

**RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL PROCESO DE  
TRANSFORMACIÓN DE LA MEZCLA HARINA DE YUCA, FIBRA DE FIQUE Y  
PLASTIFICANTE EN LA PRODUCCIÓN DE EMPAQUES TERMOESTABLES  
BIODEGRADABLES A NIVEL INDUSTRIAL**



**Felipe Gómez Orozco  
Víctor Manuel Vallejo**

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de electrónica, instrumentación y control**  
**Programa de ingeniería en automática Industrial**  
Popayán, Mayo 2010

**RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL PROCESO DE  
TRANSFORMACIÓN DE LA MEZCLA HARINA DE YUCA, FIBRA DE FIQUE Y  
PLASTIFICANTE EN LA PRODUCCIÓN DE EMPAQUES TERMOESTABLES  
BIODEGRADABLES A NIVEL INDUSTRIAL**



**Felipe Gómez Orozco  
Víctor Manuel Vallejo**

Trabajo de Grado

Director: Mg. Juan Fernando Flórez

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de electrónica, instrumentación y control**  
**Programa de ingeniería en automática Industrial**  
Popayán, Mayo 2010

# CONTENIDO

|   | Pág.      |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUCCION</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR EMPAQUES PLÁSTICOS  | 3         |
| 1.2 MATERIAS PRIMAS BIODEGRADABLES  | 4         |
| <b>1.2.1 El PLA (Acido Poliláctico)</b>   | <b>6</b>  |
| 1.3 ESTRUCTURA DEL ALMIDÓN DE YUCA  | 7         |
| <b>1.3.1 Propiedades del almidón</b>  | <b>8</b>  |
| 1.4 PROCESAMIENTO DE LOS TERMOPLÁSTICOS   | 10        |
| <b>1.4.1 Moldeo por compresión</b>  | <b>10</b> |
| <b>1.4.2 Moldeo por inyección</b>   | <b>12</b> |
| <b>2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE LA PLANTA PILOTO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN</b>  | <b>15</b> |
| 2.1 REQUERIMIENTOS DE LA PLANTA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN  | 15        |
| 2.2 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN  | 16        |
| 2.3 SISTEMAS FUNDAMENTALES DE LA PLANTA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN  | 17        |
| <b>2.3.1 Estructura base</b>  | <b>18</b> |
| <b>2.3.2 Molde de probetas</b>  | <b>20</b> |
| <b>2.3.3 Sistema mecánico de compresión</b>   | <b>27</b> |
| <b>2.3.4 Sistema mecánico de expulsión</b>  | <b>33</b> |
| <b>2.3.5 Sistema de dosificación</b>  | <b>40</b> |
| <b>2.3.6 Sistema de aislamiento térmico</b>   | <b>45</b> |
| <b>3 INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y SUPERVISIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN</b>  | <b>47</b> |
| 3.1 INGENIERÍA CONCEPTUAL   | 47        |
| <b>3.1.1 Descripción del proceso</b>  | <b>48</b> |
| <b>3.1.2 Diagrama de operaciones de proceso</b>   | <b>49</b> |
| <b>3.1.3 Variables controladas y manipuladas</b>  | <b>50</b> |
| <b>3.1.4 Lazos de control de la planta piloto de moldeo por compresión</b>  | <b>51</b> |
| <b>3.1.5 Escenarios de automatización de la planta</b>  | <b>52</b> |
| <b>3.1.6 Instrumentación para la planta de moldeo por compresión</b>  | <b>52</b> |
| <b>3.1.7 Descripción de equipos, instrumentos y accesorios de la planta de moldeo por compresión</b>                                      | <b>56</b> |
| 3.2 INGENIERÍA BÁSICA   | 65        |
| <b>3.2.1 Etiquetado de la planta e instrumentos</b>   | <b>65</b> |
| <b>3.2.2 Diagrama de flujo del proceso</b>  | <b>66</b> |
| <b>3.2.3 Diagrama de tuberías e instrumentos (PI&amp;D)</b>   | <b>69</b> |
| <b>3.2.4 Diagrama SAMA</b>  | <b>70</b> |
| <b>3.2.5 Control para la planta de moldeo por compresión</b>  | <b>71</b> |
| 3.3 INGENIERÍA DE DETALLE   | 76        |
| <b>3.3.1 Diagrama de lazo de instrumentos</b>   | <b>76</b> |
| <b>3.3.2 Diagrama de mando y potencia</b>   | <b>76</b> |
| <b>3.3.3 Diagramas lógicos</b>  | <b>76</b> |
| <b>4 CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO</b>  | <b>82</b> |
| <b>5 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE EMPAQUES BIODEGRADABLES A BASE DE YUCA, FIBRA DE FIQUE Y PLASTIFICANTE</b> | <b>94</b> |
| 5.1 RECOMENDACIONES DEL MOLDE   | 94        |
| 5.2 RECOMENDACIONES DEL SISTEMA DE MEZCLADO   | 96        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.3      | RECOMENDACIONES DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO | 97         |
| 5.4      | RECOMENDACIONES DEL SISTEMA DE DOSIFICACIÓN  | 100        |
| 5.5      | RECOMENDACIONES DEL SISTEMA DE COMPRESIÓN    | 101        |
| 5.6      | RECOMENDACIONES DEL SISTEMA DE EXPULSIÓN     | 102        |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSIONES</b>                          | <b>105</b> |
| <b>7</b> | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>            | <b>106</b> |

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Contaminación por plásticos [6].   | 3  |
| Figura 2. Vaso en PLA [2].   | 5  |
| Figura 3. Ácido poliláctico [2].   | 6  |
| Figura 4. Estructura molecular de la amilosa y amilopectina [13].  | 8  |
| Figura 5. Proceso moldeo por compresión [17].  | 11 |
| Figura 6. Planta básica utilizada para moldeo por compresión [18].   | 11 |
| Figura 7. Máquina de moldeo por inyección [21].  | 14 |
| Figura 8. Planos en vista alzada y en perspectiva de la estructura base. Izquierda: vista en plano alzado. Derecha: vista en perspectiva. Dimensiones en mm.                       | 19 |
| Figura 9. Planos anterior y lateral de la estructura base. Izquierda: Estructura base vista frontal. Derecha: Estructura base vista lateral. Dimensiones en mm.                    | 19 |
| Figura 10. Imágenes de la estructura base terminada. Lado izquierdo: Estructura base vista frontal. Lado derecho: Estructura base vista lateral.                                   | 20 |
| Figura 11. Probeta con unidades en milímetros (mm)   | 21 |
| Figura 12. Plano en vista alzada de la cara inferior de la pieza hembra del molde. Dimensiones en mm.  | 22 |
| Figura 13. Plano cara superior de la pieza hembra del molde con perspectivas de las dos probetas. Dimensiones en mm.   | 22 |
| Figura 14. Plano cara lateral con perspectivas y acercamientos de la parte hembra del molde. Dimensiones en mm.  | 23 |
| Figura 15. Imagen de la parte hembra del molde. Izquierda: Molde parte hembra ensamblado en la planta. Derecha: Acercamiento a la parte hembra del molde.                          | 24 |
| Figura 16. Plano en vista alzada de la parte macho del molde. Dimensiones en mm.   | 25 |
| Figura 17. Cara inferior de la parte macho del molde. Dimensiones en mm.   | 25 |
| Figura 18. Plano cara lateral con perspectivas y acercamientos de parte macho del molde. Dimensiones en mm.  | 26 |
| Figura 19. Plano alzado con perspectiva inferior de la parte macho del molde.  | 26 |
| Figura 20. Molde parte macho. Lado izquierdo: Molde parte macho ensamblado en la planta. Lado derecho: Acercamiento a la parte inferior macho del molde.                           | 27 |
| Figura 21. Plano vista lateral con perspectivas y acercamiento del codo superior.  | 28 |
| Figura 22. Planos cara superior, plano alzado y cara posterior del codo superior.  | 29 |
| Figura 23. Planos vista frontal y en plano alzado de la platina soporte. Superior: Vista frontal con perspectivas. Inferior: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.             | 30 |
| Figura 24. Plano cara superior con perspectivas de la platina soporte.   | 30 |
| Figura 25. Plano acople circular. Izquierda: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Derecha: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.                       | 31 |
| Figura 26. Planos en vista alzada y cara lateral con perspectivas de la platina superior. Dimensiones en mm.   | 31 |
| Figura 27. Plano cara superior de la platina superior. Dimensiones en mm.  | 32 |
| Figura 28. Plano guías. Dimensiones en mm.   | 32 |
| Figura 29. Sistema mecánico de compresión. Izquierda: Imagen del sistema mecánico terminado y ensamblado a la planta. Derecha: Acercamiento al acople circular y platina superior. | 33 |
| Figura 30. Planos cara lateral y plano alzado del codo inferior. Izquierda: Vista lateral con perspectivas. Derecho: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.                     | 34 |
| Figura 31. Plano cara superior del codo inferior. Dimensiones en mm.   | 35 |
| Figura 32. Planos platina base. Arriba: Vista frontal con perspectivas de la platina base. Abajo: Vista cara superior de la platina base. Dimensiones en mm.                       | 36 |
| Figura 33. Planos platina inferior. Arriba: Vista frontal con perspectivas de la platina base. Abajo: Vista cara superior de la platina base. Dimensiones en mm.                   | 37 |

|  |    |
|--|----|
| <i>Figura 34. Planos pieza expulsora. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Plano de abajo: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.</i>           | 38 |
| <i>Figura 35. Planos expulsor. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Abajo: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.</i>                           | 39 |
| <i>Figura 36. Plano guía expulsora. Dimensiones en mm.</i>   | 39 |
| <i>Figura 37. Sistema mecánico de expulsión. Izquierda: imagen del sistema de expulsión ensamblado. Derecha: Acercamiento al acople circular y expulsor.</i>                       | 40 |
| <i>Figura 38. Plano cara inferior del dosificador. Dimensiones en mm.</i>  | 41 |
| <i>Figura 39. Vista en plano alzado cara inferior del dosificador.</i>   | 42 |
| <i>Figura 40. Planos cara anterior y posterior del dosificador. Arriba: Vista cara anterior con perspectivas. Abajo: Vista cara posterior con perspectivas. Dimensiones en mm.</i> | 42 |
| <i>Figura 41. Planos pieza dosificadora. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Abajo: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.</i>                 | 43 |
| <i>Figura 42. Plano sostén dosificador. Dimensiones en mm.</i>   | 43 |
| <i>Figura 43. Planos tornillo dosificador. Izquierdo: Vista lateral con perspectivas. Derecha: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.</i>                                       | 44 |
| <i>Figura 44. Planos topes. Izquierda: Vista superior. Centro: Vista lateral con perspectivas. Derecha: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.</i>                              | 44 |
| <i>Figura 45. Sistema de dosificación. Izquierda: Imagen cara superior. Centro: imagen cara inferior. Derecha: Acercamiento al dosificador.</i>                                    | 45 |
| <i>Figura 46. Planos baquelita inferior. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Abajo: Vista cara superior. Dimensiones en mm.</i>  | 46 |
| <i>Figura 47. Planos baquelita circular. Izquierda: Vista lateral con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Derecha: vista en plano alzado. Dimensiones en mm.</i>            | 46 |
| <i>Figura 48. Diagrama de operaciones de proceso.</i>  | 50 |
| <i>Figura 49. Termocupla tipo j.</i>   | 56 |
| <i>Figura 50. Controlador PID.</i>   | 56 |
| <i>Figura 51. Resistencia de alta densidad.</i>  | 57 |
| <i>Figura 52. Relés de estado sólido.</i>  | 57 |
| <i>Figura 53. Regulador de presión.</i>  | 58 |
| <i>Figura 54. PLC FP-X C30R.</i>   | 58 |
| <i>Figura 55. Válvula de 3/2 vías FESTO.</i>   | 59 |
| <i>Figura 56. Llave eléctrica de dos posiciones.</i>   | 59 |
| <i>Figura 57. Relé electromecánico de 14 pines.</i>  | 60 |
| <i>Figura 58. Pantalla GT32 M.</i>   | 60 |
| <i>Figura 59. Compresor 150 psi.</i>   | 61 |
| <i>Figura 60. Cilindro de doble efecto.</i>  | 61 |
| <i>Figura 61. Tuberías de poliuretano.</i>   | 62 |
| <i>Figura 62. Relé electromecánico.</i>  | 62 |
| <i>Figura 63. Armario de control y mando.</i>  | 62 |
| <i>Figura 64. Borneras, riel dim y canaletas.</i>  | 63 |
| <i>Figura 65. Breaker.</i>   | 63 |
| <i>Figura 66. Significado del etiquetado [24].</i>   | 65 |
| <i>Figura 67. Diagrama de flujo de proceso.</i>  | 69 |
| <i>Figura 68. Diagrama PI&amp;D para mando manual.</i>   | 69 |
| <i>Figura 69. Diagrama PI&amp;D para mando automático.</i>   | 70 |
| <i>Figura 70. Diagrama SAMA.</i>   | 70 |
| <i>Figura 71. Respuesta en lazo abierto de temperatura en cada parte del molde.</i>  | 72 |
| <i>Figura 72. Zonas lineales de temperatura en cada parte del molde.</i>   | 73 |
| <i>Figura 73. Señales PWM para cada zona de control.</i>   | 74 |
| <i>Figura 74. Grafset del control de la planta piloto de moldeo por compresión.</i>  | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| <i>Figura 75. Árbol de secuencia de pantalla táctil.</i>                                       | 78  |
| <i>Figura 76. Interfaz de Inicio (Menú).</i>   | 79  |
| <i>Figura 77. Ventana "1", adquisición de valores de consigna.</i>                             | 79  |
| <i>Figura 78. Ventana "5", alcanzando valores de consigna.</i>                                 | 80  |
| <i>Figura 79. Ventana "6", comprimiendo durante tiempo de exposición.</i>                      | 81  |
| <i>Figura 80. Ventana "2", gráfico de temperatura.</i>   | 81  |
| <i>Figura 81. Muestras a 90°C, 50 psi y variando el tiempo de exposición.</i>                  | 87  |
| <i>Figura 82. Muestras a 90°C, 50 psi e independiente del tiempo de exposición.</i>            | 87  |
| <i>Figura 83. Muestras a 120°C, 20- 50 psi y variando el tiempo.</i>                           | 89  |
| <i>Figura 84. Muestras a 120°C, 20-50 psi y con tiempo de exposición aproximados a 10 min.</i> | 89  |
| <i>Figura 85. Muestras a 150°C, 20- 50 psi y variando el tiempo.</i>                           | 91  |
| <i>Figura 86. Muestras a 180°C, 50 psi y variando el tiempo.</i>                               | 92  |
| <i>Figura 87. Área de trabajo del molde</i>  | 96  |
| <i>Figura 88. Disposición de la resistencia y termopares en el molde hembra.</i>               | 100 |
| <i>Figura 89. Sistema hidráulico para una prensa [27]</i>                                      | 102 |
| <i>Figura 90. Disposición de espigas de expulsión [28].</i>                                    | 103 |

## **Lista de Tablas**

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabla 1. Valores de clasificación de las variables cualitativas del producto.</i>    | 64 |
| <i>Tabla 2. Valores de clasificación de las variables cualitativas del producto.</i>    | 66 |
| <i>Tabla 3. Valores de las variables de proceso y de pruebas.</i>                       | 82 |
| <i>Tabla 4. Valores de las variables de proceso y de pruebas.</i>                       | 83 |
| <i>Tabla 5. Valores de clasificación de las variables cualitativas del producto.</i>    | 84 |
| <i>Tabla 6. Matriz de resultados de las 31 pruebas de caracterización del producto.</i> | 84 |

## 1 INTRODUCCION

El alto grado de contaminación que está sufriendo nuestro planeta debido a la gran cantidad de gases tipo invernadero que se emiten hacia la atmósfera, los diferentes desechos producto de los procesos industriales (sólidos y lixiviados) y producción incontrolada de empaques derivados del petróleo, ha llevado a la comunidad internacional a adoptar medidas que permitan contrarrestar este hecho, a través de una serie de acuerdos y reglamentaciones, obligando a las industrias a establecer formas de producción más limpia así como a la utilización de nuevos materiales en los procesos de producción.

Es así como en varios países del mundo materiales como los polímeros sintéticos, están siendo gradualmente reemplazados por materiales que cumplan con las condiciones de degradabilidad biológica y/o fotoquímica, específicamente de fuentes naturales, como polímeros de origen vegetal, animal o microbiano [1]. En este sentido el presente trabajo está encaminado a proveer recomendaciones técnicas para la fabricación a escala industrial de empaques termomoldeados biodegradables a base de harina de yuca, fibra de fique y plastificante, realizando el análisis del comportamiento de diferentes variables físicas involucradas en la obtención de estos productos empleando la técnica de moldeo por compresión.

En el anteproyecto del presente trabajo de grado se había asumido que la planta de moldeo por compresión a utilizar en el desarrollo del proyecto, era un equipo industrial disponible comercialmente para su adquisición y posterior automatización durante el desarrollo del proyecto. Sin embargo después de muchas cotizaciones en el mercado no se logró encontrar una máquina que cumpliera con los requerimientos necesarios que el proyecto **“Uso de productos y subproductos de yuca en el desarrollo de empaques biodegradables”** requería. Por esta razón en el presente trabajo de grado se asumió la responsabilidad del diseño mecánico de la planta y de la selección de la empresa fabricante de la misma. Con la empresa elegida se inicio un proceso de asistencia compartida tanto durante el diseño como en la fabricación de la planta de moldeo por compresión que finalmente cumpliera los requerimientos del proyecto.

Por la anterior razón el proceso de obtención de las recomendaciones técnicas para la fabricación de empaques biodegradables a base de harina de yuca, fibra de fique y plastificante, se compone finalmente de cuatro etapas de desarrollo:

1. Diseño de la planta piloto de moldeo por compresión.
2. Implementación de la instrumentación, control y supervisión en la planta piloto de moldeo por compresión.
3. Caracterización de las variables del proceso (temperatura, presión y tiempo de exposición).
4. Redacción de las recomendaciones técnicas para la producción industrial de empaques termo moldeados.

Además de las recomendaciones técnicas que se pretenden obtener con la realización de este proyecto, es importante resaltar el impacto social y ambiental generado por el mismo, ya que en primera instancia se busca mejorar la productividad de yuca en el departamento del Cauca ya que en los últimos quince años ha venido decayendo de forma significativa, pasando de 25.000 hectáreas sembradas en 1980 a solo 5.000 hectáreas en el 2007 [1]. Por otro lado se busca proporcionar a pequeños y medianos productores del sector yuquero, industrias transformadoras del plástico y a empresas comercializadoras de empaques del orden nacional de una serie de beneficios tales como:

- Obtener información de las bondades que los productos biodegradables aportan al medio ambiente.
- Establecer la posibilidad de generar empleos directos e indirectos.
- Disminuir la contaminación ambiental a través de la utilización de estos empaques biodegradables lo que permite a mediano y largo plazo obtener ambientes sostenibles y saludables.
- Fortalecimiento de la cadena productiva de la Yuca.

Se debe tener en cuenta que hasta el momento en Colombia no se han elaborado empaques termomoldeados biodegradables por lo que se hace necesario construir una alternativa tecnológica viable, a partir de un material económico y renovable, para originar una industria sostenible de polímeros biodegradables. Así como también es de vital importancia mantener el gran esfuerzo investigativo que se ha venido realizando, principalmente desde la academia, para aprovechar los nichos de mercado ya mencionados y la disponibilidad de recursos naturales renovables, dado que contribuyen de manera significativa a la disminución del impacto ambiental que causa el uso indiscriminado de plásticos sintéticos [1].

Cabe resaltar que el presente trabajo de grado hace parte del programa titulado **“Uso de productos y subproductos de yuca en el desarrollo de empaques biodegradables”**, que busca de forma pionera desarrollar en el país dos proyectos:

1. Producción y caracterización de películas flexibles biodegradables por extrusión de tornillo simple a partir de almidón de yuca, plastificante y PLA [1].
2. Producción y caracterización de empaques termoformados biodegradables por moldeo por compresión a partir de harina de yuca, fibra de fique y plastificante [1].

Este programa está financiado por el Ministerio de Agricultura y liderado por el Ingeniero Agroindustrial Doctor Héctor Samuel Villada docente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca.

## 1.1 Contaminación ambiental por empaques plásticos

El extraordinario desarrollo de los materiales plásticos en ámbitos tan variados como el embalaje, el transporte, los equipamientos eléctricos y electrónicos, el mobiliario, la decoración y el hogar [2]; explica el crecimiento exponencial en la producción del plástico que por varias décadas se ha mantenido logrando valores que sobrepasan las cien millones de toneladas por año [3]. Cabe resaltar que la industria de alimentos ocupa un lugar importante en el uso de plásticos, para la protección antes, durante y después de la cosecha de alimentos, ejemplo de ello son las láminas o películas para recubrimiento, bolsas y algunos productos de consumo rutinario como platos y cuchillos y cucharas entre otros.

Las fabulosas propiedades mecánicas que poseen los plásticos se convierten en una amenaza para el medio ambiente ya que su degradación es demasiado lenta. Los plásticos suelen estar formados por los polímeros: polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad (PEBD), polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS) y polietilentereftalato (PET), donde el conjunto de las poliolefinas (PE y PP) y el poliestireno representan aproximadamente un 70% del total [4]. Estos materiales tardan unos 400 años en descomponerse y tan solo se recicla un diez por ciento [5]. Este hecho se constituye actualmente en un motivo de gran preocupación, debido a la amenaza que representan para muchos ecosistemas por ser fuentes de contaminación tanto atmosférica y visual como de suelos y medios marítimos (Figura 1).



Figura 1. Contaminación por plásticos [6].

El método convencional para solucionar este problema, hasta ahora, ha sido el reciclaje y la degradación por altas temperaturas (incineración), que causa emisión de gases tóxicos a la atmósfera [3]. El reciclaje por combustión se tropieza con la necesidad de la recuperación de humos, en particular para los plásticos que contienen compuestos halogenados y/o azufrados, y a la reducción de emisiones de dióxido de carbono. El reciclaje para la fabricación de nuevos materiales, por su parte, se encuentra con problemas de selección y limpieza de las materias rechazadas [2]. Por otro lado veinte años atrás, se creía que los envases plásticos podrían ser degradados en rellenos sanitarios y que ésta sería la solución al problema de la contaminación por ellos generada. Hoy se sabe que cualquier

sustancia se degrada muy poco en estos rellenos sanitarios debido a las condiciones de luz, aire, humedad y nutrientes para mantener la acción microbiana [7].

## **1.2 Materias primas biodegradables**

Por el alto grado de contaminación que los plásticos han ocasionado al planeta y las cada vez más escasas reservas de petróleo en el mundo, el desarrollo de los polímeros biodegradables ha tomado una gran importancia [1], teniendo en cuenta que estos últimos comparados con los polímeros convencionales tienen algunas desventajas con respecto a sus propiedades, lo que limita su utilización en algunos procesos. A pesar de sus desventajas los polímeros biodegradables o bioplásticos son ampliamente utilizados en diferentes ámbitos como son: las bolsas de plástico, los embalajes industriales, el embalaje doméstico, la medicina, los productos para la agricultura y la horticultura [2].

La estructura química de los biopolímeros es la que determina su biodegradabilidad, la cual según la norma ASTM D-5488-944 se define como la capacidad de un material de descomponerse en dióxido de carbono, metano, agua y componentes orgánicos, o biomasa, en el cual el mecanismo predominante es la acción enzimática de microorganismos, y puede medirse por ensayos estándares en un período específico de tiempo reflejado en condiciones disponibles de almacenamiento [8]. Los plásticos biodegradables están constituidos por un material que permite mantener completamente su integridad durante su manufactura, vida de anaquel y uso, pero que al ser desechado comienza a biodegradarse, producto de la acción de microorganismos como bacterias, hongos o levaduras [3].

El ciclo de un polímero biodegradable inicia con la obtención de almidón que se puede extraer del maíz, trigo, papa o yuca. Con el almidón y algunos componentes adicionales, se fabrican películas, bolsas y artículos de uso agrícola, el hogar e incluso en aplicaciones médicas como suturas e implantes. Terminada la vida útil de cada producto, el material es degradado mediante un proceso industrial llamado compostaje, quien lo retorna al medio ambiente como abono o fertilizantes de suelos que nuevamente pueden ser utilizados en los cultivos de las plantas que producen el almidón [8].

Los plásticos biodegradables se producen a partir de polímeros biodegradables sintéticos como: ácido poliláctico (PLA), succinato de polietileno o policaprolactona (PCL), entre otros o naturales como: albúmina, colágeno, glucosa, carboximetilcelulosa, quitosano, quitina y almidón; usados individualmente o en mezclas [3].

El PLA es uno de los más prometedores para el futuro desarrollo de los bioplásticos y efectivamente este polímero es producido a partir de recursos renovables y es benigno para el medio ambiente. Una reciente aplicación del PLA son los envases, ejemplo de ello son los vasos biodegradables (Figura 2) utilizados para bebidas frías y que pueden descomponerse completamente entre 45 y 60 días si el compostaje se realiza en condiciones óptimas en instalaciones industriales [2].

Actualmente se están desarrollando proyectos para mejorar las características térmicas del PLA añadiendo arcillas a fin de volverlo resistente a temperaturas elevadas y aumentar su estabilidad térmica [2].



Figura 2. Vaso en PLA [2].

Como producto de una serie de investigaciones se ha desarrollado una tecnología para producir termoplásticos biodegradables derivados de cereales, usados principalmente en la fabricación de productos para la protección post cosecha de alimentos, sin embargo aún existen problemas en la estabilidad estructural de éstos termoplásticos relacionados con la consistencia y formación. Esto ha generado inestabilidad de estos artículos frente a la humedad, al cambio en las propiedades mecánicas y reológicas con respecto al tiempo por la recristalización y al reblandecimiento debido a la absorción de agua. Estos fenómenos dan lugar a cambios en la temperatura de transición vítrea, que provocan la relajación del volumen libre y producen encogimiento [9], [10], [11].

En Colombia frente al cultivo de cereales, las raíces y tubérculos son una alternativa viable en el desarrollo de nuevos productos, debido a que presentan un área mayor cultivada, lo que implica un gran potencial de desarrollo regional a partir de estos cultivos permitiendo así el aumento del empleo de personal calificado y no calificado en el sector rural[1].

La Harina Termoplástica de Yuca (HTPY) es un polímero biodegradable de origen natural, formado durante el procesamiento a altas temperaturas y presiones de mezclas de harina de yuca y plastificantes. Estudios previos demostraron que sus propiedades mecánicas la convierten en un material apto para el desarrollo de

empaques biodegradables del tipo termomoldeados, siempre y cuando dichas propiedades sean mejoradas con la adición de algún componente que le brinde mayor resistencia al esfuerzo mecánico [11].

A nivel mundial existe un gran interés en la utilización de fibras naturales para la producción de termoplásticos reforzados, debido a ventajas como su baja densidad, su reducido costo, su capacidad de resistencia y ductilidad, y en especial por su connotación positiva hacia un medio ambiente sano [1].

De igual manera el fique o cabuya es una fibra biodegradable que al descomponerse se emplea como alimento de microorganismos y abono para el suelo; además de esto, no contamina el agua y permite hacer producción agrícola limpia, sus ventajas son ambientales y económicas. Recientes estudios han demostrado que el uso de fibra de fique (FF) en películas de polietileno de alta densidad, aumenta la rigidez del material compuesto, hecho que hace de la FF un material viable para mejorar las propiedades mecánicas de la harina termoplástica de yuca, que además es un producto biodegradable atractivo para los microorganismos [12].

La producción y caracterización de materiales termomoldeados a partir de HTPY reforzada con FF, da continuidad a proyectos ya finalizados por grupos de investigación en la Universidad del Cauca, que tienen como objetivo construir una tecnología viable a partir de derivados de la yuca y originar empaques biodegradables, dando como resultado el surgimiento de una industria de diversificación de cultivos autóctonos, así como el beneficio a la investigación básica y aplicada [1].

### 1.2.1 El PLA (Acido Poliláctico)

Un polímero biodegradable se define como una sustancia polimérica cuya degradación es en parte asegurada por un sistema biológico; un microorganismo o una célula viva. En la Figura 3 se muestra la unidad estructural del principal polímero biodegradable, el ácido poliláctico:

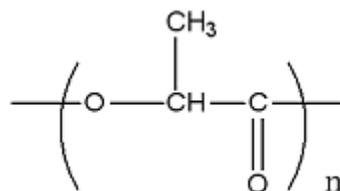


Figura 3. Ácido poliláctico [2].

Consortium Cargill-Dow principal productor mundial de este polímero, tiene una capacidad de producción anual de 140.000 toneladas, posicionando y enmarcando

este polímero en una política de desarrollo sostenible y sustentable. Como se dijo anteriormente, gracias a sus buenas propiedades mecánicas (polímero relativamente rígido), su utilización se ha extendido no solo al embalaje sino también a la biomédica en suturas y piezas como tornillos para afirmar huesos [2].

### 1.3 Estructura del almidón de yuca

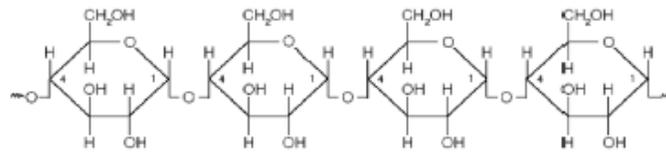
La yuca es una planta originaria de América del Sur, usada principalmente para el consumo tanto humano como animal, y en un pequeño porcentaje para la obtención de almidón y otros usos industriales. El uso de esta planta se caracteriza por el consumo de su raíz, en la que se acumulan gran cantidad de componentes entre ellos el almidón, que es la forma natural como la planta almacena energía por asimilación del carbono atmosférico mediante la clorofila presente en las hojas [13].

El almidón puede encontrarse además en otras raíces, frutos, semillas, tubérculos e incluso en bacterias que lo generan como mecanismo de defensa ante situaciones de estrés presentes en su medio. Este es un polímero natural cuyos gránulos consisten en estructuras macromoleculares ordenadas en capas y cuyas características en cuanto a composición, cantidad y forma varían de acuerdo con el tipo de fuente de la que provenga; se puede clasificar en dos clases:

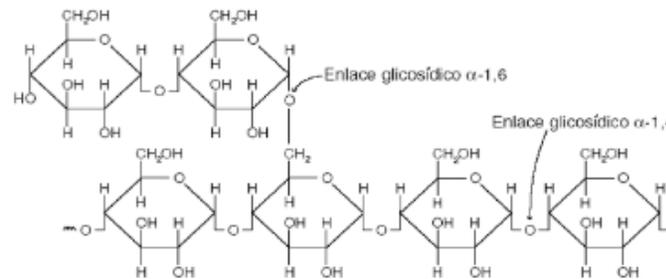
- Almidón agrio, el cual sufre un proceso de fermentación que le otorga propiedades deseables para los alimentos;
- Almidón nativo o dulce, el cual no es sometido a un proceso de fermentación y es el que generalmente se usa en la industria.

Una de las principales propiedades del almidón nativo es su semicristalinidad, donde la amilopectina es el componente dominante de la cristalización en la mayoría de los almidones. La porción cristalina está compuesta por estructuras de doble hélice formadas por puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo en las cadenas lineales de la molécula de amilopectina y por cadenas externas de amilopectina unidas con porciones de amilosa [13].

Los gránulos de almidón están compuestos por capas externas de amilopectina y capas internas de amilosa, cuya proporción es variable dependiendo de la fuente del almidón. Su composición química es la de un polisacárido formado únicamente por unidades glucosídicas, es decir, es una macromolécula formada por gran cantidad de moléculas de glucosa que se repiten. En el caso del almidón de yuca, su tamaño puede variar de 5  $\mu\text{m}$  a 35  $\mu\text{m}$ , su forma es entre redonda y achatada y su contenido de amilosa es alrededor del 17% [13]. En la Figura 4 se observa las formulas químicas de de la amilasa y amilopectina.



Estructura de molécula de amilosa



Estructura de molécula de amilopectina

Figura 4. Estructura molecular de la amilosa y amilopectina [13].

### 1.3.1 Propiedades del almidón

Según el uso para el que se requiera el almidón existen varias propiedades que determinan la forma en que debe ser tratado:

#### 1- Gelatinización

Se define como la pérdida de la semicristalinidad de los gránulos de almidón en presencia de calor y altas cantidades de agua, con muy poca o ninguna ocurrencia de despolimerización.

La gelatinización ocurre en un rango estrecho de temperaturas que varía dependiendo de la fuente del almidón, en este proceso los gránulos hinchados del almidón ocupan los espacios vacíos. La viscosidad aumenta con la temperatura hasta la fragmentación de los gránulos, que se desintegran y se disuelven generando un decrecimiento en la viscosidad. En el caso de su gelatinización en el agua, esta ocurre en temperaturas entre los 60 °C y 67 °C, lo que consiste en un hinchamiento de las moléculas de almidón debido a que el agua penetra en su estructura molecular, la movilidad térmica de las moléculas y la disolución debida al hinchamiento generan una disminución de la cristalinidad por el desenrollado de las dobles hélices, hasta que la estructura granular se fragmenta casi por completo. La viscosidad de esta mezcla depende de la concentración y de la absorción de agua por parte del almidón [13].

En condiciones de alta concentración de almidón, como suele suceder cuando se pretende obtener un almidón termoplástico, el comportamiento es diferente.

Mientras más rigidez haya, se da una mayor resistencia debido al choque entre los gránulos hinchados, lo que genera una alta viscosidad. En estas condiciones, cuanto más calor se adiciona, el agua retenida desintegra la estructura ordenada de los gránulos y la amilosa comienza a difundirse formando un gel que finalmente soporta los gránulos compuestos principalmente por amilopectina [13].

## ***2- Retrogradación***

La retrogradación se define como un incremento espontáneo del estado del orden, es decir, una reorganización de los puentes de hidrógeno y reorientación de las cadenas moleculares. Paralelamente se genera un decrecimiento de la solubilidad en el agua fría y un incremento de la turbiedad.

Posterior a la gelatinización, en el momento en que deja de introducirse calor inicia la etapa de enfriamiento, la viscosidad crece de nuevo y se presenta el fenómeno denominado retrogradación [13].

## ***3- Transición vítrea***

La transición vítrea de un material polimérico se refiere al cambio inducido por el calor sobre las características de un polímero, el cual con el incremento de la temperatura pasa de sólido, frágil y quebradizo a flexible.

La temperatura a la cual ocurre este fenómeno se conoce como temperatura de transición vítrea, que tiene influencia sobre varias propiedades del polímero, entre las cuales se encuentran la rigidez en las cadenas, entrecruzamiento de cadenas, presencia de cristales, incremento de las secciones amorfas, entre otras [13].

## ***4- Desestructuración***

La desestructuración del almidón nativo consiste en la transformación de los gránulos de almidón cristalino en una matriz homogénea de polímero amorfo, acompañada por un rompimiento de los puentes de hidrógeno entre las moléculas de almidón, de un lado, y la despolimerización parcial de las moléculas, del otro.

El proceso de desestructuración puede generarse por la aplicación de energía al almidón, los factores químicos y físicos involucrados son temperatura, esfuerzo cortante, como el que genera una máquina tradicional para trabajar plásticos como las extrusoras e inyectoras, tasa de esfuerzo, tiempo de residencia, contenido de agua y cantidad de energía aplicada [13].

## 1.4 Procesamiento de los termoplásticos

Los bioplásticos se puede acondicionar muy fácilmente a diferentes procesos de termoplastificación, tales como:

- Moldeo por compresión.
  - Moldeo por inyección.
  - Soplado.
  - Moldeo por radiación.
- [14], [15], [16].

A continuación se describe los procesos moldeo por compresión e inyección ya que son los más utilizados para materias primas termoestables y termoplásticas respectivamente.

### 1.4.1 Moldeo por compresión

El moldeo por compresión es un proceso de conformado de piezas en el que la materia prima en forma de polvo, generalmente un polímero termoestable, es introducido en un molde abierto al que luego se le aplica presión y calor constantes entre 2 toneladas y 150°C respectivamente, la temperatura y la presión se mantienen hasta que la reacción finaliza, esto produce que reticule<sup>1</sup> y adopte definitivamente la forma deseada, por último se separan las partes del molde para sacar el producto final. Los procesos de moldeo por compresión pueden clasificarse en:

- Moldeos manuales, usados para ensayo.
- Moldeos semiautomáticos, en los cuales a la etapa de prensado le sigue un ciclo programado, pero el operador carga y descarga manualmente la prensa.
- Moldeo automático, que opera bajo ciclos de prensado completamente automático (incluyendo la carga y la descarga automática) [17].

En la Figura 5 se representa las etapas de un proceso de moldeo por compresión.

---

<sup>1</sup> **Reticulación:** es una reacción química presente en la química de polímeros. Esta reacción, de igual manera que la vulcanización o el curado, implica la formación de una red tridimensional formada por la unión de las diferentes cadenas poliméricas. Después de la reticulación las moléculas adquieren mayor rigidez, ya que los movimientos de relajación se encuentran impedidos.

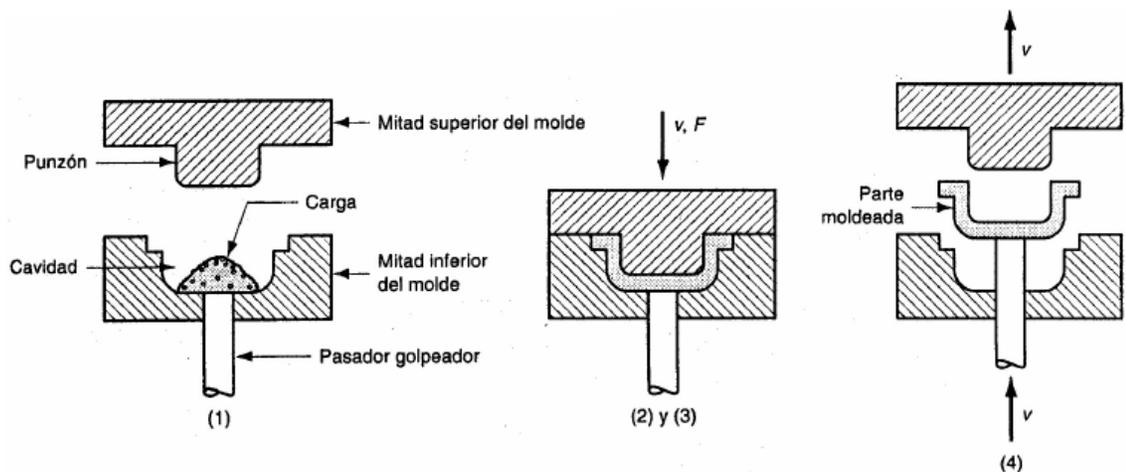


Figura 5. Proceso moldeo por compresión [17].  
 Plano lado izquierdo: Dosificación de materia prima (1). Plano central: Compresión y curado (2 y 3). Plano lado derecho: Expulsión (4).

Una planta de moldeo por compresión básicamente está constituida por una prensa hidráulica encargada de generar la presión suficiente para realizar el proceso de prensado, dos placas: una superior y otra inferior, donde va dispuesto la parte macho y hembra del molde que dan la forma al producto. Un émbolo que se encuentra dispuesto en forma vertical realiza la acción de desplazamiento en carrera ascendente (placa del fondo) o en carrera descendente (placa superior), esta última es la configuración más común.

Debido a que el proceso requiere del calentamiento del molde, se puede utilizar: resistencia eléctrica, vapor de agua o circulación de aceite caliente. En la Figura 6 se observa y describen los elementos básicos que conforman una planta de moldeo por compresión.

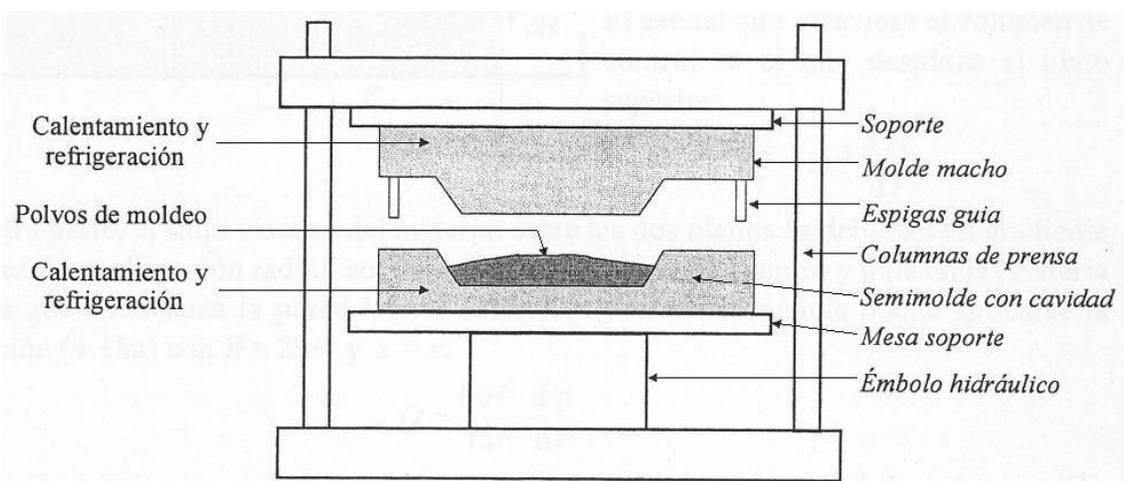


Figura 6. Planta básica utilizada para moldeo por compresión [18].

### 1.4.2 Moldeo por inyección

El moldeo por inyección ha sido una de las herramientas de fabricación más importantes para la industria del plástico desde que se patentó la máquina de tornillo recíprocante en 1956. En la actualidad es prácticamente imposible hacer algún artículo sin partes moldeadas por inyección [19].

En este tipo de moldeo la materia prima llamada termoplástico se funde por el efecto del calor a una temperatura establecida, una vez se encuentre como fluido, la máquina llamada inyectora (Figura 7); llena las cavidades huecas de un molde con una presión y velocidad determinada. Transcurrido cierto tiempo, el plástico fundido en el molde, va perdiendo su calor y retornando a su estado sólido. El producto terminado es una pieza de plástico sólido pero con la forma de las partes huecas del molde que lo contiene, que al ser retirado de este puede quedar con sobrantes o desechos de material provenientes de los canales de alimentación.

Existen moldes que no generan residuos, son los llamados moldes con cámaras calientes, estos mantienen los conductos o canales por donde circula el material, caliente, y el material no se solidifica [19].

Cada molde genera un tipo de pieza específica, así cada vez que se quiera obtener otro diseño de pieza se tiene que cambiar de molde.

El moldeo por inyección es un proceso físico porque no existe variación en la composición química del termoplástico y es reversible porque el termoplástico después del proceso conserva las mismas características que al principio, o sea, que se podría triturar la pieza y repetir el proceso con ese material [19].

En realidad cada vez que se realiza el proceso el material termoplástico sufre una pequeña degradación, su cuantía depende de las condiciones de transformación (temperatura, velocidad, tiempo, presión) y de la forma del molde por donde fluye [19].

Existen una serie de elementos muy importantes añadidos al proceso de inyección, estos son los periféricos. Entendemos por periféricos cualquier elemento añadido al proceso de inyección que puede repercutir sobre el funcionamiento del proceso, o sobre la calidad de las piezas. Dentro de los periféricos están [19]:

- La estufa de secado del material termoplástico.
- El atemperador del molde.
- El robot o manipulador de extracción de piezas.
- El regulador exterior de cámaras calientes del molde [19].

La velocidad y consistencia son características claves para que la operación de moldeo por inyección sea exitosa, ya que los márgenes de ganancia generalmente están por debajo del 10 % [20].

### **Velocidad:**

Es la cantidad de tiempo necesario para fundir el plástico, inyectarlo en el molde, enfriarlo y extraer una parte terminada.

Utilizar moldes más grandes cada vez que la maquina realiza un único ciclo aumenta la producción. Estos moldes se conocen como moldes de cavidades múltiples [20].

### **Consistencia:**

El procesamiento más consistente es el resultado de un control cuidadoso de la temperatura del plástico, presión del plástico, velocidad a la que el plástico llena el molde y las condiciones de enfriado. Estas cuatro variables primarias de moldeo son independientes y con frecuencia pueden utilizarse para comprender los cambios en el proceso y solucionar problemas. Si las variables se aplican a prácticamente todos los procesos de moldeo por inyección, el proceso será levemente distinto en cada negocio, según la aplicación el plástico utilizado y las preferencias del moldeador [20].

### **Velocidad de llenado:**

En las aplicaciones de paredes delgadas, el material debe inyectarse en el molde tan rápido como sea posible para evitar que el plástico se endurezca antes de que la parte se llene por completo. Por lo general, las más recientes tecnologías de resinas y maquinarias en el área se concentran en rellenos más rápidos y sencillos. El moldeador puede minimizar el tiempo de ciclo mediante una mejor capacidad del llenado, ahorrar en el costo de las resinas llenando moldes más delgados y aumentar la producción por la utilización de moldes más grandes de cavidades más altas [20].

El moldeo de paredes delgadas se logra utilizando máquinas que inyectan material en menos de un segundo y son lo suficientemente grandes como para soportar moldes de gran tamaño y múltiples cavidades. Las tapas y contenedores de paredes delgadas tienden a ser pequeños, entonces los moldes pueden utilizarse para fabricar más de 100 tapas pequeñas por ciclo [20].

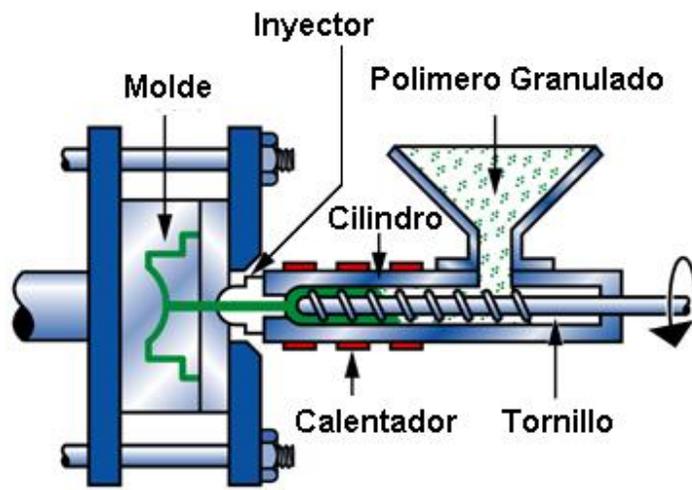


Figura 7. Máquina de moldeo por inyección [21].

## **2 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN MECÁNICA DE LA PLANTA PILOTO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN**

La primera etapa desarrollada en este trabajo de grado fue diseñar la planta piloto de moldeo por compresión para el Laboratorio de Reología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca.

El diseño de la planta piloto de moldeo por compresión en la cual se realizarán las pruebas de la materia prima, necesarias para la caracterización del producto biodegradable a base de harina de yuca, fibra de fique y plastificante, se realizó de una manera conjunta y simultanea entre los participantes del trabajo de grado y la empresa Vallecaucana PLASMEGA S.A, diseñando y manufacturando respectivamente, garantizando de esta manera la cualidad de ergonomía y funcionamiento. Este acompañamiento continuo (diseño-manufactura) evitó el error llamado “enfoco al otro lado de la pared” que consiste en primero diseñar y luego construir sin ninguna interacción entre las partes en la ingeniería del producto. Esta metodología es poco apropiada puesto que los errores de diseño no se corrigen sino hasta que el producto está totalmente terminado, lo que conlleva a costos elevados de rediseño.

Para determinar las características del diseño de la planta se realizaron varios encuentros con el ingeniero solicitante del proyecto, Dr. Héctor Samuel Villada, y con la investigadora que iba a interactuar con la misma, Mg. Diana Navia, quienes describieron las expectativas mínimas de calidad y diseño del producto a elaborar. Una vez organizadas y clasificadas las ideas de cómo se hacía y debía quedar el producto entonces se procedió finalmente a elaborar los requerimientos de la planta, del anterior análisis de requerimientos, se obtuvieron dos grupos importantes de los mismos: requerimientos físicos o propios de la planta y requerimientos del sistema de automatización de la misma.

### **2.1 Requerimientos de la planta de moldeo por compresión**

1. El proceso de transformación de la materia prima debe ser a través de moldeo por compresión y curado por calentamiento.
2. La planta debe producir dos (2) productos en forma de probeta, empleando un molde de dos partes hembra - macho, que cumplan con las dimensiones descritas en la norma internacional ASTM D 638 con un grosor variable entre 1 y 3 mm.
3. El molde debe incorporar un tratamiento especial para que el producto no se adhiera a las paredes del mismo.

4. Las partes hembra –macho del molde deben ser diseñados para poder ser tanto calentados, por medio de aceite, vapor o resistencia eléctrica, como enfriados bien sea con aire o agua.
5. La altura para permitir la operación óptima de la planta debe tener la longitud promedio de trabajo de una persona colombiana estando de pie, lo cual busca evitar el desgaste del operario a la hora de laborar en ella.
6. La planta debe ser ubicada sobre una base, la cual debe brindar estabilidad, para evitar accidentes por vibración y/o pérdida del centro de masa. Las partes metálicas de la base deben ser fabricadas en materiales no corrosivos o en su defecto con un tratamiento antioxidante.
7. La planta debe incorporar un sistema mecánico, de accionamiento neumático o hidráulico, de compresión entre los moldes sobre el producto.
8. La planta debe incorporar un sistema mecánico, de accionamiento neumático o hidráulico, de expulsión del producto terminado.
9. Deben existir elementos aisladores que eviten la pérdida de energía calorífica por conducción desde los moldes hacia la base o a los sistemas mecánicos.
10. Debe existir un aditamento que permita dosificar la materia prima en el molde.
11. La planta debe tener un sistema de seguridad para evitar que el operario sufra accidentes en el momento de dosificar la materia prima o sacar el producto terminado.

## **2.2 Requerimientos del sistema de Automatización**

1. La automatización de la planta debe permitir que la operación de la misma se pueda realizar tanto en forma Manual, por parte de un usuario, como en forma Automática, configurando previamente los tiempos y acciones a ejecutar en un sistema programable.
2. La automatización debe contar con un sistema de control regulatorio de temperatura que permita regular la temperatura, tanto de la parte hembra como macho del molde, además debe ser automático manteniendo la temperatura del molde en el valor de consigna escogido por el operario, independiente del modo (manual o automático) en el que se opere la planta.
3. El rango de temperatura dentro del cual se pueda calentar el molde debe estar en el rango de 50 °C. - 200 °C.
4. La presión con la cual se comprime la materia prima por parte de los sistemas de compresión y expulsión debe ser variable y configurable en forma manual en el rango de 0 psi - 50 psi. El accionamiento de los sistemas de compresión y expulsión debe poder realizarse tanto en forma manual como automática.
5. Debe existir un sistema de monitoreo y supervisión, desde el cual se pueda configurar la operación del proceso y registrar su comportamiento.

## 2.3 Sistemas fundamentales de la planta de moldeo por compresión

Para lograr el cumplimiento de cada uno de los requerimientos de la sección 2.1 se contó con la ayuda de la herramienta software de diseño asistido por computador Solid Edge versión 20. Por medio de la misma y con la experta asistencia de la empresa PLASMEGA se logró diseñar una planta modular la cual se compone de seis partes fundamentales:

1. Estructura base
2. Molde de probetas
3. Sistema mecánico de compresión
4. Sistema mecánico de expulsión
5. Sistema de dosificación
6. Sistema de aislamiento térmico

La estructura base es el soporte donde las demás piezas se integran, el molde de probetas con su parte hembra y macho le dan forma a la materia prima, el sistema mecánico de compresión es quien sube o baja la parte macho del molde para comprimir la materia prima sobre la parte hembra, el sistema mecánico de expulsión del producto terminado, el sistema de dosificación empleado para depositar la materia prima en el molde hembra, y finalmente el sistema de aislamiento térmico que tiene como propósito separar piezas metálicas para evitar la transferencia de calor por conducción.

Las soluciones mecánicas y tecnológicas finalmente incorporadas en las seis partes fundamentales del diseño final de la planta piloto, corresponden a decisiones concertadas entre las partes responsables en su diseño y fabricación. Entre las principales soluciones acordadas se tienen:

- El sistema mecánico de compresión debía funcionar mediante un sistema de accionamiento neumático y no hidráulico. La razón principal fue que los primeros experimentos realizados comprimiendo la materia prima con masas arrojadas que con una fuerza en el rango de 10 - 30 libras fuerza se obtenían resultados satisfactorios. La segunda razón los accionamientos hidráulicos requieren mayor mantenimiento y pueden presentar problemas de contaminación de la materia prima con el aceite. La tercera razón un sistema de accionamiento neumático también puede ser empleado en el sistema de enfriamiento del molde. Al tomar esta decisión el sistema de expulsión del producto también sería accionado con aire a presión. El aire a presión sería suministrado por un compresor.
- El calentamiento del molde debía realizarse mediante resistencias eléctricas y no por vapor de agua o aceite, debido a los costos que representaba para una

planta piloto. Se incorporarían resistencias eléctricas en las dos partes del molde hembra y macho.

- El enfriamiento del molde inicialmente se procedió a realizarlo por medio de aire. Para ello PLASMEGA diseño en forma experimental un sistema de enfriamiento y expulsión combinados que funcionaban con circulación de aire dentro del molde. Sin embargo las pruebas realizadas no arrojaron resultados satisfactorios en la expulsión del producto terminado, por lo que se desechó este sistema. Por otra parte en las mismas pruebas se determinó a nivel cualitativo, por parte de los investigadores del proyecto macro, que el posterior enfriamiento del molde al curado de temperatura no tenía incidencia en las propiedades finales del producto, por lo que se decidió en consenso no incorporarlo dentro de la planta.
- Para el aditamento de dosificación solicitado por el requerimiento de planta No. 10, se acordó aceptar la recomendación de PLASMEGA de diseñar una pieza mecánica de operación manual, donde primero el operario organiza la materia prima, segundo acopla la pieza a la parte hembra del molde y tercero deposita la materia a procesar. Este sistema de dosificación de la materia prima, así concebido, tiene como propósito eliminar el desperdicio.

Cada una de las seis partes fundamentales con las soluciones tecnológicas incorporadas que componen la planta piloto se explica con mayor detalle a continuación.

### **2.3.1 Estructura base**

Esta pieza es la encargada de soportar los sistemas de compresión, expulsión y aislamiento térmico e integrar junto con el molde de probetas toda la planta. En la Figura 8, lado izquierdo, se muestra en plano alzado la forma piramidal que se le diseñó a la pieza, la cual busca brindar de esta manera estabilidad a todo el sistema. La altura de la estructura se escogió de 90 cm ya que la estatura promedio de un operario colombiano oscila entre 160 y 170 cm, buscando que el desempeño del trabajo sea el más adecuado y dar así cumplimiento al requerimiento de planta No. 5. En la Figura 9, lado izquierdo, se puede observar la vista frontal de la pieza, en la cual se aprecian las dimensiones: segmento superior 380 mm, segmento inferior 516.81 mm y altura 896.84 mm. En la Figura 9, lado derecho, se tiene la vista de la cara lateral de la pieza con las siguientes dimensiones: segmento superior 280 mm, segmento inferior 373.71 mm. En la Figura 8 igualmente se pueden observar dos (2) grupos de cuatro (4) orificios de 10 mm de diámetro ubicados, cada grupo, en los lados laterales de la parte superior de la base, los cuales tienen como propósito permitir la unión mecánica por medio de tornillos de la estructura base con la platina base que a su vez sostiene el resto de los sistemas de la planta piloto.

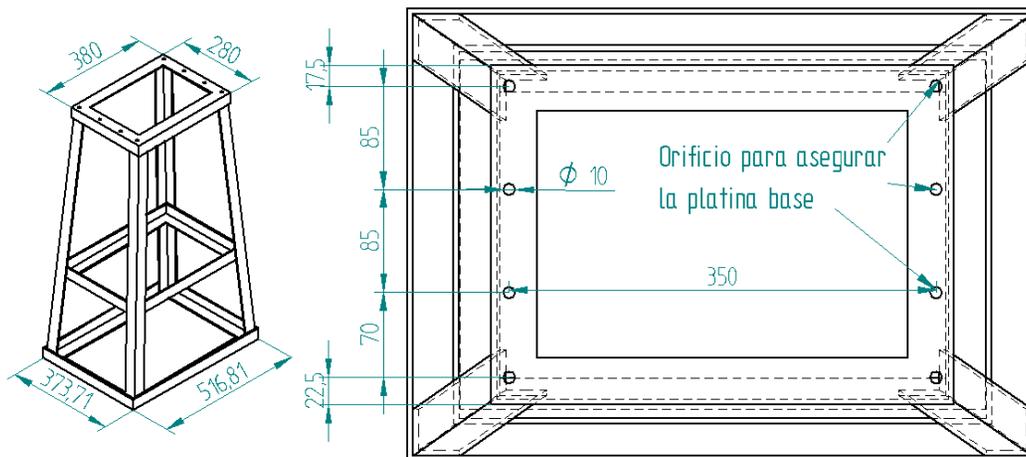


Figura 8. Planos en vista alzada y en perspectiva de la estructura base. Izquierda: vista en plano alzado. Derecha: vista en perspectiva. Dimensiones en mm.

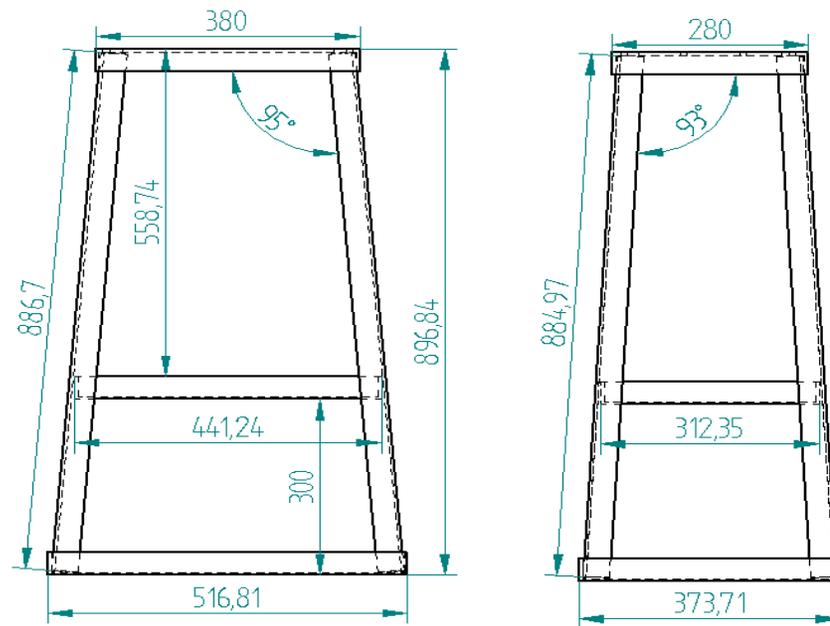


Figura 9. Planos anterior y lateral de la estructura base. Izquierda: Estructura base vista frontal. Derecha: Estructura base vista lateral. Dimensiones en mm.

El material seleccionado para la construcción de la estructura base fue ángulo en acero A-36 de 1 ½" estructural al carbono, utilizado en la mayoría de construcciones metálicas por ser suave y dúctil es decir de fácil soldabilidad. El ensamble se realizó con soldadura por fusión (soldadura de arco) con electrodo de rútilo 06059 y toda la pieza se encuentra recubierta con pintura de aceite color azul por tratarse de un material corrosivo.

En la Figura 10 se pueden observar dos imágenes de la estructura base finalmente terminada, junto con algunos aditamentos neumáticos que inicialmente se ubicaron en la base por parte de la empresa PLASMEGA.



Figura 10. Imágenes de la estructura base terminada. Lado izquierdo: Estructura base vista frontal. Lado derecho: Estructura base vista lateral.

### 2.3.2 Molde de probetas

El propósito del molde es dar forma a un producto denominado probeta. La materia prima del producto es una mezcla de harina de yuca, fibra de fique y plastificante compactada en forma de lámina rectangular de grosor variable con medidas de 165 mm de largo, 20 mm de ancho y un estrechamiento de 13 mm en la parte central de la misma. Estas dimensiones y su forma exacta se pueden apreciar en la Figura 11. Las dimensiones y forma obedecen a la norma internacional ASTM D 638. Norma que debe ser empleada para garantizar que el producto terminado, que se busca caracterizar, tenga la unificación y especificaciones necesarias que conlleven a una compatibilidad en los resultados obtenidos en cada prueba de material y puedan ser comparados con estándares internacionales.

El molde de probetas se constituye en la parte más importante y compleja de toda la planta puesto que además de darle la forma al producto en él interactúan los sistemas de calentamiento, de compresión, expulsión y la toma de señal de temperatura. El material utilizado para su construcción fue Duraluminio, una aleación constituida por 94% de aluminio, 4% de cobre y pequeñas cantidades de

hierro, manganeso, magnesio y silicio. Este es un material apto para la fabricación de moldes por su tenacidad o resistencia mecánica a temperatura ambiente, comparable a la del acero, su bajo peso específico y su facilidad en la conductividad del calor. Sin embargo, su resistencia a la corrosión, soldabilidad y aptitud para el anodizado son bajas [22]. Para evitar la corrosión y la adherencia de la materia prima a las paredes del mismo se recubrió con una capa de teflón con espesor de 0.2 mm.

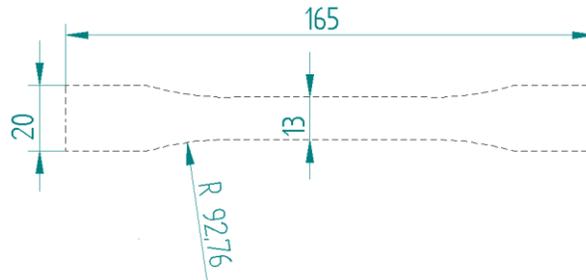


Figura 11. Probeta con unidades en milímetros (mm)

Aunque se había planeado inicialmente diseñar un molde para sacar nueve (9) probetas la dimensión física que implicaba y, en particular, su costo, condujo a disminuir el número de probetas a solo dos (2). El molde finalmente diseñado es una pieza en forma rectangular dividida en dos partes similares, la pieza hembra, estática, ubicada sobre la cima de la estructura base y la pieza macho, con movimiento vertical, ubicada sobre la pieza hembra. Sobre las caras internas de las dos piezas se han diseñado dos probetas una al lado de la otra a lo largo del molde.

- La pieza hembra: En la Figura 12 se puede observar en plano alzado la cara inferior de la pieza, se trata de un bloque de 282 mm de largo, 182 mm de ancho y 35 mm de espesor. Presenta seis (6) orificios de 6 mm de diámetro ubicados de a tres (3) a los dos lados del largo de la pieza, estos sirven para asegurar la pieza hembra a la platina inferior. Igualmente presenta cuatro (4) orificios transversales de 18 mm de diámetro avellanados a 22 mm, por medio de los cuales se aseguran las guías que permiten el desplazamiento vertical de la parte macho del molde. Finalmente presenta cuatro (4) orificios transversales, más internos, de 14 mm de diámetro por donde pasan las guías del sistema de expulsión.

En la Figura 13 se pueden apreciar las perspectivas de dos (2) cavidades con forma de probeta donde se deposita la materia prima, dos (2) entradas (vaciados) de 12 mm de ancho donde se alojan los topes para acoplar el sistema de dosificación, cuatro (4) orificios longitudinales de 267 mm de largo en donde entran las resistencias tubulares y un (1) orificio de 150 mm de longitud donde entra la termocupla tipo j.

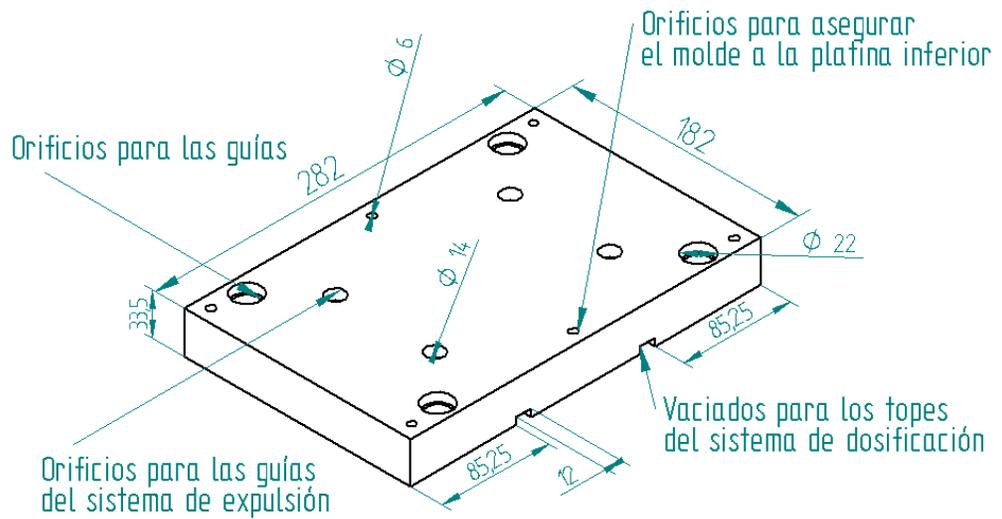


Figura 12. Plano en vista alzada de la cara inferior de la pieza hembra del molde. Dimensiones en mm.

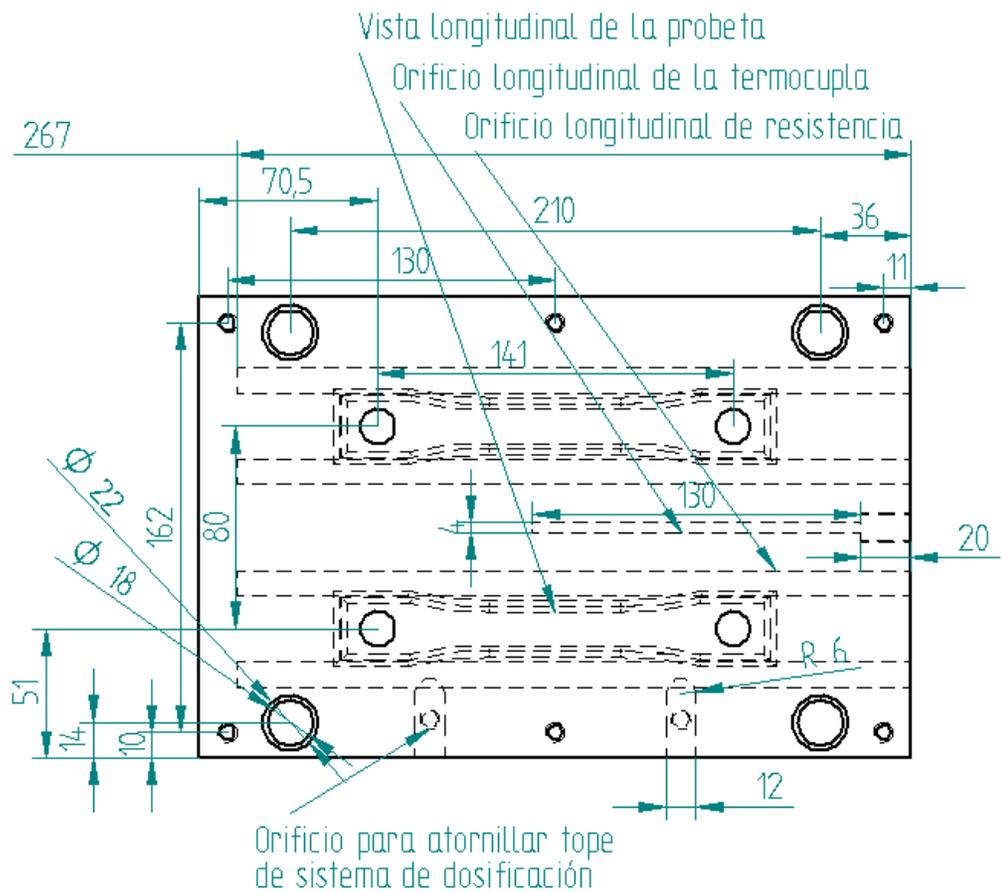


Figura 13. Plano cara superior de la pieza hembra del molde con perspectivas de las dos probetas. Dimensiones en mm.

En la Figura 14 se pueden observar los vaciados en forma de probetas vistos en corte transversal, donde entra la pieza expulsora, una serie de orificios longitudinales al molde, cuatro (4) de 10 mm de diámetro para alojar las resistencias de calefacción y uno (1) central de 12 mm de diámetro para instalar el termopar parte hembra. En el detalle A, lado derecho de la Figura 14, se puede apreciar las salientes agudas en 45° que presentan las probetas, estas corresponden a las cuchillas para eliminar residuos sólidos e igualmente se observan dos (2) orificios de 10 mm de diámetro que corren a los lados del vaciado en forma de probeta donde se insertan dos (2) resistencias tubulares asociadas al calentamiento de la misma.

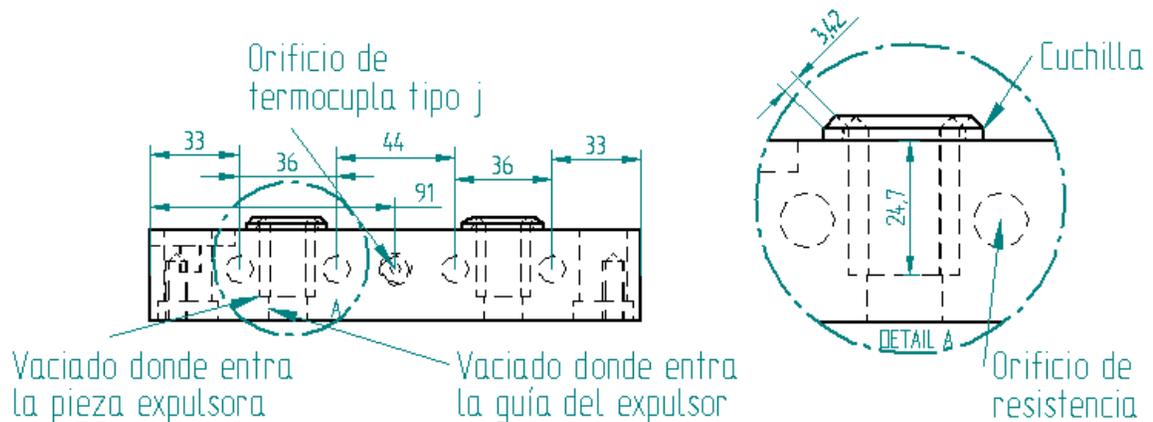


Figura 14. Plano cara lateral con perspectivas y acercamientos de la parte hembra del molde. Dimensiones en mm.

En la Figura 15 se observan dos (2) imágenes del molde parte hembra totalmente terminada. La imagen de la derecha permite observar dos vaciados en forma de probeta y cómo las cuchillas siguen todo el contorno de los mismos, en la parte superior de la misma imagen se ven, en la parte central, los dos (2) topos para asegurar el sistema de dosificación y, en los extremos, dos (2) de los cuatro (4) ejes empleados en el desplazamiento vertical del molde parte macho, finalmente se observan las piezas expulsoras dentro de los vaciados en forma de probeta que se desplazan verticalmente durante la expulsión del producto. La imagen de la izquierda muestra el conjunto molde parte hembra – parte macho con las guías de desplazamiento vertical. En la misma imagen se puede apreciar al lado izquierdo de cada parte hembra y macho del molde dos (2) conjuntos de cuatro (4) orificios, estos corresponden al sistema combinado de enfriamiento y expulsión por aire. Este sistema fue descartado ya que los orificios dispuestos para que el aire circulara se taponaban con la materia prima y el enfriamiento de las probetas no fue necesario, entre otras cosas, porque que la temperatura a la cual salía el producto era manejable y podían perfectamente enfriarse por afuera.

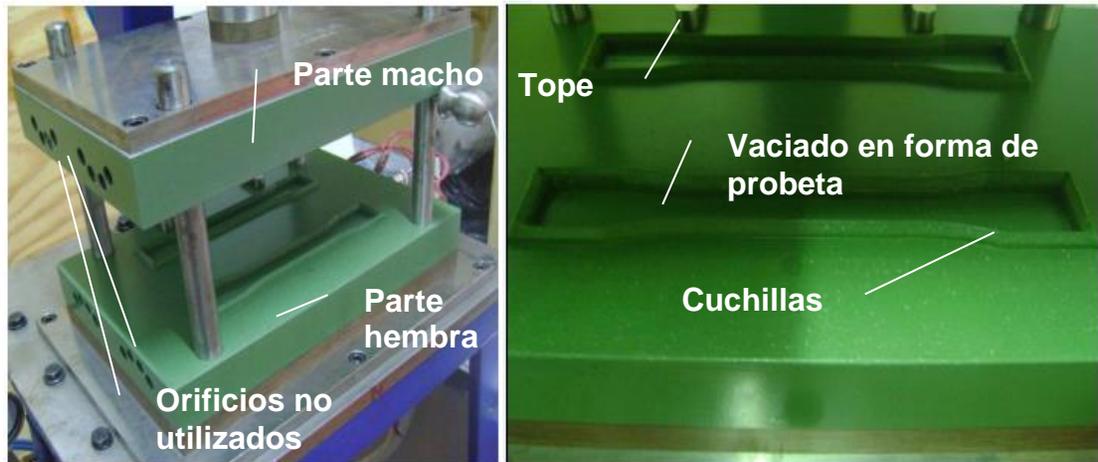


Figura 15. Imagen de la parte hembra del molde. Izquierda: Molde parte hembra ensamblado en la planta. Derecha: Acercamiento a la parte hembra del molde.

- La pieza macho: Al igual que la contra parte hembra, se trata de un bloque de 282 mm de largo, 182 mm de ancho y 36.8 mm de espesor. Presenta seis (6) orificios de 6 mm de diámetro que sirven para asegurar la pieza a una platina superior que la unirá con el sistema de compresión, cuatro (4) orificios transversales de 19.2 mm de diámetro por donde pasan las guías que permiten el desplazamiento vertical de esta pieza. En la Figura 16 se puede ver una vista en plano alzado de la parte macho del molde.

En la Figura 17 se puede apreciar la parte inferior del molde macho, la cual tiene dos (2) protusiones en forma de probeta con la cual se comprime la materia prima contra la pieza hembra, al igual que la parte hembra presenta las perspectivas de cuatro (4) orificios longitudinales de 267 mm de largo en donde entran las resistencias tubulares, un (1) orificio de 150 mm de longitud donde entra la termocupla tipo j y dos (2) vaciados donde se acoplan los topes para el sistema de dosificación.

En la Figura 18 se pueden observar las protusiones de forma de probetas vistos en corte transversal, una serie de orificios longitudinales al molde, cuatro (4) de 10 mm de diámetro para alojar las resistencias de calefacción y uno (1) central de 12 mm de diámetro para instalar el termopar parte macho. En el detalle A, lado derecho de la Figura 18, se puede apreciar las perspectivas de los vaciados (a 45°) donde entran las cuchillas de la parte hembra.

En la Figura 19 se ve el plano alzado con una vista inferior del molde macho. En la misma se observan las dos protusiones en forma de probeta, el vaciado donde entran las cuchillas de la parte hembra, los cuatro (4) orificios donde entran las guías para el desplazamiento del molde y los (2) dos vaciados para los topes del sistema de dosificación.

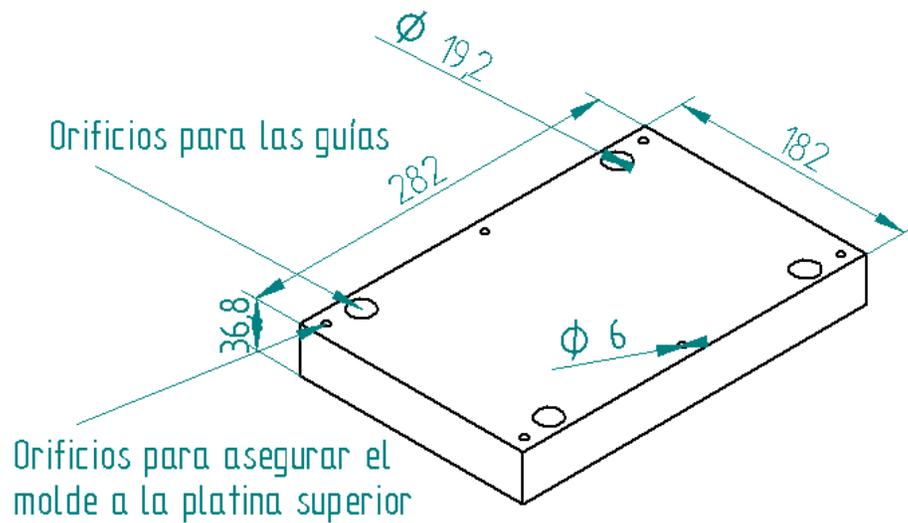


Figura 16. Plano en vista alzada de la parte macho del molde. Dimensiones en mm.

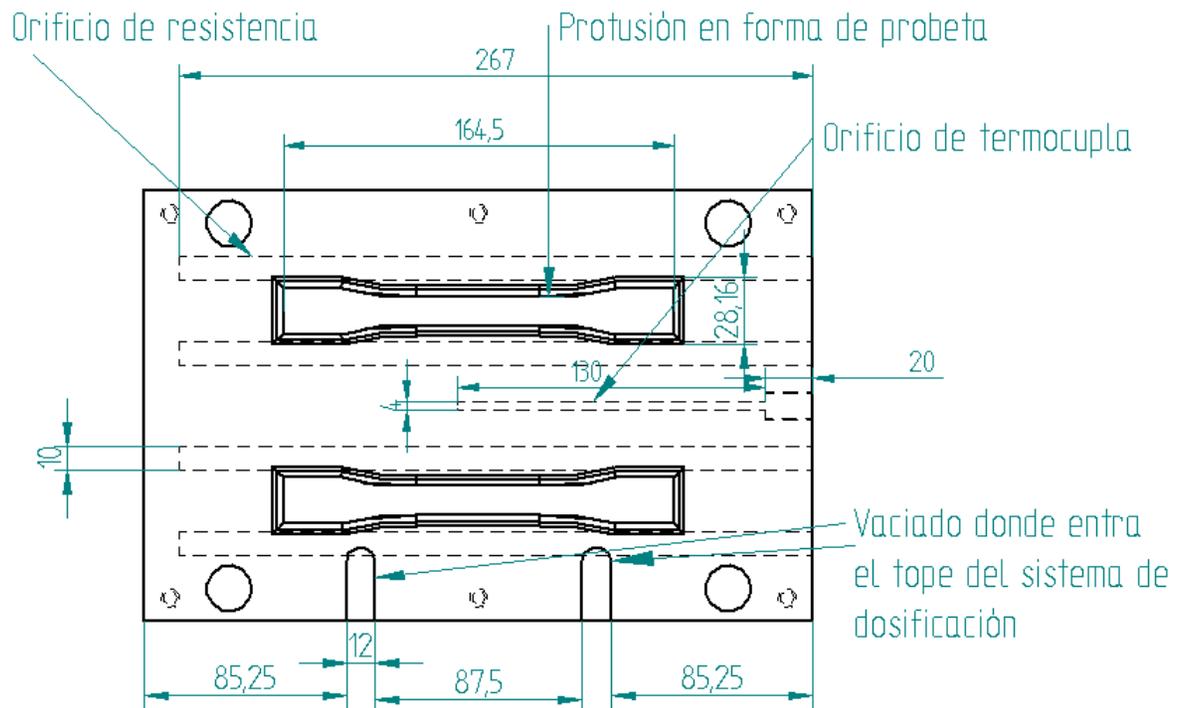


Figura 17. Cara inferior de la parte macho del molde. Dimensiones en mm.

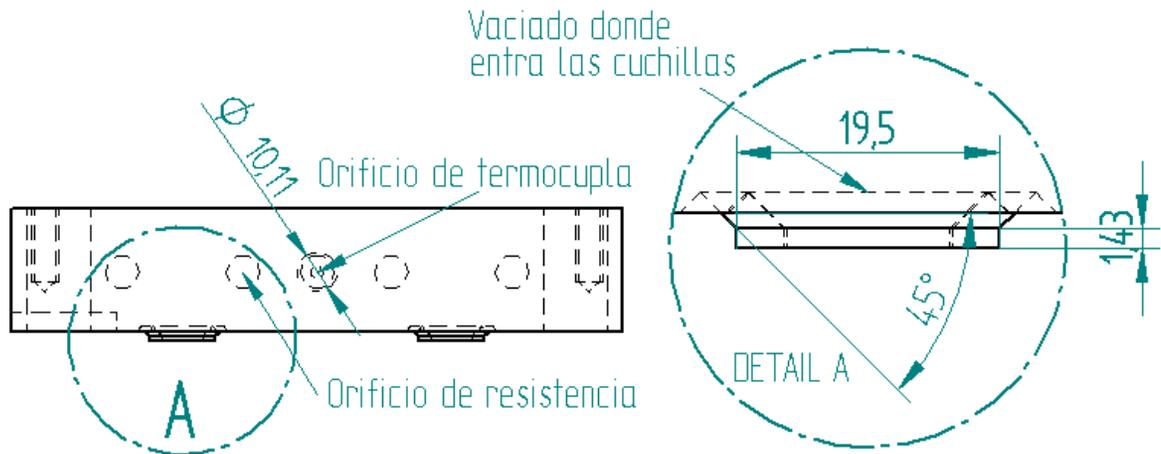


Figura 18. Plano cara lateral con perspectivas y acercamientos de parte macho del molde. Dimensiones en mm.

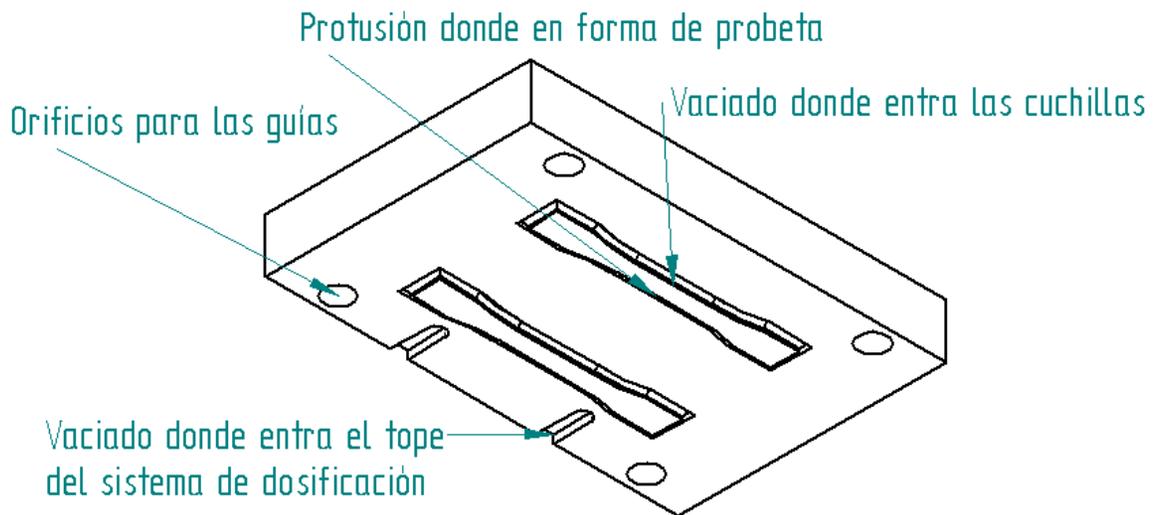


Figura 19. Plano alzado con perspectiva inferior de la parte macho del molde. Dimensiones en mm.

En la Figura 20 se observan dos (2) imágenes del molde parte macho totalmente terminada. La imagen de la derecha permite observar dos protusiones en forma de probeta y cómo el vaciado donde entran las cuchillas de la contraparte hembra sigue todo el contorno de las mismas, en la parte inferior de la misma imagen se ven, en la parte central, dos (2) vaciados donde encajan los topes del sistema de dosificación y, en los extremos, dos (2) de los cuatro (4) ejes empleados en el desplazamiento vertical del molde parte

macho. La imagen de la izquierda muestra el conjunto molde parte hembra – parte macho con las guías de desplazamiento vertical.

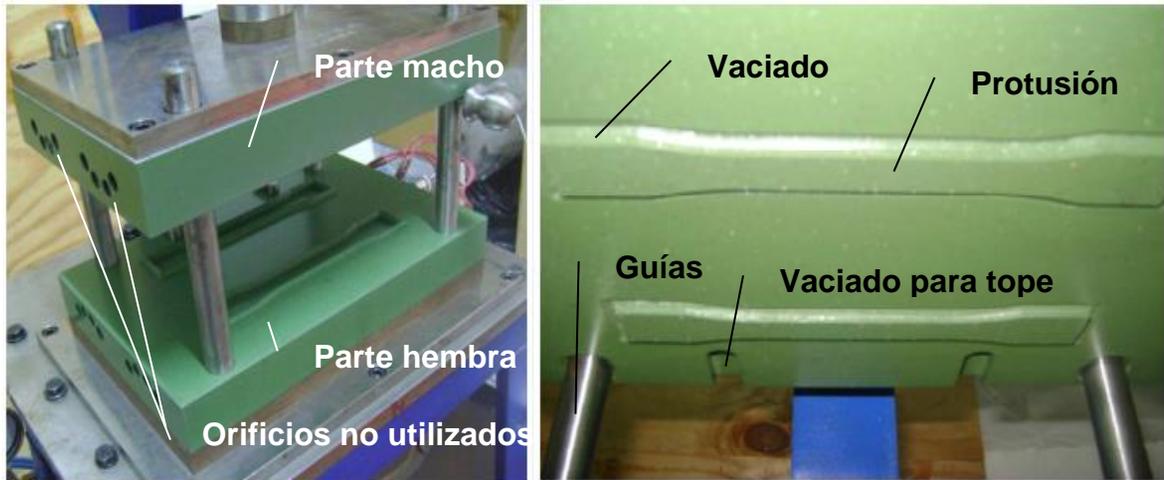


Figura 20. Molde parte macho. Lado izquierdo: Molde parte macho ensamblado en la planta. Lado derecho: Acercamiento a la parte inferior macho del molde.

### 2.3.3 Sistema mecánico de compresión

Este sistema es el encargado de subir o bajar, mediante el accionamiento de un cilindro neumático, la parte macho del molde y comprimir de esta manera la materia prima depositada en la parte hembra del molde. Para cumplir con este propósito, la planta tiene dispuesto un mecanismo que consta de las siguientes partes:

- Codo superior.
- Acople circular.
- Platina superior.
- Platina de soporte.
- Guías.
- Molde.

El codo superior es el encargado de soportar un cilindro, que a su vez y por medio del acople circular esta unido a la platina superior para sostener la parte macho del molde. Las guías permiten el desplazamiento verticalmente de la parte macho. La platina soporte asegura el codo superior a la platina base. A continuación se detalla cada una de las partes que integran el sistema mecánico de compresión.

- Codo superior: Diseñado para soportar el peso de un cilindro neumático, la parte macho del molde, la platina superior, el acople circular y la carga de trabajo que ejerce el recorrido en carrera vertical (ascendente o descendente).

El material empleado para la construcción fue hierro fundido recubierto con pintura de aceite de color azul por tratarse de un material corrosivo.

En la Figura 21 se muestra el plano con vista lateral donde se puede apreciar el codo superior con altura de 315 mm, ancho de 228.4 mm y un (1) vaciado en la parte superior derecha de mismo. En la parte inferior de la figura aparece el detalle A donde se muestra el vaciado de forma rectangular con altura de 30 mm y ancho de 54 mm, además dos (2) de los cuatro (4) orificios de 6.5 mm de diámetro que permiten asegurar el cilindro al codo.

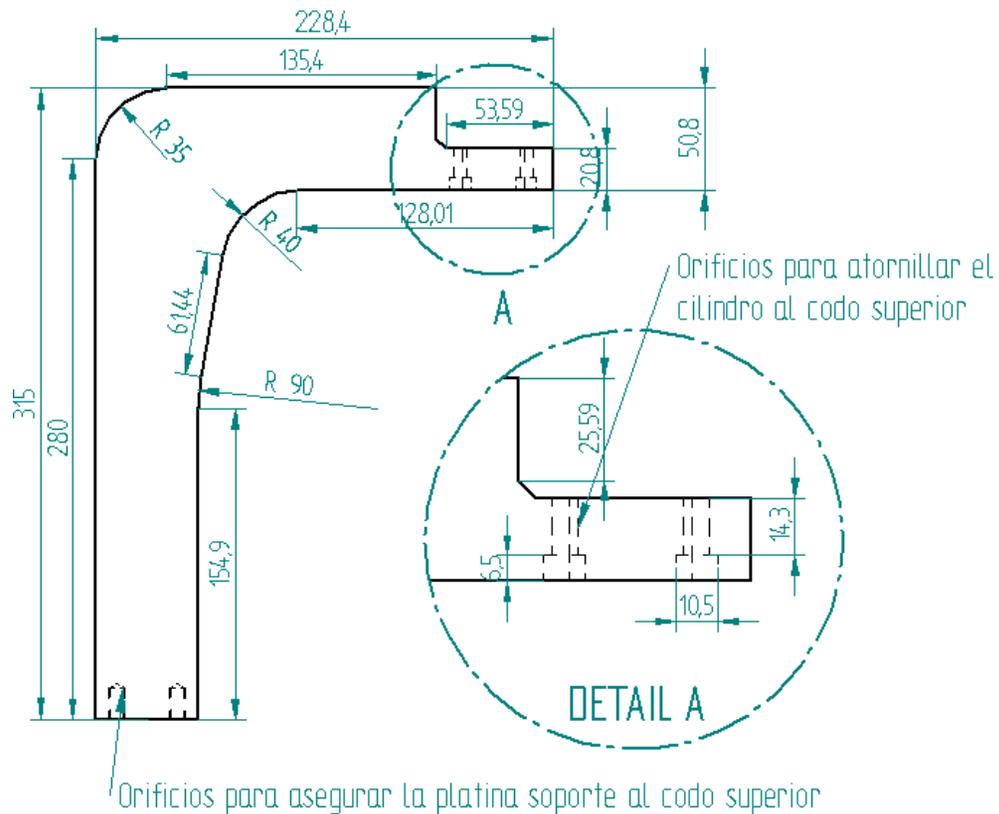


Figura 21. Plano vista lateral con perspectivas y acercamiento del codo superior.  
Dimensiones en mm.

En la Figura 22 se observan tres vistas del codo superior, la del lado izquierdo (vista superior) muestra una serie de orificios, cuatro (4) en la parte de arriba de 6.5 mm de diámetro para asegurar el codo a la platina soporte, cuatro (4) en la parte de debajo de 6.5 mm de diámetro para asegurar el cilindro y uno (1) de 31 mm de diámetro por donde entra el vástago del cilindro. En la parte central se ve la vista en plano alzado y la del lado derecho muestra la vista posterior. En el detalle B se indica las perspectivas de los orificios que permiten fijar, mediante tornillos, el codo superior a la platina soporte.

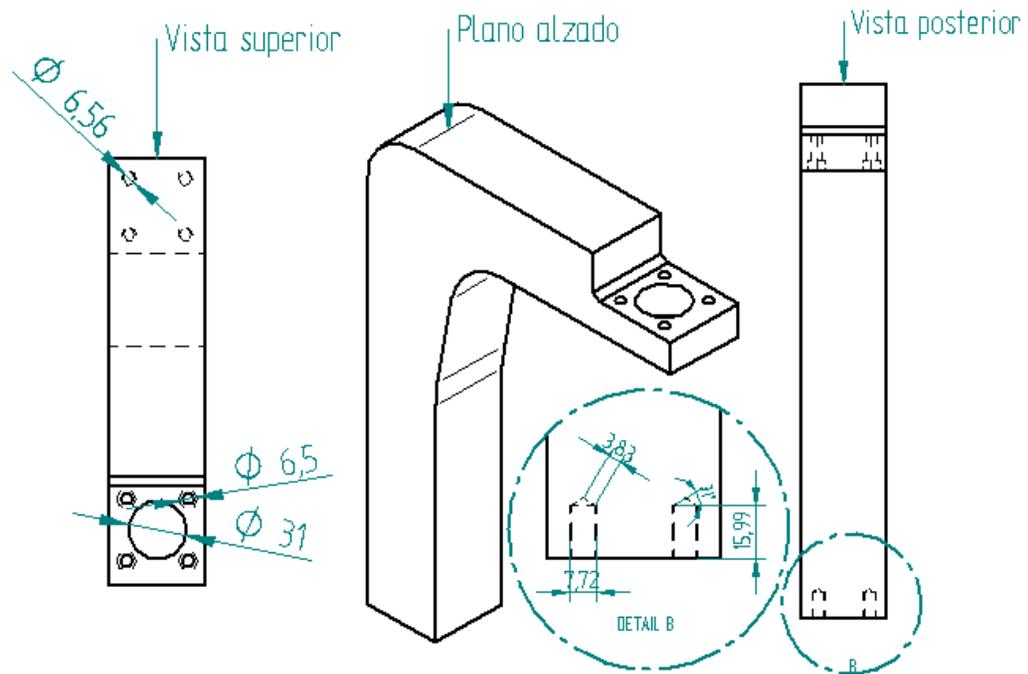


Figura 22. Planos cara superior, plano alzado y cara posterior del codo superior.  
Dimensiones en mm.

- Platina de soporte: es la encargada de fijar el codo superior a la platina base. Se trata de un bloque en hierro fundido con dimensiones: largo 110 mm, ancho 50.8 mm y espesor 18 mm como aparece en la Figura 23. En la parte superior de la figura se observa un corte transversal que muestra las perspectivas de dos (2) ranuras para atornillar la platina soporte a la platina base y dos (2) de cuatro orificios para asegurar los codos ya sea superior o inferior a la platina soporte.

En la Figura 24, se muestran cuatro orificios de 8.5 mm de diámetro y avellanados a 13 mm, para fijar mecánicamente el codo mediante tornillos, dos vaciados de 10 mm de ancho y 28 mm de largo para fijar la platina soporte a la platina base.

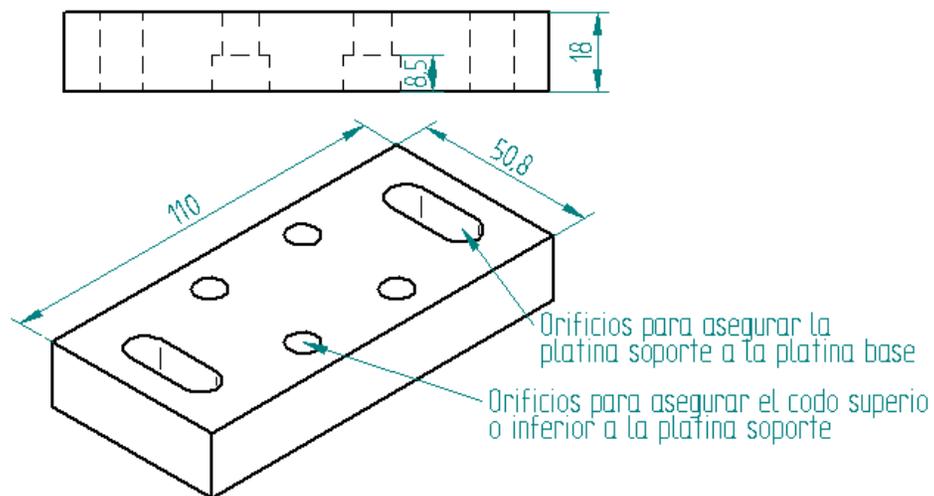


Figura 23. Planos vista frontal y en plano alzado de la platina soporte. Superior: Vista frontal con perspectivas. Inferior: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

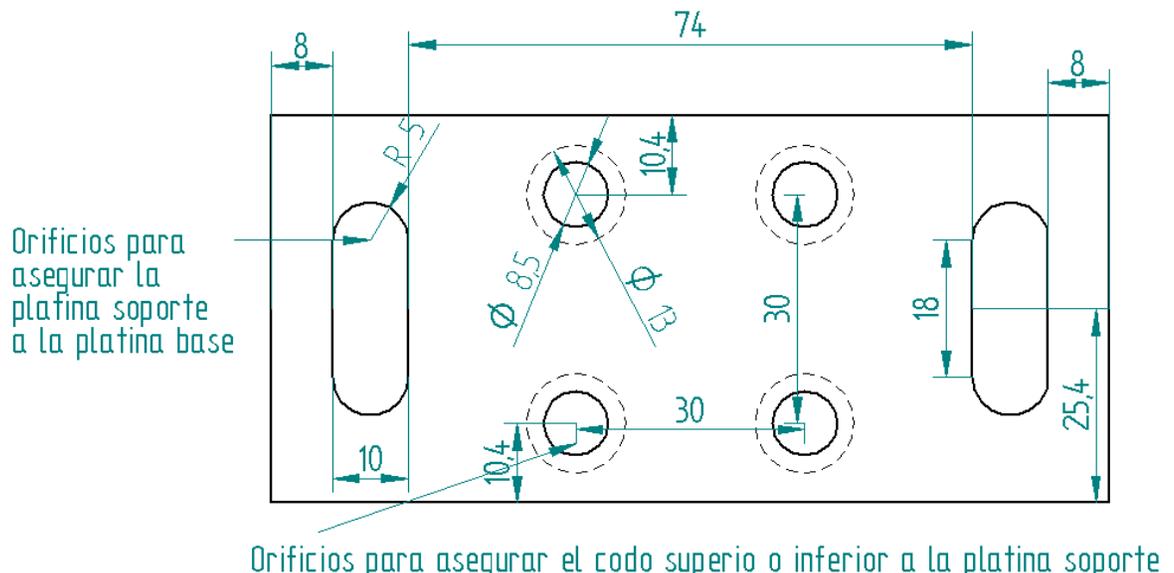


Figura 24. Plano cara superior con perspectivas de la platina soporte. Dimensiones en mm.

- Acople circular: Es el encargado de hacer la interfaz entre el cilindro superior y la platina superior, donde el vástago del cilindro se asegura mecánicamente mediante una junta roscada de 10 mm de diámetro al acople. En la Figura 25 parte superior izquierda (vista frontal), se muestran dos (2) cilindros concéntricos de 23 mm x 7.8 mm y 50 mm x 10 mm respectivamente, en la parte inferior izquierda (vista superior), se muestran cuatro (4) orificios de 7 mm de diámetro de diámetro para asegurar el acople a la platina superior y en la parte derecha de la gráfica se muestra la pieza en plano alzado.

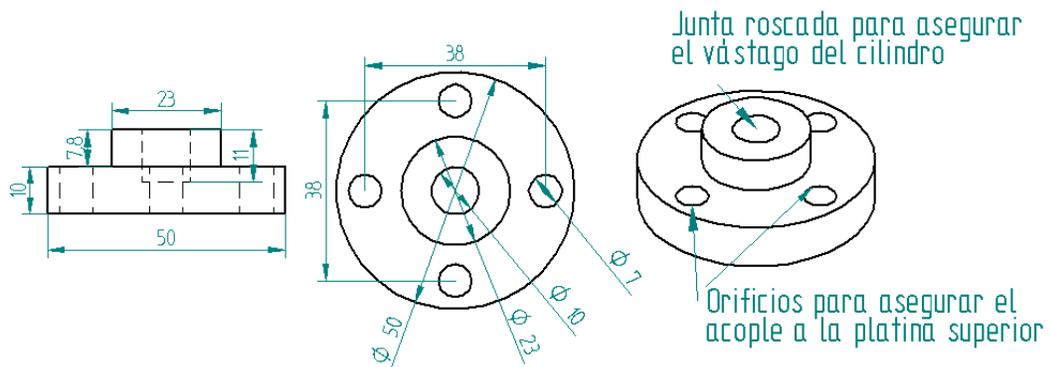


Figura 25. Plano acople circular. Izquierda: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Derecha: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

- Platina superior: Es la encargada de hacer la interfaz entre el acople circular y la parte macho del molde, es una pieza compacta de hierro de 282 mm de largo, 182 mm de ancho y 11 mm de espesor, como se muestra en la Figura 26.

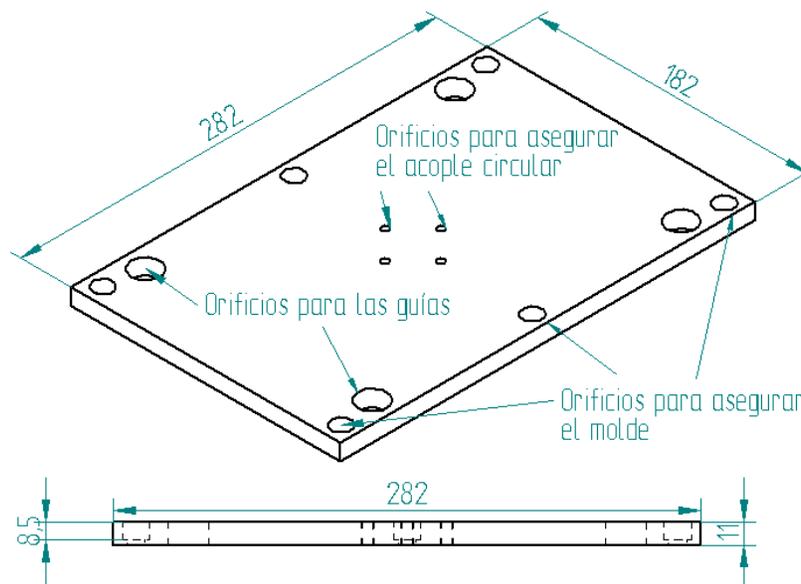


Figura 26. Planos en vista alzada y cara lateral con perspectivas de la platina superior. Dimensiones en mm.

En la Figura 27 se pueden apreciar: seis (6) orificios transversales de 8.5 mm de diámetro avellanados a 13 mm de diámetro para asegurar la parte macho del molde a la platina superior; cuatro (4) orificios de 19.2 mm de diámetro por donde pasa las guías y cuatro (4) orificios 4.92 mm de diámetro para asegurar el acople circular.

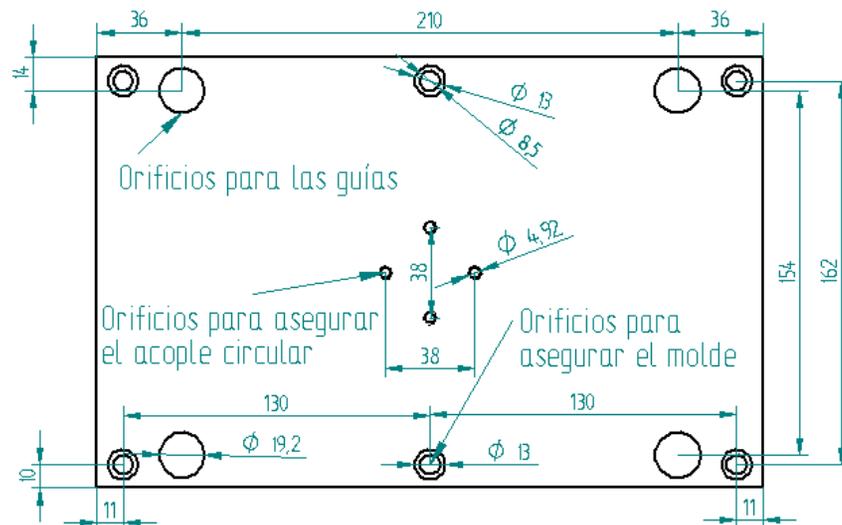


Figura 27. Plano cara superior de la platina superior. Dimensiones en mm.

- Guías: Son cuatro piezas iguales que permiten el desplazamiento vertical de la parte macho, garantizando que el cierre del molde sea perfecto. Las guías están fabricadas de hierro fundido y son dos cilindros concéntricos de 18 y 22 mm de diámetro y su largo total es de 200 mm como se muestra en las Figura 28. Estas van acopladas a presión a la platina inferior.

En la Figura 29 aparece el sistema de compresión totalmente terminado, en la imagen del lado izquierdo se aprecia las partes que lo conforman (codo superior, cilindro neumático, molde y platina soporte). La imagen de la derecha permite observar un acercamiento de la junta entre el vástago, el acople circular y la platina superior, que permite transmitir el movimiento a la parte macho del molde.

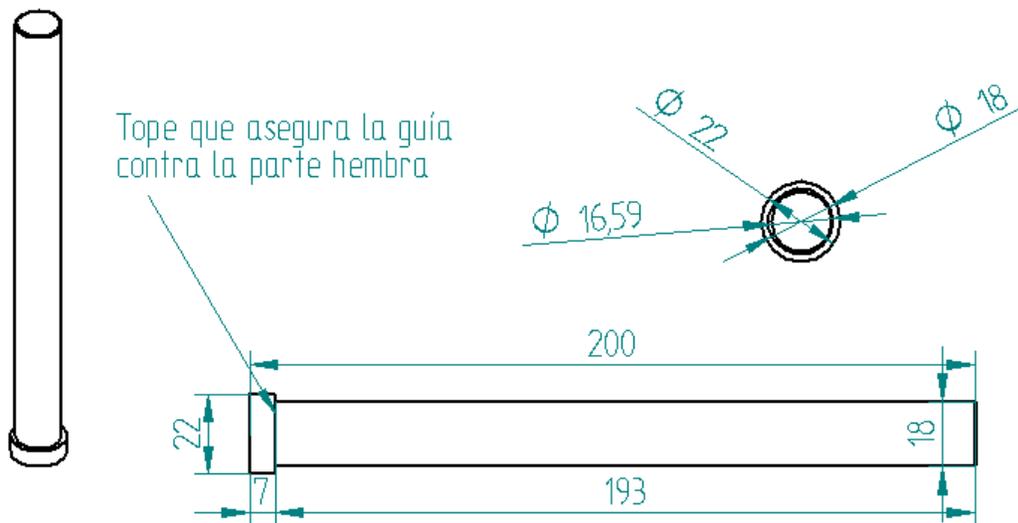


Figura 28. Plano guías. Dimensiones en mm.

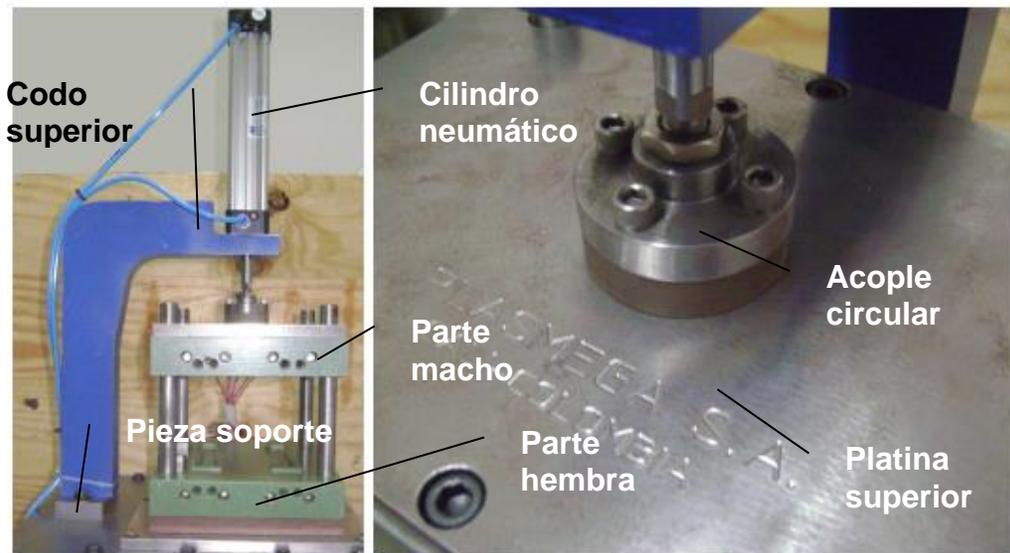


Figura 29. Sistema mecánico de compresión. Izquierda: Imagen del sistema mecánico terminado y ensamblado a la planta. Derecha: Acercamiento al acople circular y platina superior.

#### 2.3.4 Sistema mecánico de expulsión

El sistema de expulsión es el encargado de subir o bajar mediante el accionamiento de un cilindro neumático, una pieza que expulsa el producto terminado (probeta) del interior de la cavidad de la parte hembra del molde, el mecanismo está dispuesto en la parte inferior de la platina base y se compone de las siguientes partes:

- Codo inferior.
- Acople circular.
- Platina base.
- Platina inferior.
- Platina soporte.
- Pieza expulsora.
- Expulsor.
- Guía expulsora.
- Molde.

El codo inferior es el encargado de soportar un cilindro neumático, que a su vez y por medio del acople circular está unido al expulsor. Las guías permiten el desplazamiento verticalmente del expulsor por donde se trasmite el movimiento a las piezas expulsoras. El codo inferior se asegura a la parte inferior de la platina base por medio de la platina soporte. A continuación se detalla cada una de las partes que integran el sistema mecánico de expulsión.

- Codo inferior: Diseñado para soportar el peso del cilindro inferior, la pieza expulsora, el acople circular, la guía expulsora y la carga de trabajo que ejerce el recorrido en carrera vertical (ascendente o descendente) con el

accionamiento del vástago del cilindro cuando se expulsa el producto terminado. En la Figura 30 se muestra la vista lateral y en plano alzado donde aparecen las dimensiones de diseño que se ajustan al recorrido del cilindro inferior (166 mm de ancho, 127 mm de altura y 58 mm de espesor). El material empleado para la construcción fue hierro fundido recubierto con pintura de aceite por tratarse de un material corrosivo.

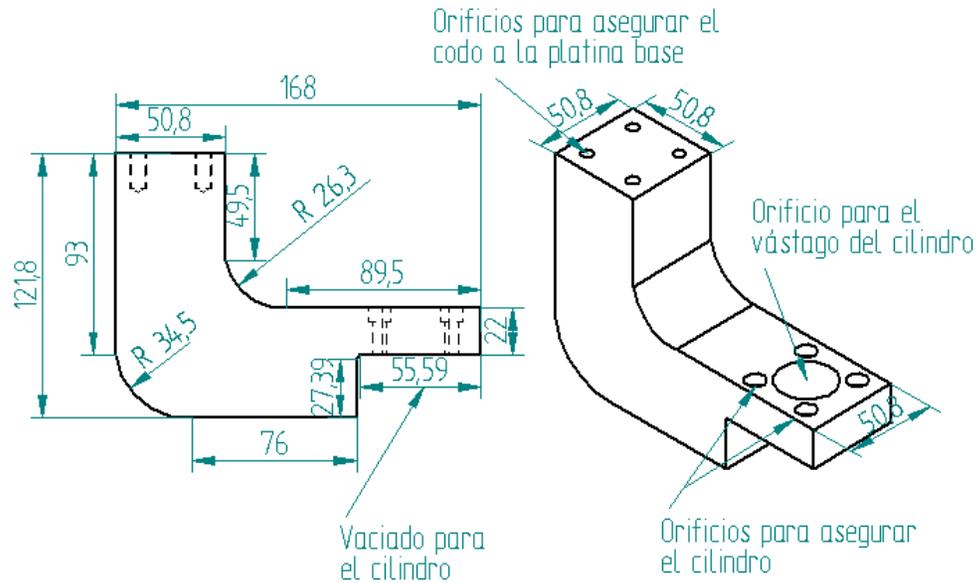


Figura 30. Planos cara lateral y plano alzado del codo inferior. Izquierda: Vista lateral con perspectivas. Derecho: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

En la Figura 31 se observan cuatro (4) perforaciones de 10.5 mm de diámetro que permiten fijar mediante tornillos el cilindro al brazo, una (1) perforación de 31 mm de diámetro por donde pasa el vástago del cilindro y cuatro (4) perforaciones de 6.56 mm de diámetro para asegurar mediante tornillos el brazo a la platina base.

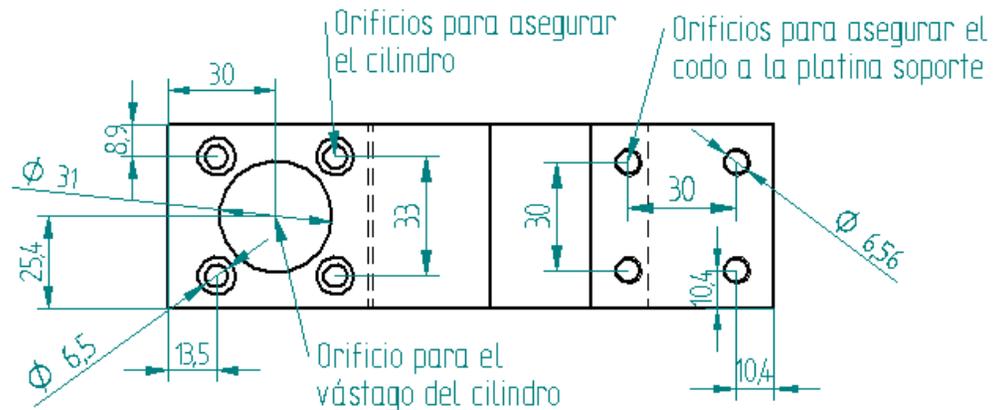


Figura 31. Plano cara superior del codo inferior. Dimensiones en mm.

- Acople circular: Es el encargado de hacer la interfaz entre el cilindro inferior y el expulsor, donde el vástago del cilindro inferior se asegura mecánicamente mediante una junta roscada de 10 mm de diámetro al acople. Es un bloque compacto de hierro de dos cilindros concéntricos de 23 mm y 50 mm respectivamente y espesor de 18 mm. Presenta cuatro orificios transversales, equidistantes, de 7 mm de diámetro para asegurar el acople a la platina superior mediante cuatro tornillos, como se aprecia en la Figura 25.
- Platina base: Es la encargada de soportar los mecanismos de compresión y expulsión, está construida en un bloque de hierro fundido de dimensiones: 405 mm de largo, 355 mm de ancho y 14.3 mm de espesor. En la Figura 32 se puede observar la disposición de perforaciones transversales para fijar cada una de las piezas anexas a ella: Ocho (8) perforaciones de 10 mm de diámetro para asegurar la platina base a la estructura base, seis (6) perforaciones de 6 mm de diámetro para asegurar la platina inferior, cuatro (4) perforaciones de 7.65 mm de diámetro (dos para asegurar el codo inferior y dos para asegurar el codo superior) y cuatro (4) perforaciones por donde pasan las guías expulsoras.

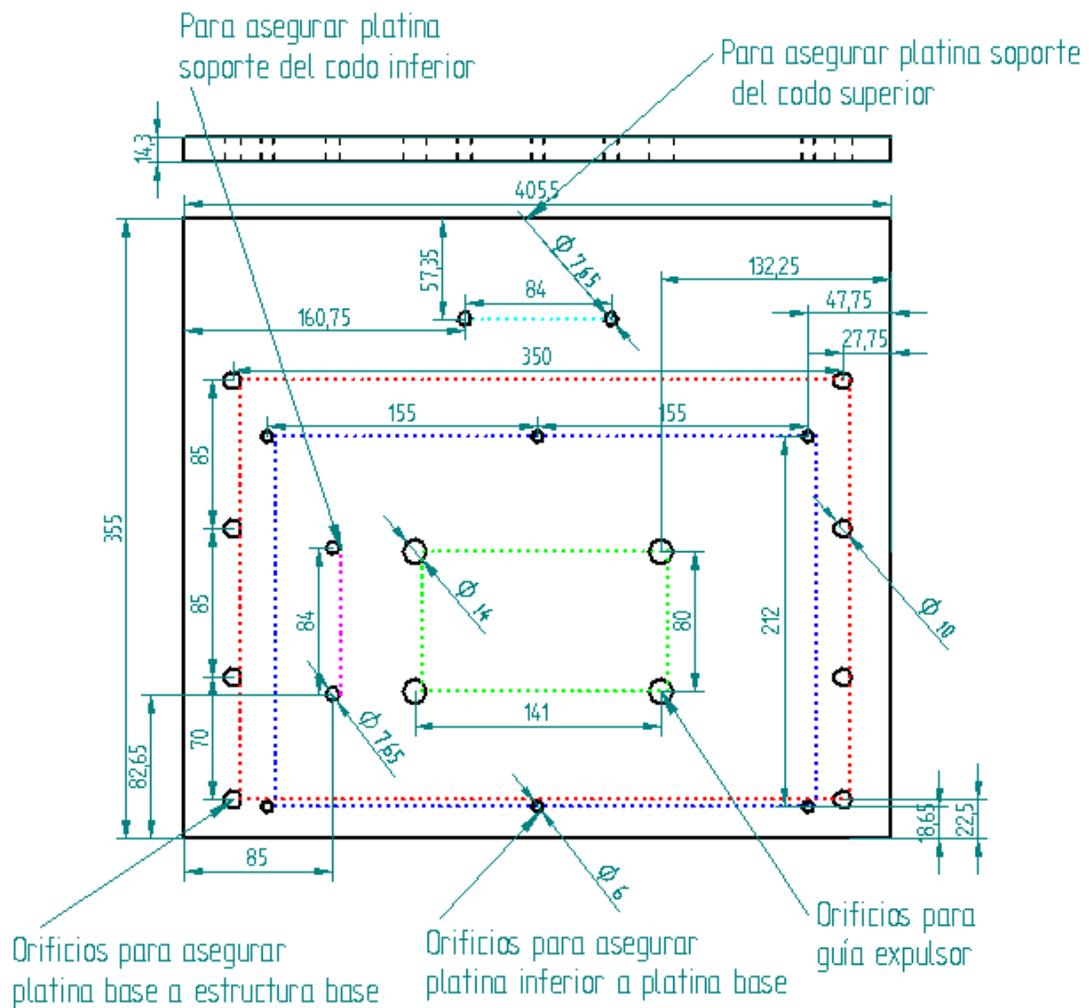


Figura 32. Planos platina base. Arriba: Vista frontal con perspectivas de la platina base. Abajo: Vista cara superior de la platina base. Dimensiones en mm.

- Platina inferior: Es la encargada de asegurar la parte hembra del molde, es una pieza compacta de hierro de 329 mm de largo, 229.3 mm de ancho y 11.3 mm de espesor. En la Figura 33 se puede observar la disposición de perforaciones transversales para fijar cada una de las piezas anexas a ella: Seis (6) perforaciones de 4.25 mm de diámetro con avellan de 6.5 mm de diámetro para asegurar la platina inferior a la platina base, seis (6) perforaciones de 4.25 mm de diámetro con avellan de 6.5 mm de diámetro para asegurar la parte hembra del molde a la platina inferior, cuatro (4) perforaciones de 7 mm de diámetro por donde pasan las cuatro (4) guías del sistema de compresión.

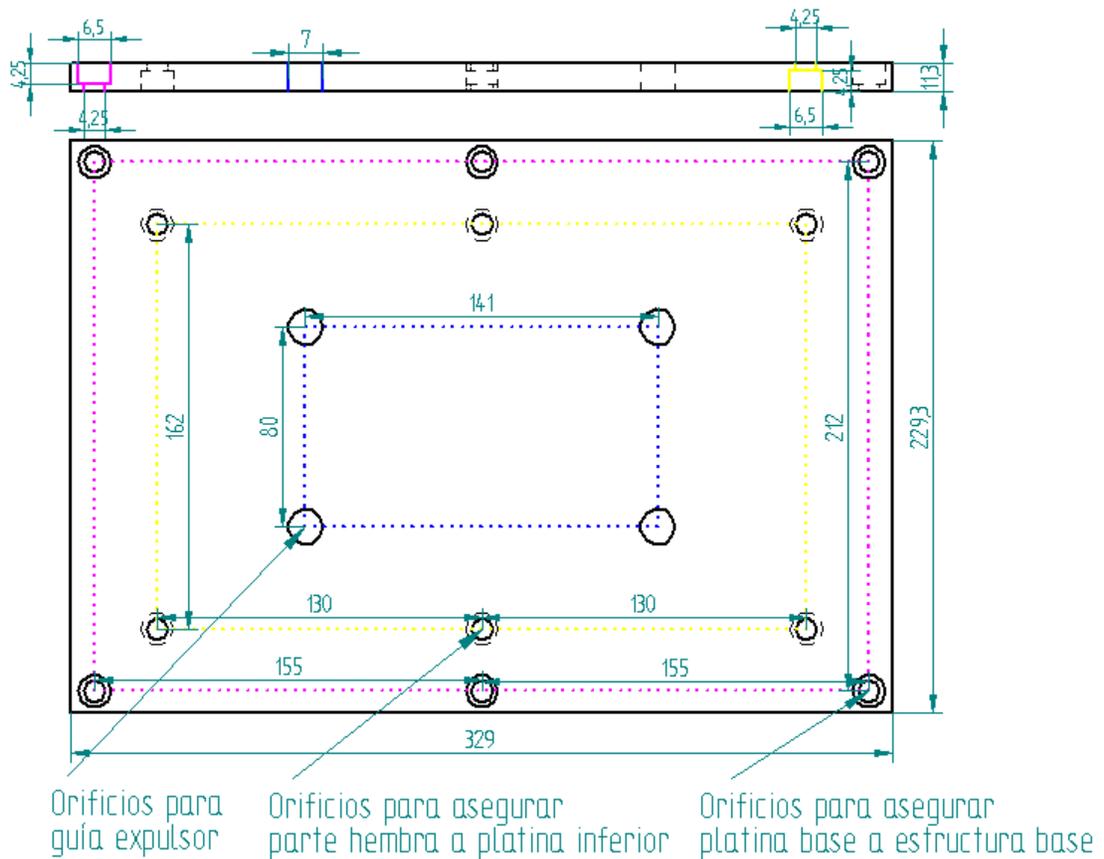


Figura 33. Planos platina inferior. Arriba: Vista frontal con perspectivas de la platina base. Abajo: Vista cara superior de la platina base. Dimensiones en mm.

- Platina soporte: Se trata de un bloque en hierro fundido con dimensiones: largo 110 mm, ancho 50.8 mm y espesor 18 mm como aparece en la Figura 23. Esta pieza es la encargada de fijar el codo superior a la platina base. La forma corresponde a la indicada en la Figura 24, donde se muestran cuatro (4) orificios transversales de 7 mm de diámetro y avellanados a 9 mm, para fijar mecánicamente el codo mediante tornillos de 6.5 mm y dos (2) vaciados transversales de 10 mm de ancho y 28 mm de largo para fijar la platina soporte a la platina base mediante dos tornillos de 8 mm de diámetro.
- Pieza expulsora: Tiene la misma forma de probeta pero con medidas tales que se pueda desplazar libremente por la cavidad de la parte hembra del molde. Esta pieza está fabricada en Duraluminio, puesto que hace parte del molde al servir de yunque para la compresión de la materia prima. En la Figura 34 se puede observar el diseño en plano alzado de la pieza, que presenta dos (2) perforaciones de 10 mm de diámetro con junta rosca donde se aseguran las guías expulsoras.

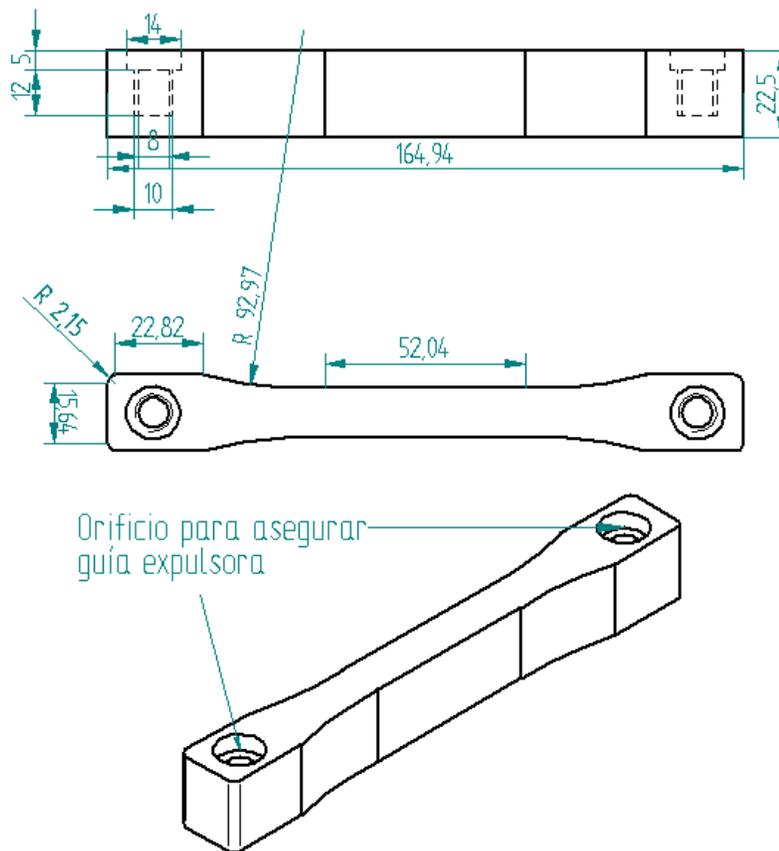


Figura 34. Planos pieza expulsora. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Plano de abajo: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

- Expulsor: Es una platina de hierro fundido con dimensiones: 170 mm de largo, 110 mm de ancho y 12 mm de espesor. En la Figura 35 se puede apreciar en plano alzado la forma de la pieza, que tiene cuatro (4) perforaciones de 10.5 mm de diámetro con avellán de 16 mm de diámetro, donde se aseguran las cuatro (4) guías expulsoras y cuatro perforaciones de 7 mm de diámetro para asegurar el acople circular. Presenta dos (2) vaciados semicirculares de 25 mm de diámetro solo para reducir el peso de la pieza.
- Guía expulsora: Son cuatro (4) piezas iguales que permiten el desplazamiento vertical (ascendente y descendente) del expulsor. Las guías están fabricadas de hierro fundido y consisten en un cilindro de 15 mm de diámetro con dos (2) protusiones roscadas (una de 8 mm de diámetro para asegurar el expulsor y otra de 10 mm de diámetro para asegurar la platina expulsora), el largo total es de 121 mm como se muestra en la Figura 36.

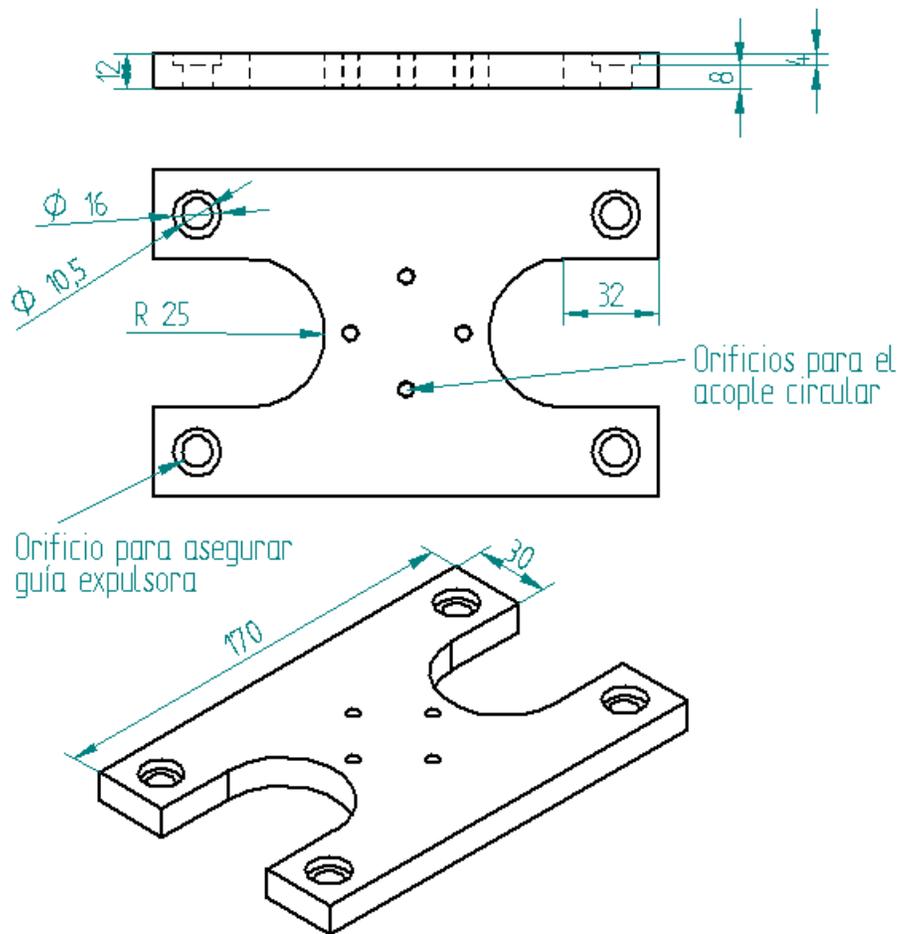


Figura 35. Planos expulsor. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Abajo: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

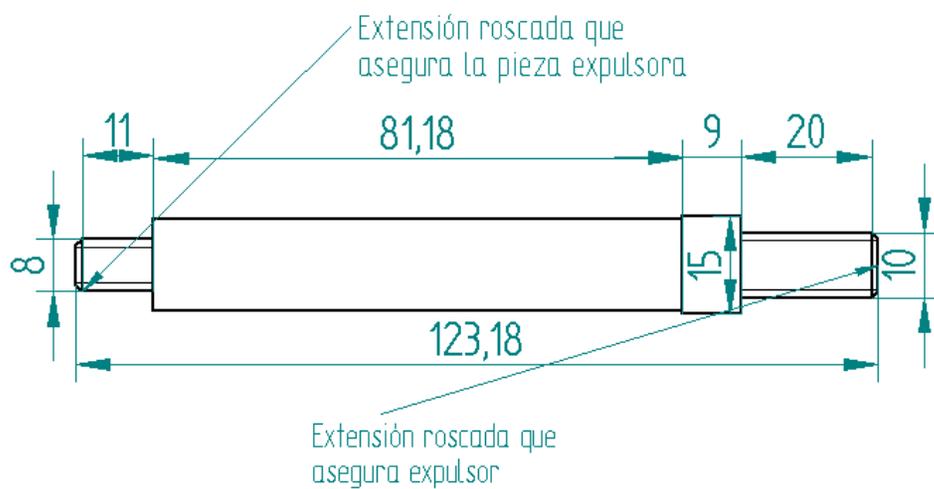


Figura 36. Plano guía expulsora. Dimensiones en mm.

En la Figura 37 aparece el sistema de expulsión totalmente terminado, en la imagen del lado izquierdo se aprecia las partes que lo conforman (codo inferior, cilindro neumático y parte hembra del molde). La imagen de la derecha permite observar un acercamiento de la junta entre el vástago, el acople circular y el expulsor, que mediante cuatro (4) guías expulsoras permite transmitir el movimiento a las dos (2) piezas dosificadoras.

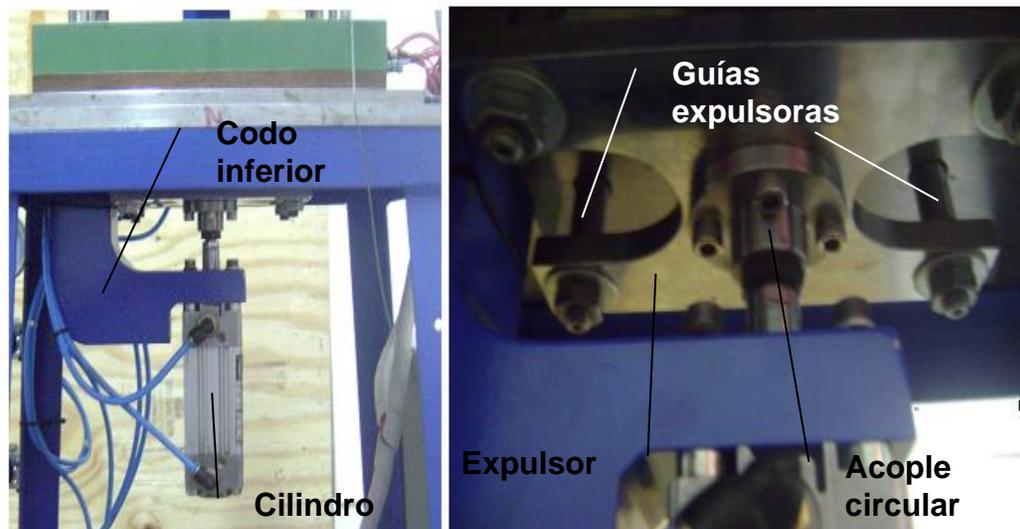


Figura 37. Sistema mecánico de expulsión. Izquierda: imagen del sistema de expulsión ensamblado. Derecha: Acercamiento al acople circular y expulsor.

### 2.3.5 Sistema de dosificación

Para la dosificación de la materia prima se diseñó un mecanismo manual y externo a la planta, pero que permite ingresar la materia prima con seguridad y eficiencia. El conjunto se compone de las siguientes partes:

- Dosificador.
- Pieza dosificadora.
- Sostén dosificador.
- Tornillos dosificadores
- Topes.

En el dosificador se integran las demás partes que conforman el sistema de dosificación, presenta dos (2) vaciados en forma de probeta donde entra la pieza dosificadora que se sujeta mediante tres (3) tornillos. Además tiene dos (2) vaciados con la misma forma de los topes y un orificio roscado para asegurar el sostén. A continuación se detalla cada una de las partes que integran el sistema mecánico de dosificación.

- Dosificador: Es un bloque en Duraluminio con dos (2) cavidades en forma de probeta donde se deposita la materia prima para que adquiera una preforma, desde este se transporta hasta la parte hembra del molde. En la Figura 38 se pueden observar los dos (2) vaciados en la parte central de la pieza y otros dos (2) vaciados en la parte superior que sirven como finales de carrera mecánicos, los cuales permiten llegar a la posición ideal de dosificación.

En la Figura 39 se observa el plano alzado del dosificador. En él se observa claramente los vaciados donde llegan los topes, los vaciados en forma de probeta donde se introduce la pieza dosificadora y un orificio en el cual se atornilla el sostén del sistema.

En la Figura 40 se aprecia la vista en perspectiva del dosificador, el cual presenta una perforación roscada de 7.65 mm de diámetro donde se asegura el mango o sostén.

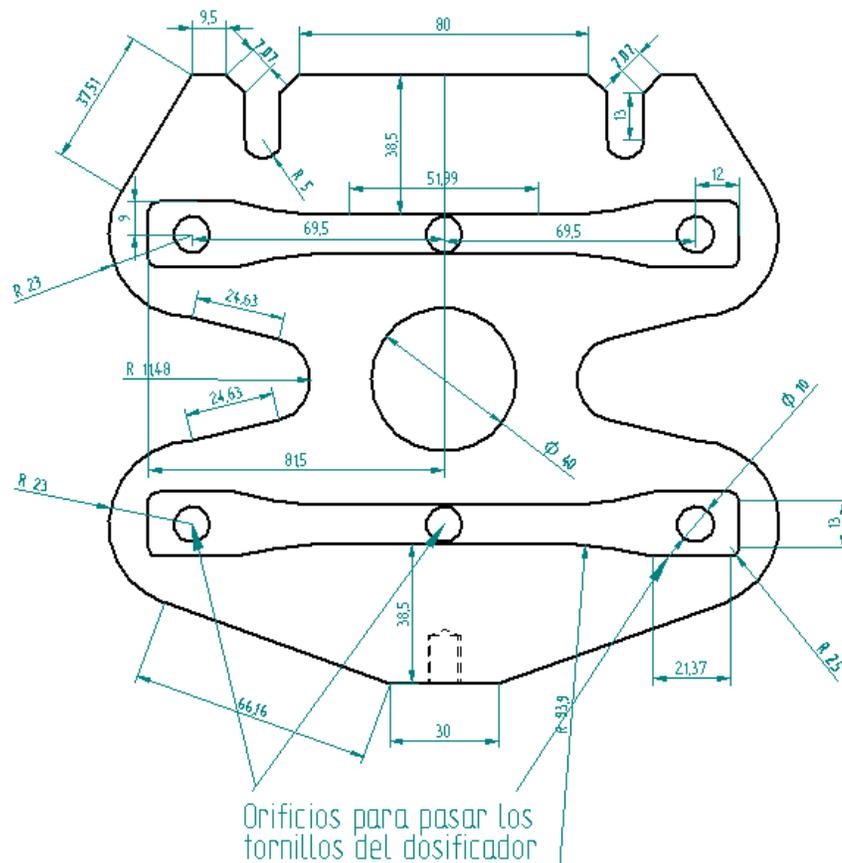


Figura 38. Plano cara inferior del dosificador. Dimensiones en mm.

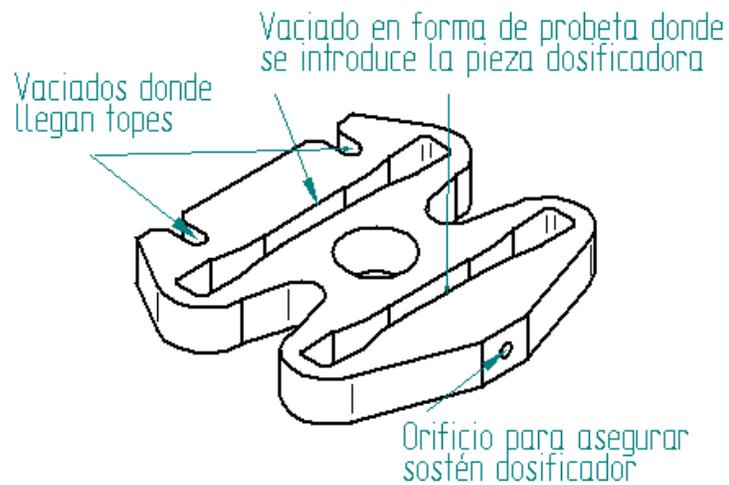


Figura 39. Vista en plano alzado cara inferior del dosificador.

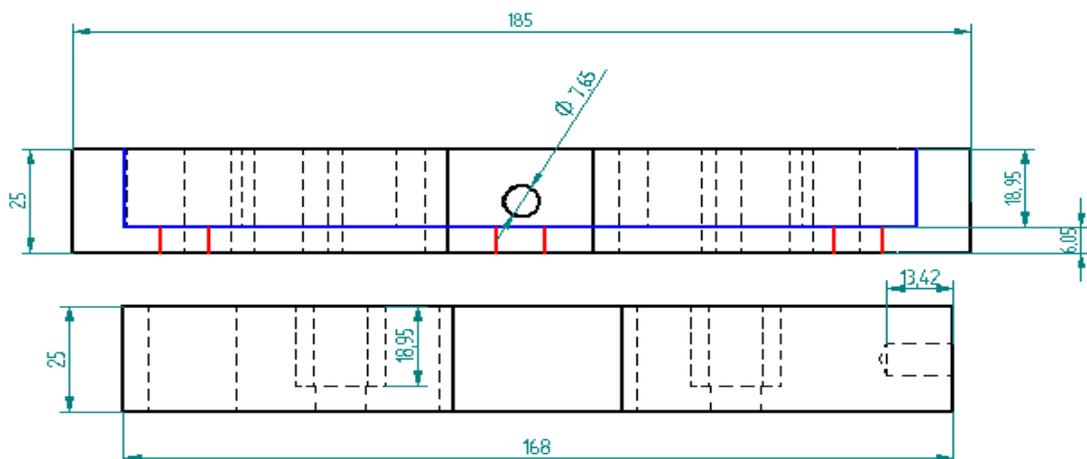


Figura 40. Planos cara anterior y posterior del dosificador. Arriba: Vista cara anterior con perspectivas. Abajo: Vista cara posterior con perspectivas. Dimensiones en mm.

- Pieza dosificadora: Tiene la misma forma de probeta pero con medidas tales que se pueda desplazar libremente por la cavidad del dosificador. Esta pieza está fabricada en Duraluminio. En la Figura 41 se puede observar el diseño en plano alzado de la pieza, la cual presenta tres (3) perforaciones de 6 mm de diámetro con junta rosca, donde se aseguran los tornillos dosificadores.

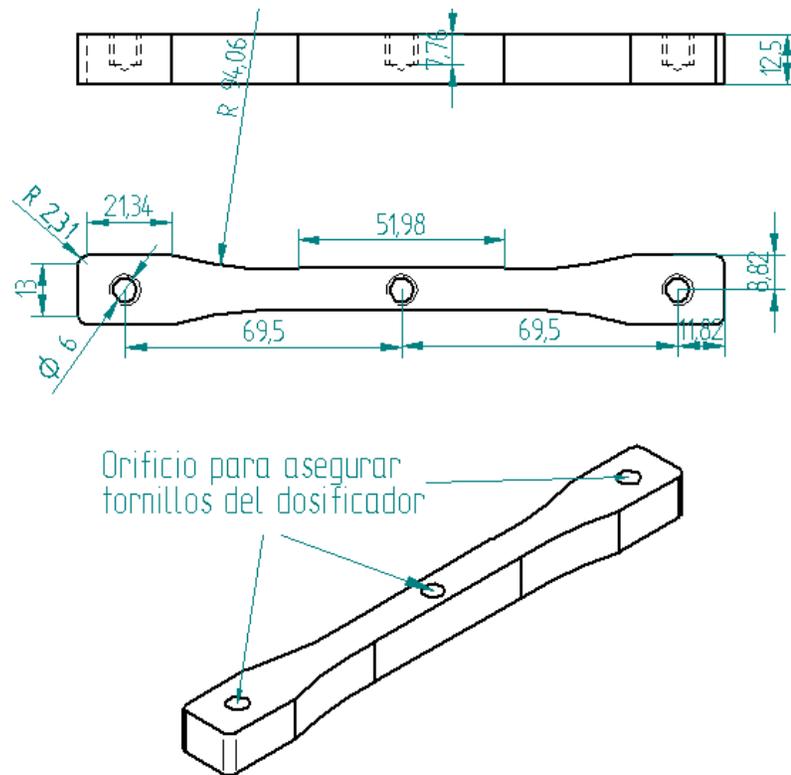


Figura 41. Planos pieza dosificadora. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Abajo: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

- Sostén dosificador: Pieza maquinada en hierro fundido que sirve como extensión para evitar que el operario sufra quemaduras o acercamiento a las partes calientes de la planta. En la Figura 42 se puede observar el diseño, el cual consta de un cilindro de 100 mm de largo, 15 mm de diámetro con una protusión roscada de 7.65 mm y otra en forma de mango en el extremo opuesto.

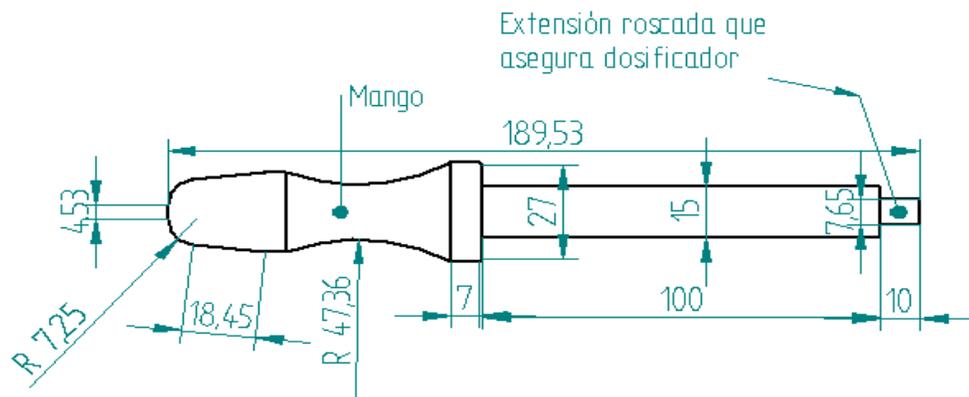


Figura 42. Plano sostén dosificador. Dimensiones en mm.

- Tornillos dosificadores: En la Figura 43 lado derecho se aprecia la vista en plano alzado del tornillo dosificador, en el lado izquierdo se observa las

dimensiones, una (1) junta roscada en el extremo superior de 6 mm x 7 mm encargada de asegurar la pieza dosificadora al dosificador, un (1) cilindro central de 10 mm x 13 mm que se acopla con la pieza base del dosificador y un cilindro de 15 mm x 28 mm para que el operario lo manipule.

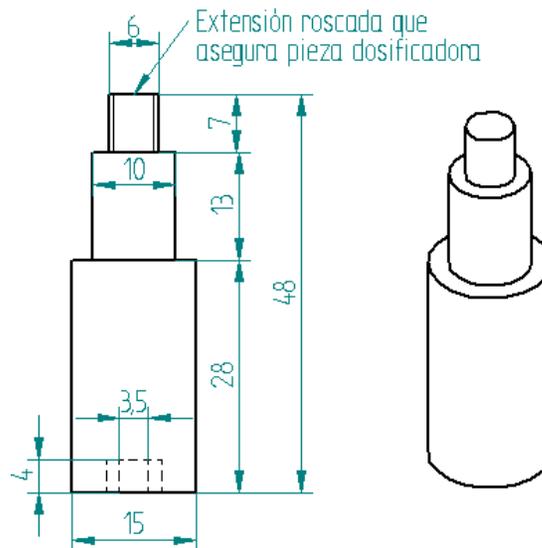


Figura 43. Planos tornillo dosificador. Izquierdo: Vista lateral con perspectivas. Derecha: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

- Topes: Piezas maquinadas en hierro fundido con una perforación de 7 mm de diámetro y avellanados a 8 mm. En la Figura 44 se presentan tres vistas de la pieza en donde se indican las dimensiones: Un bloque de 11.6 mm de ancho, 25.5 mm de largo y 15 mm de espesor. Los topes son asegurados mediante tornillos a la parte hembra del molde.

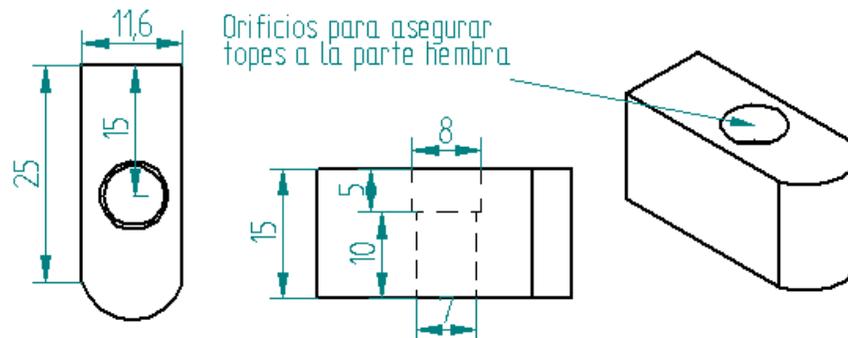


Figura 44. Planos topes. Izquierda: Vista superior. Centro: Vista lateral con perspectivas. Derecha: Vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

En la Figura 45 se pueden observar las imágenes de la pieza totalmente terminada.



Figura 45. Sistema de dosificación. Izquierda: Imagen cara superior. Centro: imagen cara inferior. Derecha: Acercamiento al dosificador.

### 2.3.6 Sistema de aislamiento térmico

Para evitar pérdidas de calor por transmisión, entre la parte hembra del molde con la platina inferior y la platina superior de la parte macho del molde con el acople circular superior, se diseñaron dos piezas en baquelita:

- Baquelita inferior: Esta pieza realiza el aislamiento térmico entre la parte hembra del molde y la platina inferior. En la Figura 46 se muestra el bloque de baquelita de 162 mm de ancho, 282 mm de largo y 11.6 mm de espesor, donde se aprecian seis (6) perforaciones de 8.5 mm de diámetro por donde pasan los tornillos que aseguran la parte hembra del molde a la platina inferior y cuatro (4) perforaciones de 14 mm de diámetro por donde pasan las guías del sistema de compresión.
- Baquelita circular: Esta pieza realiza el aislamiento térmico entre la platina superior de la parte macho del molde con el acople circular superior. En la Figura 47 se muestra el bloque circular de baquelita de 50 mm de diámetro y 11.6 mm de espesor, donde se aprecian cuatro perforaciones de 7 mm de diámetro por donde pasan los tornillos que aseguran el acople circular a la platina superior de la parte macho del molde.

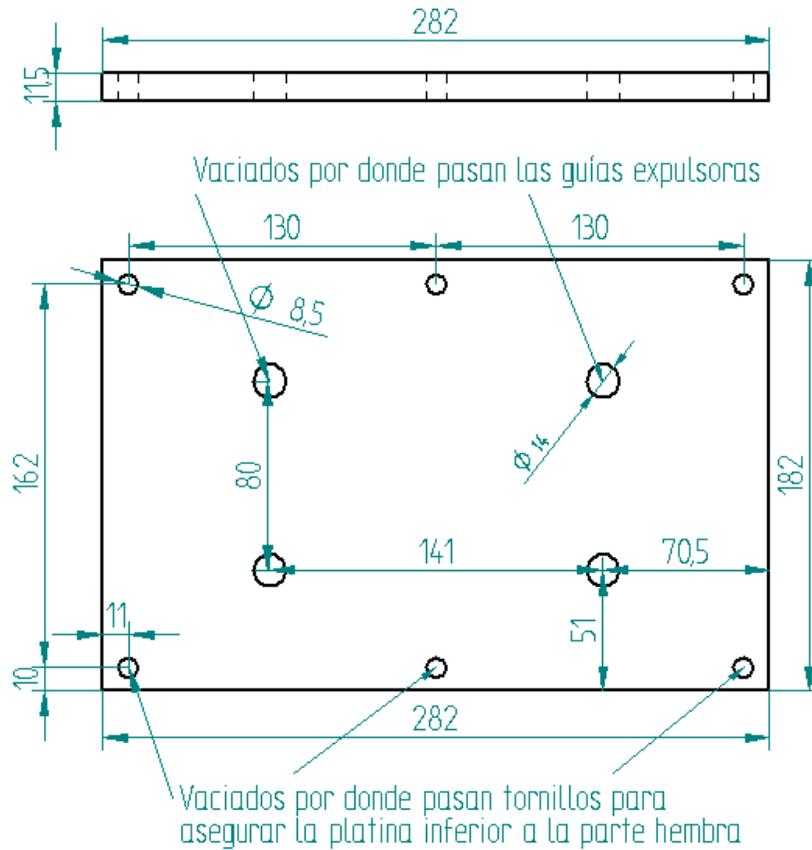


Figura 46. Planos baquelita inferior. Arriba: Vista frontal con perspectivas. Abajo: Vista cara superior. Dimensiones en mm.

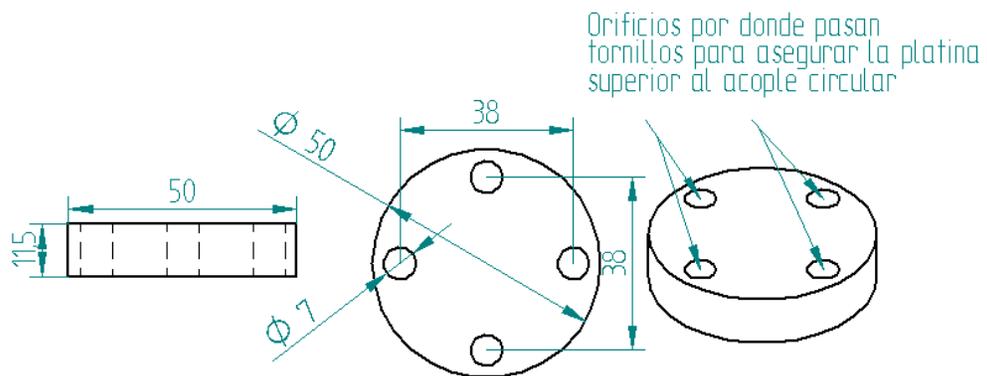


Figura 47. Planos baquelita circular. Izquierda: Vista lateral con perspectivas. Centro: Vista cara superior. Derecha: vista en plano alzado. Dimensiones en mm.

El molde, la pieza expulsora, el dosificador y la pieza dosificadora se encuentran recubiertos por una película de teflón de 0.2 mm de espesor, la cual impide que la materia prima se adhiera a las paredes de las piezas que conforman la planta.

### **3 INSTRUMENTACIÓN, CONTROL Y SUPERVISIÓN DE LA PLANTA PILOTO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN**

Para cumplir con la segunda etapa de desarrollo de este trabajo de grado; instrumentación, control y supervisión en la planta de moldeo por compresión, se analizaron los requerimientos de automatización y para cumplir con ellos se realizó la documentación del proyecto de automatización de la planta, la cual consta de una ingeniería conceptual, básica y detallada. La ingeniería conceptual explica con detalle el proceso de fabricación de la probeta y describe los pasos seguidos hasta obtener la instrumentación a utilizar en la planta; la ingeniería básica describe el proceso de automatización mediante diagramas técnicos basados en estándares (Flujo de proceso, P&ID y SAMA) y en la ingeniería de detalle se representan diagramas técnicos de instalación, cableado y programación (Potencia y mando, de lazos de instrumentos y diagramas lógicos GRAFCET y LADER), igualmente basados en estándares. Por último se diseña e implementa el sistema de supervisión y de monitoreo que sirve como interfaz hombre máquina de la planta de moldeo por compresión. A continuación se consignan los requerimientos de automatización de la planta de moldeo por compresión.

Requerimientos de Automatización:

1. La automatización de la planta debe permitir que la operación de la misma se pueda realizar tanto en forma Manual, por parte de un usuario, como en forma Automática, configurando previamente las acciones y tiempos a ejecutar en un sistema programable.
2. La automatización debe contar con un sistema de control de temperatura que permita regular la temperatura, tanto de la parte hembra como macho del molde, además debe ser automático manteniendo la temperatura en los valores de consigna escogido por el operario, independiente del modo (manual o automático) en el que se opere la planta.
3. El rango de temperatura dentro del cual se pueda calentar el molde debe estar entre 50 °C y 200 °C.
4. La presión con la cual se comprime la materia prima por parte del sistema de compresión debe ser variable y configurable en forma manual en el rango de 0 psi - 50 psi. El accionamiento de los sistemas de compresión y expulsión debe poder realizarse tanto en forma manual como automática.
5. Debe existir un sistema de monitoreo y supervisión, desde el cual se pueda configurar la operación del proceso y registrar su comportamiento.

#### **3.1 Ingeniería conceptual**

Del análisis hecho a los requerimientos de la planta se determinó que el proceso es secuencial conformado por una importante etapa continua. Esta etapa es la

encargada de controlar la temperatura del molde, el control se realiza teniendo en cuenta un valor de consigna que el operario configura con anterioridad. El control secuencial se da porque el operario a medida que realiza el proceso debe ir ejecutando acciones como: preparar la materia prima, dosificar la materia prima, comprimir la materia prima, expulsar y retirar el producto después que el proceso termina.

### **3.1.1 Descripción del proceso**

**Nombre del producto:** Probetas biodegradables a base de yuca, fibra de fique y plastificante con dimensiones según la norma ASTM D 638.

**Nombre del proceso:** Producción de probetas biodegradables termoestables a base de yuca, fibra de fique y plastificante.

- **Descripción de la parte secuencial del proceso.**

Para la producción del producto termoestable el usuario precalienta el molde a una temperatura definida y configura manualmente la presión de trabajo de los sistemas de compresión y expulsión para obtener las condiciones de inicio del proceso.

Una vez se haya alcanzado los valores de consigna de temperatura para el molde, esto es la temperatura deseada para cada parte del molde, la materia prima: yuca, fibra de fique y plastificante, previamente preparada en las proporciones adecuadas, se deposita al interior de la parte hembra del molde mediante el mecanismo de dosificación; una vez la materia prima se encuentre en la cavidad del molde parte hembra se procede a comprimirla, mediante la presión ejercida por el sistema de compresión durante un tiempo definido por el operario; transcurrido este tiempo se levanta, por parte del mismo sistema de compresión, la parte macho del molde, procediendo posteriormente a activar el sistema de expulsión, para que el operario finalmente retire manualmente el producto terminado.

#### **Secuencia paso a paso de la producción**

1. Precalentar el molde a la temperatura deseada. Mientras sucede esto se prepara la mezcla de la materia prima: harina de yuca, fibra de fique y plastificante.
2. Verificar que la temperatura del molde haya alcanzado el valor de consigna deseado.
3. Verificar que la parte macho del molde se encuentre en la posición superior, esto es sin tener contacto con la parte hembra.

4. Verificar que la pieza de expulsión en el molde parte hembra se encuentra abajo.
5. Verificar que la temperatura del molde haya alcanzado el valor de consigna deseado.
6. Introducir la materia prima preparada dentro de las cavidades del sistema de dosificación.
7. Depositar la materia prima al interior de la parte hembra del molde mediante el mecanismo de dosificación.
8. Iniciar el proceso de compresión (se baja la parte macho del molde).
9. Contabilizar el tiempo durante el cual la materia prima estará expuesta a compresión y temperatura constantes.
10. Finalizar el proceso de compresión (se sube la parte macho del molde).
11. Iniciar el proceso de expulsión del producto terminado.
12. Retirar el producto terminado.
13. Dar orden de bajar la pieza de expulsión.
14. Si no hay nuevo ciclo finalizar el sistema de calentamiento.

- **Descripción de la parte continúa del proceso.**

La parte continua del proceso se determinó del cumplimiento de los requerimientos No. 2 y 4 del sistema de automatización, que es controlar tanto la temperatura como la presión durante todo el proceso en valores de consigna que el operario fije. La parte continua del proceso consiste en mantener regulada la temperatura y la presión sobre el molde durante todo el tiempo que dura el proceso secuencial. Durante este tiempo el proceso térmico recorre dos etapas:

1. Pre calentamiento de los moldes hasta que se deposita la materia prima sobre el molde parte hembra.
2. Compresión de la materia prima hasta que se separa el molde y se expulsa el producto.

Es un requisito que sin importar lo que suceda en las dos etapas el proceso regulatorio de control de temperatura rechace cualquier perturbación.

### **3.1.2 Diagrama de operaciones de proceso**

El diagrama de operaciones del proceso de moldeo por compresión se representa de una forma sistemática mediante una secuencia lógica de actividades, donde se señala la entrada de todos los componentes que intervienen en el proceso hasta obtener el producto totalmente terminado, se puede observar en la Figura 48. El objetivo del diagrama es presentar una imagen clara de todos los acontecimientos del proceso. Para identificar cada actividad se han utilizado símbolos de acuerdo con su naturaleza, siguiendo estas convenciones:

| Operaciones | Inspecciones | Retrasos o demoras | Almacenamiento |
|-------------|--------------|--------------------|----------------|
| ○           | □            | D                  | ▽              |

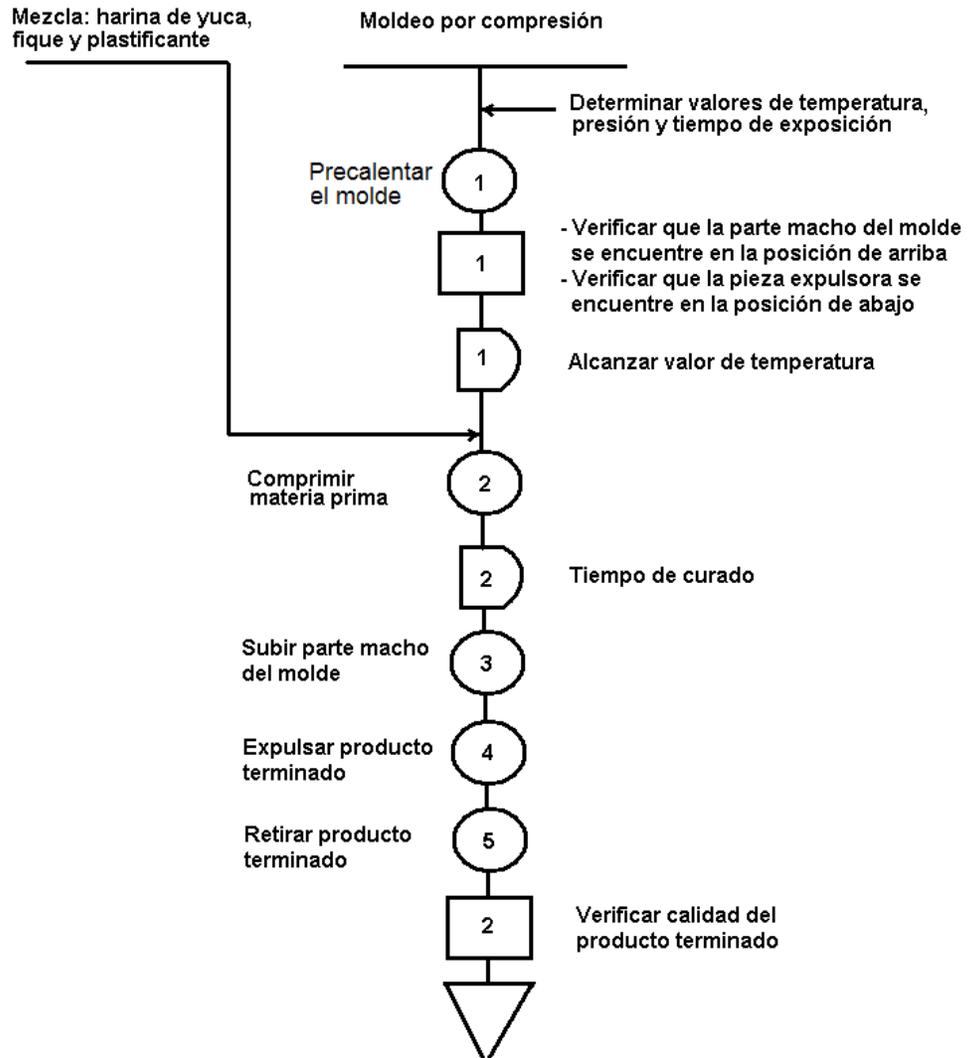


Figura 48. Diagrama de operaciones de proceso.

La numeración se realiza por actividad, siguiendo el recorrido del proceso de arriba hacia abajo y en forma secuencial para cada una de ellas.

### 3.1.3 Variables controladas y manipuladas

- Variables etapa continúa del proceso

#### Control de temperatura en el molde

*Variable controlada:* Temperatura en cada parte del molde.

*Variable manipulada:* Voltaje que alimenta los actuadores.

*Perturbaciones:* Solamente externas. Primera: cuando se deposita la materia prima en el molde parte hembra, segunda cuando se unen las dos partes del molde y tercera cuando se separan los moldes. Clasificadas como no críticas, esto es, se pueden propagar en el proceso.

### **Control de presión para el sistema de compresión**

*Variable controlada:* Flujo de aire comprimido para el sistema de compresión.

*Variable manipulada:* Presión proveniente de un sistema de alimentación de aire.

*Perturbaciones:* No existentes.

### **Control de presión para el sistema de expulsión**

*Variable controlada:* Flujo de aire comprimido para el sistema de expulsión.

*Variable manipulada:* Presión proveniente de un sistema de alimentación de aire.

*Perturbaciones:* No existentes.

- **Variables para la parte secuencial del proceso**

### **Control de activación del sistema de compresión**

*Variable controlada:* Presión de entrada para el sistema de compresión.

*Variable manipulada:* Paso de aire proveniente de un sistema de alimentación de aire.

### **Control de activación del sistema de expulsión**

*Variable controlada:* Presión de entrada para el sistema de expulsión.

*Variable manipulada:* Paso de aire proveniente de un sistema de alimentación de aire.

## **3.1.4 Lazos de control de la planta piloto de moldeo por compresión**

- **Lazos de control de la parte continua del proceso**

**Control de temperatura en el molde:** Es el encargado de mantener la temperatura del molde en un valor constante según se haya definido por el

operario. La temperatura es controlada bajo un esquema *feedback*, con lazos independientes para cada parte del molde (hembra y macho).

**Control de presión para el sistema de compresión:** Es el encargado de mantener la presión de aire comprimido en un valor constante para el sistema de compresión según se haya fijado por el operario. La presión es controlada bajo un esquema en lazo abierto. El usuario fija manualmente la presión de consigna utilizada por el sistema.

**Control de presión para el sistema de expulsión:** Es el encargado de mantener la presión de aire comprimido en un valor constante para el sistema de expulsión según se haya fijado por el operario. La presión es controlada bajo un esquema en lazo abierto. El usuario fija manualmente la presión de consigna utilizada por el sistema.

- **Lazos de control de la parte secuencial del proceso**

**Control de activación del sistema de compresión:** Es el encargado de permitir o inhibir el paso de aire a presión hacia el sistema de compresión, cuando se dé la orden de comprimir la materia prima.

**Control de activación para el sistema de expulsión:** Es el encargado de permitir o inhibir el paso de aire a presión hacia el sistema de expulsión, cuando se dé la orden de expulsar el producto terminado.

### **3.1.5 Escenarios de automatización de la planta**

Para cumplir con el requerimiento No.1 de automatización, que establece que la planta debe permitir la interacción con la misma tanto en forma manual como automática, se proponen dos escenarios de automatización para la operación de la planta.

El primero es un escenario de lógica cableada para el sistema de compresión y expulsión combinado con un control realimentado de temperatura *Stand Alone* para el molde. El segundo es un escenario basado en PLC, en el cual se conectan los sistemas de compresión y expulsión en combinación con un control realimentado de temperatura a un PLC. Por medio de un sistema de conmutación, gobernado por una llave selectora, el operario de la planta selecciona el modo de operación mando Manual o Automático.

### **3.1.6 Instrumentación para la planta de moldeo por compresión**

- **Instrumentación para la etapa continúa del proceso**

- **Planta operando en modo Manual**

- **Lazo de control de temperatura en el molde**

- **Molde parte hembra**

- **Sensor:** Termopar tipo J en el molde parte hembra.

- **Controlador:** Controlador industrial PID de temperatura.

- **Actuador:** Juego de cuatro (4) resistencias en el molde parte hembra.

- **Molde parte macho**

- **Sensor:** Termopar tipo J en el molde parte macho.

- **Controlador:** Controlador industrial PID de temperatura.

- **Actuador:** Juego de cuatro (4) resistencias en el molde parte macho.

- **Lazo de control de presión en el sistema de compresión**

- **Sensor:** Indicador de presión.

- **Controlador:** Operario de la planta.

- **Actuador:** Regulador de presión manual.

- **Lazo de control de presión en el sistema de expulsión**

- **Sensor:** Indicador de presión.

- **Controlador:** Operario de la planta.

- **Actuador:** Regulador de presión manual.

- **Planta operando en modo Automático**

- **Lazo de control de temperatura en el molde**

- **Molde parte hembra**

- **Sensor:** Termopar tipo J en el molde parte hembra.

- **Controlador:** Ley de control programada en el PLC.

- **Actuador:** Juego de cuatro (4) resistencias en el molde parte hembra.

- **Molde parte macho**

- **Sensor:** Termopar tipo J en el molde parte macho.

- **Controlador:** Ley de control programada en el PLC.

**Actuador:** Juego de cuatro (4) resistencias en el molde parte macho.

- **Lazo de control de presión en el sistema de compresión**

No aplica de acuerdo al requerimiento No. 4. Esto es, sigue operando el mismo esquema de control del modo manual.

- **Lazo de control de presión en el sistema de expulsión**

No aplica de acuerdo al requerimiento No. 4. Esto es, sigue operando el mismo esquema de control del modo manual.

- **Instrumentación para la parte secuencial del proceso**

- Planta operando en modo Manual**

- **Control de activación para el sistema de compresión**

- Sensor:** Operario de la planta.

- Controlador:** Operario de la planta.

- Actuador:** Electroválvula que manipula el paso de aire.

- **Control de activación para el sistema de expulsión**

- Sensor:** Operario de la planta.

- Controlador:** Operario de la planta.

- Actuador:** Electroválvula que manipula el paso de aire.

- Planta operando en modo Automático**

- **Control de activación para el sistema de compresión**

- Sensor:** PLC.

- Controlador:** PLC.

- Actuador:** Electroválvula que manipula el paso de aire.

- **Control de activación para el sistema de expulsión**

- Sensor:** PLC.

- Controlador:** PLC.

- Actuador:** Electroválvula que manipula el paso de aire.

- **Instrumentación para la conmutación de modos de operación**

Para que la automatización de la planta de moldeo por compresión pueda operar bajo los dos modos cumpliendo con el requerimiento No 1, debe contar con un sistema de conmutación que le permita compartir sensores y actuadores entre el modo Manual y el modo Automático. Este sistema de conmutación debe permitir:

1. Conmutar los dos (2) sensores de temperatura tipo J, de los dos (2) lazos de control de temperatura del molde, entre los dos (2) controladores industriales PID y el PLC. Esta conmutación se eliminó del diseño final puesto que el cambio en el relé electromecánico generaba ruido en la señal.
2. Conmutar los dos (2) actuadores, de los dos (2) lazos de control de temperatura del molde, entre los dos (2) controladores industriales PID y el PLC.
3. Conmutar los dos (2) actuadores del control de activación de los sistemas de compresión y expulsión entre dos (2) llaves manuales y el PLC.

- **Instrumentación para el sistema de monitoreo y supervisión de la planta de moldeo por compresión**

Para el cumplimiento del requerimiento No.5 se consideraron tres escenarios para implementar el sistema de monitoreo y supervisión de la planta de moldeo por compresión:

1. Supervisorio y monitoreo en un computador de escritorio (PC) cerca a la planta, con comunicación serial RS232 con el PLC.
2. Supervisorio y monitoreo remoto en un PC lejos o cerca de la planta, comunicándose vía Ethernet con el PLC.
3. Supervisorio y monitoreo empotrado en panel de control por medio de una pantalla táctil con exportación de datos fuera de línea a un PC.

Después de analizar pros y contras la opción tres fue la seleccionada ya que un sistema de supervisión en computador, sea o no remoto tiene más desventajas con respecto a uno empotrado en lo que respecta a facilidad y rapidez de manejo. Para la planta y el proceso a realizar es suficiente las funcionalidades que brinda la tecnología de las pantallas táctiles.

### 3.1.7 Descripción de equipos, instrumentos y accesorios de la planta de moldeo por compresión

- **Instrumentación para la etapa continúa del proceso**

Termopar tipo J.

Se utilizaron dos termocuplas tipo J una para cada parte del molde, se escogió de tipo “j” porque con éstas se pueden medir temperaturas hasta de 427°C (Figura 49).



Figura 49. Termocupla tipo j.

Controlador industrial de temperatura

Para efectuar el control automático de temperatura en el molde, en mando manual, se dispone de dos controladores digitales con algoritmo de control PID (Figura 50). Uno para la parte macho del molde y otro para la parte hembra del molde.

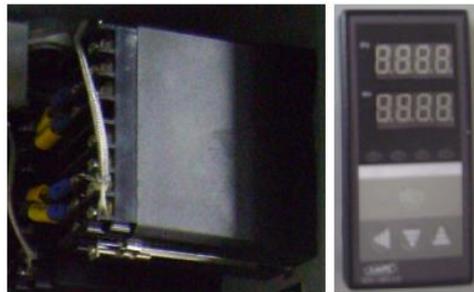


Figura 50. Controlador PID.

Resistencias tipo cartucho en acero inoxidable.

Para calentar cada pieza del molde, se han dispuesto 4 resistencias conectadas en paralelo de alta densidad tipo cartucho en acero inoxidable las

cuales son aptas para exigencias de temperaturas muy elevadas en espacios reducidos.

Cada resistencia está construida con alambre en espiral de ferro níquel (Fe+Ni) con coeficiente de resistividad de  $0,86 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  y un área trasversal de  $5 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$ . Además tienen un cartucho en acero inoxidable con oxido dieléctrico entre el alambre en espiral y el cartucho para permitir la transferencia de calor y aislar la conducción eléctrica, y dos cables con aislamiento de silicona para la conexión externa. Cada resistencia tiene 28 cm. de longitud y una resistencia eléctrica de 48 ohmios. (Figura 51). Cada resistencia es alimentada con corriente alterna monofásica de 120 voltios y un consumo de potencia de 300 w, para un consumo total de de 2400w en todo el sistema de calefacción.



Figura 51. Resistencia de alta densidad.

Relé de estado sólido.

Los relés de estado sólido (Figura 52) son dispositivos electrónicos de corte y cierre de gran potencia mediante la modulación por ancho de pulsos, se utilizan en la planta para manejar el flujo de corriente eléctrica que alimentan las resistencias que calientan el molde. Se escogieron de estado sólido y no electromecánicos puesto que los electromecánicos no están diseñados para trabajar en este tipo de control on-off, donde el corte y cierre es permanente.



Figura 52. Relés de estado sólido.

Regulador de presión y manómetro.

Los reguladores de presión suministran una presión secundaria que llega a los elementos de trabajo, estos son válvula manuales calibradas por el operario antes de dar inicio al proceso. Los reguladores que están instalados resisten máximo 120 psi (Figura 53).



Figura 53. Regulador de presión.

- **Instrumentación para la parte secuencial del proceso**

PLC FP-X C30R

El PLC FP-X C30R (Figura 54) de la empresa PANASONIC es un controlador lógico programable o autómeta. Es un equipo compacto con terminales a tornillo, alimentación 110/220 VCA y salidas a relé. Dispone de una amplia capacidad de memoria, elevada velocidad de proceso y gran expansibilidad de E/S. Se puede programar con el FPWIN GR o con el FPWINPro (conforme con el estándar IEC 61131-3) [23]. En la planta se utiliza para control automático de temperatura de las dos partes del molde en mando automático y para efectuar las tareas secuenciales de la planta, también en mando automático.



Figura 54. PLC FP-X C30R.

### Válvulas de 3/2 vías

En la planta existe una válvula para cada cilindro, su función es la de permitir el paso del aire a una u otra cámara del cilindro, dependiendo del estado de la bobina que la controla. Cuando está energizada la bobina, permite el paso del aire a una de las cámaras y cuando está desenergizada permite el paso a la otra cámara del cilindro.

Las válvulas son marca FESTO referencia MFH-5-1/8 y la máxima presión que resisten es de 8 bares o 120 psi (Figura 55).



Figura 55. Válvula de 3/2 vías FESTO.

- **Instrumentación para la conmutación de modos de operación**

Llave eléctrica de dos posiciones.

Es un mecanismo que permite o interrumpe el flujo de corriente eléctrica de un punto a otro, en la planta de moldeo por compresión esta llave cumple con las funciones: Cambiar el modo de operación entre manual y automático, permitir la compresión o expulsión cuando se opera manualmente la máquina. (Figura 56)



Figura 56. Llave eléctrica de dos posiciones.

Relé electromecánico de 14 pines.

Es un dispositivo que funciona como un interruptor pero controlado por un circuito eléctrico en el que, por medio de una bobina, se acciona un juego de

uno o varios contactos que permiten abrir o cerrar otros circuitos eléctricos independientes. (Figura 57)



Figura 57. Relé electromecánico de 14 pines.

- **Instrumentación para el sistema de monitoreo y supervisión de la planta de moldeo por compresión**

Pantalla táctil GT32 M.

El terminal GT32 M (Figura 58) se utiliza para ejecutar la interacción hombre-máquina en operación con mando automático. La transmisión de datos entre el terminal GT32 M y el PLC FP-X C30R se realiza mediante puerto serial RS232.



Figura 58. Pantalla GT32 M.

- **Equipos**

Compresor.

Según las exigencias con respecto a la presión de trabajo y al caudal de suministro, se emplea un compresor de desplazamiento con embolo oscilante y de pistón; la razón por la cual se escogió es porque es apto para comprimir a baja, media y alta presión. Este compresor está configurado para generar presiones hasta 100 psi y nunca bajar de 80 psi en su funcionamiento normal (Figura 59).



Figura 59. Compresor 150 psi.

Cilindro de doble efecto.

Se escogió este cilindro de doble efecto y tipo golpe por que tiene la característica de generar fuerza en ambas direcciones de su recorrido, aplicando presión en la cámara inferior y superior para movimiento del embolo hacia arriba y hacia abajo respectivamente (Figura 60).



Figura 60. Cilindro de doble efecto.

- **Accesorios**

Tubería.

La red de distribución de aire está construida con tubería de poliuretano de 6\*4 mm, adecuada para los instrumentos que se manejan, así como para resistir la presión del sistema (Figura 61).



Figura 61. Tuberías de poliuretano.

### Contactador electromecánico

El contactor es el encargado de manejar la parte de fuerza de la planta, por medio de él pasa la corriente hacia el compresor y las etapas de control y mando (PID, PLC y pantalla GT32), ver Figura 62.



Figura 62. Relé electromecánico.

### Armario.

Es una estructura metálica en la cual se resguarda los instrumentos de control y mando, como se muestra en la Figura 63.



Figura 63. Armario de control y mando.

### Rieles din, canaletas y borneras.

El riel din es un accesorio metálico estandarizado en la industria eléctrica, que sirve para sostener equipos y dispositivos en un panel de control. En la parte superior e inferior de la Figura 64 se observa partes de riel din sosteniendo borneras y relés de estado sólido respectivamente. Los canaletas al igual que los rieles din se utilizan en los panel de control pero su función es proteger los cables como se muestra en la parte central de la Figura 64. Las borneras se utilizan para realizar conexiones entre equipos evitando empalmes entre los conductores.



Figura 64. Borneras, riel din y canaletas.

### Breaker.

Los breaker son dispositivos encargados de proteger el sistema eléctrico contra sobre corrientes ocasionadas por cortocircuitos. Su funcionamiento consiste en interrumpir el flujo de corriente mediante el disparo de un switch térmico (Figura 65).



Figura 65. Breaker.

En la siguiente tabla se puede observar la clasificación de los instrumentos de la planta con algunas características.

Tabla 1. Valores de clasificación de las variables cualitativas del producto.

| Item                   | cantidad | Referencia / Descripción técnica | Señal de entrada | Señal de salida | Rango de operación | Costo Total         |
|------------------------|----------|----------------------------------|------------------|-----------------|--------------------|---------------------|
| <b>Instrumento</b>     |          |                                  |                  |                 |                    |                     |
| Termocupla             | 2 und    | Tipo j                           |                  | Voltaje         | (0-427) °C         | \$ 60.000           |
| Controlador Industrial | 2 und    | PID                              | Voltaje          | Voltaje (V)     |                    | \$ 200.000          |
| Resistencia            | 8 und    | Tubular                          | Voltaje (V)      |                 | 120 VCA            | \$ 320.000          |
| Relé de estado sólido  | 2 und    | Estado sólido                    | Voltaje (V)      | Voltaje (V)     | 120 VCA            | \$ 110.000          |
| Regulador de presión   | 4 und    |                                  |                  |                 |                    | \$ 80.000           |
| Manómetro              | 1 und    |                                  | Presión          | Analógica       | (0-200) psi        | \$ 30.000           |
| PLC                    | 1 und    | FP-X C30R                        | A/D              | Digital         |                    | \$ 2.300.000        |
| Relé                   | 1 und    | Electromecánico                  | Voltaje (V)      | Voltaje (V)     | 120 VCA            | \$ 25.000           |
| Contactador            | 1 und    | Electromecánico                  | Voltaje (V)      | Voltaje (V)     | 120 VCA            | \$ 70.000           |
| Pantalla               | 1 und    | Táctil monocromática             |                  |                 | 24 VCC             | \$ 800.000          |
| Llave eléctrica        | 4 und    | Dos posiciones                   |                  |                 |                    | \$ 20.000           |
| Electroválvula         | 2 und    | 3/2 vías                         |                  |                 |                    | \$ 300.000          |
| <b>Equipos</b>         |          |                                  |                  |                 |                    |                     |
| Compresor              | 1 und    |                                  |                  |                 |                    | \$ 250.000          |
| Cilindro               | 2 und    | Neumático                        | Neumática        | Posición        |                    | \$ 360.000          |
| <b>Accesorios</b>      |          |                                  |                  |                 |                    |                     |
| Breakers               | 5 und    | Térmico                          |                  |                 | 3, 10 y 20         | \$ 75.000           |
| Bornera                | 100 und  | Plástica                         |                  |                 | 300V/50 A          | \$ 120.000          |
| Terminal               | 200 und  | Pin                              |                  |                 | 300V/50 A          | \$ 40.000           |
| Manguera               | 15 m     | Poliuretano de 6x4               |                  |                 |                    | \$ 30.000           |
| Riel                   | 6 m      | Din                              |                  |                 |                    | \$ 10.000           |
| Cable                  | 100 m    | AWG-12                           |                  |                 |                    | \$ 110.000          |
| Canaleta               | 12 m     | Plástica                         |                  |                 |                    | \$ 40.000           |
| Armario                | 1 und    | Metálico                         |                  |                 |                    | \$ 200.000          |
| Marquillas             | 300 und  | Plástica                         |                  |                 |                    | \$ 60.000           |
| <b>TOTAL</b>           |          |                                  |                  |                 |                    | <b>\$ 5.610.000</b> |

## 3.2 Ingeniería básica

### 3.2.1 Etiquetado de la planta e instrumentos

Para tener un orden en la disposición de elementos que conforman la planta (equipos e instrumentación) y adquirir una mayor claridad en la comprensión e interpretación de los planos de proceso, se decidió aplicar la siguiente convención para el etiquetado, normalizada por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA 5.1 por sus siglas en inglés) (Figura 66):

XX: Dos caracteres alfabéticos para indicar el tipo de equipo, instrumento o accesorio de la planta.

Y: hace referencia al área dentro de la planta.

ZZ: Dos caracteres numéricos para indicar el consecutivo de equipos de la misma característica y en la misma sección.

En la Figura 66 se observa la lógica de las etiquetas de los instrumentos.

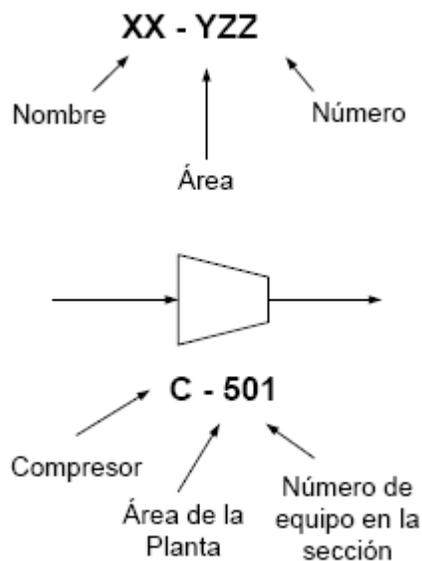


Figura 66. Significado del etiquetado [24].

A continuación se listan en la Tabla 2 las etiquetas de todos los equipos, instrumentos y accesorios utilizados en la automatización planta. Se aclara que todos los equipos están en el mismo lugar dentro de la planta por lo tanto no se utiliza el carácter “Y” de identificación.

Tabla 2. Valores de clasificación de las variables cualitativas del producto.

| Instrumento   | Etiqueta |
|---|----------|
| Conjunto de cuatro resistencias en la parte macho del molde.  | TE-1     |
| Conjunto de cuatro resistencias en la parte hembra del molde.                                       | TE-2     |
| Relé de estado sólido que controla la corriente para las resistencias de la parte macho del molde.  | Q-1      |
| Relé de estado sólido que controla la corriente para las resistencias de la parte hembra del molde. | Q-2      |
| Relé electromecánico que controla la corriente para toda la maquina pasando por un guarda motor.    | Q-3      |
| Regulador de presión que actúa en la cámara superior de C-1.  | RG-1     |
| Regulador de presión que actúa en la cámara inferior de C-1.  | RG-2     |
| Regulador de presión que actúa en la cámara superior de C-2.  | RG-3     |
| Regulador de presión que actúa en la cámara inferior de C-2.  | RG-4     |
| Válvula de 3/2 vías que maneja C-2.   | V-1      |
| Válvula de 3/2 vías que maneja C-1.   | V-2      |
| Relé electromecánico de 14 pines.   | K-2      |
| Llave de carro de tres posiciones: OFF-ON-STAR, para el encendido de la planta.                     | S-1      |
| Llave de dos posiciones para escoger el modo de operación automático/manual.                        | S-2      |
| Llave dos posiciones que controla la compresión en modo manual.                                     | S-3      |
| Llave dos posiciones que controla la expulsión en modo manual.                                      | S-4      |
| PLC FP-X C30R.  | PLC-1    |
| Controlador industrial de temperatura para la parte macho del molde.                                | PID-1    |
| Controlador industrial de temperatura para la parte hembra del molde.                               | PID-2    |
| Pantalla táctil monocromática para supervisar el proceso  | GT32-1   |
| <b>Equipos</b>  |          |
| Parte macho del molde.  | M-1      |
| Parte hembra del molde.   | M-2      |
| Cilindro que actúa en la parte macho del molde.   | C-1      |
| Cilindro que actúa en la parte macho del molde.   | C-2      |
| <b>Accesorios</b>   |          |
| Luz piloto para indicar funcionamiento en automático.   | L-1      |
| Luz piloto para indicar funcionamiento en manual.   | L-2      |
| Luz piloto para indicar falla en la maquina.  | L-3      |
| Breaker 1.  | B-1      |
| Breaker 2.  | B-2      |
| Breaker 3.  | B-3      |
| Breaker 4.  | B-4      |
| Breaker 5.  | B-5      |

### 3.2.2 Diagrama de flujo del proceso

En la Figura 67 se muestra el diagrama de flujo de proceso, según la recomendación ISA S5.1: El proceso inicia en (1) con el control automático de temperatura del molde, tanto para mando manual utilizando los PID-1 y PID-2 como para mando automático a través del PLC-1. Este control se consigue variando la potencia suministrada a las resistencias mediante dos relés de estado sólido, en (2) se realiza la dosificación de la materia prima, en (3) se aplica la presión mediante la acción de C-1, en (4) se levanta C-1 una vez cumplido (3), en

(5) se expulsa el producto terminado después de cierto tiempo escogido por el operario, en (6) se retira el producto terminado y en (7) se baja el sistema de expulsión para comenzar un nuevo ciclo.

A continuación se listan los pasos seguidos en cada uno de los modos de operación de la planta:

- **Secuencia paso a paso de producción con mando manual:**

1. Ingresar valor de consigna de temperatura a cada uno de los controladores industriales PID-1 y PID-2 mediante los pulsadores propios de cada equipo en mención, con el cual se precalienta el molde.
2. Verificar que la parte macho del molde se encuentre en la posición de arriba (sin tener contacto la parte hembra).
3. Verificar que la pieza expulsora se encuentre abajo.
4. Verificar que el molde se encuentre a la temperatura de consigna, observando los tableros numéricos de los PID-1 y PID-2.
5. Depositar la materia prima (yuca, fibra de fique y plastificante) al interior del molde hembra mediante el mecanismo de dosificación.
6. Dar orden de compresión, girando la llave de dos (2) posiciones S-3, que activa la válvula V-2 que da paso al aire comprimido hacia la cámara 1 del cilindro C-1 quien baja la parte macho del molde para comprimir la materia prima.
7. Contabilizar el tiempo durante el cual la materia prima estará expuesta a compresión y temperatura constantes.
8. Dar orden de levantar la parte macho del molde, girando la llave S-3 a su posición inicial, que desactiva la válvula V-2 dando paso al aire comprimido hacia la cámara 2 del cilindro C-1.
9. Dar orden de expulsión del productor terminado, girando la llave de dos (2) posiciones S-4, que activa la válvula V-1 que da paso al aire comprimido hacia la cámara 1 del cilindro C-2 quien sube la pieza expulsora.
10. Retirar el producto terminado.
11. Dar orden de bajar la pieza expulsora, retornando la llave S-4 a su posición inicial, que desactiva la válvula V-1 dando paso al aire comprimido hacia la cámara 2 del cilindro C-2.
12. Iniciar un nuevo ciclo.

- **Secuencia paso a paso de producción con mando automático:**

1. Ingresar los valores de consigna, temperatura y tiempo de exposición, al PLC-1 mediante la interfaz GT32-1. Con la consigna de temperatura se precalienta el molde.

2. Depositar la materia prima (yuca, fibra de fique y plastificante) al interior del molde hembra mediante el mecanismo de dosificación.
3. Dar orden de marcha para continuar con el proceso mediante la interfaz GT32-1. Donde el PLC-1 toma el control automático del proceso activando la válvula V-2 que da paso al aire comprimido hacia la cámara 1 del cilindro C-1 quien baja la parte macho del molde para comprimir la materia prima, una vez terminado el tiempo de exposición programado en el paso 1 el PLC desactiva la válvula V-2 para dar paso al aire comprimido hacia la cámara 2 del cilindro C-1 subiendo de esta manera la parte macho del molde. Des pues de que la parte macho del molde se encuentre en la posición de arriba, el PLC activa la válvula V-1 que da paso al aire comprimido hacia la cámara 1 del cilindro C-2 quien sube la pieza expulsora.
4. Retirar el producto terminado
5. Dar orden de bajar la pieza expulsora mediante la interfaz GT32-1. Donde el PLC-1 toma nuevamente el control automático del proceso desactivando la válvula V-1 dando paso al aire comprimido hacia la cámara 2 del cilindro C-2 quien baja la pieza expulsora.
6. Iniciar un nuevo ciclo.

A continuación la Figura 67 representa el diagrama de flujo de proceso en los dos modos de operación de la planta: manual y automático.

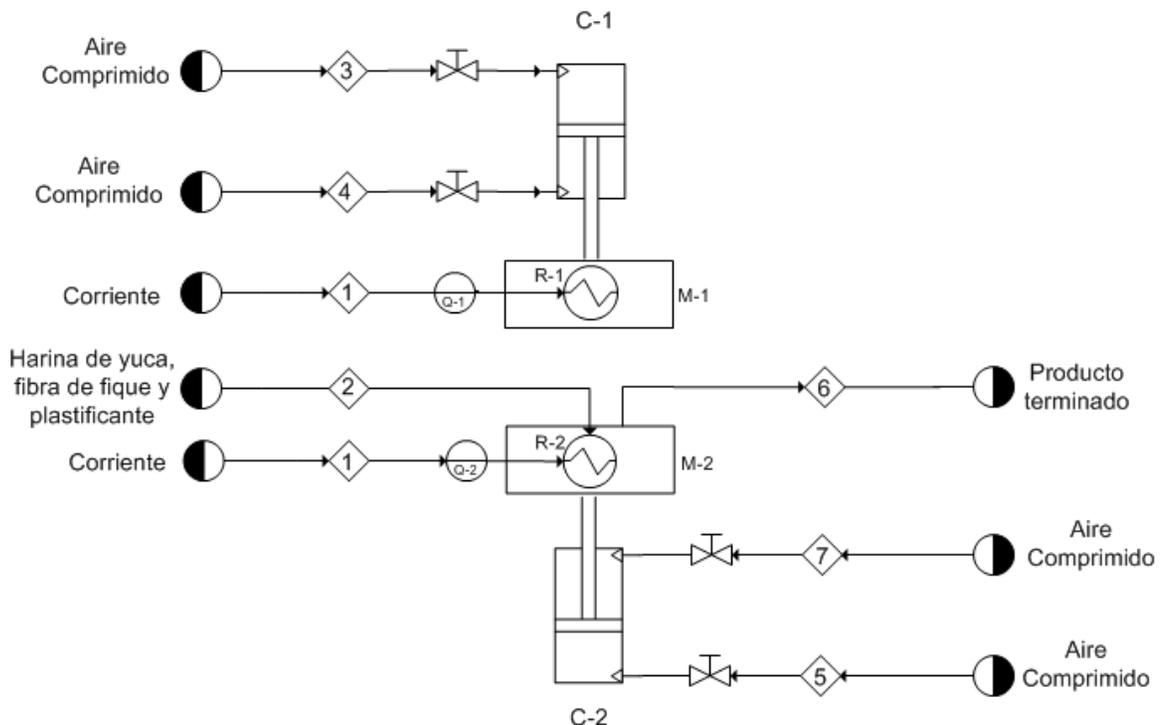


Figura 67. Diagrama de flujo de proceso.

### 3.2.3 Diagrama de tuberías e instrumentos (PI&D)

En la Figura 68 se muestra el diagrama PI&D, según la recomendación ISA S5.1 de la planta para operación con mando manual.

Para efectuar el cambio de operación con mando manual a operación con mando automático o viceversa, se manipula la llave automático/manual S-2.

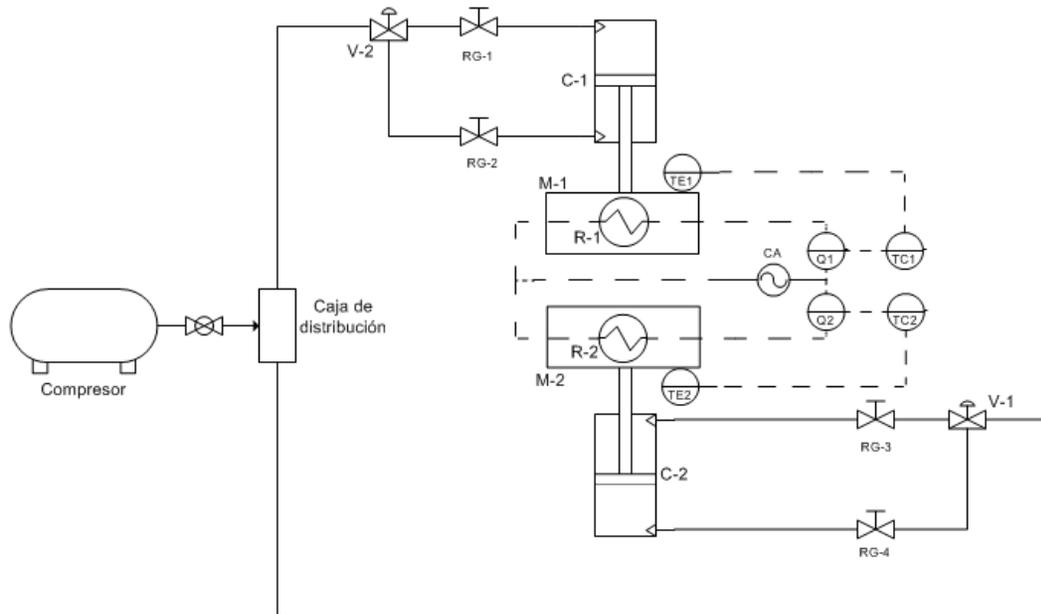


Figura 68. Diagrama PI&D para mando manual.

En la Figura 69 se muestra el diagrama PI&D, según la recomendación ISA S5.1 de la planta para operación con mando automático.

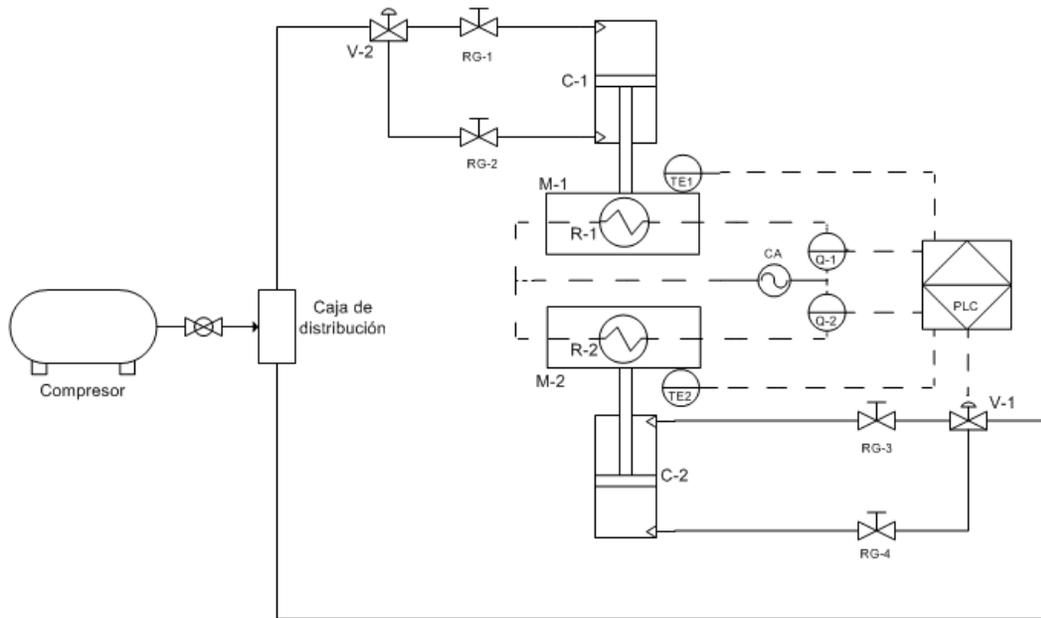


Figura 69. Diagrama *PI&D* para mando automático.

### 3.2.4 Diagrama SAMA

En la Figura 70 se muestra el diagrama SAMA del lazo de control de temperatura en el molde, que corresponde a la norma desarrollada por la Asociación Científica de Fabricantes de Aparatos (SAMA, por sus siglas en inglés).

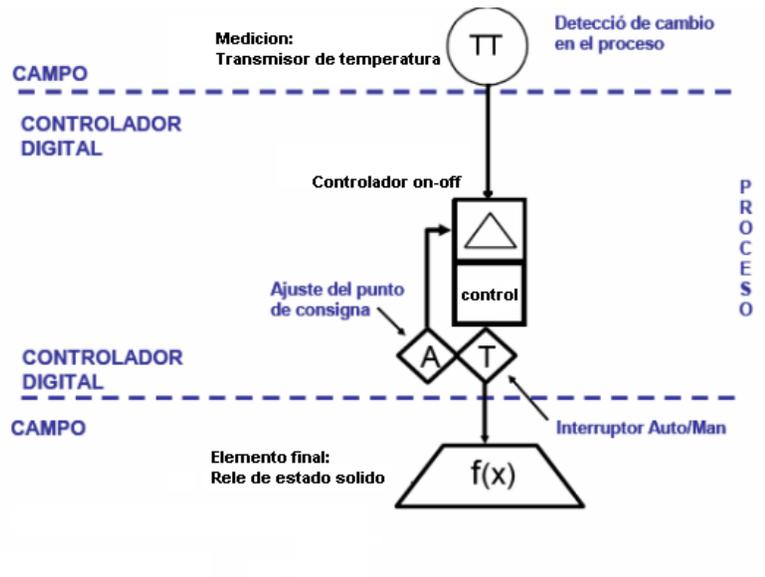


Figura 70. Diagrama SAMA.

### **3.2.5 Control para la planta de moldeo por compresión**

#### **Control para la parte continúa del proceso**

El sistema de control de temperatura, esté o no la planta operando en modo automático, mide la temperatura de cada parte del molde (hembra y macho) de un sensor termopar tipo J, esta señal, mientras la planta está operando en modo manual es procesada por el controlador industrial, el cual viene con una ley de control PID para controlar temperatura. Cuando la planta opera en modo automático la señal de temperatura se digitaliza y el control es responsabilidad del PLC FP-X C30R.

El controlador del sistema en lazo cerrado, independiente si es el PLC o el PID industrial, activa una señal de potencia PWM para las resistencias tipo cartuchos quienes se encargan de calentar los moldes con la potencia disipada. En los controladores industriales la ley de control es un PID mientras que la ley de control implementada en el PLC es una ley propia.

La ley de control propia programada en la memoria de programa del PLC se determino primero haciendo un análisis de la respuesta del sistema en lazo abierto para posteriormente diseñar a partir de los resultados la ley propia.

- Análisis de la respuesta en lazo abierto

Primero se procedió a tomar datos en la posición ON de activación de las resistencias tanto del molde hembra como macho durante un periodo largo. Este tiempo se fijo garantizando que la grafica obtenida incluya todos los valores de temperatura en los que trabajará la máquina (rango de trabajo). En la Figura 71 se observa la grafica de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) versus tiempo (seg), de cada parte del molde, se tomaron datos durante 20 minutos, tiempo en el cual se logro la temperatura máxima de trabajo de la planta. El pico que se da al final del tiempo es debido a que se apagaron las resistencias, debido a que ya se había alcanzado la temperatura máxima de trabajo.

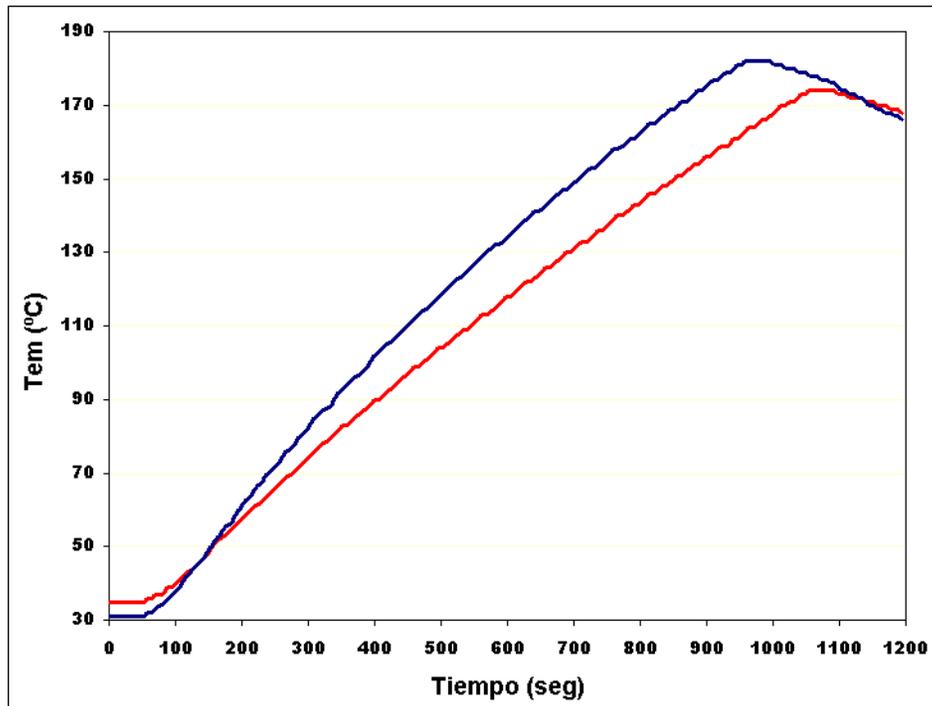


Figura 71. Respuesta en lazo abierto de temperatura en cada parte del molde.  
 Línea azul: Temperatura de la parte hembra del molde.  
 Línea roja: Temperatura de la parte macho del molde.

Observando la Figura 71 se determinaron 3 zonas lineales de temperatura para cada parte del molde. Se puede resaltar que aunque la parte hembra del molde incrementa su temperatura con una tasa de cambio más alta que su contraparte, las zonas lineales son iguales para ambas partes. En la Figura 72 se puede observar las tres zonas descritas, los rangos lineales de cada zona son: Zona 1= [30 °C – 90 °C]; Zona 2= [91 °C – 140 °C]; Zona 3= [141 °C – 190 °C].

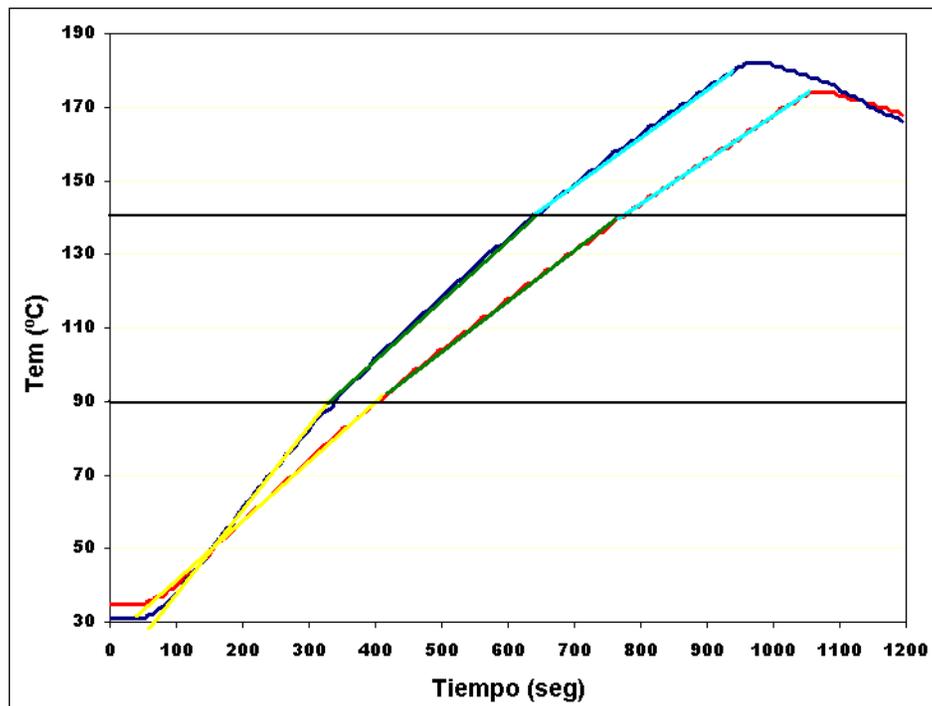


Figura 72. Zonas lineales de temperatura en cada parte del molde.

Zona 1= color amarillo [30 °C – 90 °C].

Zona 2= color verde [91 °C – 140 °C].

Zona 3= color azul claro [141 °C – 180 °C].

Con la anterior información se procede al diseño de una ley de control propia, consistente en modificar simplemente los tiempos ON – OFF de la señal de PWM según la zona de trabajo de calentamiento del molde.

- Diseño de la ley de control

La señal que se envía a las resistencias, independientemente de la zona en donde se quiere realizar el control, es una modulación por ancho de pulso o PWM (por sus siglas en ingles), lo que cambia en cada zona son los tiempos de los estados ON y OFF. La señal para cada zona se puede observar en la Figura 73:

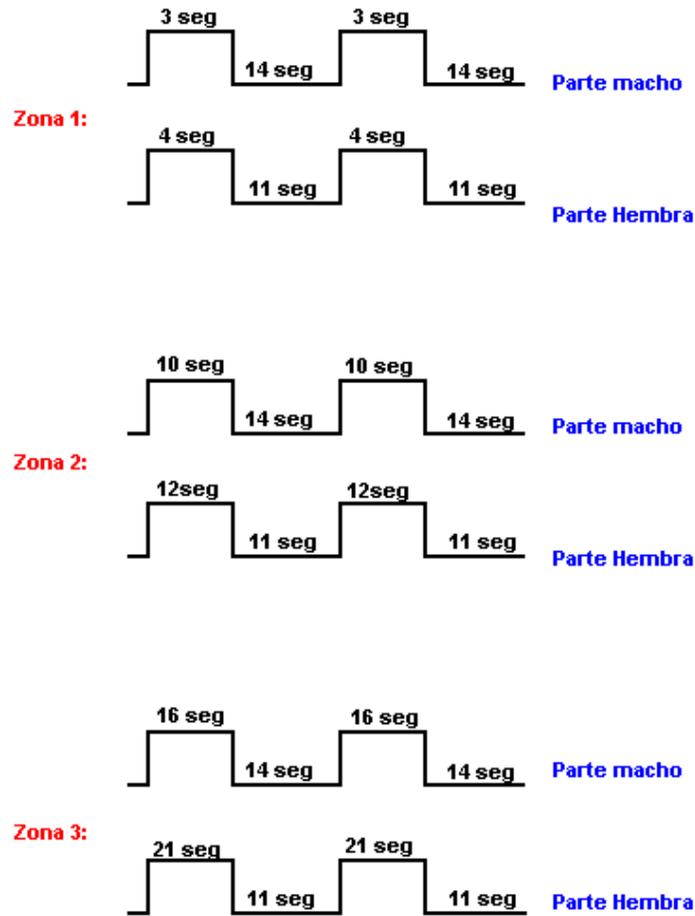


Figura 73. Señales PWM para cada zona de control.

Para determinar la duración temporal de los estados de la señal PWM se hizo un procedimiento de ensayo y error, en el cual se fijo inicialmente un valor base de 14 seg y 11 seg para el estado OFF de la parte macho y hembra del molde respectivamente. Este valor base de tiempo para el estado OFF se emplea independientemente de la zona de trabajo a operar, con el fin de únicamente modificar el pulso positivo (ON) de la señal PWM a medida que se cambia de zona de trabajo.

Para determinar el valor temporal del pulso ON de cada zona se realizaron una serie de ensayos. En estos se modifica el tiempo progresivamente hasta controlar la temperatura en el valor máximo de los rangos, esto se realizó por cada zona. Por ejemplo para realizar el cálculo del periodo de tiempo ON de la zona1, se fijo un valor de consigna en 90 °C, que es el valor máximo en la zona1, entonces se genera una señal PWM correspondiente a la zona1 a las resistencias, donde se procede aumentando gradualmente el periodo del pulso ON hasta que el sensor

indique 90° C. Para la zona 2 y 3 se realizó el mismo procedimiento pero con los valores máximos de cada rango de operación 140 °C y 190 °C respectivamente.

Para controlar la temperatura en los moldes en un valor de consigna diferente a los establecidos para cada zona se procede de la misma forma, incrementando el tiempo ON hasta que el sensor indica que se alcanzó el valor deseado. Entonces se pasa OFF hasta que baje la temperatura un grado centígrado para iniciar nuevamente el proceso de incrementar el tiempo en ON.

### **Control para la parte secuencial del proceso.**

Con el escenario de mando manual de la planta, el responsable del control secuencial es el operario y para el control secuencial del proceso en mando automático se utilizó un PLC Panasonic FP-X C30R. Ya sea manual o automático el control de secuencia que se debe cumplir para ser un proceso óptimo se debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Controlar dos cilindros de doble efecto (C-1 y C-2), los cuales deben comprimir la materia prima y expulsar el producto terminado respectivamente.
- Para el control de los cilindros (C-1 y C-2) se cuenta con dos válvulas de 3/2 vías (V-1 y V-2), las cuales son administradas por el PLC o el operario según el escenario de automatización.
- Para dar inicio al proceso la parte macho del molde se debe encontrar arriba (V-1 des energizada) por lo tanto el vástago de C-1 debe permanecer adentro del cilindro. El mecanismo de expulsión debe encontrarse en la posición de reposo (V-2 des energizada) por lo tanto el vástago de C-2 debe permanecer adentro del cilindro.
- Cuando el molde alcance los valores de consigna, en la pantalla táctil debe aparecer un aviso que le anuncie al operario que la planta está con las condiciones para dosificar la materia prima; el operario debe dar la orden de inicio mediante un botón virtual de marcha (presione para continuar) en la pantalla táctil; después de dar marcha, la parte macho del molde debe bajar (C-1 abajo con V-1 energizada) y permanecer en este estado hasta que se cumpla el tiempo de exposición estipulado; una vez terminado el tiempo de exposición la parte macho del molde debe regresar a la posición superior (C-1 arriba con V-1 des energizada), posteriormente se debe activar el mecanismo de expulsión (C-2 arriba con V-2 energizada) para que el operario pueda retirar manualmente el producto terminado; después de ser retirado el producto terminado el operario debe dar la orden de descenso del expulsor (C-2 abajo con V-2 des energizada) mediante un botón virtual (Bajar Expulsor) de la pantalla táctil.

### **3.3 Ingeniería de detalle**

#### **3.3.1 Diagrama de lazo de instrumentos**

El diagrama de lazo de instrumentación que corresponde a la norma ISA S5.4, describe la ubicación y el cableado entre cada uno de los componentes de la planta. Este diagrama se puede observar en detalle en el documento del ANEXO 1 en formato PDF o en el documento impreso de los anexos.

#### **3.3.2 Diagrama de mando y potencia**

La documentación de control, mando y potencia realizada según la normalización de la Comisión Internacional de Eléctrica (por sus siglas en inglés IEC), describen el cableado punto a punto entre cada componente eléctrico y electrónico de la planta. Cada plano se puede observar en detalle en los documentos de los anexos: ANEXO 2 (Diagrama de Potencia), ANEXO 3 (Diagrama de control de temperatura) Y ANEXO 4 (Diagrama de Control y Mando), en formato PDF o en el documento impreso de los anexos.

#### **3.3.3 Diagramas lógicos**

Con las condiciones de control secuencial de la ingeniería básica aparte “control secuencial del proceso” se desarrollo el diagrama lógico GRAFCET que controla la planta piloto de moldeo por compresión (Figura 74).

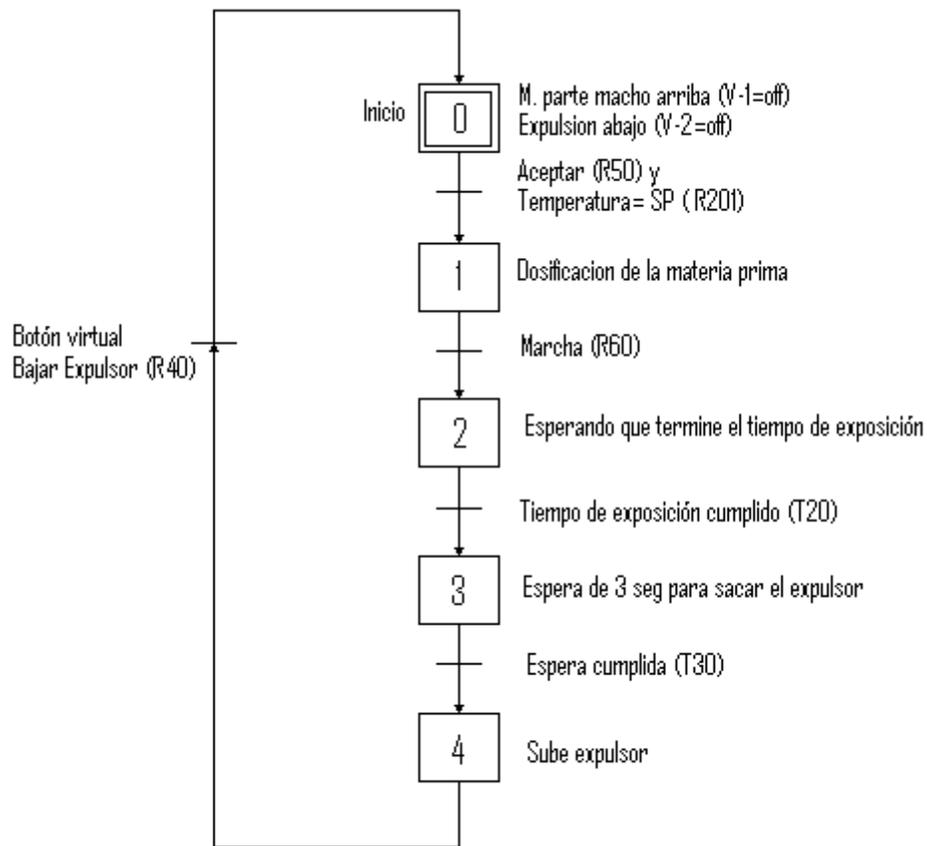


Figura 74. Graficet del control de la planta piloto de moldeo por compresión.

Con el diagrama lógico graficet se desarrollo el programa que maneja el PLC (LADER) que controla el mando automático de la planta, Ver anexo5.

### 3.4 Supervisorio del proceso de producción de probetas termoestables

Inicialmente se tenían tres formas para hacer el supervisorio:

4. Supervisorio en un computador de escritorio cerca a la planta, con comunicación serial RS232.
5. Supervisorio remoto en un computador cerca o lejos de la planta, comunicándose vía Ethernet.
6. Supervisorio empotrado en panel de control con pantalla táctil como interfaz de usuario.

La opción tres fue la utilizada ya que un sistema de supervisión en computador sea o no remoto tiene más desventajas con respecto a uno empotrado, ya que para la planta y proceso a inspeccionar es suficiente las características que maneja este tipo de tecnología. Las principales desventajas del monitoreo con computador de mesa son:

- Es más grande que una pantalla táctil lo que implica más espacio de instalación, y mayor trabajo de movilización.
- Es mucho más costoso que una pantalla táctil.
- Tiene gastos en mantenimiento costos, mientras que la pantalla táctil no tiene en absoluto.

El supervisorio o HMI del proceso se realiza mediante una pantalla táctil de referencia GT32 de marca Panasonic. El software utilizado para la configuración y programación es el GTWIN del mismo fabricante.

En la Figura 75 se observa la organización y secuencia del supervisorio.

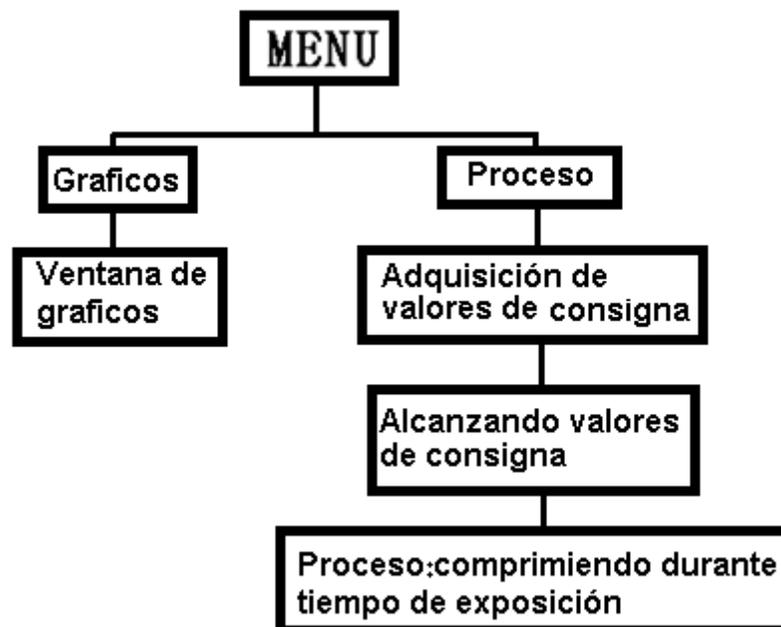


Figura 75. Árbol de secuencia de pantalla táctil.

En las siguientes figuras se muestran las diferentes vistas desplegadas por pantalla que el operario observa a medida interactúe con la interfaz GT32.

En la Figura 76 se observa la ventana "0" que es la interfaz de inicio del supervisorio, en ella se despliegan tres opciones de menú: **Proceso**, **Gráficos** y

**Alarmas**, además cuenta con datos adicionales de temperatura de cada parte del molde.

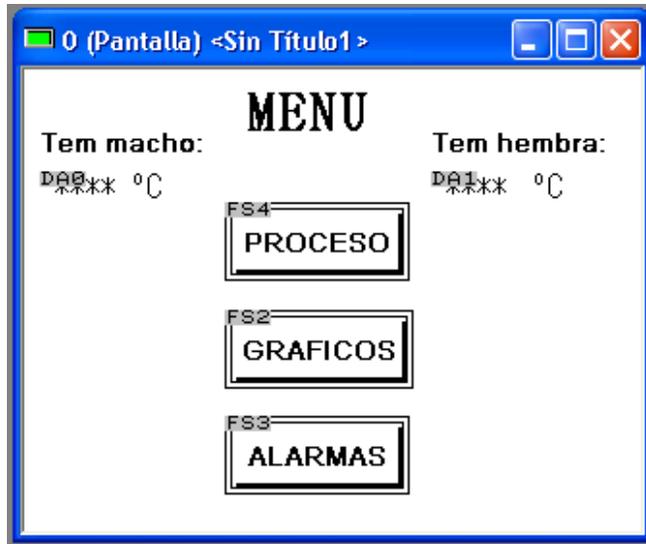


Figura 76. Interfaz de Inicio (Menú).

Si el operario pulsa el botón **Proceso**, automáticamente aparece la ventana "1" de adquisición de valores de consigna (ver Figura 77), como son: Temperatura del molde y tiempo de exposición, a los cuales la materia prima va a estar expuesta durante el proceso. Para ingresar estos valores, se debe presionar la pantalla táctil en el "prompt", justo al lado izquierdo de la unidad de medida y aparecerá un teclado numérico. Una vez digitados los valores de consigna, se activa el botón **Aceptar** que sirve para confirmar los valores de consigna y continuar con el proceso o **Menú** que sirve para regresar a la ventana anterior o Menú principal.

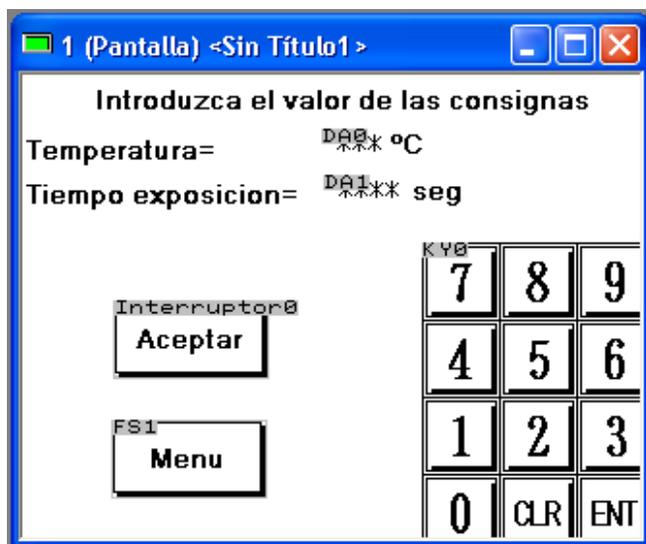


Figura 77. Ventana "1", adquisición de valores de consigna.

Cuando los valores de consigna son aceptados, la planta empieza a alcanzarlos mediante la ejecución del programa diseñado para tal fin y el supervisorio despliega la ventana "5" (ver Figura 78), donde se muestran los valores actuales de temperatura y un mensaje "**Alcanzando Temperatura de Consigna**", este mensaje cambia automáticamente a "**Dosifique la materia prima y presione para continuar**" solo cuando la temperatura de consigna sea igual a la temperatura actual. Además en esta ventana se dispone de un botón **Atrás** que permite retornar a la ventana anterior.

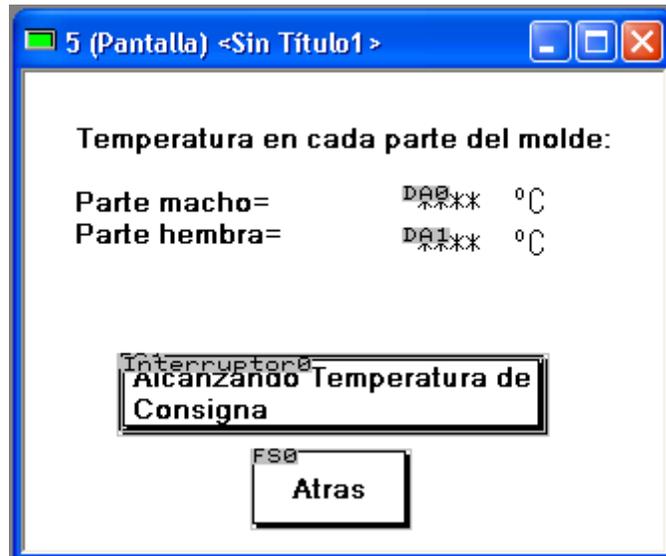


Figura 78. Ventana "5", alcanzando valores de consigna.

Cuando el proceso haya alcanzado los valores de consigna y el operario haya presionado el botón "**Dosifique la materia prima y presione para continuar**" el supervisorio despliega la ventana "6", como se muestra en la Figura 79, en donde se muestra el valor real de temperatura de cada parte del molde y un contador regresivo del tiempo de exposición de la materia prima, cuando este conteo termina, se activa el botón "**Bajar expulsor**", que al pulsarlo regresa nuevamente a la ventana de inicio o menú principal para comenzar un nuevo ciclo con nuevos parámetros si es necesario.

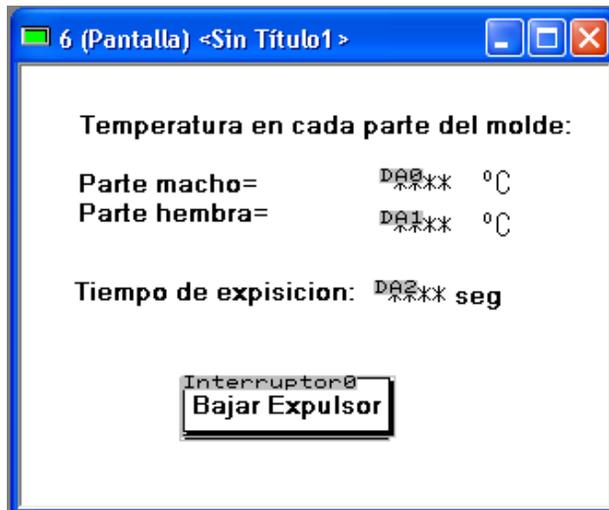


Figura 79. Ventana “6”, comprimiendo durante tiempo de exposición.

Si el operario pulsa el botón **Gráficos** del menú principal se muestra la ventana “2” (Figura 80) que es donde se genera un grafico dinámico de la temperatura del molde. El grafico está configurado con un muestreo cada 6 seg y está separado por 10 líneas horizontales y 10 verticales, en la pantalla se alcanzan a registrar 300 muestreos por lo que cada cuadrícula equivale en tiempo a 3 minutos. También existe el botón **Menu** que sirve para regresar a la ventana de inicio o menú principal, además se muestran los valores reales de temperatura para cada parte del molde.

Los datos del proceso son almacenados en una memoria interna Eprom de la pantalla GT32 que pueden ser exportados a un archivo de texto con extensión “.CSV” para posteriormente ser analizados y graficados mediante cualquier aplicación desarrollada para tal fin.

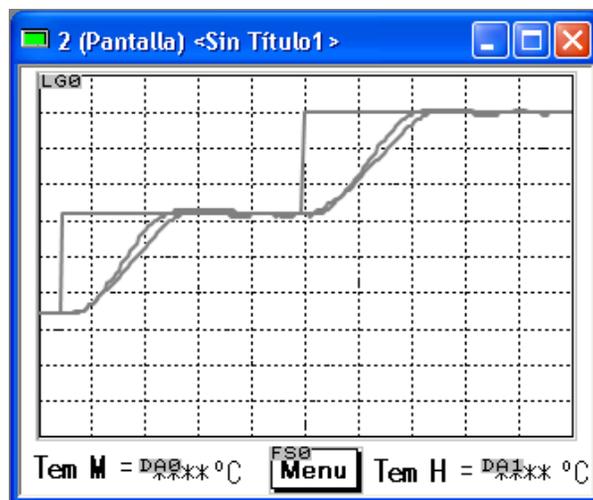


Figura 80. Ventana “2”, gráfico de temperatura.

#### 4 CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE PROCESO

Las variables involucradas en el proceso de moldeo por compresión que influyen en las propiedades del producto terminado son: la temperatura de los moldes, el tiempo de exposición y la presión aplicada entre las partes del molde.

Esta caracterización tiene como objetivo establecer los rangos de operación de las variables en los que la planta debe trabajar, para obtener un producto con las propiedades esperadas en color, rigidez y curado.

#### METODOLOGIA DE CARACTERIZACION:

Para la caracterización de las variables de proceso se propuso la organización de una serie de pruebas, que consistieron en variar de una forma ordenada y planeada los valores de las variables: Temperatura en el molde, presión que se ejerce cuando se comprime la materia prima y el tiempo de exposición al cual va a estar sometida la materia prima durante el proceso de curado.

Con respecto al tiempo de exposición de la materia prima a la compresión y curado por temperatura se escogieron siete (7) valores diferentes en el rango de 1 a 30 minutos. Con respecto a la temperatura de calentamiento de los moldes se escogieron cuatro (4) valores en el rango de 90 a 180 grados centígrados. Finalmente con respecto a la presión de compresión se escogieron dos (2) valores: 20 psi y 50 psi. Los valores de las variables y número de pruebas se observan en la Tabla 3:

Tabla 3. Valores de las variables de proceso y de pruebas.

| Variables                         | Tiempo (min) |       | Temperatura (°C) |       | Presión (psi) |       |
|-----------------------------------|--------------|-------|------------------|-------|---------------|-------|
|                                   | # de pruebas | valor | # de pruebas     | valor | # de pruebas  | valor |
| Valores /<br>Número de<br>pruebas | 1            | 1     | 7                | 90    | 12            | 20    |
|                                   | 1            | 2     | 7                | 120   | 19            | 50    |
|                                   | 1            | 3     | 7                | 150   |               |       |
|                                   | 8            | 5     | 10               | 180   |               |       |
|                                   | 4            | 10    |                  |       |               |       |
|                                   | 8            | 15    |                  |       |               |       |
|                                   | 8            | 30    |                  |       |               |       |

Los valores seleccionados para las variables y el número de pruebas escogidas obedecen a la experiencia obtenida durante las pruebas preliminares de acondicionamiento de la planta. Pruebas que se realizaron en conjunto con el grupo investigador, de aquellas pruebas se determino que el producto tendría que ser formado a una temperatura mayor a 110 °C, que la presión debía ser mayor a

20 psi y que los tiempos de exposición podrían estar en el orden de 5 min – 30 min dependiendo la temperatura.

Debido a esto, las pruebas que se realizaron empezaron con un valor de temperatura de 90° C, al ser menor a 110 °C se garantiza que las pruebas tengan un porcentaje mínimo de incertidumbre. La temperatura se aumento en escalones de 30 °C hasta llegar a 180 °C. Con este procedimiento se generaron 4 grupos en los cuales se varía tiempo y presión en los rangos descritos anteriormente. En la Tabla 4 se puede ver las pruebas realizadas separadas en los grupos mencionados.

Tabla 4. Valores de las variables de proceso y de pruebas.

| <b>Grupos</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Tiempo (min)</b> | <b>Presión (psi)</b> | <b># de pruebas</b> |
|---------------|-------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| 1             | 90                      | 5                   | 20                   | 1                   |
|               |                         |                     | 50                   | 2                   |
|               |                         | 10                  | 50                   | 3                   |
|               |                         | 15                  | 20                   | 4                   |
|               |                         |                     | 50                   | 5                   |
|               |                         | 30                  | 20                   | 6                   |
|               |                         |                     | 50                   | 7                   |
|               |                         | 2                   | 120                  | 5                   |
| 50            | 9                       |                     |                      |                     |
| 10            | 50                      |                     |                      | 10                  |
| 15            | 20                      |                     |                      | 11                  |
|               | 50                      |                     |                      | 12                  |
| 30            | 20                      |                     |                      | 13                  |
|               | 50                      |                     |                      | 14                  |
| 3             | 150                     |                     |                      | 5                   |
|               |                         | 50                  | 16                   |                     |
|               |                         | 10                  | 50                   | 17                  |
|               |                         | 15                  | 20                   | 18                  |
|               |                         |                     | 50                   | 19                  |
|               |                         | 30                  | 20                   | 20                  |
|               |                         |                     | 50                   | 21                  |
|               |                         | 4                   | 180                  | 5                   |
| 50            | 23                      |                     |                      |                     |
| 10            | 50                      |                     |                      | 24                  |
| 15            | 20                      |                     |                      | 25                  |
|               | 50                      |                     |                      | 26                  |
| 30            | 20                      |                     |                      | 27                  |
|               | 50                      |                     |                      | 28                  |

Al final del procedimiento se detecto la necesidad de adicionar tres (3) pruebas a 1 min, 2 min y 3 min con una temperatura de 180 °C y una presión de 50 psi. Ya que con tiempos mayores las probetas salen quemadas y la presión a 20 psi no afecta el producto terminado en cuanto a observaciones cualitativas.

En todas las pruebas realizadas para la caracterización de las variables del proceso, la materia prima empleada: mezcla de harina de yuca, fibra de fique y plastificante, se mantuvo en unas proporciones preestablecidos por los investigadores del proyecto macro. Estos valores son reservados.

Con un total de 31 pruebas, se realizo en cada una de ellas un análisis cualitativo donde se observan los cambios en color, rigidez y curado del producto terminado. Las variables cualitativas observadas en las pruebas tienen la clasificación establecida en la Tabla 5:

Tabla 5. Valores de clasificación de las variables cualitativas del producto.

| Variable | Color       | Curado  | Rigidez |
|----------|-------------|---------|---------|
| Valores  | Café claro  | Crudo   | Buena   |
|          | Café medio  | Cocido  | Mala    |
|          | Café oscuro | Quemado |         |

El objetivo final de estas pruebas es poder determinar los rangos de las variables del proceso para la operación de la planta y cómo la variación de alguna de ellas afecta o cambia el producto terminado. Las pruebas de rigor que se realizarán a las probetas estarán a cargo del grupo investigador.

Para nuestro análisis se determinó que una probeta apta es aquella que cumpla con la siguiente clasificación de valores: color (café medio), rigidez (buena) y curado (cocido), donde el color nos indica la cantidad de humedad presente, el curado la cantidad de calor aplicado y la rigidez la compactación del material. En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de las 31 pruebas.

Tabla 6. Matriz de resultados de las 31 pruebas de caracterización del producto.

| # DE PRUEBA | TIEMPO DE EXPOSICIÓN (min) | TEMPERATURA (°C) | PRESIÓN (psi) | COLOR       | RIGIDEZ | CURADO |
|-------------|----------------------------|------------------|---------------|-------------|---------|--------|
| 1           | 1                          | 180              | 50            | CAFE MEDIO  | BUENA   | CRUDA  |
| 2           | 2                          | 180              | 50            | CAFE MEDIO  | BUENA   | CRUDA  |
| 3           | 3                          | 180              | 50            | CAFE MEDIO  | BUENA   | COCIDA |
| 4           | 5                          | 90               | 20            | CAFE OSCURO | MALA    | CRUDA  |

|    |    |     |    |             |       |         |
|----|----|-----|----|-------------|-------|---------|
| 5  | 5  | 90  | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | CRUDA   |
| 6  | 5  | 120 | 20 | CAFE MEDIO  | MALA  | CRUDA   |
| 7  | 5  | 120 | 50 | CAFE MEDIO  | MALA  | CRUDA   |
| 8  | 5  | 150 | 20 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 9  | 5  | 150 | 50 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 10 | 5  | 180 | 20 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 11 | 5  | 180 | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 12 | 10 | 90  | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | CRUDA   |
| 13 | 10 | 120 | 50 | CAFE MEDIO  | MALA  | CRUDA   |
| 14 | 10 | 150 | 50 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 15 | 10 | 180 | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 16 | 15 | 90  | 20 | CAFE OSCURO | MALA  | CRUDA   |
| 17 | 15 | 90  | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | CRUDA   |
| 18 | 15 | 120 | 20 | CAFE MEDIO  | MALA  | CRUDA   |
| 19 | 15 | 120 | 50 | CAFE MEDIO  | MALA  | CRUDA   |
| 20 | 15 | 150 | 20 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 21 | 15 | 150 | 50 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 22 | 15 | 180 | 20 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 23 | 15 | 180 | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 24 | 30 | 90  | 20 | CAFE OSCURO | MALA  | CRUDA   |
| 25 | 30 | 90  | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | CRUDA   |
| 26 | 30 | 120 | 20 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 27 | 30 | 120 | 50 | CAFE MEDIO  | BUENA | COCIDA  |
| 28 | 30 | 150 | 20 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 29 | 30 | 150 | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 30 | 30 | 180 | 20 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |
| 31 | 30 | 180 | 50 | CAFE OSCURO | MALA  | QUEMADA |

## **Resultados detallados de las pruebas**

Estos resultados se han organizado en los grupos descritos en la Tabla 4.

### **Grupo 1**

En la Figura 81 se observan 4 muestras de las pruebas realizadas con una temperatura de 90°C, presión de 50 psi y tiempos de exposición de 5min, 10min, 15min y 30 min respectivamente.

Como se observa, las probetas presentan un color café oscuro indicando que no lograron evaporar toda el agua, quedando con un remanente de humedad bastante alto. El producto terminado no presenta características de resistencia ya que al someterlas a una prueba de gravedad, tomándolas de uno de sus extremos no se mantenían firmes (Figura 82). En las cuatro pruebas no se encontró diferencia alguna entre ellas.

Las pruebas realizadas, modificando únicamente la presión de 50 psi a 20 psi, presentaron los mismos resultados, indicando que la presión no afecta el porcentaje de humedad presente en el producto terminado, esto cualitativamente, no es del trabajo de grado entrar a determinar cambios en las moléculas microscópicamente.

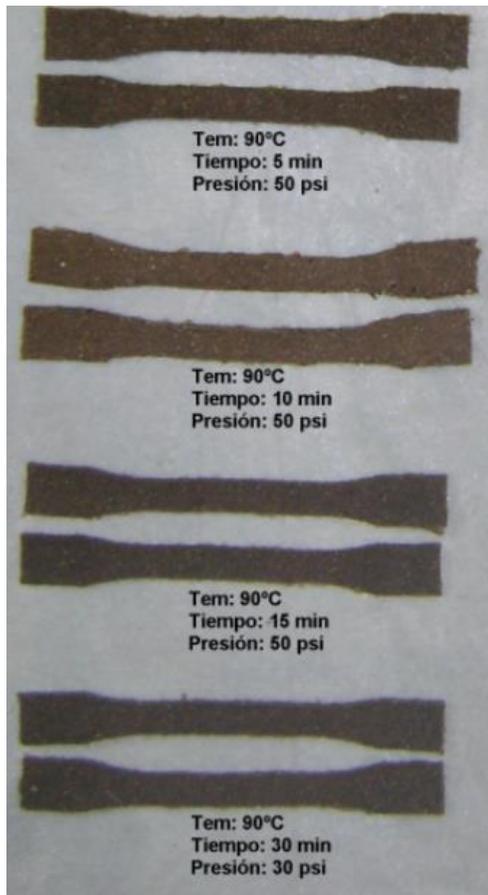


Figura 81. Muestras a 90°C, 50 psi y variando el tiempo de exposición.



Figura 82. Muestras a 90°C, 50 psi e independiente del tiempo de exposición.

## Grupo 2

Las pruebas realizadas a 120°C, 20 psi y variando el tiempo de exposición en 5min, 15min y 30min se observan en la parte izquierda de la Figura 83, y las

pruebas a 120°C, 50 psi y variando el tiempo de exposición en 5min, 10min, 15min y 30min se observan en la parte derecha de la Figura 83.

En este lote de prueba se puede observar que el producto terminado presenta un color café claro indicando menor presencia de humedad, debido a que la temperatura supera el punto de ebullición del agua, dando como resultado que esta se evapora y deje las muestras con mayor resistencia.

A 120°C, 5min de exposición y con presiones de 20 psi y 50 psi las probetas se doblan al sujetarlas de uno de sus extremos, indicando que el producto no tiene la resistencia adecuada.

A 120°C, 15min de exposición y 20 psi las probetas tienen menos humedad que la de 5min y son más resistentes. La variación de la presión de 20 psi a 50 psi no se representa ningún cambio en el producto terminado.

A 120°C, 30min de exposición y 20 psi las probetas tienen menos humedad que la de 5min y 15min y tienen una resistencia mayor pero se vuelven quebradizas. Variando la presión a 50 psi no se nota ningún cambio.

En conclusión, para tiempos aproximados a 10 min y sin importar la presión, el producto terminado adquiere las propiedades físicas deseadas. (Figura 84). Si los tiempos descienden de 10 minutos o sobrepasan los 15 las probetas son débiles o quebradizas respectivamente.

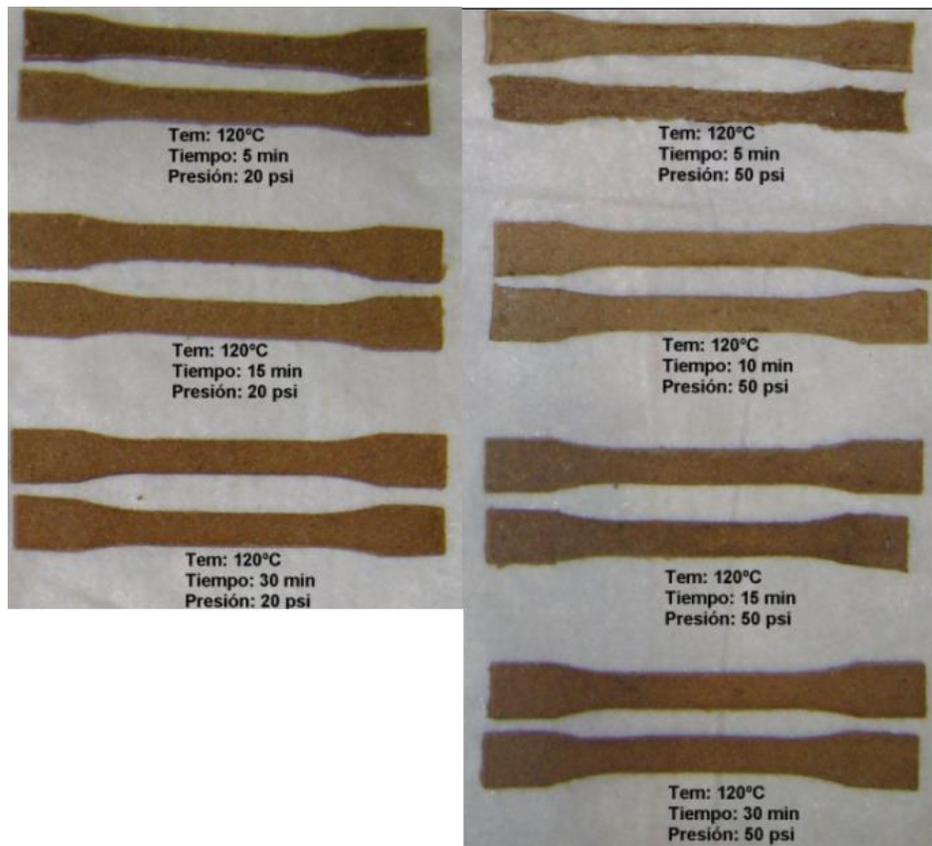


Figura 83. Muestras a 120°C, 20- 50 psi y variando el tiempo.



Figura 84. Muestras a 120°C, 20-50 psi y con tiempo de exposición aproximados a 10 min.

### Grupo 3

Las pruebas realizadas a 150°C, 20 psi y variando el tiempo de exposición en 5min, 15min y 30min se observan en la parte izquierda de la Figura 85, y las pruebas a 150°C, 50 psi y variando el tiempo de exposición en 5min, 10min, 15min y 30min se observan en la parte derecha de la Figura 85.

A 150°C, 5min de exposición y 20 psi las probetas adquieren mayor consistencia y no se doblan al someterlas a la fuerza de gravedad al tomarlas de uno de sus extremos. La variación de la presión a 50 psi no genera ningún cambio sobre el producto terminado.

Los resultados de esta prueba son similares a la prueba con 120°C y 15min de exposición, indicando que se puede aumentar la temperatura y reducir el tiempo de exposición en un 30%, reduciendo de esta manera el tiempo total del ciclo de producción.

Los resultados de la prueba a 150°C, 15min de exposición y 20 psi son similares a la prueba con 120°C y un tiempo de exposición de 30min. Variando la presión a 50 psi no se nota ningún cambio en el producto terminado.

A 150°C, 30min de exposición y 20 psi las probetas son quebradizas y se empiezan a quemar, tomando un color negro. Al variar la presión a 50 psi no se nota ningún cambio en el producto terminado.

En conclusión, se puede incrementar la temperatura para disminuir el tiempo de exposición y obtener características similares en el producto terminado.

La presión no afecta las características del producto terminado.

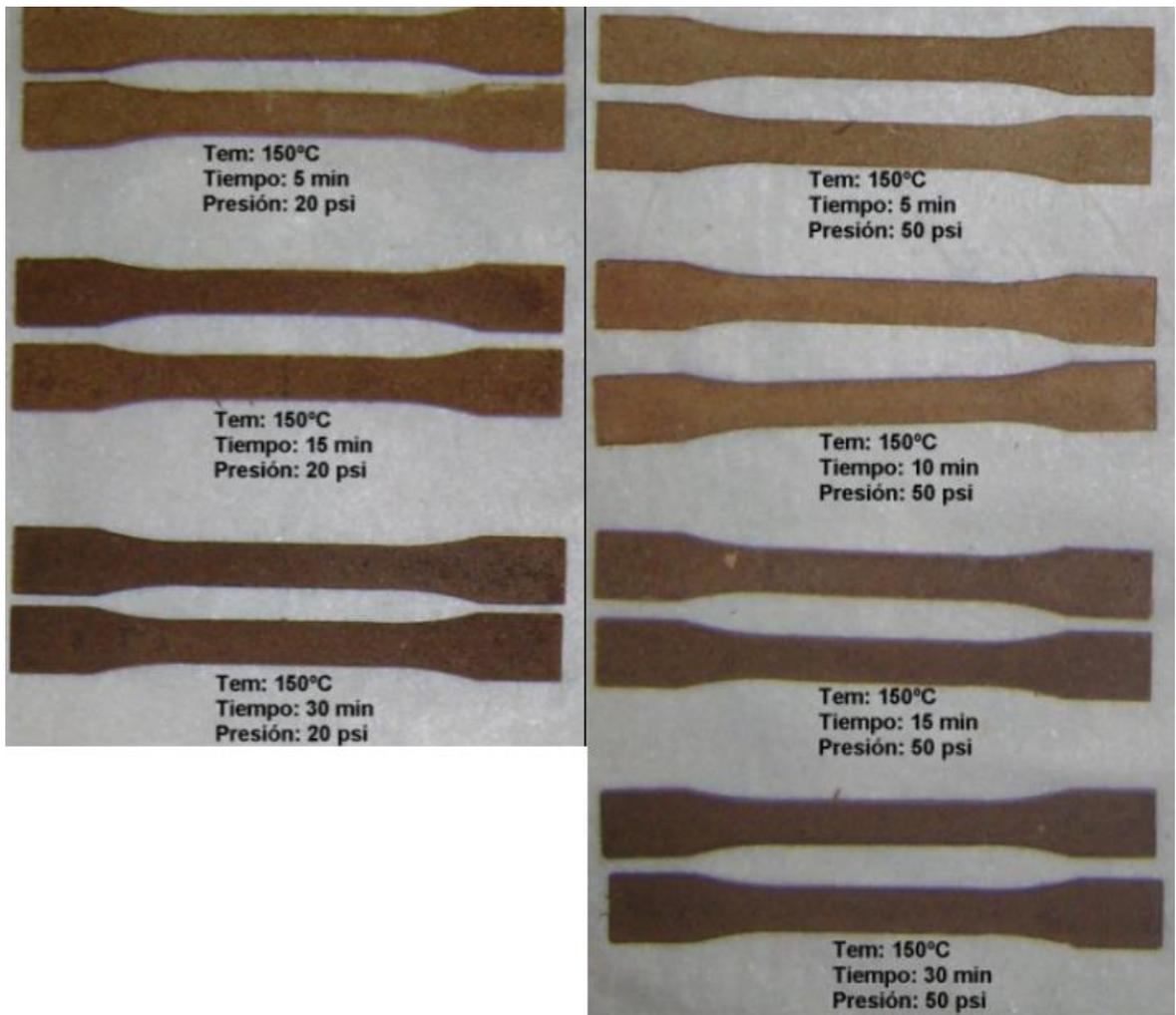


Figura 85. Muestras a 150°C, 20- 50 psi y variando el tiempo.

#### Grupo 4.

Las pruebas para 180°C se realizaron con 50psi y variando el tiempo de exposición con 5min, 15min y 30 min, pero al observar que todas las probetas salían quemadas fue necesario realizar pruebas con tiempos de 1min, 2min y 3 min y presión a 50 psi las cuales se pueden observar en la Figura 86.

En la prueba de 1min, la probeta presentó humedad en el interior debido a que la parte exterior se sella rápidamente por la alta temperatura.

En la prueba de 2min las características de la probeta son similares a las de 150° con 10min de exposición. Pero continúa presentando humedad interna.

Con la prueba de 3min se adquieren características similares a las obtenidas con la prueba de 150°C y 10 min, sin humedad en la parte interna del producto terminado.

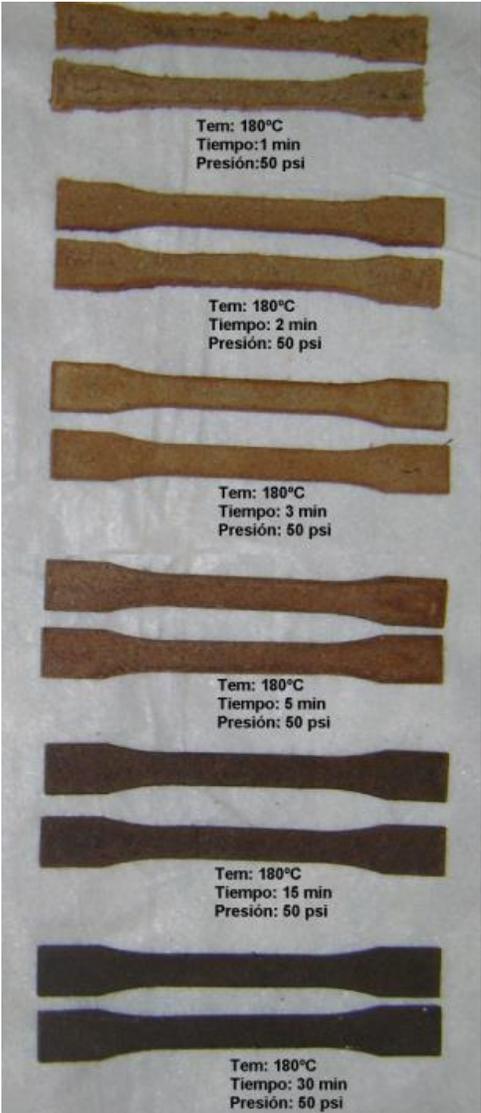


Figura 86. Muestras a 180°C, 50 psi y variando el tiempo.

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS:**

De las 31 pruebas realizadas 8 tuvieron un color café medio, curado cocido y rigidez buena. Lo que indica que el 26% de las pruebas resultaron aptas. De las pruebas aptas el 25% corresponden a temperaturas de 120 para un tiempo de 30 minutos, el 62.5 % corresponden a temperaturas de 150 para un periodo de tiempo comprendido entre 5 y 15 minutos.

Para obtener probetas con características deseadas se tiene que manejar temperaturas mayores a 120 °C ya que con valores menores las probetas salieron con humedad aproximadamente de un 60 %. Otra conclusión importante es que para disminuir los tiempos de ciclo de producción es posible aumentar la temperatura, siendo cuidadoso de no tener tiempos largos ya que con altas temperaturas un (1) solo minuto determina el curado de la pieza y podría llegar a quemarse, prueba de lo anterior, fueron las pruebas a 180°C que después de 5 minutos empezaron a quemarse cada vez mas.

En los resultados de estas pruebas cualitativas, la variable presión no influyo significativamente ya que con 20 psi o 50 psi las características finales del producto terminado eran muy parecidas (casi idénticas).

El tiempo mínimo logrado para pruebas aptas fue de 3 minutos a 180°C sin importar la presión. Esta prueba fue de características similares a las obtenidas con la prueba de 150°C y 10 min. Lo que indica que para los investigadores sería bueno tener en cuenta estas dos pruebas para hacer análisis más arduos.

## **5 RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN INDUSTRIAL DE EMPAQUES BIODEGRADABLES A BASE DE YUCA, FIBRA DE FIQUE Y PLASTIFICANTE**

Las recomendaciones técnicas se plantaron de acuerdo a un requerimiento de la Asociación Hortofrutícola de Colombia - **ASOHOFRUCOL** -, una organización nacional de carácter gremial, fundada en 1995 [25]. Uno de los principales objetivos de esta organización es el de promover la producción a escala industrial de frutas y hortalizas, los cuales tienen como principal destino el mercado internacional. Como es sabido, en la actualidad, una de las tantas exigencias del mercado extranjero para negociar con las empresas nacionales, es que los empaques de estos productos deben cumplir con las exigencias medioambientales de sello verde [26].

Actualmente ASOHOFRUCOL esta interesada en invertir en un proyecto industria de empaques biodegradables que este en capacidad de generar, inicialmente: cincuenta mil (50.000) bandejas mensualmente hechas de la materia prima: harina de yuca, residuos de fique y plastificante. El que las industrias productoras de alimentos cuenten con este tipo de empaques amigables con el medio ambiente, las ayudara a certificarse con el sello verde o ecosello necesario para exportar sus productos a los países del primer mundo.

Basados en esta necesidad, en el conocimiento y experiencia adquirida en el diseño y automatización de la planta piloto de moldeo por compresión, se plantearon una serie de recomendaciones técnicas para una planta industrial que este en capacidad de producir 50.000 unidades mensuales de bandejas biodegradables de dimensiones 15cm x 17cm x 2cm.

Estas recomendaciones están organizadas en las características técnicas que deben tener las siguientes partes y sistemas: Moldes, sistema de mezclado, sistema de calentamiento, sistema de dosificación, sistema de compresión, el sistema de expulsión.

### **5.1 Recomendaciones del molde**

Para aumentar la productividad de la empresa y que el producto se pueda comercializar a un costo más bajo, el área de trabajo del molde debe ser amplia permitiendo de esta manera producir varias piezas por lote (ciclo de producción).

Para calcular el número de bandejas que se tienen que producir por ciclo de producción para cumplir con las 50000 piezas mensuales se realizo el siguiente procedimiento:

Si se labora 23 días durante 16 horas entonces:

Numero de piezas por día laboral:

$$\frac{5000 \text{ piezas}}{23 \text{ días laborales}} = 217.39 \text{ piezas por día laboral}$$

Numero de piezas por hora laboral:

$$\frac{217.39 \text{ piezas}}{16 \text{ horas laborales}} = 13.59 \text{ piezas por hora laboral}$$

Numero de piezas por minuto:

$$\frac{13.59 \text{ piezas}}{60 \text{ min}} = 0.2265 \text{ piezas por minuto}$$

Como un ciclo de producción de una bandeja dura 5 min, según los resultados del cap4, entonces:

$$\frac{0.2265 \text{ piezas}}{5 \text{ min}} = 0.0453 \text{ piezas por ciclo}$$

Por lo tanto para cumplir con el requerimiento de 50 unidades mensual es necesario que la maquina produzca 12 bandejas por ciclo.

$$\frac{5000 \text{ piezas}}{0.0453 \text{ piezas por ciclo}} = 110375.28 \text{ ciclos mensuales}$$

Del anterior resultado podemos observar que si se producen 12 piezas por ciclo mensualmente se producirán 52992 piezas, las cuales son suficientes para cumplir

con el requerimiento de 50000 unidades mensual y además sobran 2992 piezas para el stock de seguridad, en caso de que haya un pedido extra.

Como las dimensiones de la bandeja son 15cm de ancho x 17cm de largo, se calculo un área de trabajo de 53cm de ancho x 77 cm. de largo como se puede observar en la Figura 87. La ranura que va entra cada pieza mide 1 cm. y es por donde va la cuchilla que corta los lixiviados. Entre las bandejas y el borde del molde se dejaron 3 cm. garantizado espacio suficiente para tornillería y guías de traslación.

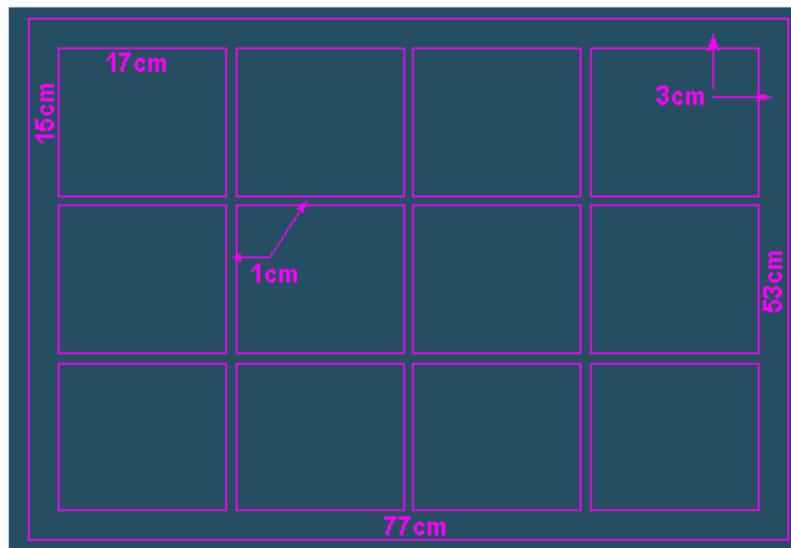


Figura 87. Área de trabajo del molde

Las dimensiones y masa final del molde se fijaran en las recomendaciones técnicas del sistema de calentamiento.

Se recomienda utilizar duraluminio para hacer el molde además de tener un respectivo chapado, ya sea en teflón o cromo duro, esto para que el material no se adhiera al las paredes del molde. Después de chapear el molde, será necesario pulimentar el cromo porque la chapa de cromo sin pulimentar puede pegarse.

## 5.2 Recomendaciones del sistema de mezclado

A nivel de la planta piloto la preparación de la materia prima se realiza en forma manual, sin embargo a escala industrial los altos volúmenes de producción hacen necesario que la materia prima se prepare con velocidad y que sea de una calidad alta, para esto se debe tener una mezcladora industrial la cual homogenice a tal

punto que el producto salga sin manchas como se observo en algunas pruebas del capitulo 4.

De acuerdo al número de piezas por hora laboral ( $135.8695652 \frac{\text{piezas}}{\text{hora.laboral}}$ ), la cantidad de materia prima utilizada por pieza ( $400\text{cm}^3$  aproximadamente) y para un turno de trabajo de 8 horas, se tiene:

$$400\text{cm}^3 * 135.8695652 \frac{\text{piezas}}{\text{hora.laboral}} * 8\text{horas} = 434782 \frac{\text{cm}^3}{\text{turno}}$$

Expresado en litros se tiene:

$$\frac{434782 \frac{\text{cm}^3}{\text{turno}}}{1000 \frac{\text{litro}}{\text{cm}^3}} = 434.782 \frac{\text{litros}}{\text{turno}}$$

De acuerdo a lo anterior se recomienda una mezcladora con sistema de tornillo sin fin, velocidad variable (10 rpm - 50 rpm) y una capacidad entre 500 y 800 litros.

### 5.3 Recomendaciones del sistema de calentamiento

Para lograr la meta de producir el mayor número de piezas de calidad en un ciclo tan corto como sea posible con un mínimo de lixiviados de materia prima es necesario que el diseño del sistema de calentamiento sea capaz de mantener la temperatura uniforme durante todo el proceso.

Que la temperatura deba ser uniforme significa que la temperatura de cada semimolde es la misma para todas las localizaciones (con un error máximo de  $\pm 6^\circ\text{C}$ ). Esto garantiza que el molde se llene más fácilmente y producirá las piezas con menos deformación, una mejor estabilidad dimensional y una apariencia de la superficie uniforme.

El calentamiento no debe ser por vapor ya que mantener e implementar una caldera es muy costoso, y la producción inicial no soportaría costos de tal magnitud.

El lograr una temperatura de molde uniforme depende del método de calentar el molde. Los moldes que están calentados eléctricamente producen una gran cantidad de calor en la fuente pero este calor tiene que ser distribuido por el molde entero de manera que un solo cartucho de resistencia serviría cuando el molde es

muy pequeño, en caso de ser grande hay que poner un número de cartuchos que produzca una temperatura adecuada para que esta se distribuya uniformemente sin dejar partes con temperaturas distintas.

Según el diseño del sistema de calentamiento implementado en la planta piloto, que dio un resultado óptimo, se recomienda: por cada  $430\text{cm}^3$  de metal un wattaje potencia disipada de  $300\text{w}$ , si el molde es en duraluminio (recomendado) la curva temperatura Vs tiempo llega a  $180^\circ\text{C}$  en aproximadamente 17min. Una vez calculado el wattaje necesario que deberá llevar el molde para que la temperatura sea uniforme durante todo el proceso se procede a determinar el número de resistencias según el diseño del molde. Se recomienda no localizar un calentador en la línea central del molde porque el centro del molde normalmente está bastante caliente sin añadir cualquier calor adicional. Típicamente, los calentadores de cartucho tienen una distancia entre  $3\text{cm}$  y  $4\text{cm}$  entre ellos. Deberá haber un mínimo de un termopar por cada  $1800\text{cm}^3$  de metal. Lo que resulta en un mejor control y en una temperatura más uniforme de molde. Los termopares deberán estar localizados lo más centrados posibles y en una distancia de  $2.5\text{cm}$  desde el calentador más cercano. Esta distancia debe ser medida desde el borde del orificio de termopar al borde del orificio del calentador. La distancia desde el termopar al calentador es importante porque un calentador que esté demasiado cerca causará que el termopar desconecte la calefacción antes de que el molde esté a temperatura apropiada. Un calentador que esté demasiado lejos del termopar resultará en un molde que calienta en exceso y luego se pone demasiado frío. Igualmente, no es buena práctica posicionar un termopar en la superficie del molde. Si es posible, debería estar localizado) lo más centrado posible, puesto que la temperatura tomada allí es menos susceptible a las influencias exteriores y por lo tanto es más estable.

Debe implementarse un sistema de aislamiento térmico que proteja los elementos finales de control (cilindros) ya que las altas temperaturas los deterioran. Los actuadores deben resistir mínimo  $100^\circ\text{C}$  de temperatura puesto que en las pruebas realizadas se observó que estos llegan hasta  $[75^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}]$  aproximadamente.

Al realizar un control de temperatura en un sistema de calentamiento de moldes mediante resistencias de corriente eléctrica, se debe utilizar relés de estado sólido que permitan efectuar los cortes y cierres sin presentar arco eléctrico entre sus contactos, evitando de esta manera el deterioro de partes electromecánicas como son el juego de contactos o platinos de los relés electromecánicos, que son equipos que no fueron diseñados para realizar tal fin.

La termocupla a utilizar es una tipo j ya que esta permite consignar mediciones de hasta  $427^\circ\text{C}$ , el control de la temperatura se puede realizar mediante el algoritmo de control realizado para la planta piloto de moldeo por compresión (ANEXO 5), si

el control es forma manual se debe realizar con un controlador industrial adquirido comercialmente.

Para el área del molde definida anteriormente (77cm \*53cm) se recomienda un espesor de 3.5cm. Con estas medidas obtenemos un volumen de:

$$77cm * 53cm * 3.5cm = 14283.5cm^3$$

El vaciado total de las bandejas equivale a:

(Volumen de bandeja) x (# de piezas)

$$(15cm * 17cm * 2cm) * 12 piezas = 6120cm^3$$

El metal utilizado en el molde es:

(Volumen total) – (vaciado total de las bandejas).

$$14283.5cm^3 - 6120cm^3 = 8163.5cm^3$$

Con un largo de 26 cm se obtienen 300w requeridos por cada 430cm<sup>3</sup> de metal según las recomendaciones, Como se van a instalar resistencias a lo largo del ancho (53cm) del molde entonces los cartuchos se diseñaron de 52 para 600w y 860cm<sup>3</sup> de metal, por lo tanto el número de resistencias a instalar son:

$$\frac{8163.5cm^3}{860cm^3} = 9.49 \approx 10$$

De todo el análisis se determina que se instalaran 10 resistencias a lo largo del ancho de cada parte del molde, cada una consume 600w de potencia y tiene un largo de 52cm. El consumo total de corriente de todo el molde (parte hembra y parte macho) equivale a:

$$\frac{600w * 10 cartuchos * 2 partes - del - molde}{240 Voltios} = 50 Amperios$$

Como por cada 1800cm<sup>3</sup> es recomendable un termopar entonces:

$$\frac{8163.5cm^3}{1800cm^3} = 4.535 \approx 5$$

De lo anterior se dice que; se instalaran 5 termopares tipo j y cada uno controlara 2 resistencias de tipo cartucho.

En la parte superior de la Figura 88 se puede observar el plano en vista superior de la parte hembra del molde, en la parte inferior se puede ver la ubicación de 10

orificios para introducir las resistencias, además hay 5 orificios de menor diámetro donde van las termocupas.

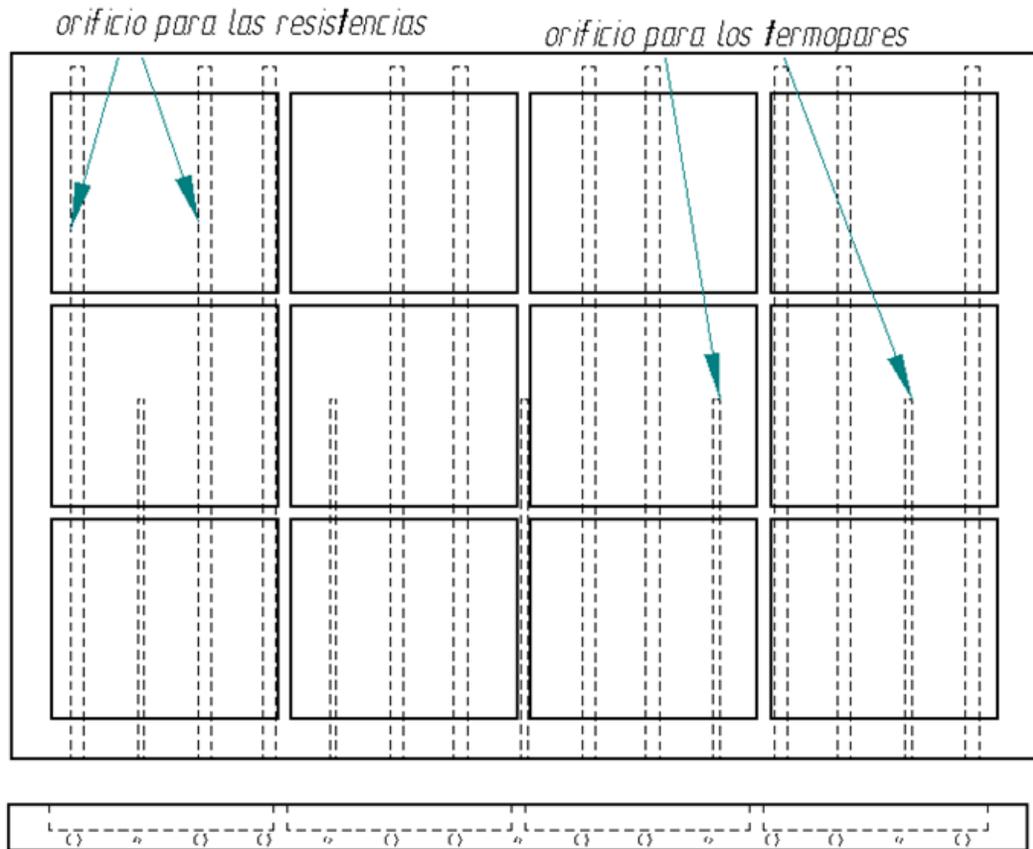


Figura 88. Disposición de la resistencia y termopares en el molde hembra.

Nota. El diseño del molde macho se omite puesto que es similar al molde hembra pero con protrusiones en lugar de vaciados.

#### 5.4 Recomendaciones del sistema de dosificación

Por lo regular en la industria la dosificación en una planta de moldeo por compresión es manual, para esto debe existir un estudio previo, del cual se obtenga el peso de la materia prima que el operario siempre manejara para colocar en cada cavidad del molde hembra. La dosificación no se realiza automáticamente ya que esto conlleva a precios demasiado altos, que para la producción que se esta manejando, un operario es mas rentable. Debido a la experiencia en la planta piloto donde se utilizo un mecanismo para la dosificación que brinda la preforma de la materia prima, se recomienda que la dosificación sea manual utilizando una herramienta que cumpla las siguientes características:

- Debe ser resistente al calor y a al trabajo continuo.
- Debe permitir dosificar simultáneamente todas las cavidades del molde hembra.

## 5.5 Recomendaciones del sistema de compresión

Debido a que en un ciclo de producción se harán mas piezas, al tiempo la presión de compresión debe ser mucho mayor, por lo cual se debe utilizar un sistema hidráulico, y no neumático como el utilizado en la planta piloto, que además de generar mas fuerza al comprimir proporciona la ventaja de controlar el movimiento de la parte macho del molde, esta característica de poder desplazar proporcionalmente la parte macho es optima y debe ser utilizada ya que en la pruebas hechas en la planta piloto se observo que el golpe generado por tener una válvula de paso On-Off es indeterminado, produciendo una incertidumbre en las pruebas.

En la Figura 89 se observa el diseño más común de una planta de moldeo por compresión con sistema hidráulico, en la cual se ve las partes de la misma, la pieza número 1 es el tanque, su función es contener el aceite para suministro del sistema hidráulico. 2: Bomba, Es el corazón del sistema hidráulico. Su trabajo es crear flujo y no presión. La bomba puede ser de engranajes, de paletas o de pistones. 3: Tuberías, encargadas de trasladar el fluido. 4: Válvula de alivio, Su función es limitar la presión máxima. Protege al sistema hidráulico de un aumento excesivo de presión debido a sobrecargas o a líneas bloqueadas. 5: Válvula de control de dirección, Su propósito principal es el de bloquear o dirigir el flujo de aceite a un circuito determinado. 6: Cilindro, es quien transforma el flujo en presión. 7: Moldes y resistencias, son los receptores del material a procesar y además hacen la transformación física del mismo. 8: Filtro, Dispositivos para separar las partículas o sólidos que se hayan en suspensión en el aceite.

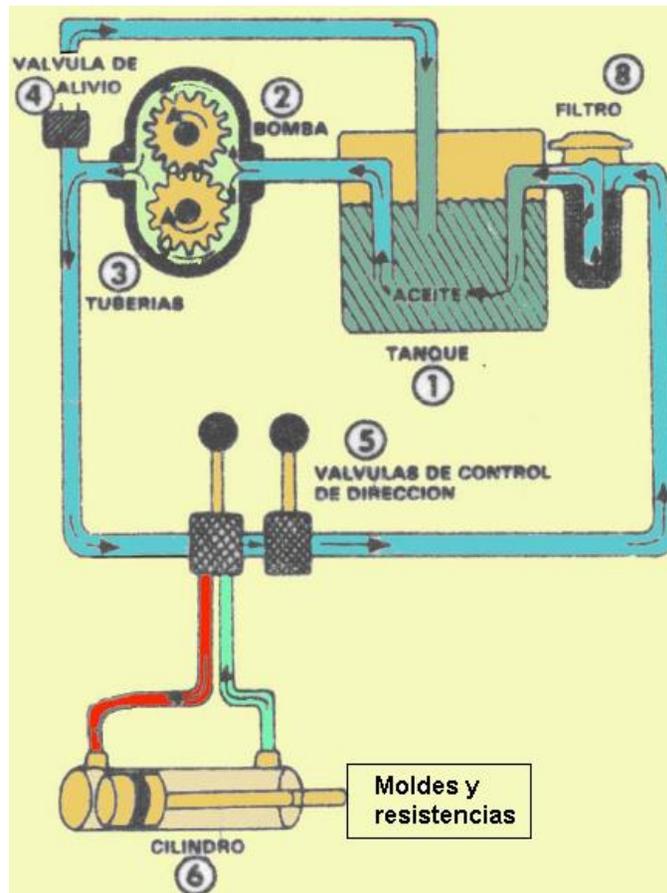


Figura 89. Sistema hidráulico para una prensa [27]

## 5.6 Recomendaciones del sistema de expulsión

Para expulsar el producto terminado se recomienda utilizar espigas de expulsión y no el sistema de la planta piloto, puesto que realizar un sistema de expulsión con el mismo tamaño y forma de las piezas a expulsar es muy complicado, tanto para su posterior mantenimiento como para su montaje y funcionamiento.

La colocación de las espigas de expulsión es casi tan importante como la localización de la entrada de las mismas. Las espigas deberían empujar la pieza fuera del molde sin torcerla y sin dejar una marca indeseable en la pieza. Una razón secundaria por tener las espigas de expulsión es para ayudar a la ventilación del molde. Las espigas de expulsión deberían ser localizadas en los puntos más profundos de la cavidad.

Una vez que se determina una colocación de las espigas de expulsión, se decide el tamaño de la espiga. Si se utiliza un diámetro muy pequeño pueden ser problemáticas a causa de que son susceptibles de romperse. Por lo tanto no se

recomiendan las espigas de expulsión más pequeñas de diámetro de 2.4 mm. Otro problema común es el flujo de material hacia abajo y alrededor de la espiga de expulsión y obstruyéndola para que se rompa cuando se activan los expulsores. Para evitar que esto ocurra, el agujero para la espiga sólo debería ser de 0.025 mm más grande que la espiga para una profundidad de 13 – 16 mm de la cavidad.

Para asegurarse que las espigas se muevan al tiempo y de esta forma expulsar la pieza sin dañarla, se sugiere que el molde esté equipado con un sistema de expulsión guiado, el cual mueva una placa conectada a todas las espigas de expulsión.

Aunque es deseable tener las espigas de expulsión localizadas en superficies planas, esto no es posible siempre. Algunas veces es necesario localizar las espigas de expulsión en superficies contornadas. Las espigas de expulsión localizadas en superficies contornadas deberían ser hechas para igualar el contorno de la cavidad. Será necesario clavetear estas espigas para que mantengan así su alineación con el contorno de la cavidad [28].

En la Figura 90 se puede observar un ejemplo de cómo colocar las espigas de expulsión.

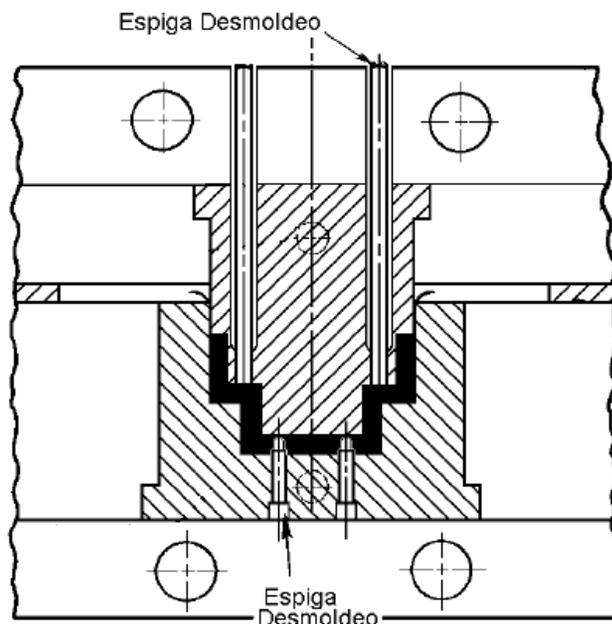


Figura 90. Disposición de espigas de expulsión [28].

La activación del sistema de expulsión se debe realizar neumáticamente ya que la presión necesaria para desmoldar el producto es mínimo comparada con la que ejerce el sistema hidráulico.

La instrumentación que un sistema como este requiere es el siguiente:

Cilindro de simple efecto con resorte.  
Electroválvula de paso.  
Compresor de baja capacidad.  
Maguara o tubería  
Llave selectora para el funcionamiento en manual  
Espigas

## 6 CONCLUSIONES

Este proyecto de grado se trabajó en conjunto con el personal encargado del proyecto macro **“Uso de productos y subproductos de yuca en el desarrollo de empaques biodegradables”**, la empresa PLASMEGA S.A y el profesor Juan Fernando Florez, logrando cumplir a cabalidad con los objetivos trazados, reflejo de ello fue la entrega de la planta piloto al laboratorio de **REOLOGÍA** de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca el pasado 18 de enero de 2010. Fecha desde la cual se han realizado más de quinientas (500) pruebas con diferentes características, variando tanto la composición de la materia prima como la configuración operativa de la planta, corroborando de esta manera el buen funcionamiento de la misma. Los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio, empiezan a arrojar información sobre la composición final y el tratamiento idóneo que la materia prima debe sufrir en la planta de moldeo por compresión, para alcanzar los valores deseados en el producto terminado.

Como satisfacción profesional se tiene no solo el aporte a la ciencia con la entrega de esta planta piloto de moldeo por compresión sino para nuestra facultad y específicamente al programa de Automática Industrial la entrega de la documentación del diseño de una planta con características industriales, siguiendo las normas vigentes tanto para el diseño como para la construcción y puesta en servicio de esta planta piloto.

La guía o recomendaciones técnicas para la producción a nivel industrial es un documento basado en la experiencia adquirida durante el desarrollo de todo el trabajo, pasando por cada una de sus fases: Diseño de la planta, instrumentación y supervisión, cableado e instalación, puesta en servicio y pruebas. Experiencia que esperamos haberla plasmado con la suficiente responsabilidad y claridad para el buen uso en la industria Caucana o nacional llegado el caso.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] VILLADA, Héctor Samuel. "Programa: Uso de productos y subproductos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en el desarrollo de empaques biodegradables", 2007, Colombia, Ministerio de Agricultura, código proyecto 2008z3816, sección termoformados.
- [2] TIPHAINE, Richard. "Preparación y caracterización de nanocompuestos en base PLA". España, Universidad Politécnica de Cataluña, 2008, <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4791/1/PFC.pdf>
- [3] THARANTAHAN, R, N. "Biodegradable films and composite coatings: past, present and future". In: Critical reviews in Food Science and Technology. Vol. 14 (2003); p. 71-78.
- [4] Sotelo J.L., Aguado J., Serrano D.P, Van Grieten.R; "RECICLADO QUÍMICO DE PLÁSTICOS Y ACEITES LUBRICANTES USADOS MEDIANTE CATALIZADORES ZEOLÍTICOS". España. Universidad de Madrid. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas. <http://www.icp.csic.es/cyted/Monografias/Monografias2001/C1-311.pdf>
- [5] <http://www.comparativadebancos.com/contaminacion-bolsas-de-plastico-falsos-mitos/>
- [6] <http://intececologico.com/2008/08/01/prohibicion-bolsas-de-plastico-en-china/>
- [7] HALLEY, P.J. "Thermoplastic starch biodegradable polymers". The University of Queensland, Australia. En: Smith, R. Biodegradable polymers for industrial applications. First published. 6, 141 - 162. (2005).
- [8] Ruiz A, Gladys. "Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca". Colombia, Universidad EAFIT, 2006, <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/835/83520401.pdf> <http://www.eafit.edu.co/ingciencia/revista4/PolimeroBiodegradable.pdf>
- [9] VILLADA, H. S. y ACOSTA, H. "Informe de avance del proyecto sobre adopción de un protocolo para el desarrollo de almidones termoplásticos obtenidos a partir de almidones agro y nativo de yuca". Cali, Colombia, 2002, 1-42 p. Departamento de Alimentos, Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, Valle del cauca-Cali.
- [10] VILLADA, H. S. y ACOSTA, H. "Informe de avance del proyecto sobre el desarrollo de almidones termoplásticos a partir de almidones agro de yuca y nativo de papa". Cali, Colombia, 2003, p. 1-25. Departamento de Alimentos, Facultad de Ingeniería. Universidad del Valle, Valle del cauca-Cali.
- [11] MONTALVO, C. y NARVÁEZ M. "Influencia de las Variables de Extrusión (Velocidad de tornillo, perfil de temperatura y mezcla) en las propiedades de harina termoplástica de yuca". Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. 2005.
- [12] ARJONA, S, D.; PERDOMO, F.; MEJÍA, G. R. Ecolaminados de PEAD – Fibras de Fique. En Ingeniería y Competitividad. Vol. 3 No. 1. Junio 2001.
- [13] Meneses, Juliana. Corrales, Catalina M. Valencia, Marco. "Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca". Colombia, Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 8, p. 57-67, 2007, <http://revista.eia.edu.co/articulos8/Art.5.pdf>

- [14] VAN SOEST, J. J. G., S. H. D. HULLEMAN., D. DE WIT. y J. F. G. VLIEGENTHART, Crystallinity in starch bioplastic. *Ind. Crops and Prod*: 5, 11-22 (1996).
- [15] SHAMEKIN, S., MYLLÄRIHEN, P., POUTANEN, K. and FORSELL, P. Film Formation Properties of Potato Starch Hydrolysates. In: *Starch/Stärke* Vol. 54 (2002); p. 20-24.
- [16] CARVALHO, A. J., ZAMBON, M. D., CURVELO, A.A. and GANDINI, A. Size exclusion chromatography characterization of thermoplastic starch composites. 1. Influence of plasticizer and fibre content. In: *Polymer Degradation Stability*. 79, 133 – 138. (2003).
- [17] “capitulo II: moldeo por compresión y transferencia”, Bolivia, Universidad Mayor de San Simón (UMSS) – *Facultad de Ciencias y Tecnología*, <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/teco-II/PDF/cap-236.pdf>
- [18] “Moldeo por compresión y transferencia”, España, Universidad Politécnica de Madrid, , [http://www.mater.upm.es/polimeros/Documentos/Cap6\\_6CompresionTransf.pdf](http://www.mater.upm.es/polimeros/Documentos/Cap6_6CompresionTransf.pdf)
- [19] <http://www.mailxmail.com/curso-inyeccion-termoplasticos/que-consiste-proceso-inyeccion>
- [20] <http://www.dow.com/styrenics/la/es/fab/molding/improcess.htm>
- [21] <http://img162.imageshack.us/img162/7185/elastmeros2inyeccinjb2.png>
- [22] <http://www.acanomas.com/Diccionario-Espanol/81039/DURALUMINIO.htm>
- [23] <http://www.panasonic-electric-works.es/pewes/es/html/fpx.php>
- [24] [http://www.galeon.com/mcoronado/CLASES\\_I/CLASE\\_1.pdf](http://www.galeon.com/mcoronado/CLASES_I/CLASE_1.pdf)
- [25] <http://www.asohofrucol.com.co/>
- [26] <http://www.marn.gob.sv/cd1/Gestion/Nacional/Acciones/SELLOV.HTM>
- [27] Centro de Formación Técnica Minera, “sistemas hidráulicos, teoría de funcionamiento”, pdf de la Universidad Nacional de Ingeniería
- [28] [http://www.plenco.com/plenco\\_processing\\_guide\\_spanish/Sect%2013%20Compression%20Mold%20Design%20Tips%20\(Spanish\).pdf](http://www.plenco.com/plenco_processing_guide_spanish/Sect%2013%20Compression%20Mold%20Design%20Tips%20(Spanish).pdf)