26	175	180	0,2	2,383	
23	26	175	180	0,3	2,15	
24	26	175	180	0,4	2,082	
25	26	175	200	0,2	2,272	
26	26	175	200	0,3	1,933	
27	26	175	200	0,4	2,003	
1	30	125	160	0,2	1,543	
2	30	125	160	0,3	1,809	
3	30	125	160	0,4	1,766	
4	30	125	180	0,2	1,451	
5	30	125	180	0,3	1,352	
6	30	125	180	0,4	1,748	
7	30	125	200	0,2	1,77	
8	30	125	200	0,3	1,518	
9	30	125	200	0,4	1,717	
10	30	150	160	0,2	2,1	
11	30	150	160	0,3	1,84	
12	30	150	160	0,4	1,759	
13	30	150	180	0,2	1,815	
14	30	150	180	0,3	2,053	
15	30	150	180	0,4	1,93	
16	30	150	200	0,2	2,143	
17	30	150	200	0,3	2,182	
18	30	150	200	0,4	2,283	
19	30	175	160	0,2	1,843	
20	30	175	160	0,3	1,925	
21	30	175	160	0,4	2,204	
22	30	175	180	0,2	2,065	
23	30	175	180	0,3	1,92	
24	30	175	180	0,4	2,029	
25	30	175	200	0,2	2,228	
26	30	175	200	0,3	1,849	
27	30	175	200	0,4	1,843	
1	31	125	160	0,2	1,63	
2	31	125	160	0,3	1,574	
3	31	125	160	0,4	1,828	
4	31	125	180	0,2	1,725	

5	31	125	180	0,3	1,802	
6	31	125	180	0,4	1,439	
7	31	125	200	0,2	1,77	
8	31	125	200	0,3	1,621	
9	31	125	200	0,4	1,645	
10	31	150	160	0,2	2,061	
11	31	150	160	0,3	1,874	
12	31	150	160	0,4	1,767	
13	31	150	180	0,2	1,925	
14	31	150	180	0,3	2,455	
15	31	150	180	0,4	1,855	
16	31	150	200	0,2	2,369	
17	31	150	200	0,3	2,375	
18	31	150	200	0,4	2,23	
19	31	175	160	0,2	1,663	
20	31	175	160	0,3	2,228	
21	31	175	160	0,4	2,22	
22	31	175	180	0,2	1,841	
23	31	175	180	0,3	2,066	
24	31	175	180	0,4	1,912	
25	31	175	200	0,2	2,091	
26	31	175	200	0,3	1,894	
27	31	175	200	0,4	2,149	