

**Propuesta de Automatización del Proceso de Moldeo  
por Compresión de Materiales Biodegradables del  
Laboratorio de Reología y Empaques de la  
Universidad del Cauca**



**Juan Manuel Ordoñez Anaya  
Walter Fabián Pabón Carabalí**

*Universidad del Cauca*  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Ingeniería en Automática Industrial  
Popayán, abril de 2015**

# **Propuesta de Automatización del Proceso de Moldeo por Compresión de Materiales Biodegradables del Laboratorio de Reología y Empaques de la Universidad del Cauca**



**Juan Manuel Ordoñez Anaya  
Walter Fabián Pabón Carabalí**

**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de  
Ingeniero en Automática Industrial**

Director: Ing. Juan Fernando Flórez Marulanda

*Universidad del Cauca*

**Facultad de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones  
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control  
Ingeniería en Automática Industrial**

Popayán, abril de 2015

Nota de Aceptación: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



(Firma)

Jurado coordinador  
Mg. Alcy René Cerón



(Firma)

Jurado  
Mg. Francisco Franco Obando

Popayán, abril de 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos primero a Dios Padre por sus bendiciones, a nuestras familias por el apoyo incondicional y la confianza constante que depositaron en nosotros, al Ingeniero Juan Fernando Flórez Marulanda por su dedicación y acompañamiento continuo, al grupo de investigación CYTBIA (Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial) de la Facultad de Ciencias Agrarias, encabezado por el Ingeniero PhD. Héctor Samuel Villada, al Ingeniero René Cerón, a las Ingenieras investigadoras Karen Delgado y Susana Cajiao que con paciencia nos dieron su colaboración para lograr este trabajo y al Ingeniero Felipe González por su aporte intelectual.

**TABLA DE CONTENIDO**

	pág.
<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 1. GENERALIDADES .....</b>	<b>3</b>
1.1    MOLDEO DE PLÁSTICOS .....	3
1.2    MOLDEO POR INYECCIÓN .....	3
1.3    MOLDEO POR EXTRUSIÓN .....	4
1.4    MOLDEO POR INSUFLACIÓN DE AIRE .....	4
1.5    MOLDEO POR COMPRESIÓN .....	4
1.5.1    Proceso de moldeo por compresión .....	5
1.5.2    Características del proceso de moldeo por compresión. ....	5
1.5.3    Esquema del proceso de moldeo por compresión. ....	5
1.6    CLASIFICACIÓN DE PRENSAS .....	6
1.7    MÁQUINA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	7
1.7.1    Moldeo por compresión neumática. ....	7
1.7.2    Moldeo por compresión hidráulica. ....	8
1.8    MATERIALES PARA EL MOLDEO POR COMPRESIÓN .....	9
1.8.1    Plásticos. ....	9
1.8.2    Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos. ....	9
1.8.3    La yuca y su almidón. ....	10
1.8.4    Características de los materiales para el proceso de moldeo por compresión .....	11
1.9    PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES EN EL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES .....	13
1.9.1    Elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión .....	14
1.9.2    Descripción por etapas del proceso de moldeo de probetas. ....	14
1.9.4    Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables.....	22
1.9.6    Descripción de la unidad de prensado por módulos. ....	26
<b>CAPÍTULO 2. INGENIERÍA CONCEPTUAL.....</b>	<b>28</b>
2.1    MODELADO ISA S88 DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS BIODEGRADABLES PARA ENSAYO DE TENSIÓN .....	28
2.1.1    Modelo de proceso de elaboración de probetas. ....	28
2.1.4    Modelo físico de elaboración de probetas. ....	31
2.1.5    Modelo de control procedimental del proceso de elaboración de probetas. ....	34
2.2    MODELADO ISA S88 DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE BANDEJAS SEMIRRÍGIDAS BIODEGRADABLES .....	37
2.2.1    Modelo de proceso de elaboración de bandejas. ....	38
2.2.3    Descripción de cada etapa del proceso por operaciones. ....	38
2.2.4    Modelo físico del proceso de elaboración de bandejas. ....	40
2.2.5    Modelo de control procedimental del proceso de elaboración de bandejas.....	42
2.3    DIAGNÓSTICO DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	45
2.3.1    Documentación de la célula de proceso de moldeo por compresión. ....	45
2.3.2    Valoración y verificación de la célula de proceso de moldeo por compresión. ....	45
2.3.3    Nivel de dificultad en la realización de operaciones del proceso de moldeo por compresión. ....	46
2.3.4    Informe estadístico del nivel de dificultad en la realización de las fases de los procedimientos. ....	49
2.3.5    Nivel de automatización de la célula de proceso de moldeo por compresión.....	51
2.3.6    Informe estadístico del nivel de automatización de la célula de proceso de moldeo. ....	54
2.3.7    Requerimientos de automatización del proceso de moldeo por compresión. ....	55
2.3.8    Requerimientos de hardware para el proceso de moldeo por compresión. ....	55
2.3.9    Requerimientos de software del proceso de moldeo por compresión.....	56

<b>CAPÍTULO 3. INGENIERÍA BÁSICA.....</b>	<b>57</b>
3.1 CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS PROPUESTOS PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN .....	57
3.1.1 Cumplimiento de requerimientos de automatización. ....	57
3.1.2 Cumplimiento de requerimientos de hardware. ....	57
3.1.3 Cumplimiento de requerimientos de software. ....	61
3.2 DISEÑO DE MODELOS DE REPORTES PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN .....	62
3.2.1 Modelo de orden de compra de materiales.....	64
3.2.2 Modelo de seguimiento de parámetros de proceso. ....	65
3.3 COMPLEMENTO MODELADO ISA 88 DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	65
3.3.1 Modelado etapa “Acondicionamiento de equipos” del proceso de moldeo por compresión. ....	66
3.3.2 Modelos de récipes del proceso de moldeo por compresión. ....	67
3.3.3 Modelo de récipe maestra para el proceso de elaboración de probetas.....	67
3.3.4 Modelo de récipe de control para el proceso de elaboración de probetas.....	68
3.3.5 Modelo de récipe maestra para el proceso de elaboración de bandejas. ....	70
3.3.6 Modelo de récipe de control para el proceso de elaboración de bandejas. ....	71
3.4 DIAGRAMAS ISA 5, DE ENERGÍA DE FLUIDOS Y CADENA DE VALOR DE LA CÉLULA DE PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	72
3.4.1 PFD elaboración de probetas para ensayo de tensión. ....	73
3.4.2 PFD elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables. ....	74
3.5 ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES DE LAS ETAPAS DE PENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN .....	75
3.5.1 Variables unidad de prensado hidráulico y moldeo.....	75
3.5.2 Esquemas de control unidad prensado hidráulico y moldeo. ....	76
3.5.3 Escenario de automatización de la unidad de prensado hidráulico y moldeo. ....	77
3.5.4 Variables de la unidad de prensado neumático y moldeo.....	78
3.5.5 Esquemas de control de la unidad prensado neumático y moldeo. ....	79
3.5.6 Escenario de automatización de la unidad de prensado neumático y moldeo.....	79
3.5.7 Etiquetado de dispositivos e instrumentos de la célula de proceso de moldeo por compresión. .	80
3.5.8 Etiquetado de la unidad de prensado neumático. ....	81
3.5.9 Etiquetado de la unidad de prensado hidráulico. ....	81
3.5.10 Etiquetado de los equipos en común de las dos unidades de prensado. ....	83
3.5.11 P&ID de la unidad de prensado neumático y moldeo. ....	83
3.5.12 P&ID unidad de prensado hidráulico y moldeo. ....	84
3.5.13 Diagrama de energía de fluido neumático. ....	87
3.5.14 Diagrama de energía de fluido hidráulico. ....	88
3.6 CADENA DE VALOR DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	89
<b>CAPÍTULO 4. INGENIERÍA DETALLADA.....</b>	<b>91</b>
4.1 ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LA INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN .....	91
4.1.1 Planos del sistema de distribución de planta e instalación. ....	91
4.1.2 Especificación técnica de equipos e instrumentos. ....	91
4.2 ILD DE LAS UNIDADES DE PENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	93
4.2.1 Diagramas de lazo de control unidad de prensado neumático y moldeo. ....	93
4.2.2 Diagramas de lazo de control unidad de prensado hidráulico y moldeo. ....	94
4.3 DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE PENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	97
4.3.1 Diagramas de mando unidad de prensado neumático y moldeo. ....	98
4.3.2 Diagramas de mando unidad de prensado hidráulico y moldeo. ....	98
4.3.3 Diagramas de Potencia unidad de prensado neumático y moldeo. ....	100
4.3.4 Diagramas de Potencia de la unidad de prensado hidráulico y moldeo.....	100
4.3.5 Diagramas de entradas y salidas del PLC. ....	101
4.3.6 Diagramas de mando y potencia de electroválvulas hidráulicas.....	103
4.4 DIAGRAMAS DE PROGRAMACIÓN DEL PLC PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	103

PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.

4.4.1	Graficet de programación del PLC unidades de prensado y moldeo.....	104
4.4.2	Ladder de programación del PLC unidades de prensado y moldeo.....	105
4.5	PLANOS EN SOLID EDGE DEL ARMARIO 1 DE CONTROL DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN.....	105
4.6	PRUEBA DE MOLDEO EN LA CÉLULA DE PROCESO.....	106
4.7	ESCALAMIENTO DE LA CÉLULA DE PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE UNICAUCA.....	107
4.7.1	Proceso de Investigación y Desarrollo (I + D).....	108
4.7.2	Escalamiento del proceso de elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables.....	109
4.7.3	Situación actual escala de laboratorio del proceso de elaboración de bandejas.....	109
4.7.4	Propuesta de escala piloto de la célula de proceso de elaboración de bandejas.....	109
4.7.5	Concepto de ingenierización para escalamiento.....	110
4.7.6	Diseño de la célula de proceso de elaboración de bandejas para escala piloto.....	110
4.7.7	Propuesta tecnológica para escala piloto de la célula de proceso de elaboración de bandejas.....	111
4.7.8	PFD célula de proceso de elaboración de bandejas a escala piloto.....	116
4.7.9	Lote de producto de la célula de proceso de elaboración de bandejas a escala piloto.....	117
4.8	CADENA DE VALOR EMPRESARIAL DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE BANDEJAS.....	117
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>		<b>120</b>
<b>CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES.....</b>		<b>122</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>123</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1.</b> Moldeo por inyección. ....	3
<b>Figura 2.</b> Moldeo por extrusión.....	4
<b>Figura 3.</b> Moldeo por insuflación de aire. ....	4
<b>Figura 4.</b> Esquema del moldeo por compresión. ....	6
<b>Figura 5.</b> Clasificación de prensas. ....	7
<b>Figura 6.</b> Sistema neumático básico. ....	8
<b>Figura 7.</b> Sistema hidráulico básico.....	9
<b>Figura 8.</b> Efecto de la temperatura en la estructura de los materiales termoplásticos. ....	10
<b>Figura 9.</b> Estructura de la molécula de Amilosa. ....	11
<b>Figura 10.</b> Estructura de molécula de Amilopectina. ....	11
<b>Figura 11.</b> Representación del proceso de entrecruzamiento de termoestables. ....	12
<b>Figura 12.</b> Probetas para ensayo de tensión.....	14
<b>Figura 13.</b> Tamizado del fique.....	14
<b>Figura 14.</b> Etapa de preparación del fique.....	15
<b>Figura 15.</b> Unidad de acondicionamiento del fique.....	15
<b>Figura 16.</b> Harina de yuca gelatinizada. ....	16
<b>Figura 17.</b> Etapa de gelatinización de harina de yuca. ....	16
<b>Figura 18.</b> Unidad de gelatinización de harina de Yuca.....	17
<b>Figura 19.</b> Etapa de mezclado. ....	18
<b>Figura 20.</b> Unidad de mezclado. ....	18
<b>Figura 21.</b> Etapa de moldeado y dosificado. ....	19
<b>Figura 22.</b> Unidad de dosificado.....	19
<b>Figura 23.</b> Etapa de prensado y moldeo. ....	20
<b>Figura 24.</b> Unidad de prensado neumático y moldeo de Unicauca.....	21
<b>Figura 25.</b> Panel de potencia, PLC y panel de control HMI. ....	22
<b>Figura 26.</b> Forma de la bandeja semirrígida biodegradable. ....	23
<b>Figura 27.</b> Etapas de preparación de materia prima.....	23
<b>Figura 28.</b> Etapa de moldeado.....	24
<b>Figura 29.</b> Unidad de secado. ....	24
<b>Figura 30.</b> Etapa de prensado hidráulico y moldeo. ....	25
<b>Figura 31.</b> Unidad de prensado hidráulico y moldeo de Unicauca.....	26
<b>Figura 32.</b> Módulo de potencia hidráulica.....	27
<b>Figura 33.</b> Modelo de proceso ISA S88.....	29
<b>Figura 34.</b> Etapas del proceso de elaboración de probetas biodegradables.....	29
<b>Figura 35.</b> Descripción de cada etapa del proceso por operaciones. ....	30
<b>Figura 36.</b> Modelo físico ISA 88-I. ....	32
<b>Figura 37.</b> Vista superior Laboratorio de Reología y Empaques de Unicauca. ....	33
<b>Figura 38.</b> Modelo de control procedimental ISA 88-I.....	35
<b>Figura 39.</b> Etapas del proceso de elaboración de bandejas. ....	38
<b>Figura 40.</b> Descripción de cada etapa del proceso por operaciones. ....	39
<b>Figura 41.</b> Vista superior Laboratorio de Reología y Empaques, Unicauca. ....	40
<b>Figura 42.</b> Nivel de dificultad en la realización de fases en general.....	50
<b>Figura 43.</b> Nivel de dificultad en la realización de fases por etapas del proceso. ....	50
<b>Figura 44.</b> Nivel de automatización del proceso en general. ....	54
<b>Figura 45.</b> Nivel de automatización de la célula de proceso por etapas. ....	54
<b>Figura 46.</b> Diagrama de un secador de rodillos.....	58



<b>Figura 47.</b> Secador de tambor FT32. ....	58
<b>Figura 48.</b> Inyector de aire frío 6910.15. ....	59
<b>Figura 49.</b> Funcionamiento del inyector de aire frío.....	59
<b>Figura 50.</b> AUTOJET Modelo 1550+Sistema Modular de Spray.....	60
<b>Figura 51.</b> <i>MicroLogix 1500 de Allen Bradley.</i> .....	61
<b>Figura 52.</b> Arquitectura SCADA del sistema.....	62
<b>Figura 53.</b> Diagrama de flujo de registro por etapas del proceso. ....	63
<b>Figura 54.</b> Modelo de orden de compra de materiales. ....	64
<b>Figura 55.</b> Modelo de seguimiento de parámetros de proceso. ....	65
<b>Figura 56.</b> PFD elaboración de probetas para ensayo de tensión. ....	73
<b>Figura 57.</b> PFD elaboración de bandejas biodegradables. ....	74
<b>Figura 58.</b> Interpretación de etiquetas. ....	80
<b>Figura 59.</b> P&ID unidad de prensado neumático. ....	84
<b>Figura 60.</b> P&ID Lazo de control de temperatura unidad de prensado hidráulico. ....	85
<b>Figura 61.</b> P&ID Lazo de control de presión unidad de prensado hidráulico.....	86
<b>Figura 62.</b> P&ID Lazo de control de posición unidad de prensado hidráulico. ....	87
<b>Figura 63.</b> Diagrama de energía de fluido neumático. ....	88
<b>Figura 64.</b> Diagrama de energía de fluido hidráulico. ....	89
<b>Figura 65.</b> Cadena de valor escala laboratorio del proceso de moldeo por compresión. .	90
<b>Figura 66.</b> Distribución Laboratorio de Reología y Empaques FACA Unicauca.....	91
<b>Figura 67.</b> Diagrama de lazo control de posición de los cilindros neumáticos. ....	93
<b>Figura 68.</b> Diagrama de lazo control de temperatura unidad neumática.....	94
<b>Figura 69.</b> Diagrama de lazo control de posición de los cilindros hidráulicos. ....	95
<b>Figura 70.</b> Diagrama de lazo control de temperatura unidad hidráulica.....	96
<b>Figura 71.</b> Diagrama de lazo control de presión hidráulica.....	97
<b>Figura 72.</b> Diagramas de Mando unidad de prensado neumático y moldeo. ....	98
<b>Figura 73.</b> Diagramas de mando unidad de prensado hidráulico y moldeo. ....	99
<b>Figura 74.</b> Diagramas de potencia unidad de prensado neumático y moldeo.....	100
<b>Figura 75.</b> Diagrama de potencia de la unidad de prensado hidráulico y moldeo. ....	101
<b>Figura 76.</b> Diagrama de entradas del PLC. ....	102
<b>Figura 77.</b> Diagrama de salidas del PLC. ....	102
<b>Figura 78.</b> Diagramas de mando y potencia de electroválvulas hidráulicas.....	103
<b>Figura 79.</b> <i>Grafcet</i> de programación del PLC unidades de prensado y moldeo.....	104
<b>Figura 80.</b> Planos CAD en <i>Solid Edge ST5</i> del Armario 1 de control.....	105
<b>Figura 81.</b> Evidencia fotográfica prueba de moldeo: elaboración de bandejas.....	106
<b>Figura 82.</b> Bandeja de 20 g y 2 mm de espesor.....	107
<b>Figura 83.</b> Unidad de acondicionamiento de fique escala piloto.....	111
<b>Figura 84.</b> Módulo de equipo mezcladora Planetaria <i>Plamixer PL-30.</i> ....	112
<b>Figura 85.</b> Modulo de equipo secador <i>Simon Drum</i> de doble tambor.....	113
<b>Figura 86.</b> Modulo de equipo amasadora AME-7 con tornillo extrusor. ....	113
<b>Figura 87.</b> Unidad de prensado: Prensa de cigüeñal neumática serie JE21.....	114
<b>Figura 88.</b> Módulo de equipo Tubo de <i>Vortex 21000.</i> .....	115
<b>Figura 89.</b> Sistema de aspersión y secado de bandejas. ....	115
<b>Figura 90.</b> PFD célula de proceso de elaboración de bandejas a escala piloto. ....	116
<b>Figura 91.</b> Cadena de valor empresarial del proceso de elaboración de bandejas.....	119

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Modelo de proceso de elaboración de probetas. ....	31
<b>Tabla 2.</b> Modelo físico del proceso de elaboración de probetas. ....	33
<b>Tabla 3.</b> Modelo procedimental de elaboración de probetas.....	35
<b>Tabla 4.</b> Modelo de proceso de elaboración de bandejas.....	39
<b>Tabla 5.</b> Modelo físico de la elaboración de bandejas. ....	41
<b>Tabla 6.</b> Modelo de control procedimental del proceso de elaboración de bandejas. ....	42
<b>Tabla 7.</b> Nivel dificultad en la realización del procedimiento de probetas. ....	47
<b>Tabla 8.</b> Nivel dificultad en la realización del procedimiento de bandejas.....	48
<b>Tabla 9.</b> Nivel de automatización de la célula de proceso de probetas.....	51
<b>Tabla 10.</b> Nivel de automatización de la célula de proceso de bandejas. ....	53
<b>Tabla 11.</b> Listado de libros Excel de registro de información. ....	64
<b>Tabla 12.</b> Modelado de la etapa “Acondicionamiento de equipos”.....	66
<b>Tabla 13.</b> Récipe maestra para el proceso de elaboración de probetas. ....	67
<b>Tabla 14.</b> Récipe de control para el proceso de elaboración de probetas.....	69
<b>Tabla 15.</b> Récipe maestra para el proceso de elaboración de bandejas.....	70
<b>Tabla 16.</b> Récipe de control para el proceso de elaboración de bandejas. ....	71
<b>Tabla 17.</b> Flujo de materiales - elaboración de probetas. ....	74
<b>Tabla 18.</b> Flujo de materiales - elaboración de bandejas.....	75
<b>Tabla 19.</b> Variables controladas y manipuladas, etapa de prensado hidráulico. ....	76
<b>Tabla 20.</b> Etiquetado de la unidad de prensado neumático. ....	81
<b>Tabla 21.</b> Etiquetado de la unidad de prensado hidráulico. ....	82
<b>Tabla 22.</b> Etiquetado de los equipos en común de las dos unidades de prensado. ....	83
<b>Tabla 23.</b> Localización de equipos e instrumentos unidades de prensado y moldeo. ....	92
<b>Tabla 24.</b> Ficha técnica: Prueba de moldeo en la célula de proceso. ....	106

## RESUMEN

Se presentaron definiciones de distintos procesos para moldear plástico, cuatro técnicas de moldeo, se describe una clasificación de tres tipos de prensas y dos formas de moldeo por compresión, llegando al moldeo por compresión hidráulico y neumático, utilizados en la investigación y desarrollo de empaques biodegradables en el laboratorio de Reología y Empaques de Unicauca. La forma de moldeo utilizada sugiere eficiencia y complementa de manera satisfactoria el resultado esperado en cada moldeo, con los materiales, los parámetros de proceso, los equipos y las condiciones en las que se lleva a cabo cada lote de producción. En ese sentido se hizo la introducción al material más común para ser moldeado por el método de compresión utilizada, el plástico, y el efecto que tiene aplicarle altas temperaturas en su composición molecular. Se dio relevancia a uno de los materiales utilizados en el proceso de moldeo por compresión de Unicauca, la yuca que al ser polímero natural, posee características que son indispensables para lograr el producto esperado.

Conocer y documentar detalladamente el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables que se lleva a cabo en el Laboratorio de Reología y Empaques de la Universidad del Cauca. Mediante el uso de la norma ISA-88 parte 1, se realizaron los modelos de proceso, físico y de control procedimental, los cuales arrojaron el número de etapas, operaciones y acciones que se deben llevar a cabo de manera ordenada para lograr siempre un mismo de producto de calidad y homogéneo. Se realizaron diagramas de lazo de instrumentos de las unidades de prensado (neumático e hidráulico) y cocción del proceso de moldeo por compresión, buscando una comprensión de los sistemas y la lógica de control, además mejorar la comunicación entre el personal técnico y los investigadores del laboratorio.

Finalmente se mediante un estudio de gestión tecnológica, se propuso una nueva célula de proceso para elaborar productos semirrígidos biodegradables a escala piloto.

**Keywords:** *Harina de yuca; Fibra de fique; Moldeo por compresión; Prensa hidráulica; Prensa neumática; Automatización; Estandarización; Modelos ISA S.88; Diagramas ISA 5.1; Escalamiento a nivel piloto.*

## INTRODUCCIÓN

El moldeo por compresión es la técnica que se usa para la investigación y desarrollo de empaques biodegradables que se lleva a cabo en el laboratorio de Reología y Empaques de La Universidad del Cauca. El material común para ser moldeado por el método de compresión es el plástico, y el efecto que tiene aplicarle altas temperaturas en su composición molecular, es el que se estudia para la transformación de los materiales usados en los plásticos biodegradables. El proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables en Unicauca, se divide por etapas para dar detalles de los dos productos que se elaboran en la misma célula de proceso, bandejas semirrígidas y probetas para ensayo de tensión.

Los modelos de proceso, físico y control procedimental que provee la norma ISA-88 para ordenar un proceso de manera jerárquica, se siguen de manera ordenada por etapas, operaciones, fases y/o acciones, acudiendo a terminología estándar que aporta características de estandarización. El diagnóstico de automatización evidencia una inexistente documentación y además proporciona resultados estadísticos que magnifican el nivel de automatización de la célula de proceso y el nivel de dificultad para realizar las fases que lo componen. Para disminuir la dificultad de las tareas del investigador, se proponen requerimientos de automatización los cuales a lo largo del trabajo de grado se formulan como propuesta y otros son realizados y solucionados.

Diagramas bajo la norma ISA-5, de flujo de proceso y de instrumentación y tuberías de las unidades de prensado y moldeo de la célula de proceso, determinan cada elemento e instrumento utilizando una etiqueta que los identifica, además diagramas de energía de fluidos muestran el flujo de la energía neumática o hidráulica presente durante las etapas de prensado y moldeo.

Se levanta un diagrama que muestra la distribución e instalación de la célula de proceso, que muestra la ubicación de cada equipo en campo y los elementos e instrumentos en los armarios de control de las unidades de prensado y moldeo. Para estas unidades se levantan diagramas de lazo de instrumentos, bajo la norma ISA 5 parte 4, buscando la comprensión de los sistemas y la lógica de control para mejorar la comunicación entre el personal técnico y los investigadores del proyecto.

Como propuesta de automatización para el proceso de moldeo por compresión de Unicauca, se propone escalar los trabajos que se realizan en laboratorio a un nivel piloto, diseñando una nueva célula de proceso con unidades existentes y adicional a estas, se proponen otras que aumenten la productividad con una gestión tecnológica la cual permite proponer un lote de producción de 2.333 bandejas semirrígidas en 6 horas y 30 minutos. Para obtener una visión empresarial de la producción de bandejas semirrígidas biodegradables, se propone un esquema de cadena de valor con eslabones para cuatro categorías genéricas de actividades empresariales.

## CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

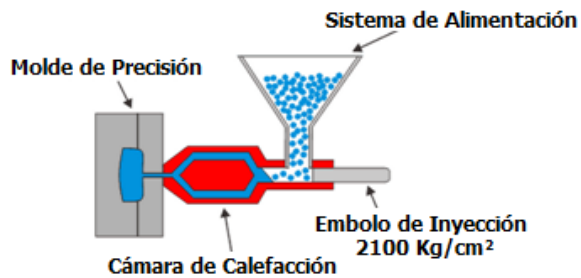
### 1.1 MOLDEO DE PLÁSTICOS

En la elaboración de piezas de plástico se usan varios métodos de moldeo que delimitan la masa del material mientras se endurece y conserva la forma deseada. Estos métodos requieren de moldes que son dispuestos en una prensa que se abrirá y se cerrará aplicando presión, la carga del moldeo se realizará por medio de dispositivos externos. El material se mantiene en el molde a presión hasta que se endurece conservando su forma después de su extracción. El método de calentamiento a emplear para el proceso viene determinado por los medios de que se dispone y por el carácter del trabajo. Los compuestos del material plástico se diferencian entre sí y para ellos existen varios métodos de moldeo adaptándose mejor según su estructura aunque varios de estos pueden ser elaborados usando uno o más formas de moldeo. El material que se usa para moldear puede ser en forma de polvo o granular, y en ocasiones estos pasan por un proceso de preformado antes de ser moldeado. En la industria se encuentran varias modalidades para moldear, a continuación se presentan las técnicas más usadas para materiales plásticos [1].

### 1.2 MOLDEO POR INYECCIÓN

El plástico se ablanda aplicándole alta temperatura y se ejerce fuerza por medio de un émbolo o pistón de inyección al moverse hacia adelante y hacia atrás rápidamente a través del espacio que hay entre las paredes del cilindro y una pieza caliente que está situada en el centro del mismo. Esta pieza central se emplea, debido a la mínima conductividad térmica de los plásticos, de forma que la superficie de calefacción del cilindro es grande y el espesor de la capa plástica calentada es pequeño. Bajo la acción combinada del calor y la presión ejercida por el pistón de inyección, el polímero<sup>1</sup> fluye como para llegar al molde frío donde toma forma la pieza en cuestión. El polímero estará lo suficiente fluido como para llenar el molde frío, (ver Figura 1). Pasado un tiempo breve dentro del molde cerrado, el plástico solidifica, el molde se abre y la pieza es removida. El ritmo de producción es muy rápido, de escasos segundos [2].

**Figura 1.** Moldeo por inyección.



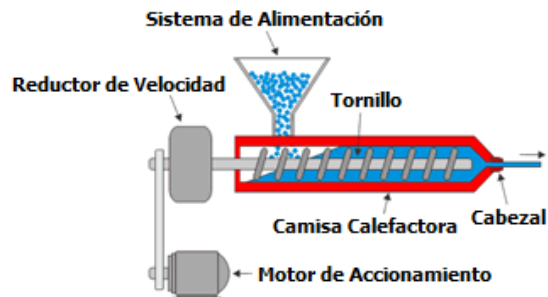
Fuente: Tomado de [2], octubre de 2014.

<sup>1</sup> Son macromoléculas (generalmente orgánicas) formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeras.

### 1.3 MOLDEO POR EXTRUSIÓN

En el moldeo por extrusión se utiliza un transportador de tornillo helicoidal. El polímero es transportado desde la tolva, a través de la cámara de calentamiento, hasta la boca de descarga, en una corriente continua. A partir de gránulos sólidos, el polímero emerge de la matriz de extrusión en un estado blando. Como la abertura de la boca de la matriz tiene la forma del producto que se desea obtener, el proceso es continuo. Posteriormente se corta en la medida adecuada, (ver Figura 2) [2].

**Figura 2.** Moldeo por extrusión.

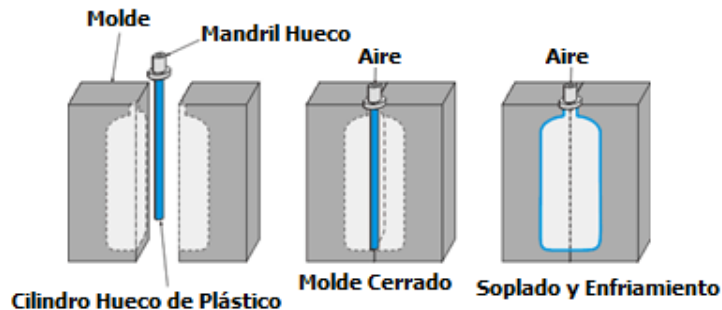


Fuente: Tomado de [2], octubre de 2014.

### 1.4 MOLDEO POR INSUFLACIÓN DE AIRE

Es un proceso usado para hacer formas huecas (botellas, recipientes). Un cilindro plástico de paredes delgadas es extruido y luego cortado en el largo que se desea. Luego el cilindro se coloca en un molde que se cierra sobre el polímero ablandado y le suprime su parte inferior cortándola. Una corriente de aire o vapor es insuflado por el otro extremo y expande el material hasta llenar la cavidad. El molde es enfriado para el fraguado, (ver Figura 3) [2].

**Figura 3.** Moldeo por insuflación de aire.



Fuente: Tomado de [2], octubre de 2014.

### 1.5 MOLDEO POR COMPRESIÓN

El moldeo por compresión es un proceso de transformación de plásticos antiguo que aún se usa. Aparece descrito en bibliografía de principios del siglo XIX, aunque no comenzó a

desarrollarse a escala industrial hasta 1908, cuando *Leo Baeckeland* desarrolló las resinas fenol-formaldehído<sup>2</sup>, que siguen empleándose hoy en día. Básicamente el proceso es un conformado donde se coloca un material plástico en un molde de metal caliente para ablandar por calor y obligarlo a conformarse con la forma del molde [3].

**1.5.1 Proceso de moldeo por compresión.** El uso de compuestos plásticos termoestables<sup>3</sup> en preformas, es un proceso que se diferencia entre varios debido a que los materiales suelen ser precalentados y cuantificados antes del moldeo lo cual ayuda a reducir el exceso de rebabas. Se ha vuelto una práctica común precalentar la carga antes de colocarla en el molde, esto suaviza el polímero y acorta la duración del ciclo de producción. Los métodos de precalentamiento incluyen calentadores infrarrojos, calentamiento por convección en estufa y el uso de tornillos giratorios dentro de un cilindro calentado. Esta última técnica (tomada del moldeo por inyección) se usa también para medir la cantidad de la carga [3].

**1.5.2 Características del proceso de moldeo por compresión.** En el moldeo por compresión se utilizan materias primas preformadas, se colocan en el molde caliente y se cierra lentamente hasta que las dos mitades del molde ejercen presión sobre el material. Conforme el molde va cerrándose, el material es obligado a ocupar todas las partes de la cavidad. En ciertos casos es ventajoso realizar el moldeo cerrando primero el molde casi por completo y abriéndolo después unos segundos antes de aplicar la presión definitiva, así se deja que el material tome un respiro para permitir la evacuación del gas que queda atrapado entre el material. Una vez el molde se ha cerrado completamente se aplica la máxima presión provocando el llenado final de la cavidad [3].

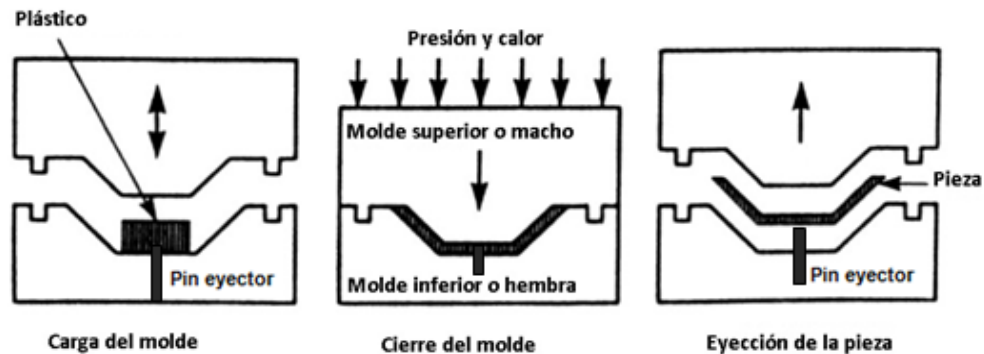
**1.5.3 Esquema del proceso de moldeo por compresión.** El moldeo por compresión se inicia con una cantidad determinada de material colocado en un molde, luego el material se calienta a un estado maleable, poco después, la prensa comprime el plástico flexible contra el molde, dando como resultado una pieza moldeada que mantiene la forma de la superficie interior del molde. Finalmente la prensa retrocede y, si es el caso, un pin eyector en el fondo del molde expulsa la pieza fuera del molde y el proceso concluye, (ver Figura 4) [3].

---

<sup>2</sup> Es una resina sintética termoestable, obtenida como producto de la reacción de los fenoles con el formaldehído. A veces, los precursores son otros aldehídos u otro fenol.

<sup>3</sup> Son polímeros infusibles e insolubles. La razón de tal comportamiento estriba en que las cadenas de estos materiales forman una red tridimensional espacial, entrelazándose con fuertes enlaces covalentes.

Figura 4. Esquema del moldeo por compresión.



Fuente: Modificado de [3], octubre de 2014.

## 1.6 CLASIFICACIÓN DE PRENSAS

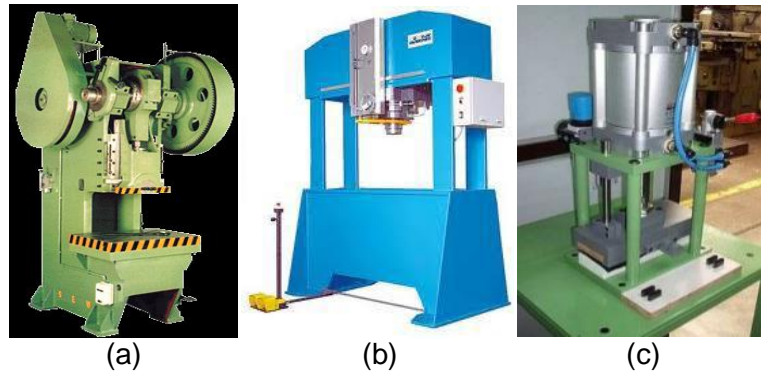
Atendiendo a la forma de entregar la energía las prensas pueden ser mecánicas, hidráulicas o neumáticas.

- Prensas Mecánicas:** Constan de un motor eléctrico que hace girar un volante de inercia que sirve de acumulador de energía. La energía se entrega a la parte móvil de la prensa (carro) mediante un embrague o acoplamiento. La entrega de la energía es rápida y total gastando en cada golpe una fracción de la capacidad de trabajo acumulada. Se usan para trabajos de corte, estampación, forja y pequeñas embuticiones, (ver Figura 5 (a)) [4].
- Prensas Hidráulicas:** Se basan en el principio de Pascal, (ver Figura 5 (b)), alimentándose un pistón de gran diámetro con fluido a alta presión y bajo caudal consiguiendo altas fuerzas resultantes. La entrega de energía es controlada en cada momento tanto en fuerza como en velocidad por lo que se mantiene el control constante del proceso. Se usan en operaciones de embutición profunda y en procesos de altas sollicitaciones como acuñado [4].
- Prensas Neumáticas:** Las prensas neumáticas mantienen la misma estructura que las prensas hidráulicas, diferenciándose en que el pistón y el émbolo son accionados por aire a altas presiones. Para esto se requiere de la ayuda de un compresor de aire el cual acciona todo el sistema neumático. La prensa neumática está compuesta de tres componentes: diafragma, plato de presión y armadura, (ver Figura 5 (c)). El diseño hace que normalmente el diafragma, al estar fuera de su instalación, mantenga el plato de presión ligeramente salido  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Una prensa neumática se utiliza para trabajos puntuales, troquelado de goma, cartón y juntas. Ventajas de las prensas neumáticas: requieren menor mantenimiento que otro tipo de prensas y hay menor acumulación de residuos [4].



**Figura 5.** Clasificación de prensas.

(a) Prensa mecánica; (b) Prensa hidráulica; (c) Prensa neumática.



Fuente: Tomado de [4], octubre de 2014.

### 1.7 MÁQUINA DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

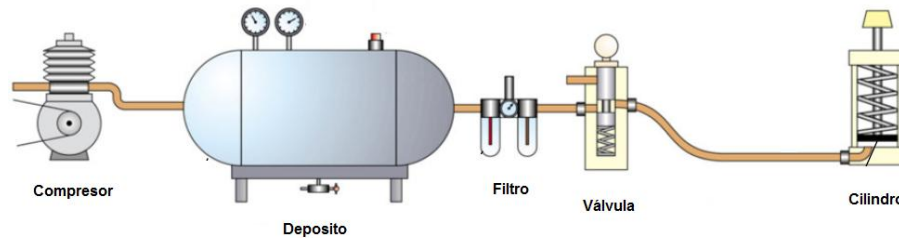
Una máquina de moldeo por compresión básicamente es una prensa que ejerce presión y calor sobre un material para darle una forma predefinida. Utiliza sistemas hidráulicos o neumáticos para presionar o moldear las preformas y un arreglo de resistencias para elevar la temperatura en los moldes y curar la pieza. Se clasifican según el accionamiento, es decir, de donde toma la prensa la energía para realizar la transformación y el diseño del bastidor, armazón metálico que conforma el cuerpo sobre el cual se instalan los componentes de la prensa [5].

- **Bastidor tipo C:** Es usado en las prensas de compresión pequeñas ya que facilitan la operación [5].
- **Bastidor tipo cuatro columnas:** Ideal para compresoras grandes donde las cargas son mayores y causaría deformación o grietas por apertura excesiva en una prensa tipo C [5].
- **Accionamiento hidráulico:** Constan de un sistema hidráulico conformado por una bomba hidráulica que transforma la energía mecánica en energía hidráulica y un cilindro hidráulico que genera una fuerza de compresión [6].
- **Accionamiento neumático:** Consta de un sistema Neumático conformado por un compresor que transfiere la energía de la maquina al fluido (aire comprimido) y un cilindro neumático que transforma la energía del fluido en energía mecánica [7].

**1.7.1 Moldeo por compresión neumática.** Entre los siglos XVI y XVII se empezaron estudios sobre compresión y expansión de gases y presión atmosférica. El primer registro de una transmisión neumática data de 1700, cuando el inventor francés *Denis Papin* utiliza la fuerza de un molino de agua para comprimir aire que después se transporta por tubos a largas distancias. Luego vinieron otras aplicaciones de esta técnica: el taladro neumático y el freno de aire comprimido para trenes. Hoy día la compresión neumática es un proceso utilizado en el moldeo para la transformación de plásticos donde la materia prima es precalentada y colocada en un molde, se le aplica presión y calor durante un determinado tiempo hasta que el material utilizado se ha conformado [8].

El moldeo por compresión cuenta con un sistema neumático, (ver Figura 6), que utiliza aire comprimido para transferir energía mecánica, la cual es utilizada para realizar el proceso de moldeo. Todo sistema neumático básico está compuesto por un compresor, depósito, filtro, válvula y actuador. El compresor absorbe aire de la atmósfera y aumenta su presión reduciendo el volumen en que se encuentra. El depósito acumula el aire a alta presión que produce el compresor y lo enfría. El filtro acondiciona el aire antes de introducirlo en el circuito. La válvula permite el paso del aire comprimido al cilindro y el actuador transformar la energía del aire comprimido en movimiento [8].

**Figura 6.** Sistema neumático básico.



Fuente: Modificado de [9], octubre de 2014.

**1.7.2 Moldeo por compresión hidráulica.** En el siglo XVII, en Francia, el matemático y filósofo Blaise Pascal comenzó una investigación referente al principio donde la presión aplicada a un líquido contenido en un recipiente se transmite con la misma intensidad en todas las direcciones, gracias a este se obtienen fuerzas grandes utilizando otras relativamente pequeñas. Uno de los aparatos que usa el anterior principio es la prensa hidráulica [10].

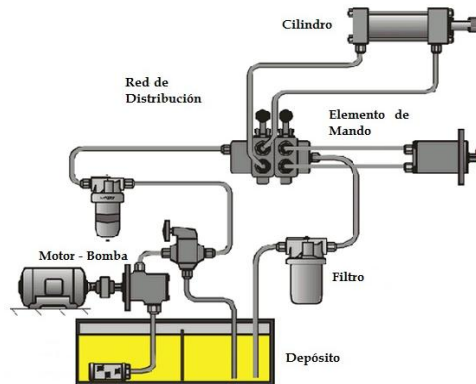
El moldeo por compresión consiste en un sistema hidráulico que comprime aceite y lo transforma en energía mecánica<sup>4</sup>. El circuito hidráulico básico posee una bomba que se encarga de suministrar caudal constante, un depósito que contiene el aceite, un filtro para remover contaminantes, un distribuidor o red que dirige el fluido, un *switch* o elemento de mando para maniobrar el circuito y un cilindro que se comprime y se contrae transformando la energía hidráulica en energía mecánica [11].

Este proceso en general se realiza en prensas orientadas verticalmente y cuenta con dos placas que sujetan los semi-moldes. La maquinaria consta de un embolo que realiza la acción de desplazamiento, dos placas: una superior y otra inferior, donde se asegura un semi-molde macho y un semi-molde hembra, puede tener dos variaciones en su actuación, uno carrera ascendente de la placa inferior o la más común carrera descendente de la placa superior [12] (ver Figura 7).

---

<sup>4</sup> Se puede definir como la forma de energía que se puede transformar en trabajo mecánico de modo directo mediante un dispositivo mecánico como una turbina ideal.

Figura 7. Sistema hidráulico básico.



Fuente: Modificado de [13], octubre de 2014.

## 1.8 MATERIALES PARA EL MOLDEO POR COMPRESIÓN

**1.8.1 Plásticos.** Los plásticos son materiales poliméricos que se componen de moléculas químicas de gran tamaño en las que se repiten unidades de un compuesto denominado monómero. Dependiendo del método de polimerización y del monómero, los plásticos tienen estructuras químicas variadas que hacen que, en general, se clasifiquen en dos grandes grupos: los termoplásticos y los termoestables [14].

- Los termoplásticos son polímeros formados por cadenas lineales con ramificaciones, se desarmen fácilmente con el calor y se ablandan pudiéndose moldear con nuevas formas que se conservan al enfriarse. Se reconstruyen al enfriarse, pueden fundirse y volver a fabricarse muchas veces. Esta propiedad les otorga la característica de ser reciclables [14].
- Los termoestables, por el contrario, son materiales cuya estructura molecular forma una red que no puede desligarse por medio de temperatura (característica que es posible con los termoplásticos) y que después de ser formados no pueden modificarse ni reciclarse [14].

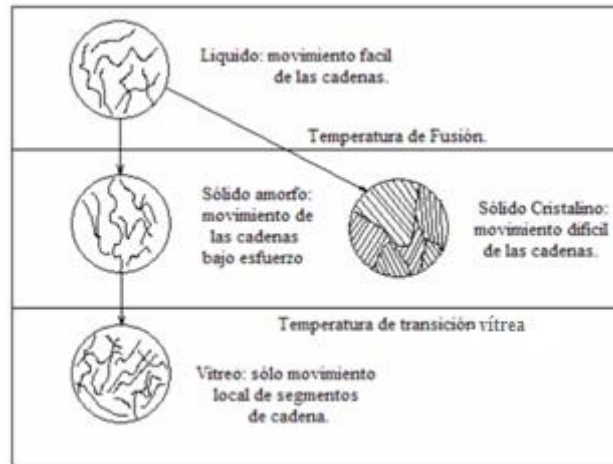
Existe otro tipo de polímeros conocidos con el nombre de elastómeros o más comúnmente cauchos. Estos materiales están constituidos por moléculas pequeñas independientes provenientes del hule. Al realizarles un proceso conocido como vulcanización, estas moléculas se unen entre sí por azufre, lo que les otorga altas condiciones de elasticidad [14].

**1.8.2 Efecto de la temperatura sobre los termoplásticos.** Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Es necesario saber la forma en que ocurren estos cambios, ya que pueden ayudar a:

- a) El diseño de mejores componentes.
- b) Guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deban utilizarse [15].

Se pueden observar varias temperaturas y estructuras críticas, las cuales una vez que se hayan enfriado por debajo de la temperatura de fusión, los materiales termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos. Con mayor frecuencia los termoplásticos de ingeniería están formados por regiones amorfas y cristalinas. La cristalinidad de los materiales termoplásticos puede inducirse por temperatura (enfriamiento lento) o mediante aplicación de esfuerzos que desenreden cadenas [15] (ver Figura 8).

**Figura 8.** Efecto de la temperatura en la estructura de los materiales termoplásticos.



Fuente: Tomado de [15], noviembre de 2014.

**1.8.3 La yuca y su almidón.** La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) 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 [14].

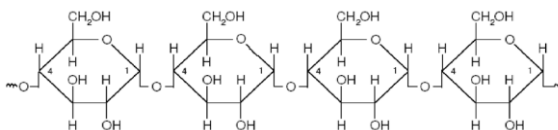
El almidón es un polímero natural cuyos gránulos consisten en estructuras macromoleculares ordenadas en capas y cuyas características en cuanto a composición, cantidad y forma varían de acuerdo con el tipo de fuente de la que provenga. Los gránulos de almidón están compuestos por capas externas de amilopectina<sup>5</sup> y capas internas de amilosa<sup>6</sup>, 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  $\mu\text{m}$

<sup>5</sup> Molécula del almidón que tiene ramificaciones y está constituida por muchos anillos de glucosa unidos entre sí para formar largas moléculas con numerosas ramificaciones laterales cortas.

<sup>6</sup> Molécula lineal de almidón que está constituida por muchos anillos de glucosa unidos entre sí para formar largas moléculas que no tienen ramificaciones.

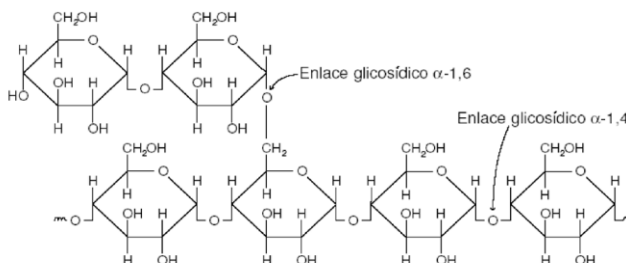
a 35  $\mu\text{m}$ , su forma es entre redonda y achatada y su contenido de amilosa es alrededor del 17%. Las figuras 9 y 10 ilustran la estructura de la amilosa y la amilopectina [14].

**Figura 9.** Estructura de la molécula de Amilosa.



Fuente: Tomado de [14], octubre de 2014.

**Figura 10.** Estructura de molécula de Amilopectina.



Fuente: Tomado de [14], octubre de 2014.

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 [14].

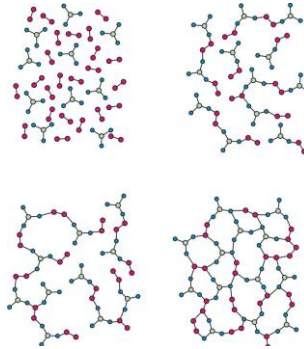
#### 1.8.4 Características de los materiales para el proceso de moldeo por compresión

- **Gelificación y vitrificación de termoestables.** El proceso de conformado empieza con la formación y crecimiento lineal de cadenas que pronto empiezan a ramificarse y posteriormente a entrecruzarse de forma irreversible. A medida que la reacción avanza, el peso molecular aumenta y varias cadenas se unen en un retículo de peso molecular infinito, (ver Figura 11). Inicialmente el material pasa desde un estado líquido viscoso hasta un estado gel elástico, lo que se conoce como proceso de gelificación<sup>7</sup> o punto de gel. La gelificación es característica de los termoestables y tiene una gran importancia en el procesado. El punto de gel es crítico en la manipulación de los materiales termoestables, ya que a partir de este estado el material deja de fluir. Después de la gelificación, la reacción continúa hasta la

<sup>7</sup> Es el proceso mediante el cual forma un gel. Un gel es un sistema coloidal donde la fase continua es sólida y la dispersa es líquida. Los geles presentan una densidad similar a los líquidos, sin embargo su estructura se asemeja más a la de un sólido.

formación de un retículo infinito, el aumento sustancial de la densidad de entrecruzamiento, la temperatura de transición vítrea y de las propiedades físicas últimas alcanzadas [3].

**Figura 11.** Representación del proceso de entrecruzamiento de termoestables.



Fuente: Tomado de [3], octubre de 2014.

Otro fenómeno que puede ocurrir durante el conformado es la vitrificación<sup>8</sup> de las cadenas que están creciendo. Esta transformación, desde un estado líquido viscoso o de gel elástico a un estado vítreo, empieza a ocurrir cuando la temperatura de transición vítrea de las cadenas crecientes o del retículo coincide con la temperatura de conformado. A partir de aquí, el conformado es extremadamente lento y, a efectos prácticos, la vitrificación supone una parada brusca del conformado. La vitrificación es un fenómeno reversible y el conformado puede ser completado por calentamiento, desvitrificándose el termoestable parcialmente conformado [3].

- **Factor de compresión.** El factor de compresión de un material de moldeado es la relación entre la densidad de la pieza moldeada y la densidad aparente del polvo de moldeado. La densidad aparente es la relación entre el peso de material que, sin compactar, llena un volumen normalizado, y dicho volumen. Según lo anterior se puede escribir las siguientes relaciones:

$$\text{Factor de compresión} = FC = \frac{\text{Densidad de la pieza moldeada}}{\text{Densidad aparente del polvo moldeado}}$$

$$FC = \frac{\text{Peso de la pieza moldeada}}{\text{Volumen de la pieza moldeada}} \times \frac{\text{Volumen aparente del polvo de moldeado}}{\text{Peso del polvo de moldeado}}$$

$$F.C. = \frac{\text{Volumen aparente del polvo de moldeado}}{\text{Volumen de la pieza moldeada}}$$

---

<sup>8</sup> Es el proceso de conversión de un material en un sólido amorfo similar al vidrio, carente de toda estructura cristalina. Esto se consigue por medio de calentamiento o enfriamiento muy rápido o mediante la mezcla con un aditivo.

Por tanto, el factor de compresión es la relación entre el volumen que ocupa el polvo de moldeo sin compactar y el volumen de la pieza tras ser moldeada. El factor de compresión en un material de moldeo depende, fundamentalmente, del tipo de carga utilizada y del tamaño de partícula y distribución de tamaño de partícula del polvo de moldeo. Cuando el factor de compresión tiene un valor alto, es deseable, siempre que sea posible, comprimir previamente el material antes del moldeo, es decir, utilizar preformas. De esta forma se reduce notablemente el factor de compresión y es posible colocar la cantidad correcta de material en el molde sin necesidad de un espacio suplementario encima de la cavidad (espacio de carga). En otros materiales con factores de compresión inferiores, entre 2.5 y 1.8, se pueden emplear directamente los polvos para moldear sin necesidad de usar preformas [3].

### **1.9 PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES EN EL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES**

Proyectos de investigación de Colciencias, cierre de brechas y ahora de regalías, han tratado sobre investigación y desarrollo de empaques semirrígidos a partir de materiales biodegradables<sup>9</sup> a base de harina de yuca<sup>10</sup>, fibra de fique<sup>11</sup> y plastificante que se han venido desarrollando en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca por parte del Dr. Héctor Samuel Villada Castillo, uno de los desarrolladores de la patente “*Envases biodegradables obtenidos a partir de harina de yuca y fibra de fique y su proceso de fabricación*” [16].

Otros proyectos paralelos al anterior se han venido desarrollando en colaboración del grupo CYTBIA (Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial) desde el año 2008, algunos se mencionan a continuación:

“Producción y caracterización de empaques termoformados biodegradables a partir de harina de yuca, fibra de fique y plastificante”, “Desarrollo de un empaque biodegradable a base de harina de yuca, fibra de fique y plastificante por extrusión y moldeo-compresión para envasar Uchuva (*Physalis Peruviana*)”.

Para llevar a cabo los anteriores proyectos, se vio la necesidad de diseñar e implementar prensas para moldeo por compresión para la producción de preformas de materiales semirrígidos biodegradables, en forma de probetas para ensayo de tensión que cumplen con la norma internacional ASTM D 638 y bandejas semirrígidas biodegradables, sin embargo en estas prensas únicamente se desarrolla una etapa: prensado y moldeo, pero la fabricación de bandejas semirrígidas biodegradables o probetas para ensayo implica el desarrollo de otras importantes etapas previas en común.

---

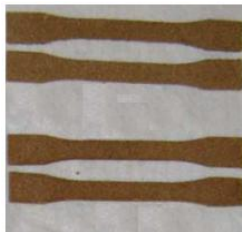
<sup>9</sup> Producto o sustancia que puede descomponerse en los elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos, como plantas, animales, microorganismos y hongos, bajo condiciones ambientales naturales.

<sup>10</sup> Manihot esculenta, llamada comúnmente yuca, es un arbusto perenne de la familia de las euforbiáceas, autóctona y extensamente cultivada en Sudamérica, África y el Pacífico por sus tubérculos con almidones de alto valor alimentario.

<sup>11</sup> Fique es una fibra natural que crece en las hojas de la planta de fique, *Furcraea andina*, un xerófila monocotiledóneas nativas de Andino regiones de Colombia, Ecuador y Perú.

**1.9.1 Elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión.** Para la producción del producto el operario estima la cantidad de gramos de harina de yuca que necesita para producir un determinado número de probetas, precalienta el molde a una temperatura definida, se configura manualmente la presión de trabajo de los sistemas de compresión y expulsión para obtener las condiciones de inicio del proceso. A la vez que se alcanza los valores de consigna de temperatura para el molde, se acondiciona la materia prima: harina de yuca, fibra de fique y aditivos, previamente preparada en 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 hembra se procede a comprimirla, mediante la presión ejercida por el sistema de compresión neumático durante un tiempo definido por el operario; transcurrido este tiempo se levanta la parte macho del molde, mediante el mismo sistema, procediendo a activar el sistema de expulsión, para que el operario finalmente retire manualmente el producto terminado, (ver Figura 12).

**Figura 12.** Probetas para ensayo de tensión.



Fuente: El autor, octubre de 2014.

### 1.9.2 Descripción por etapas del proceso de moldeo de probetas.

- **Etapas de adecuación del fique.** Primero se dispone de la fibra de fique para ser cortada en longitudes aproximadas de 20cm lo cual otorga una mejor manipulación, posteriormente es llevada a una molienda que deja la fibra de un tamaño reducido mm o micras para ser dispuesta en un proceso de tamizado, (ver Figura 13 (a)), donde se escoge las fibras con las dimensiones adecuadas para la mezcla, este proceso se conoce como tamizar, después de 360 segundos en el equipo Tamiz, se elige el producto que ha pasado del tamiz 80 al tamiz 60, en la figura se escoge el producto del tamiz de la derecha, (ver Figura 13 (b)).

**Figura 13.** Tamizado del fique.

(a) Fique molido; (b) Fique tamizado.

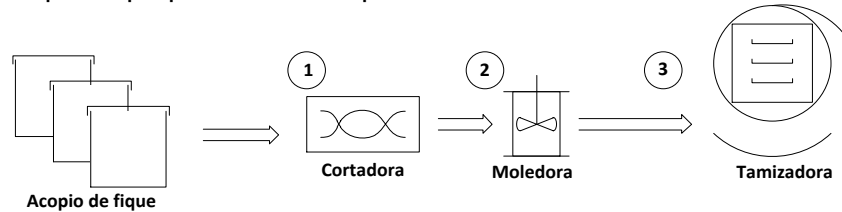


Fuente: El autor, octubre de 2014.



El flujo de proceso de la etapa de adecuación de fique comprende tres operaciones: cortado, molido y tamizado, (ver Figura 14).

**Figura 14.** Etapa de preparación del fique.



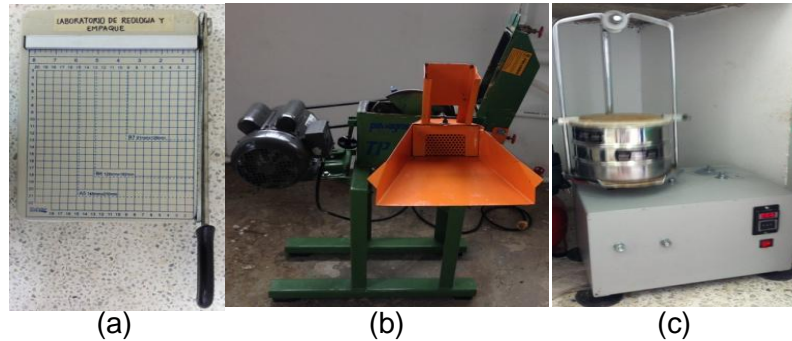
FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
1	Fique entero
2	Fique cortado
3	Fique molido

Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Unidad de adecuación del fique.** La unidad de adecuación de fique está conformada por tres equipos, en su orden: guillotina, (ver Figura 15 (a)), para cortar las fibras de fique en longitudes de hilo de 20 cm, molino Penagos TP-8, (ver Figura 15 (b)), para disminuir el fique a milímetros, y el equipo para tamizar, (ver Figura 15 (c)).

**Figura 15.** Unidad de acondicionamiento del fique.

(a) Guillotina; (b) Molino; (c) Tamizador.



Fuente Propia, octubre de 2014.

- **Etapa de gelatinización de harina de yuca.** Esta etapa inicia con la disposición de la harina de yuca de la cual se toma una muestra de 1 a 5g en una capsula metálica y se lleva a una prueba de humedad en el equipo especializado para medir porcentaje de humedad y formular un balance que defina la proporción de agua que tiene que adicionarse. Obtenidos estos cálculos se pesa en una balanza electrónica el agua y harina por separado en *beakers* y se mezclan en frío (temperatura ambiente) hasta que se disuelva la harina en el agua. Luego se prepara el equipo calefactor que se controla manualmente por medio de una perilla, un recipiente metálico donde se agrega la mezcla para un baño María, un montaje de soporte que sirve de base al baño y dos pinzas que sujetan el recipiente, un termómetro que se usa para verificar la temperatura de la mezcla y un agitador manual. Una vez listos los equipos, se vierte la mezcla en el recipiente

mientras se agita y se regula la temperatura del baño María hasta gelatinizar logrando una textura húmeda y suave, (ver Figura 16).

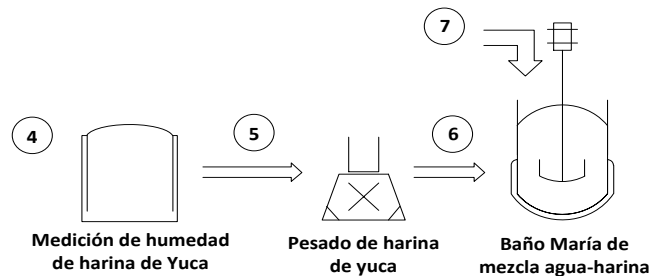
**Figura 16.** Harina de yuca gelatinizada.



Fuente: El autor, octubre de 2014.

El flujo de proceso de la etapa de gelatinización de harina de yuca comprende tres operaciones: medición de humedad de la harina de yuca, pesado de harina de yuca y baño María de la mezcla agua-harina, (ver Figura 17).

**Figura 17.** Etapa de gelatinización de harina de yuca.



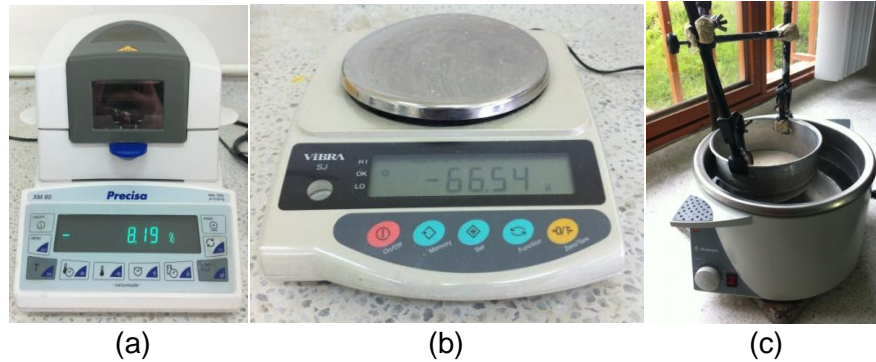
FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
4	Harina de yuca
5	Harina de yuca
6	Harina de yuca pesada
7	Agua

Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Unidad de gelatinización de harina de yuca.** Esta unidad se encuentra compuesta por varios equipos que dan las características necesarias para el uso en condiciones deseadas del producto, se debe disponer del equipo Precisa XM60 para determinar la cantidad de humedad presente en la harina de yuca antes de ser mezclada, (ver Figura 18 (a)), se tiene una balanza electrónica VIBRA SJ para pesar los materiales, (ver Figura 18 (b)) y finalmente se dispone de un equipo que hace baño María a la mezcla, el calefactor *Heidolph*, (ver Figura 18 (c)).

**Figura 18.** Unidad de gelatinización de harina de Yuca.

(a) Medidor de humedad; (b) Balanza electrónica; (c) Calefactor para baño María.



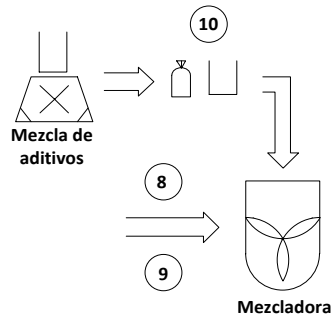
Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Etapas de mezclado.** Esta etapa inicia con la disposición de la harina de yuca gelatinizada, fique tamizado y aditivos. La harina de yuca gelatinizada se vierte en un *beaker* para ser pesada en una balanza electrónica y con esta información realizar un balance para el cálculo de cantidades necesarias de fique y aditivos, una vez obtenido este cálculo, se dispone de un *beaker* para pesar el fique y de una capsula Petri para pesar los aditivos, sobre una balanza se pesa la capsula Petri y se tara, el aceite vegetal se vierte en la capsula Petri y se tara cuando alcance el peso deseado, si se sobrepasa el peso, el excedente se retira con una espátula, sobre la misma capsula Petri se pesa el plastificante y se tara, finalmente en la misma capsula se pesa el emulsionante para caracterizar adecuadamente la mezcla. Una vez pesados, el fique y aditivos se dispone del equipo mezclador y una máscara especial para polvo que usa el operario.

La máquina mezcladora cuenta con un tazón y su respectiva tapa, un motor con 7 velocidades y una palanca manual que eleva la olla de la base y la acerca al mixer para optimizar el mezclado. Con la mezcladora lista se retira la tapa del tazón para dosificar harina de yuca gelatinizada y fique, se sube la palanca para elevar el tazón y se mezcla en la velocidad 3 hasta obtener una masa homogénea. Posteriormente para agregar los aditivos se para la maquina mezcladora se baja el tazón y se dosifica directamente sobre la masa. Debido a la falta de fluidez de los aditivos permanecen residuos sobre la capsula Petri y se debe tomar una porción de la masa y untarla sobre la capsula Petri para aprovechar todo el material dosificado, se renueva la operación de mezclado se sube el tazón y se acciona el mezclador. Por último, se toma la materia prima del mezclador y se prosigue a mezclar manualmente comprimiendo y desprendiendo pedazos de masa repetitivamente hasta que el operario considere que se ha obtenido una mezcla lista para ser moldeada.

El flujo de proceso de la etapa de mezclado comprende dos operaciones: mezcla de aditivos y mezclado en frío, (ver Figura 19).

**Figura 19.** Etapa de mezclado.



FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
8	Fique tamizado
9	Harina de yuca gelatinizada
10	Aditivos

Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Unidad de mezclado.** La unidad de mezclado se compone de dos equipos: la balanza electrónica VIBRA SJ, (ver Figura 20 (a)) y el equipo mezclador, (ver Figura 20 (b)).

**Figura 20.** Unidad de mezclado.

(a) Balanza electrónica; (b) Mezclador.

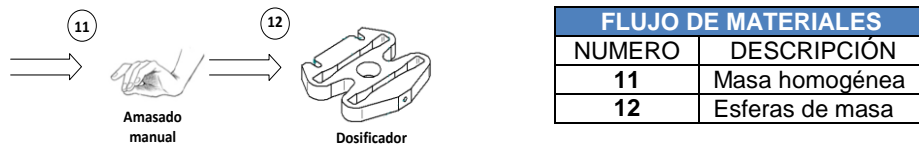


Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Etapa de moldeado y dosificado.** Después de obtener con el mezclado una masa homogénea se procede manualmente amasar, tomar porciones y formar esferas del material que facilitan la correcta dosificación, se introduce la materia prima preparada dentro de las cavidades del sistema de dosificación para ser dispuesto encima del molde hembra para su posterior etapa.

El flujo de proceso de la etapa de moldeado y dosificado comprende dos operaciones: moldeado manual y dosificado, (ver Figura 21).

**Figura 21.** Etapa de moldeado y dosificado.



Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Unidad de moldeado y dosificado.** En esta unidad solo cuenta con un equipo que se usa para montar la materia prima en la parte hembra del molde para su posterior prensado, primero se moldea manualmente la mezcla y se ponen las cantidades necesarias de la masa en el dosificador, (ver Figura 22).

**Figura 22.** Unidad de dosificado.



Fuente: El autor, octubre de 2014.

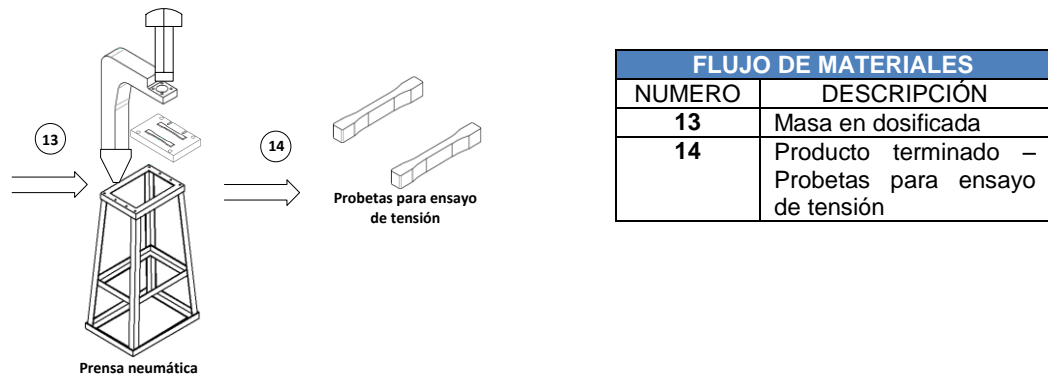
- **Etapa de prensado neumático y moldeo.** El procedimiento inicia conectando el panel principal a una fuente de alimentación de 3 fases, se limpia los moldes con una tela y se enciende la maquina girando la llave maestra en el panel de control, una vez se enciende se despliega en el panel HMI una pantalla de bienvenida con el escudo de la Universidad del Cauca y el nombre del laboratorio, seguido muestra una pantalla de validación de credenciales, si el usuario valida correctamente sus credenciales, el botón etiquetado como "CONTINUAR" es habilitado y el usuario puede proseguir con la operación del sistema, se despliega una nueva pantalla para seleccionar el modo de operación y la unidad de equipo de prensado, se elige la unidad de equipo neumático y modo automático, se presiona CONTINUAR y se muestra una pantalla de selección de parámetros: tiempo de moldeado expresado en segundos y temperatura de las placas inferior y superior en grados Celsius. Una vez se han seleccionado los parámetros apropiados oprimir "CONTINUAR", el sistema permite informar los requerimientos desde la pantalla al controlador y se procede con la acción alcanzar valores de consigna. De forma automática desciende la placa superior uniéndose al molde hembra para alcanzar rápidamente el valor deseado, en el panel HMI se muestra una ventana que indica en gráficos separados estos valores de consigna y de proceso, además se visualiza para ambas placas los valores de manera textual incluyendo el porcentaje de la variable de control (voltaje en las resistencias).

En paralelo a la operación de precalentamiento de moldes, se llevan a cabo las 4 primeras etapas del proceso de elaboración de probetas para ensayo de tensión, se

verifica que la temperatura del molde haya alcanzado el valor de consigna deseado, cuando esto sucede el sistema avisa al operario en el panel HMI que introduzca la muestra en los moldes, para continuar, se debe presionar el botón virtual “CONTINUAR”, la parte macho del molde se eleva, se inspecciona que la pieza de expulsión en la parte inferior del molde se encuentra abajo, se deposita la materia prima al interior del molde hembra mediante el mecanismo dosificador y se presiona el botón “CONTINUAR”, de esa manera se inicia el proceso de compresión (se baja la parte macho del molde). Se contabiliza el tiempo durante el cual la materia prima estará expuesta a compresión y temperatura constantes, se finaliza el proceso de compresión (se sube la parte macho del molde). Seguido se inicia la expulsión de la probeta y se sube el expulsor, se retira el producto terminado, se da la orden de bajar la pieza de expulsión y si no hay nuevo ciclo se finaliza el sistema de moldeo.

El flujo de proceso de la etapa comprende una operación: prensado neumático y moldeo, (ver Figura 23).

**Figura 23.** Etapa de prensado y moldeo.



Fuente: El autor, octubre de 2014.

- **Unidad de prensado neumático y moldeo de Unicauca.** En el laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, se dispone de una máquina de moldeo por compresión neumática adquirida en el año 2010, diseñada por estudiantes de Ingeniería en Automática Industrial en colaboración de la empresa Vallecaucana PLASMEGA S.A., quienes estuvieron a cargo de la manufactura. Esta máquina realiza la transformación fisicoquímica de una mezcla de harina de yuca, fique y aditivos mediante el prensado, en un producto en forma de dos probetas para ensayo de tensión empleando un par de moldes que cumplen con la norma internacional ASTM D 638.

La prensa neumática es de bastidor tipo C, conformada por una unidad de potencia neumática, una unidad mecánica y una unidad de control, posee una estructura metálica de forma piramidal que soporta en la parte superior las placas con sus moldes hembra y macho, el codo superior, que se acopla al cilindro de compresión, y la caja acrílica de protección. En la parte inferior la estructura sostiene el sistema mecánico de expulsión con sus ejes guías y codo inferior el cual se acopla al cilindro expulsor, (ver Figura 24).

La unidad de prensado cuenta con un armario de mando que contiene la instrumentación dedicada al control de temperatura, se realiza para 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.

**Figura 24.** Unidad de prensado neumático y moldeo de Unicauca.



Fuente: El autor, octubre de 2014.

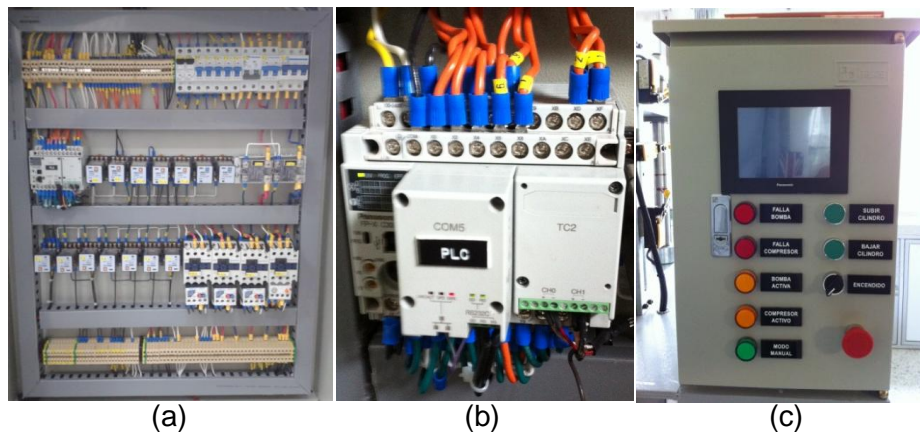
**1.9.3 Descripción de la unidad de prensado por módulos.** Según la clasificación que se realizó anteriormente la prensa de moldeo por compresión es una maquina neumática con bastidor tipo C.

- **Módulo de potencia neumática.** El módulo de potencia neumática es un sistema neumático donde la prensa toma su energía para el proceso de compresión, está compuesta por: compresor, regulador de presión y manómetro, válvulas de 5/2 Vías y cilindro de doble efecto.
- **Módulo mecánico.** Este módulo es el encargado de soportar los sistemas de compresión y expulsión e integrar con el molde de probetas toda la planta. El propósito de esta unidad es subir y bajar la parte macho del molde y del sistema de expulsión mediante el accionamiento de un cilindro neumático, que a su vez esta acoplado a piezas mecánicas que realizan el desplazamiento vertical. Está compuesta por un codo superior, platina de soporte, acople circular, platina superior, ejes guía, plataforma de deslizamiento, mesa de trabajo y soporte, codo inferior, acople circular inferior, pieza expulsora, expulsor, guía expulsora y molde de probetas superior e inferior.
- **Módulo de control.** La unidad de prensado neumático y moldeo cuenta con un sistema de control automatizado, contiene dos armarios, el primero: un panel de potencia, (ver Figura 25 (a)), que provee al usuario ventajas sobre el proceso y así operar la prensa de forma rápida y segura, esta unidad de control se encuentra equipada de relés térmicos, relés electromecánicos, relés de estado sólido, *breakers*, rieles *din*, canaletas y borneras y un controlador lógico programable (PLC) de PANASONIC que posee un módulo de

comunicación, un módulo de temperatura y un módulo de lectura, (ver Figura 25 (b)). Se describen partes del armario 1, remitirse al Anexo B: DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DEL ARMARIO 1 DE CONTROL.

Un segundo armario: Panel de control HMI, (ver Figura 25 (c)) que se encarga del mando de los sistemas hidráulicos de compresión y expulsión mediante el accionamiento de botones y llaves selectoras, un panel de mando compuesto por indicadores de funcionamiento del sistema hidráulico, indicador de modo manual/automático, pulsador para elevación/descenso del cilindro hidráulico superior, botones de arranque y parada de bomba, botón de parada de emergencia, contactor, rieles *din*, canaletas y borneras.

**Figura 25.** Panel de potencia, PLC y panel de control HMI.  
(a) Armario 1; (b) PCL; (c) Armario 2.

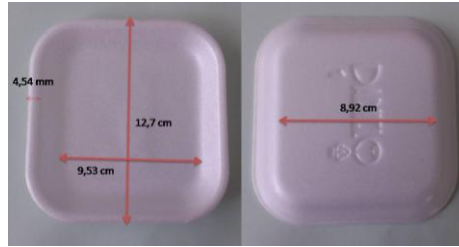


Fuente: El autor, octubre de 2014.

**1.9.4 Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables.** Para la producción del producto semirrígido en forma de bandeja, (ver Figura 26), el usuario precalienta el molde a una temperatura definida para obtener las condiciones de inicio del proceso. Una vez se haya alcanzado los valores de consigna de temperatura para los moldes macho y hembra, la materia prima: harina de yuca, fibra de fique, plastificante y aditivos, es previamente preparada en las proporciones adecuadas, se deposita al interior de la parte hembra del molde; 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 la parte superior del molde, procediendo a activar el sistema de expulsión, para que el operario finalmente retire manualmente el producto terminado.



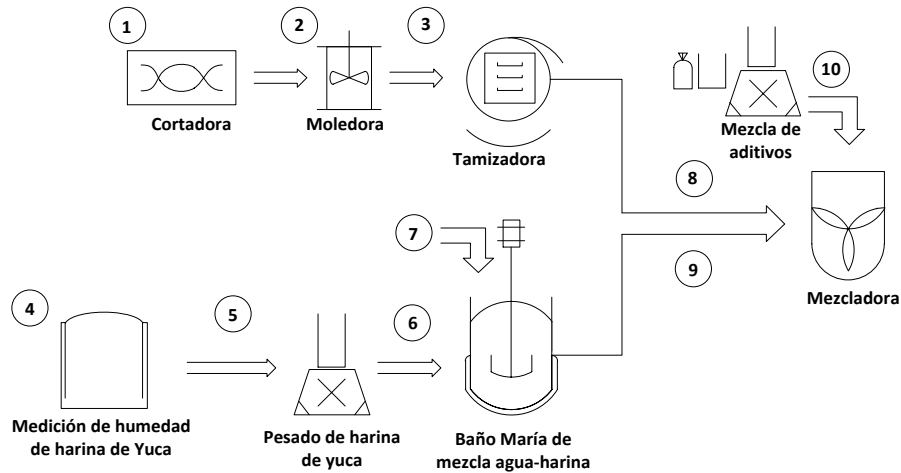
**Figura 26.** Forma de la bandeja semirrígida biodegradable.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

**1.9.5 Descripción por etapas del proceso de elaboración de bandejas.** Las tres primeras etapas del proceso de elaboración de bandejas corresponde a la preparación de materia prima: adecuación de fique, gelatinización de harina de yuca y mezclado, estas etapas se llevan a cabo de igual manera que en el proceso de elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión del caso anterior. El flujo de materiales de las etapas de adecuación de fique, gelatinización de harina de yuca y mezclado aparece en la Figura 27.

**Figura 27.** Etapas de preparación de materia prima.



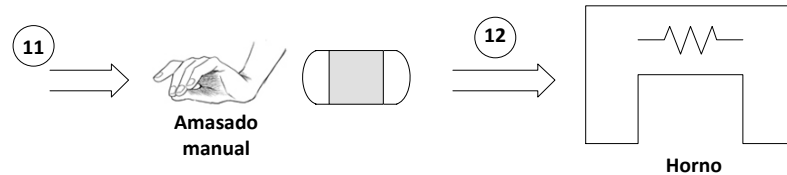
FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
1	Fique entero
2	Fique cortado
3	Fique molido
4	Harina de yuca
5	Harina de yuca
6	Harina de yuca pesada
7	Agua
8	Fique tamizado
9	Harina de yuca gelatinizada
10	Aditivos

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Etapa de secado y moldeado.** Después del mezclado, se toma una porción pequeña de masa y se somete a una prueba de humedad para registrar el porcentaje de agua, seguido se prepara el horno a 80° y se dispone de una bandeja metálica, se toman porciones pequeñas de masa y se aplanan con los dedos, se depositan sobre la bandeja hasta cubrirla por completo y se lleva al horno por 20 minutos con el fin de disminuir la humedad y mejorar las propiedades mecánicas. Cumplido el tiempo se retira la bandeja del horno y se toma una porción de masa horneada y se lleva a una prueba de humedad para verificar que cumpla con el 40% de humedad si no es así se somete de nuevo al horno por 5 minutos a 90°C. Alcanzado el porcentaje de humedad se toma manualmente las porciones de materia prima y se comprimen en una única masa usando las palmas y los dedos. Seguido se moldea con un rodillo de cocina para formar láminas delgadas de dimensiones aproximadas al tamaño del molde y facilitar la siguiente etapa.

El flujo de proceso de la etapa de moldeado comprende dos operaciones: amasado manual y secado aparece en la Figura 28.

**Figura 28.** Etapa de moldeado.



FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
11	Porciones de masa homogénea
12	Masa en laminas cuadradas

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Unidad de secado.** Esta unidad se compone de un equipo manual para moldear las láminas, básicamente un rodillo y para la operación de secado se dispone de un horno *Memmert Model ULP 700*, (ver Figura 29).

**Figura 29.** Unidad de secado.



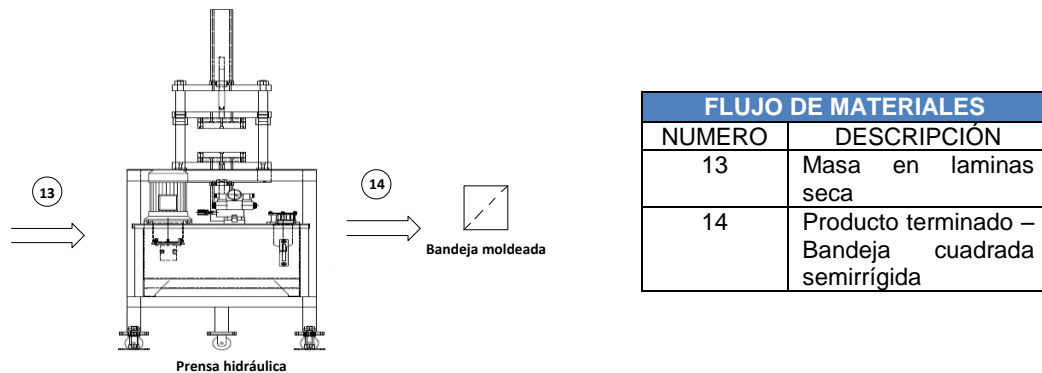
Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Etapa de prensado hidráulico y moldeo.** Se inicia de igual manera que la etapa de prensado y moldeo neumática, los cambios se presentan en el modo de operación, la unidad de equipo y el ingreso de parámetros de presión, en este caso se escoge manual, hidráulico y el valor deseado respectivamente. El ingreso de los parámetros para el control de temperatura es de igual forma que el prensado y moldeo neumática.

Cuando se alcance la temperatura en los moldes y se deposite la materia prima en el molde hembra, inicia el proceso de compresión, se baja la parte macho del molde presionando el pulsador de descenso, al mismo instante se toma el tiempo con un cronometro y se contabiliza el tiempo durante el cual la materia prima estará expuesta a compresión y temperatura constantes, al momento que el molde macho presione el molde hembra se debe oprimir el pulsador de elevación para generar alivios de presión, repetir alivios (subir y bajar la placa superior), en intervalos de tiempo definidos por el usuario que van aumentando a medida que se moldea, antes que termine el tiempo de prensado y moldeo la bandeja es presionada constantemente sin generar alivios. Una vez cumplido el tiempo se sube la parte macho del molde y el sistema avisara que expulsara la muestra, se inicia la expulsión automática de la bandeja presionando el botón virtual "OK". Se dispone de unos guantes y se retira el producto terminado y si no hay nuevo ciclo se finaliza el sistema de moldeo.

El flujo de proceso se comprende de una operación: prensado hidráulico y moldeo, (ver Figura 30).

**Figura 30.** Etapa de prensado hidráulico y moldeo.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Unidad de prensado hidráulico y moldeo de Unicauca.** En el laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, se dispone de una segunda máquina de moldeo pero por compresión hidráulica adquirida a la empresa Industrias EDAFA S.A. de Medellín en el año 2011. Esta máquina realiza el moldeo de una mezcla de harina de yuca, fique y aditivos en bandejas de forma cuadrada.

La máquina de moldeo hidráulica es una prensa de bastidor tipo 4 columnas cuya estructura metálica soporta en su parte superior una plataforma de deslizamiento con sus ejes guía, placas de calentamiento y cilindro hidráulico; al costado izquierdo se encuentra

el depósito de aceite el cual sostiene el motor trifásico y el sistema de válvulas que distribuyen el fluido a los cilindros; en el costado derecho se encuentra un armario de mando con pulsadores, indicadores de luz y *switches*, (ver Figura 31).

**Figura 31.** Unidad de prensado hidráulico y moldeo de Unicauca.



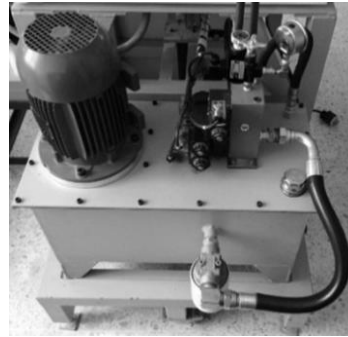
Fuente: El autor, noviembre de 2014.

Para obtener detalles del manual de operación de la unidad de prensado hidráulico y moldeo, remitirse al Anexo A: MANUAL DE OPERACIÓN DE LA UNIDAD DE PRENSADO HIDRÁULICO.

#### **1.9.6 Descripción de la unidad de prensado por módulos.**

- **Módulo de potencia hidráulica.** La unidad de potencia hidráulica es la que brinda la energía para el proceso de compresión y expulsión. Está compuesta por un depósito de aceite, indicador de nivel y temperatura de aceite, motor eléctrico 3 fases conectadas en estrella, distribuidor hidráulico, válvula de control de flujo de fluido hidráulico cilindro superior, válvula de control de flujo de fluido hidráulico cilindro inferior, válvula de control de flujo de fluido hidráulico de alivio, válvula de control de presión total en el distribuidor, válvula de control de flujo total en el distribuidor, presostato indicador de sobrepresión en cilindro superior, manómetro indicador analógico de presión del distribuidor, (ver Figura 32).

**Figura 32.** Módulo de potencia hidráulica.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Módulo mecánico.** Esta unidad es la encargada de soportar el sistema de potencia hidráulica e integrar con el molde de bandejas toda la planta. El propósito de esta unidad es subir y bajar el molde macho y el sistema de expulsión mediante el accionamiento de un cilindro hidráulico, que a su vez está acoplado a piezas mecánicas que realizan el desplazamiento vertical. Está compuesta por un cilindro hidráulico superior, cilindro hidráulico inferior, ejes guía y plataforma de deslizamiento, mesa de trabajo y soporte, sensores de fin de carrera de la plataforma móvil, aislante térmico entre las placas y las plataformas, placas de calentamiento superior e inferior y moldes superior e inferior.

- **Módulo de control.** La unidad de prensado hidráulico y moldeo solo tenía implementado un sistema de control para el movimiento de los moldes ubicado en el armario 2 y se le hacía control de temperatura desde el armario 1 de la unidad de prensado neumático. Esto permitió ahorrarle dinero al laboratorio de Reología pero demandaba por parte del investigador una mayor exigencia y complejidad en el desarrollo de sus tareas de experimentación con las unidades de prensado. Para lograr un alto grado de eficiencia se vio la necesidad de integrar los sistemas de control para crear un ambiente favorable de trabajo y experimentación mejorando el factor de productividad.

Un trabajo alternativo a la investigación y desarrollo de empaques biodegradables en el laboratorio fue desarrollado por parte del ingeniero Ernesto Felipe González quien implementó la integración de los armarios de control de temperatura y de posición de las dos unidades de prensado y moldeo del proceso. La unidad de prensado hidráulico y moldeo tiene un sistema de control automatizado con dos armarios: Armario 1 Panel de potencia y Armario 2 Panel de control HMI los cuales son los mismos instalados para la unidad de prensado neumático y moldeo.

## CAPÍTULO 2. INGENIERÍA CONCEPTUAL

En la industria se hace uso de la norma ISA 88 pues provee una terminología estándar y un conjunto consistente de conceptos y modelos para plantas de manufactura por tandas y control de tandas, que mejora la comunicación entre todas las partes involucradas, todo ello sin establecer un grado de automatización específico [17]. Con el fin de recopilar la información de forma organizada y detallada del proceso de elaboración de semirrígidos biodegradables a base de harina de yuca, fibra de fique y aditivos, se propone el estándar para modelarlo.

Tras una primera aproximación a los sistemas y subsistemas que componen la célula de proceso de elaboración de semirrígidos biodegradables, se realizó una descripción de los procesos, atendiendo las recomendaciones de la norma ISA 88 parte 1. Teniendo en cuenta que el proceso de elaboración de semirrígidos biodegradables es un proceso que se desarrolla por tandas, se moldea de uno a varios lotes de masa de harina de yuca mezclada con fique y aditivos, es decir que se lleva a producción cantidades finitas de material, sometiendo cantidades de material de entrada a un conjunto ordenado de actividades de procesamiento, en un período finito de tiempo, usando uno o más porciones de equipos [17].

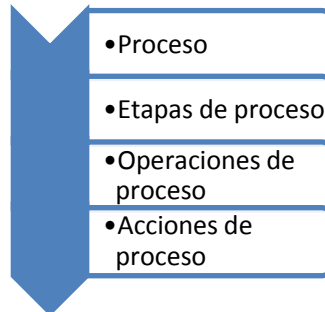
En la célula de proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables de Unicauca se elaboran dos tipos de producto, probetas para ensayo de tensión y bandejas semirrígidas biodegradables, para seguir con un orden primero se describirá el modelado ISA 88 para las probetas.

### 2.1 MODELADO ISA S88 DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS BIODEGRADABLES PARA ENSAYO DE TENSIÓN

Asumiendo dos aspectos, el primero: que el proceso de elaboración de semirrígidos biodegradables se lleva a cabo por tandas y el segundo: que la norma ISA 88 parte 1 ofrece las herramientas para modelar este tipo de producción, se propone en este trabajo de grado los modelos de proceso, físico y procedimental, utilizando la norma, con el fin que la información recopilada acerca del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables se presente, se almacene y se organice bajo un estándar que permita futuros trabajos (escalamiento industrial) y haga más sencilla la clasificación, el estudio y el análisis de datos del actual proyecto de investigación.

**2.1.1 Modelo de proceso de elaboración de probetas.** De acuerdo a la norma ISA 88 parte 1, el modelo de proceso se utiliza para describir el proceso productivo de una empresa en términos de: proceso, etapas de proceso, operaciones de proceso, y acciones de proceso siguiendo la jerarquía [17], (ver Figura 33). Una vez asumida la jerarquía establecida por ISA 88 se procede a describir el modelo de proceso, que caracteriza el proceso de elaboración de probetas para ensayo de tensión.

Figura 33. Modelo de proceso ISA S88.



Fuente: Modificado de [17], noviembre de 2014.

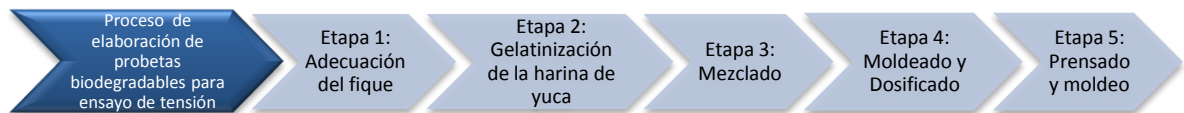
La descripción por etapas se realiza a partir de la observación detallada de los procedimientos realizados por investigadores que trabajan en el laboratorio de Reología y Empaques elaborando probetas.

**2.1.2 Etapas del proceso de elaboración de probetas.** El proceso es dividido para establecer las etapas que lo componen, recordando que las etapas son una parte del proceso que normalmente opera independientemente de otras y que usualmente resulta en una sucesión planeada de cambios químicos o físicos en el material que se está procesando [17].

Se describen las 5 etapas en las que fue dividido el proceso de elaboración de probetas, (ver Figura 34). La primera etapa del proceso se define “Adecuación del fique”, en esta se manipula el fique cambiando algunas de sus propiedades físicas, para que cumpla con el producto esperado. La segunda etapa que se estipula se define “Gelatinización de la harina de yuca”, en la cual se miden propiedades que son esenciales para su posterior mezcla, se somete a cambios de temperatura que ayudarán a darle la textura gelatinosa que se necesita. La etapa “Mezclado” donde se adicionan y se mezclan todos los materiales y aditivos para darle características a la masa. Después de mezclar viene la etapa “Moldeado y dosificado” donde se amasa y se toman ciertas cantidades necesarias para acomodarlas en la herramienta de dosificación para posteriormente ser dispuesta en la parte hembra del molde de la unidad de prensado neumático.

Finalmente se propuso la última etapa del proceso “Prensado y moldeo” en la cual se opera la unidad de prensado fijando la temperatura a la cual se va a moldear, mientras eso ocurre se dosifica el material en el dosificador, se baja el molde macho consiguiendo que la presión neumática ejercida por la placa caiga sobre el material y se dé inicio al moldeo para lograr el conformado de la muestra y la etapa termina con la extracción de la probeta.

Figura 34. Etapas del proceso de elaboración de probetas biodegradables.

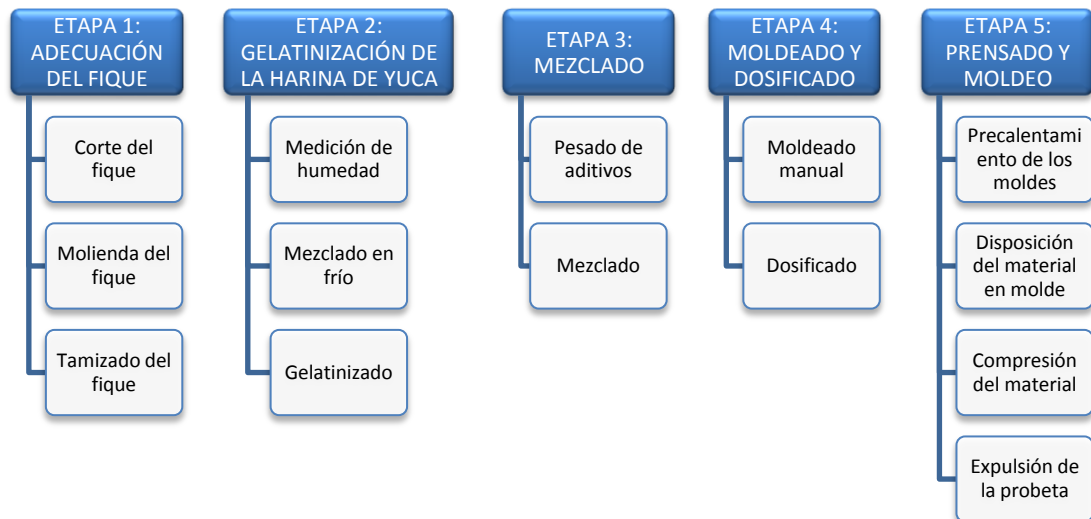


Fuente: El autor, noviembre de 2014.

La norma ISA 88 define las etapas como secuencia de operaciones que deben contener cambios físicos o químicos, pero en el presente trabajo de grado no se aplica estrictamente como normalmente se observa en el medio industrial. Sin embargo, no hacer uso de estas etapas propuestas en el modelo del proceso, implicaría obtener respuestas no deseadas.

**2.1.3 Descripción de cada etapa del proceso por operaciones.** Una vez determinadas las etapas del proceso de elaboración de probetas, se definen las operaciones de cada etapa, (ver Figura 35), teniendo en cuenta que el desarrollo de cada una de estas permite avanzar en el proceso. En la primera etapa “Adecuación del fique” se deben desarrollar las operaciones: cortar fique, moler fique, tamizar fique. En la segunda etapa “Gelatinización de harina de Yuca” se deben llevar a cabo las operaciones: medición de humedad, mezclado en frío, gelatinización. La tercera etapa se denomina “Mezclado” en la cual se realizan las operaciones: pesado de aditivos y mezclado. La cuarta etapa de “Moldeado y dosificado” se compone por dos operaciones: moldeado manual y dosificado. Finalmente la etapa de “Prensado neumático y moldeo” está determinada por las operaciones de proceso: precalentamiento del molde, disposición de material en molde, compresión de material y expulsión de probeta.

**Figura 35.** Descripción de cada etapa del proceso por operaciones.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

Siguiendo la jerarquía que establece ISA S.88, las etapas han sido subdivididas en operaciones, considerando que cada etapa de proceso consiste en un conjunto ordenado de una o más operaciones de proceso y estas representan actividades mayores de procesamiento. Una operación de proceso usualmente da como resultado un cambio químico o físico en el material que está siendo procesado [17].

Cada etapa del proceso requiere del desarrollo de operaciones de proceso, cada una de las cuales se llevan a cabo después de realizar ciertas acciones que son necesarias para cumplir con cada operación, (ver Tabla 1).



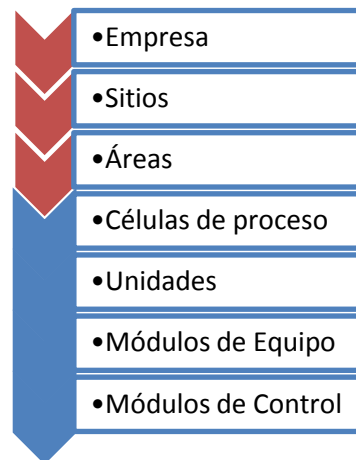
**Tabla 1.** Modelo de proceso de elaboración de probetas.

Proceso	Etapa	Operación	Acción
Elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión	Adecuación de fique	Corte de fique	Tomar una porción de fique
			Colocar el fique sobre guillotina
			Medir la longitud de fique
			Cortar el fique
		Molienda de fique	Tomar el fique cortado
			Ingresar el fique en molino
			Moler el fique
		Tamizado de fique	Tomar una porción de fique molido
			Poner el fique en tamiz
	Tamizar el fique		
	Seleccionar el fique		
	Gelatinización de harina de Yuca	Medición de humedad	Tomar una porción de harina de yuca
			Sensar humedad de la harina de yuca
			Realizar balance de humedad a la harina
		Mezcla en frío	Pesar la harina de yuca
			Pesar el agua
			Adicionar la harina de yuca al agua
			Mezclar materiales
		Gelatinizado	Poner la mezcla en baño María
			Mezclar hasta homogenizar
	Mezclado	Pesado de aditivos	Pesar la harina de yuca gelatinizada
			Realizar balance de masa de materiales
			Pesar el fique
			Pesar el glicerol
			Pesar el aceite de oliva
			Pesar el emulsionante
		Mezclado	Agregar los aditivos al gel de harina de yuca
Mezclar hasta homogenizar			
Moldeado y dosificado	Moldeo manual	Moldear para obtener esferas de masa	
	Dosificación	Dosificar la masa	
Prensado y moldeo	Pre calentamiento de moldes	Seleccionar los parámetros de operación	
	Disposición de material en molde	Colocar la masa en molde hembra	
	Compresión de material	Prensar el material	
		Moldear el material	
Expulsión de probeta	Expulsar el producto		

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

**2.1.4 Modelo físico de elaboración de probetas.** La parte 1 de la norma dice que el modelo físico se usa para describir los activos físicos de una empresa en términos de empresa, sitios, áreas, células de proceso, unidades, módulos equipo y módulos control, de la misma forma los activos físicos de una empresa involucrados en una fabricación por lotes son organizados usualmente en una forma jerárquica, (ver Figura 36). Los agrupamientos de nivel inferior se combinan para formar agrupamientos superiores en la jerarquía. El modelo tiene siete niveles, comenzando en la parte superior con empresa, sitio y área [17]. Estos tres niveles frecuentemente se definen por consideraciones comerciales y no se modelan más allá en este documento.

**Figura 36.** Modelo físico ISA 88-I.



Fuente: Modificado de [17], noviembre de 2014.

Los tres niveles más altos hacen parte del modelo para identificar de manera apropiada la relación de los equipos de niveles más bajos con la empresa de manufactura, mientras que los cuatro niveles más bajos de este modelo se refieren a tipos de equipo específicos [17].

A continuación se muestra el desarrollo del modelo físico para el proceso de elaboración de probetas, exponiendo que para este trabajo de grado se realizaron las subdivisiones correspondientes y sugeridas por la norma ISA 88 asumiendo que la Universidad del Cauca corresponde al primer nivel del modelo, el de empresa, consecuentemente se hacen las siguientes asignaciones para sitio y área.

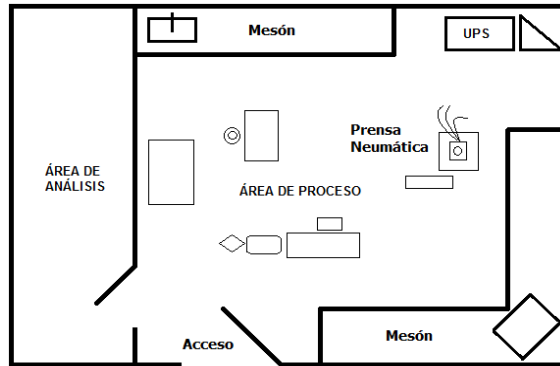
**Empresa:** Universidad del Cauca.

**Sitio:** Facultad de Ciencias Agrarias, Vereda Las Guacas en Popayán, Cauca, es aquí en donde se lleva a cabo el proceso productivo al que se le aplican los modelos mencionados del estándar ISA 88 parte 1.

**Área:** Laboratorio de Reología y Empaques es donde se lleva a cabo el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables.

Se describe la distribución del Laboratorio de Reología y Empaques, (ver Figura 37), espacio designado para llevar a cabo el proceso de elaboración de probetas. En la zona de producción se encuentran ubicados los equipos, instrumentos y accesorios que permiten desarrollar el proceso, todos ellos dispuestos de tal forma que la cercanía permite llevar a cabo las conexiones necesarias, además frente a este espacio se encuentra el mesón donde se prepara la materia prima.

**Figura 37.** Vista superior Laboratorio de Reología y Empaques de Unicauca.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Célula de proceso.** Se entiende como célula de proceso a una agrupación lógica de equipos que incluye los elementos requeridos para la producción de una o más tandas. Define el alcance de control lógico de un conjunto de equipos de proceso dentro de un área [17]. Acudiendo a esta definición que ofrece ISA S88, la célula de proceso de elaboración de probetas tiene como tarea elaborar el producto a base de materiales biodegradables y plastificantes.
- **Clasificación de la célula de proceso.** La célula de proceso de elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión es uni-producto, pues produce un solo tipo de producto.
- **Identificación de unidades.** La célula de proceso Elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión contiene 5 (cinco) unidades: unidad de acondicionamiento del fique, unidad de gelatinización, unidad de mezclado, unidad de moldeado y dosificación y la unidad de prensado y moldeo. Una vez clasificada la célula de proceso e identificadas las unidades se debe continuar con el desarrollo del modelo físico que incluye el módulo de equipo y el módulo de control, entendiéndose por módulo de equipo como un grupo funcional de equipo que puede llevar a cabo un número finito de actividades menores específicas de proceso, puede ser parte de una unidad o formar una agrupación aparte de equipo dentro de una célula [17]. A continuación se expone la relación bajo el modelo de proceso de ISA S.88, (ver Tabla 2), entre la célula de proceso, las unidades, módulos de equipo y módulos de control que definen la célula de proceso de elaboración de probetas.

**Tabla 2.** Modelo físico del proceso de elaboración de probetas.

Célula de proceso	Unidad	Módulo Equipo	Módulo Control
Célula de elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión	Unidad de acondicionamiento del Fique	Módulo de corte	Operario
		Módulo de molido	Operario Motor
		Módulo de	Operario

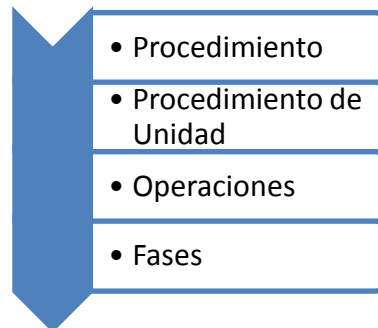
**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

		tamizado	Motor
Unidad de gelatinización	Módulo de humedad		Operario
			Sensor de humedad
	Módulo de pesado		Operario
			Sensor de peso
	Módulo de baño María		Operario
			Resistencias calefactoras
			Variador de potencia
	Unidad de mezclado	Módulo de pesado	
			Sensor de peso
Módulo de mezclado			Operario
			Motor
		Variador de velocidad	
Unidad de moldeado y dosificado	Módulo de moldeado		Operario
	Módulo de dosificado		Operario
			Dosificador
Unidad de prensado y moldeo	Módulo de prensado		Operario
			Motor Compresor
			Manómetro
			Válvula 3/2 vías – Cilindro compresor
			Válvula 3/2 vías – Cilindro Expulsor
			Válvula manual reguladora de ascenso en cilindro compresor
			Válvula manual reguladora de descenso en cilindro compresor
			Válvula manual reguladora de ascenso en cilindro expulsor
			Válvula manual reguladora de descenso en el cilindro expulsor
			Moldes
			Molde inferior
	Módulo moldeo		Resistencias de calefacción
			Termocuplas Tipo J

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

**2.1.5 Modelo de control procedimental del proceso de elaboración de probetas.** El control procedimental es una característica del proceso por tandas. Es el control que permite al equipo realizar un proceso por tandas, además está construido con elementos procedimentales que se combinan de una manera jerárquica para cumplir la meta de un proceso completo [17], como lo define el modelo de proceso mostrado en Tabla 1. Se define cada uno de los componentes del modelo de control procedimental, (ver Figura 38), donde el Procedimiento es “Elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión”.

**Figura 38.** Modelo de control procedimental ISA 88-I.



Fuente: Modificado de [17], noviembre de 2014.

- **Procedimiento.** La elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión, se define como un procedimiento por lotes de dos piezas.

- **Procedimiento de unidad.** Un procedimiento de unidad consiste en un conjunto ordenado de operaciones que hace que tenga lugar una secuencia de producción continua dentro de una unidad [17]. Se tiene que el proceso de elaboración de probetas cuenta con cinco unidades, los procedimientos de unidad quedan definidos: Acondicionamiento del fique, gelatinizado de la harina de yuca, mezclado, moldeado y dosificado, y finalmente prensado y moldeo.

- **Operación.** Una operación es un conjunto ordenado de fases que define una secuencia de proceso mayor que toma el material que está siendo procesado de un estado a otro [17]. Por lo tanto al cumplir con esta definición se plantean las operaciones: cortar fique, moler fique, tamizar fique, medir humedad, mezclar en frío, gelatinizar, pesar aditivos, mezclar, moldear, dosificar, precalentar moldes, disponer material en molde, comprimir material y expulsar probeta.

- **Fases.** El elemento más pequeño del control procedimental que realiza una tarea es una fase [17]. De esta forma fueron establecidas 97 fases asociadas a 14 operaciones y 5 procedimientos de unidad, (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Modelo procedimental de elaboración de probetas.

Procedimiento	Procedimiento de unidad	Operación	Fases
Elaboración de probetas biodegradables para ensayo de tensión	Acondicionamiento de fique	Cortar fique	Disponer de fique
			Tomar una porción de fique
			Ubicar el fique sobre la guillotina
			Medir la longitudes de 20 cm y cortar
		Moler fique	Disponer de fique cortado
			Conectar equipo de molienda a toma de 110v
			Tomar fique
			Ingresar fique a la boca del molino
			Moler fique
		Tamizar fique	Disponer de fique molido
			Conectar tamizador a toma de 110v
			Depositar fique molido en tamiz 80

PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.

			Armar tamices y ajustarlos al módulo de vibración		
			Encender y Tamizar (360 segundos)		
			Seleccionar fique de tamiz 60		
	Gelatinización de la harina de Yuca	Medir humedad		Disponer de harina de yuca	
				Conectar medidor de humedad a toma de 110v	
				Agregar de 1 a 4g de harina en la capsula	
				Ingresar capsula al medidor de humedad	
				Registrar porcentaje de humedad	
				Calcular balance de humedad	
		Mezclar en frio			Pesar <i>beaker1</i> y tarar
					Agregar agua al <i>beaker1</i> y pesar la cantidad deseada
					Pesar <i>beaker2</i> y tarar
					Agregar harina al <i>beaker2</i>
					Pesar la cantidad de harina deseada
					Agregar el agua pesada en el fique pesado
		Gelatinizar			Mezclar
					Disponer de mezcla de harina y agua
					Colocar sobre el soporte universal el calefactor
					Conectar el calefactor a un toma de 110v
					Sujetar el recipiente metálico con las pinzas dentro del calefactor
					Agregar la mezcla en recipiente metálico
	Mezclado	Pesar aditivos		Encender el calefactor <i>turn on</i>	
				Girar la perilla del calefactor	
				Superar los 55°C y medir con el termómetro	
				Agitar la mezcla y regular la temperatura hasta gelatinizar	
				Apagar el equipo <i>turn off</i>	
				Disponer de harina de yuca gelatinizada	
				Pesar <i>beaker</i> y tarar	
				Agregar harina gelatinizada al <i>beaker</i> y pesar	
				Registrar peso y calcular balance de masa	
	Disponer de glicerol				
		Mezclar		Pesar cápsula Petri y tarar	
				Verter glicerol en cápsula Petri	
Pesar glicerol deseado y tarar					
Disponer Aceite vegetal					
Verter aceite vegetal en la capsula Petri					
Pesar aceite vegetal deseado y tara					
Disponer de emulsionante					
Verter emulsionante en la capsula Petri					
Pesar emulsionante deseado					
Disponer del fique					
Pesar <i>beaker</i> y tarar					
Agregar fique al <i>beaker</i> y pesar la cantidad deseada					
Conectar el mezclador a un toma de 110V					
Disponer de harina gelatinizada					
Disponer de Fique					
Retirar la tapa del tazón del mezclador					
Verter la harina gelatinizada en el tazón					
Subir la palanca que eleva el tazón					
Encender mezclador y mezclar (Posición No 3)					
Mezclado en vivo agregar fique al tazón					
Mezclar hasta obtener una masa					
Poner aditivos en capsula Petri					
Apagar mezcladora y detener el mezclado					

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

			Bajar la palanca que desciende el tazón
			Dosificar aditivos directamente sobre la masa
			Subir palanca y mezclar
			Apagar mezcladora y bajar el tazón
			Tomar un trozo de materia prima del tazón
			Mezclar residuos en cápsula Petri con trozos de masa manualmente
	Moldeado y dosificado	Moldear	Disponer de masa
			Amasar manualmente
			Tomar porciones de masa
			Formar esferas de masa
		Dosificar	Introducir las esferas en las cavidades del dosificador
	Prensado y moldeo	Precalentar moldes	Conectar prensa neumática a toma trifásico de 120 VAC
			Encender la prensa girando la llave maestra del panel de control
			Validar credenciales de acceso a la unidad
			Oprimir botón "CONTINUAR"
			Seleccionar modo de operación y la unidad de prensado neumático
			Oprimir botón "CONTINUAR"
			Seleccionar parámetros de temperatura y tiempo de moldeo
		Oprimir botón "CONTINUAR" y alcanzar los valores de consigna	
		Disponer material en molde	Oprimir botón "CONTINUAR" para la dosificación
Disponer de dosificador con el material			
Llevar dosificador hasta la prensa con las cavidades hacia arriba			
Girar el dosificador hacia abajo			
Ubicar el dosificador encima del molde hembra			
Comprimir material		Dosificar	
	Presionar el botón virtual "CONTINUAR" para cerrar el molde		
	Aplicar presión	Mantener presión total Dejar conformar	
Expulsar probeta	Subir molde		
	Subir expulsor		
	Extraer la pieza moldeada		

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

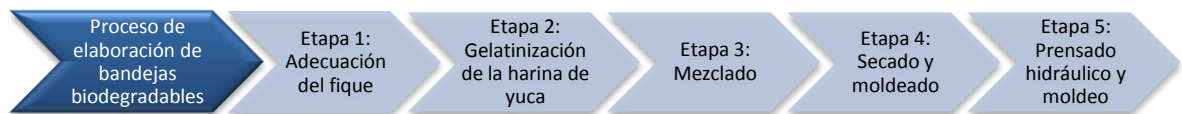
## **2.2 MODELADO ISA S88 DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE BANDEJAS SEMIRRÍGIDAS BIODEGRADABLES**

Se realizó un análisis de los modelos como en la sección 2.1 para las probetas con el fin que la información recopilada acerca del proceso de elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables se presente, se almacene y se organice bajo un estándar que permita futuros trabajos (escalamiento industrial) y haga más sencilla la clasificación, el estudio y el análisis de datos del proyecto actual de investigación.

**2.2.1 Modelo de proceso de elaboración de bandejas.** Una vez asumida la jerarquía establecida por ISA S88 se procede a describir el modelo de proceso, que caracteriza el proceso de elaboración de bandejas que se lleva a cabo en el laboratorio de Reología y Empaques ubicado en la Universidad del Cauca. La descripción por etapas es partir de la observación detallada de los procedimientos realizados por los investigadores que trabajan en la célula de moldeo por compresión.

**2.2.2 Etapas del proceso de elaboración de bandejas.** A continuación se describen las 5 etapas en las cuales fue dividido el proceso de elaboración de bandejas, (ver Figura 39). Las tres primeras etapas del proceso corresponden de igual manera a las tres primeras del proceso de elaboración de probetas para ensayo de tensión: “Adecuación del fique”, “Gelatinización de la harina de yuca” y “Mezclado”. A partir de la etapa de mezclado el proceso cambia incorporando nuevas operaciones, acciones y equipos los cuales hacen que el material obtenga unas características diferentes. Las etapas que diferencian a la bandeja de la probeta para ensayo de tensión son: la etapa de “Secado y moldeado” y la etapa de “Prensado hidráulico y moldeo”.

**Figura 39.** Etapas del proceso de elaboración de bandejas.

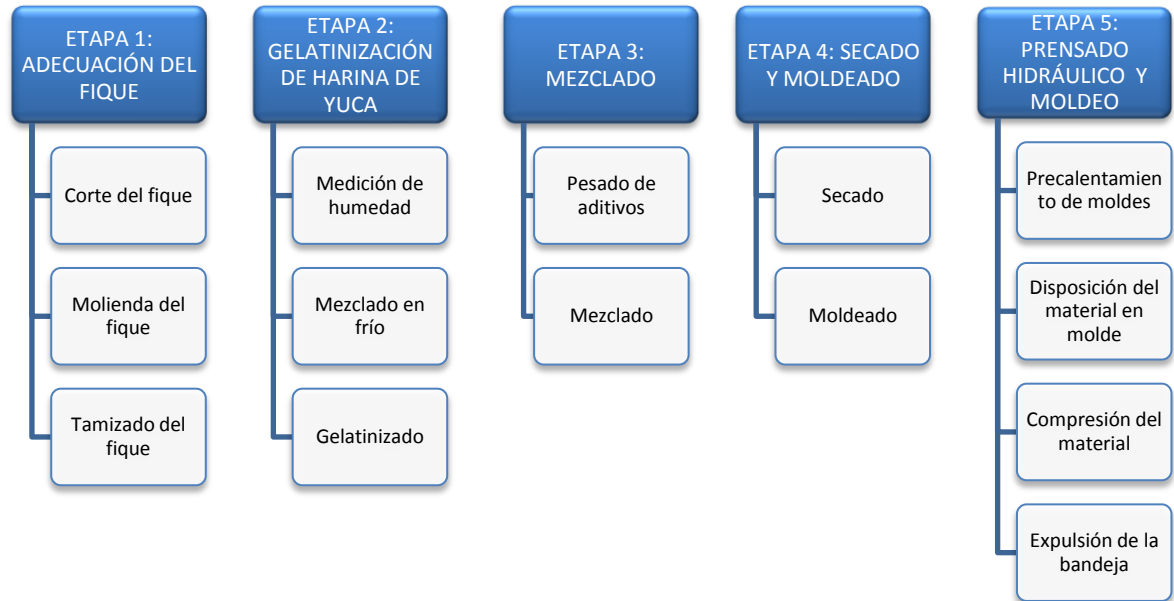


Fuente: El autor, noviembre de 2014.

**2.2.3 Descripción de cada etapa del proceso por operaciones.** Una vez determinadas las etapas del proceso de elaboración de bandejas, se definieron las operaciones para cada una de ellas, (ver Figura 40), teniendo en cuenta que el desarrollo de cada una de estas permite avanzar en el proceso y se consideran las necesarias. Para superar la cuarta etapa “Secado y moldeado” se deben desarrollar las operaciones de: Secado y moldeado; se continua con el desarrollo de las operaciones que hacen parte de la quinta etapa “Prensado hidráulico y moldeo”: precalentamiento de moldes, disposición de material en molde, compresión de material y expulsión de bandeja.



**Figura 40.** Descripción de cada etapa del proceso por operaciones.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

Se expone la relación bajo el modelo de proceso de ISA S88 de 37 acciones que componen 14 operaciones de proceso, (ver Tabla 4).

**Tabla 4.** Modelo de proceso de elaboración de bandejas.

Proceso	Etapas	Operación	Acción
Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables	Adecuación del fique	Corte del fique	Tomar porción de fique
			Colocar el fique sobre guillotina
			Medir la longitud de fique
			Cortar el fique
		Molienda del fique	Tomar el fique cortado
			Ingresar el fique
			Moler el fique
		Tamizado del fique	Tomar porción de fique molido
			Poner el fique en tamiz
	Tamizar el fique		
	Seleccionar el fique		
	Gelatinización de la harina de yuca	Medición de la humedad	Tomar porción de harina de yuca
			Sensar la harina de yuca
			Hacer balance de humedad de la harina
Mezcla en frío		Pesar la harina de yuca	
		Pesar agua	
		Adicionar harina de yuca al agua	
		Mezclar	
Gelatinización		Poner la mezcla en baño María	
		Mezclar hasta homogenizar	
Mezclado	Pesa de aditivos	Pesar la harina de yuca gelatinizada	
		Hacer balance de masa de materiales	
		Pesar el fique	
		Pesar el glicerol	

		Mezcla	Pesar el aceite de oliva
			Pesar el emulsionante
			Agregar los aditivos a la harina de yuca gelatinizada
			Mezclar hasta homogenizar
	Secado y moldeado	Secado	Hacer prueba de humedad a la mezcla
			Secar la masa
		Moldeo	Amasar manualmente
			Moldear laminarmente
	Prensado hidráulico y moldeado	Pre calentamiento de moldes	Seleccionar los parámetros de operación
		Disposición de material en molde	Colocar la masa en molde hembra
		Compresión de material	Prensar el material
		Expulsión de bandeja	Moldear el material
			Expulsar el producto terminado

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

**2.2.4 Modelo físico del proceso de elaboración de bandejas.** Las determinaciones para empresa, sitio y área son las mismas que se definieron para el caso de la elaboración de probetas en la sección 2.1. Se describe una aproximación de la distribución del Laboratorio de Reología y Empaques, (ver Figura 41), espacio designado para llevar a cabo el proceso de elaboración de bandejas y la ubicación dentro del mismo de la unidad de prensado hidráulico.

**Figura 41.** Vista superior Laboratorio de Reología y Empaques, Unicauca.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

- **Célula de proceso.** La célula de proceso de elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables, tiene como tarea producir un tipo de producto a base de materiales biodegradables y plastificantes.

- **Clasificación de la célula de proceso.** La llamada célula de proceso de *Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables* realmente es multi-producto, debido a que produce dos tipos de producto que se obtienen con el procedimiento, las bandejas semirrígidas y las probetas biodegradables para ensayo de tensión, la unidad de prensado hidráulico y moldeo se modifica cambiando los moldes para lograr la

elaboración de los dos productos. Para el caso de estudio se hará el análisis de los modelos fijándose en el proceso para elaborar las bandejas semirrígidas.

• **Identificación de unidades.** La célula de proceso “Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables” contiene 5 unidades: unidad de acondicionamiento del fique, unidad de gelatinización, unidad de mezclado, unidad de secado y moldeo, unidad de prensado y moldeo. Una vez definida la célula de proceso e identificadas las unidades se debe continuar con el desarrollo del modelo físico que incluye el módulo de equipo y el módulo de control, (ver Tabla 5).

**Tabla 5.** Modelo físico de la elaboración de bandejas.

Célula de proceso	Unidad	Módulo Equipo	Módulo Control
Célula de elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables	Unidad de acondicionamiento del Fique	Módulo de corte	Operario
		Módulo de molienda	Operario
			Motor
	Módulo de tamizado	Operario	
		Motor	
	Unidad de gelatinización	Módulo de humedad	Operario
			Sensor de humedad
		Módulo de pesado	Operario
			Sensor de peso
		Módulo de baño María	Operario
			Resistencias calefactoras
	Variador de potencia		
	Sensor de temperatura (Termómetro)		
	Unidad de mezclado	Módulo de pesado	Operario
			Sensor de peso
		Módulo de mezclado	Operario
	Motor		
	Variador de velocidad		
	Unidad de secado y moldeo	Módulo de secado	Operario
			Sensor de humedad
Sensor de temperatura			
Resistencias eléctricas			
Módulo de moldeo		Operario	
		Rodillo	
Unidad de prensado y moldeo	Módulo de prensado	Indicador de nivel	
		Motor eléctrico de tres fases	
		Válvula de control de flujo hidráulico -cilindro superior	
		Válvula de control de flujo hidráulico - cilindro inferior	
		Válvula de control de flujo hidráulico de alivio	
		Válvula de control de presión total	
		Válvula de control de flujo total	
		Preostato	
		Manómetro del distribuidor	
Sensores fin de carrera			

			Sensor de presión	
			Moldes	Molde superior Molde inferior
		Módulo de moldeo	Placas de calentamiento	Placa superior Placa inferior
			Termocuplas Tipo J	

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

**2.2.5 Modelo de control procedimental del proceso de elaboración de bandejas.** Se definen los componentes del modelo de control de procedimientos, donde el Procedimiento es “Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables”.

- **Procedimiento.** El procedimiento de elaboración de bandejas se ha definido como un lote de una sola pieza, que requiere de un conjunto de operaciones discretas y continuas para realizar el producto.
- **Procedimiento de unidad.** La elaboración de bandejas cuenta con cinco procedimientos de unidad: Acondicionamiento del fique, gelatinizado de la harina de yuca, mezclado, secado y moldeado, prensado y moldeo.
- **Operación.** Se plantean las operaciones: Cortar fique, moler fique, tamizar fique, medir humedad, mezclar en frío, gelatinizar, pesar aditivos, mezclar, secado, moldeado, precalentar moldes, disponer material en molde, comprimir material y expulsar bandejas.
- **Fases.** Fueron establecidas 104 fases asociadas a 14 operaciones de 5 procedimientos de unidad. La descripción de cada fase y la relación con su respectiva operación se observa a continuación, (ver Tabla 6).

**Tabla 6.** Modelo de control procedimental del proceso de elaboración de bandejas.

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operación	Fases
Elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables	Acondicionamiento de fique	Cortar fique	Tomar una porción de fique
			Ubicar el fique sobre la guillotina
			Medir la longitud de 20 cm y cortar
		Moler fique	Conectar equipo de molienda a toma de 110v
			Tomar fique
			Ingresar fique a la boca del molino
		Tamizar fique	Moler fique
			Conectar tamizador a toma de 110v
			Depositar fique molido en tamiz 80
	Armar tamices y ajustarlos al módulo de vibración		
	Gelatinizado de harina de Yuca	Medir humedad	Encender y tamizar (360 segundos)
			Seleccionar fique de tamiz 60
			Conectar medidor de humedad a toma de 110v
			Agregar de 1 a 4g de harina en la capsula
Ingresar capsula al medidor de humedad			
Mezclar en frío	Registar porcentaje de humedad	Calcular balance de humedad	
		Pesar <i>beaker1</i> y tarar	
		Agregar agua al <i>beaker1</i> y pesar la cantidad deseada	
			Pesar <i>beaker2</i> y tarar

PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.

		Agregar harina al <i>beaker</i> 2
		Pesar la cantidad de harina deseada
		Agregar el agua pesada en el fique pesado
		Mezclar
	Gelatinizar	Disponer de mezcla de harina y agua
		Colocar sobre el soporte universal el calefactor
		Conectar el calefactor a un toma de 110v
		Sujetar recipiente metálico con las pinzas dentro del calefactor
		Agregar la mezcla en el recipiente metálico
		Encender el calefactor <i>turn on</i>
		Girar la perilla del calefactor
		Superar los 55°C y medir con el termómetro
		Agitar la mezcla y regular la temperatura hasta gelatinizar
		Apagar el equipo <i>turn off</i>
Mezclado	Pesar aditivos	Pesar <i>beaker</i> y tarar
		Agregar harina de yuca gelatinizada al <i>beaker</i> y pesar
Registrar peso y calcular balance de masa		
Disponer de glicerol		
Pesar cápsula Petri y tarar		
Verter glicerol en cápsula Petri		
Pesar glicerol deseado y tarar		
Disponer Aceite vegetal		
Verter aceite vegetal en la capsula Petri		
Pesar aceite vegetal deseado y tarar		
Disponer de emulsionante		
Verter emulsionante en la capsula Petri		
Pesar emulsionante deseado		
Disponer del fique		
Pesar <i>beaker</i> y tarar		
	Mezclar	Agregar Fique al <i>beaker</i> y pesar la cantidad deseada
		Conectar el mezclador a un toma de 110V
		Disponer de la harina de yuca gelatinizada
		Disponer del Fique
		Retirar la tapa del tazón del equipo mezclador
		Verter la harina de yuca gelatinizada al tazón
		Subir la palanca que eleva el tazón
		Encender mezclador y mezclar (Posición No 3)
		Mezclado en vivo agregar Fique al tazón
		Mezclar hasta obtener una masa
		Disponer de capsula Petri con aditivos
		Apagar mezcladora y detener el mezclado
		Bajar la palanca que desciende el tazón
		Dosificar aditivos directamente sobre la masa
	Subir palanca y mezclar	
	Apagar mezcladora y bajar el tazón	
	Tomar la materia prima del mezclador	
	Mezclar residuos en cápsula Petri con trozos de masa manualmente	
Secado y Moldeado	Secado	Disponer de masa
		Tomar una porción pequeña de masa
		Agregar a la capsula la porción pequeña de masa
		Ingresar la capsula al medidor de humedad
		Registrar humedad
		Prepara horno a 80°C

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

		Tomar porciones pequeñas de la masa y aplanarlas con los dedos	
		Depositar las porciones aplanadas en la bandeja metálica hasta cubrirla	
		Ingresar la bandeja en el horno por 20 minutos	
		Retirar bandeja y tomar una porción pequeña de masa	
		Realizar una medición de humedad de la porción de masa y registrar	
	Moldeado	Disponer de porciones de masa	
	Tomar las porciones de masa, comprimirlas y moldearlas manualmente hasta formar una única masa		
	Moldear la masa con el rodillo hasta formar una lámina		
	Prensado y moldeo	Precalentar moldes	Conectar el panel principal a toma trifásico de 120 VAC
			Encender la prensa girando la llave maestra del panel de control
		Validar credenciales de acceso a la unidad	
		Oprimir botón "CONTINUAR"	
		Seleccionar modo de operación "Manual" y la unidad de prensado "Hidráulico"	
		Oprimir botón virtual "CONTINUAR"	
		Seleccionar el botón virtual "Temperatura Automática"	
		Seleccionar "Temperatura en la placa Superior/Inferior" e ingresar la Temperatura	
		Oprimir botón "CONTINUAR" y alcanzar los valores de consigna	
	Disponer material en molde	Oprimir botón "CONTINUAR" para dosificar	
		Disponer del material	
		Llevar el material hasta la prensa manualmente	
		Ubicar el material encima del molde hembra	
		Dosificar	
	Comprimir material	Cerrar molde oprimiendo el pulsador de descenso en el panel de control y activar cronometro	
		Oprimir pulsador de elevación al momento que el molde superior toque el molde inferior para generar alivios de presión	
		Repetir los alivios de presión (subir y bajar el molde macho)	
		Aplicar moldeo	
		Cerrar el molde	
		Dejar conformar	
	Expulsar bandejas	Presionar pulsador de ascenso del molde macho	
		Presionar el botón virtual "OK" para accionar el expulsor	
		Extraer la pieza moldeada	

Fuente: El autor, noviembre de 2014.

## 2.3 DIAGNÓSTICO DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

Teniendo en cuenta la capacidad de la célula de proceso, el nivel de dificultad por parte del operario para llevar a cabo las tareas de los procedimientos, el nivel de automatización de la célula y la valoración de pertinencia del proceso se realizó un diagnóstico de automatización.

**2.3.1 Documentación de la célula de proceso de moldeo por compresión.** Del ejercicio realizado describiendo la célula de proceso se identifica la inexistencia de documentación del proceso, se evidenció que habían algunos documentos específicos de la unidad de prensado hidráulico y un trabajo de grado donde sólo se especifica la construcción y detalles técnicos de la unidad de prensado neumático.

Los investigadores manejan una bitácora donde consignan datos de cantidades y propiedades químicas durante la etapa de gelatinización de la harina de yuca, en el balance de humedad, para saber qué cantidad de agua adicionan, también registran datos en el mezclado cuando deben saber el peso de los recipientes, tarar y adicionar los materiales y en la etapa final de prensado consignan datos de la presión y la temperatura de moldeo. Para la probeta registran algunos resultados de las pruebas mecánicas que realizan de las pruebas de tensión. Sin embargo las bitácoras no manejan formatos de registro establecidos por consenso, son altamente dependientes del operario y no contienen toda la información pertinente que permita asegurar la reproducibilidad de los resultados, esto en razón de no haber establecido modelos estandarizados a seguir en la ejecución de los *batch* como tal, y eso se le debe adicionar el desconocimiento de la adecuación de los equipos que serán usados.

En la actualidad se enfrentan a problemas como salidas de proceso defectuosas o de diferentes características, ya que un investigador por ensayo y error debe darle continuidad a un trabajo de un investigador ausente, cuya bitácora no contenía toda la información necesaria para poder adaptarse al proceso que se llevaba a cabo.

En este trabajo de grado se brinda valor no sólo al modelado de las etapas de prensado y moldeo del proceso, sino también a etapas previas y su documentación lo cual es indispensable para lograr la estandarización, generando un comportamiento estable, garantizando que un producto tenga características de calidad homogénea y con reducidos costos de manufactura.

**2.3.2 Valoración y verificación de la célula de proceso de moldeo por compresión.** Se realizó el diagnóstico de la célula haciendo un reconocimiento visual de las unidades del proceso y de la misma manera se verificó el funcionamiento de los equipos externos que son necesarios para llevar a cabo cada una de las fases del procedimiento.

- **Valoración de las unidades comunes del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables.** En la inspección visual que se realizó como primera medida, se identificó que el módulo de molienda se encuentra disponible en la planta piloto de alimentos pero debe ser puesto en un lugar externo al laboratorio y operado al aire libre a causa de la contaminación del aire que genera el polvillo de fique; para almacenar el material molido se dispone de varias bolsas plásticas que se sujetan al módulo con cinta

de enmascarar para cubrir espacios por donde se escapa el material. El módulo de tamizado se observa que está dispuesto en el laboratorio de Reología y Empaques pero no tiene un lugar adecuado para su uso, el principio del funcionamiento del módulo es una vibración constante y tiende a moverse por el piso y deben acuñarlo con un objeto pesado, además esta es una actividad incómoda para el operario ya que se encuentra en un lugar limitado de espacio.

En la unidad de gelatinizado, el módulo de equipo dispuesto para Baño María pertenece al laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agrarias, por ello debe ser pedido con anticipación al día programado para moldear y es proporcionado al equipo de investigadores por un determinado tiempo lo que hace que se deba agilizar el proceso. Esta operación requiere de otro elemento como el soporte universal para sujetar el contenedor metálico y se identifica que fue adaptado para la actividad de forma rudimentaria. En la unidad de mezclado no se encuentra disponible un módulo de equipo que sea óptimo para dosificar los aditivos sobre la masa de gelatina de yuca y fique, el operario debe detener el mezclado para tomar una porción del material y pasarlo por la cápsula Petri, esto con el fin de obtener la totalidad de los aditivos necesarios para la mezcla.

- **Valoración de las unidades del proceso de moldeo por compresión para elaborar bandejas biodegradables.** En la unidad de secado y moldeo se debe amasar con un rodillo de cocina la masa para obtener una lámina delgada, actividad que depende del operario y no hay un estándar para lograr siempre las dimensiones indicadas de la lámina, con esto se esperaría una reducción en las rebabas del material en la bandeja. En la unidad de prensado y moldeo se debe disponer de la lámina de material en el molde de manera manual aumentando el riesgo para el operario, además de ello al finalizar el moldeo se sube el molde y la bandeja queda adherida en la parte superior del molde haciendo que el operario deba usar las manos para sacar el producto con una espátula, actividad que resulta en el posible deterioro del producto terminado.

- **Valoración de las unidades del proceso de moldeo por compresión para elaborar probetas biodegradables para ensayo de tensión.** La unidad de moldeo y dosificado carece de un módulo de equipo para estandarizar la cantidad de material que debe ser usada en cada probeta, el operario se dispone a tomar manualmente la masa acudiendo a sus sentidos para determinar las cantidades que sean necesarias. En la unidad de prensado y moldeo se observa que al finalizar la operación y se sube el molde macho, las probetas quedan adheridas a este lo que resulta en una acción adicional del operario para extraer la muestra con una espátula incurriendo en su deterioro.

**2.3.3 Nivel de dificultad en la realización de operaciones del proceso de moldeo por compresión.** Teniendo en cuenta la anterior valoración y de acuerdo con las entrevistas realizadas a los investigadores del grupo CYTBIA, se hace un diagnóstico del nivel de dificultad en la ejecución de las fases que se llevan a cabo para la elaboración de bandejas y probetas biodegradables para ensayo de tensión.



- **Realización del procedimiento de elaboración de probetas para ensayo de tensión.** Para establecer el porcentaje de los niveles de dificultad de las tareas a realizar, se tuvo en cuenta la información que aportaron los investigadores, (ver Tabla 7).

**Tabla 7.** Nivel dificultad en la realización del procedimiento de probetas.

Procedimiento de Unidad	Fases	Dificultad en la realización
Acondicionamiento de fique	Tomar una porción de fique	Bajo
	Ubicar el fique sobre la guillotina	Bajo
	Medir la longitud a cortar (20 cm)	Bajo
	Cortar	Bajo
	Adecuar equipo de molienda	Medio
	Conectar equipo de molienda a toma de 110v	Bajo
	Tomar fique e Ingresarlo a la boca del molino	Bajo
	Moler fique	Bajo
	Conectar tamizador a toma de 110v	Bajo
	Depositar fique molido en tamiz 80	Bajo
	Armar y ajustar tamices al módulo de vibración	Medio
	Encender y tamizar (360 segundos)	Bajo
	Seleccionar fique de tamiz 60	Bajo
Gelatinizado de harina de Yuca	Conectar medidor de humedad a toma de 110v	Bajo
	Agregar de 1 a 4g de harina de yuca en la capsula	Bajo
	Ingresar capsula al medidor de humedad	Bajo
	Sensar y registrar porcentaje de humedad	Bajo
	Calcular balance de humedad	Medio
	Pesar <i>beaker1</i> y tarar	Bajo
	Agregar agua al <i>beaker1</i> y pesar la cantidad deseada	Bajo
	Pesar <i>beaker2</i> y tarar	Bajo
	Agregar harina de yuca al <i>beaker2</i>	Bajo
	Pesar la cantidad de harina de yuca deseada	Bajo
	Agregar el agua pesada en el fique pesado	Bajo
	Mezclar	Bajo
	Colocar sobre el soporte universal el calefactor	Bajo
	Conectar el calefactor a un toma de 110v	Bajo
	Sujetar recipiente metálico con las pinzas dentro del calefactor	Medio
	Agregar la mezcla en el recipiente metálico	Bajo
	Encender el calefactor <i>turn on</i>	Bajo
Girar la perilla del calefactor	Medio	
Superar los 55°C y medir con el termómetro	Bajo	
Agitar la mezcla y regular la temperatura hasta gelatinizar	Alto	
Mezclado	Pesar <i>beaker</i> y tarar	Bajo
	Agregar gel de yuca al <i>beaker</i> y pesar	Bajo
	Registrar peso y calcular balance de masa	Medio
	Pesar cápsula Petri y tarar	Bajo
	Verter glicerol en cápsula Petri	Bajo
	Pesar glicerol deseado y tarar	Medio
	Verter aceite vegetal en la capsula Petri	Bajo
	Pesar aceite vegetal deseado y tara	Medio
	Verter emulsionante en la capsula Petri	Bajo
	Pesar emulsionante deseado	Medio
	Pesar <i>beaker</i> y tarar	Bajo
	Agregar fique al <i>beaker</i> y pesar la cantidad deseada	Bajo
	Conectar el mezclador a un toma de 110V	Bajo
Retirar la tapa del tazón del equipo mezclador	Bajo	

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

	Verter el gel de yuca en el tazón	Bajo	
	Subir la palanca que eleva el tazón	Bajo	
	Encender mezclador y mezclar (Posición No 3)	Bajo	
	Mezclado en vivo agregar fique al tazón	Medio	
	Mezclar hasta obtener una masa	Bajo	
	Detener el mezclado y bajar la palanca que desciende el tazón	Bajo	
	Dosificar aditivos directamente sobre la masa	Medio	
	Subir palanca y mezclar	Bajo	
	Detener mezcladora, bajar el tazón y tomar la materia prima	Bajo	
	Mezclar manualmente comprimiendo y desprendiendo pedazos de masa repetidamente, hasta considerar una materia prima lista para ser moldeada	Medio	
Moldeado y dosificado	Amasar manualmente	Bajo	
	Tomar porciones de masa y formar esferas de masa	Bajo	
	Introducir las esferas en las cavidades del dosificador	Bajo	
Prensado neumático y moldeo	Conectar prensa neumática a toma de 120 VAC	Bajo	
	Limpiar moldes	Bajo	
	Encender la prensa girando la llave maestra del panel de control	Bajo	
	Validar credenciales de acceso a la unidad	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR"	Bajo	
	Seleccionar modo de operación y la unidad de prensado neumático	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR"	Bajo	
	Seleccionar parámetros de temperatura y tiempo de moldeo	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR" y alcanzar los valores de consigna	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR" para dosificar	Bajo	
	Llevar dosificador hasta la prensa con las cavidades hacia arriba	Bajo	
	Girar el dosificador hacia abajo	Bajo	
	Ubicar el dosificador encima del molde hembra	Bajo	
	Dosificar	Medio	
	Presionar el botón virtual "CONTINUAR" para cerrar el molde	Bajo	
	Aplicar presión	Cerrar molde	Bajo
		Dejar conformar	
	Subir molde	Bajo	
	Subir expulsor	Bajo	
	Extraer la pieza moldeada	Medio	

Fuente: El autor, diciembre de 2014.

• **Realización del procedimiento de elaboración de bandejas biodegradables.** A continuación se presenta la información recopilada según los criterios de los investigadores para determinar el nivel de dificultad en la realización de las tareas del procedimiento para elaborar bandejas semirrígidas biodegradables, (ver Tabla 8), sin tener en cuenta las tres primeras etapas (Acondicionamiento de fique, gelatinización de la harina de yuca y mezclado) comunes del proceso de moldeo por compresión.

**Tabla 8.** Nivel dificultad en la realización del procedimiento de bandejas.

Procedimiento de Unidad	Fases	Dificultad en la realización
Secado y Moldeado	Tomar una porción pequeña de masa	Bajo
	Agregar a la capsula la porción pequeña de masa	Bajo

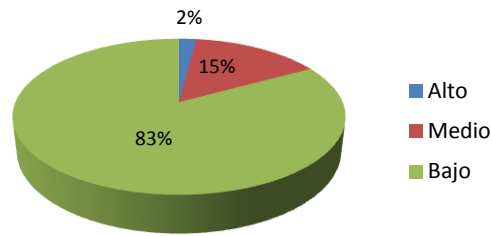
**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

	Ingresar la capsula al medidor de humedad	Bajo	
	Sensar y registrar humedad	Bajo	
	Preparar horno a 80°C	Bajo	
	Tomar porciones pequeñas de la masa y aplanarlas con los dedos	Bajo	
	Depositar las porciones aplanadas en la bandeja metálica hasta Cubrirla	Bajo	
	Ingresar la bandeja en el horno y secar por 20 minutos	Bajo	
	Retirar bandeja y tomar una porción pequeña de masa	Bajo	
	Sensar la humedad de la porción de masa y registrar	Bajo	
	Tomar las porciones de masa, comprimirlas y moldearlas manualmente hasta formar una única masa	Medio	
	Moldear la masa con el rodillo hasta formar una lámina	Medio	
Prensado Hidráulico y moldeo	Conectar el panel principal a toma de 120 VAC	Bajo	
	Limpiar moldes	Bajo	
	Encender la prensa girando la llave maestra del panel de control	Bajo	
	Validar credenciales de acceso a la unidad	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR"	Bajo	
	Seleccionar modo de operación "Manual" y la unidad de prensado "Hidráulico"	Bajo	
	Oprimir botón virtual "CONTINUAR"	Bajo	
	Seleccionar el botón virtual "Temperatura Automática"	Bajo	
	Seleccionar "Temperatura en la placa Superior/Inferior" e ingresar la Temperatura	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR" y alcanzar los valores de consigna	Bajo	
	Oprimir botón "CONTINUAR" para dosificar	Bajo	
	Llevar el material hasta la prensa manualmente	Bajo	
	Ubicar el material encima del molde hembra	Bajo	
	Dosificar	Bajo	
	Cerrar molde oprimiendo el pulsador de descenso en el panel de control y activar cronometro	Bajo	
	Oprimir pulsador de elevación al momento que el molde superior toque el molde inferior para generar alivios de presión	Medio	
	Repetir los alivios de presión (subir y bajar el molde macho)	Alto	
	Aplicar moldeo	Cerrar el molde	Bajo
		Dejar conformar	Bajo
		Presionar pulsador de ascenso del molde macho	Bajo
	Presionar el botón virtual "OK" para accionar el expulsor	Bajo	
	Extraer la pieza moldeada	Bajo	

Fuente propia, diciembre de 2014.

**2.3.4 Informe estadístico del nivel de dificultad en la realización de las fases de los procedimientos.** Se presenta el diagrama estadístico para observar el nivel de dificultad en la realización de las fases del proceso de moldeo por compresión (elaboración de bandejas y probetas para ensayo de tensión) de manera general con respecto a los criterios presentados en las tablas 7 y 8. El proceso es dependiente del investigador pero la ejecución de las fases, de acuerdo a su juicio, es de baja dificultad en un 83%, (ver Figura 42), ya que tiene a su disposición módulos de equipo que facilitan la realización de las actividades.

**Figura 42.** Nivel de dificultad en la realización de fases en general.

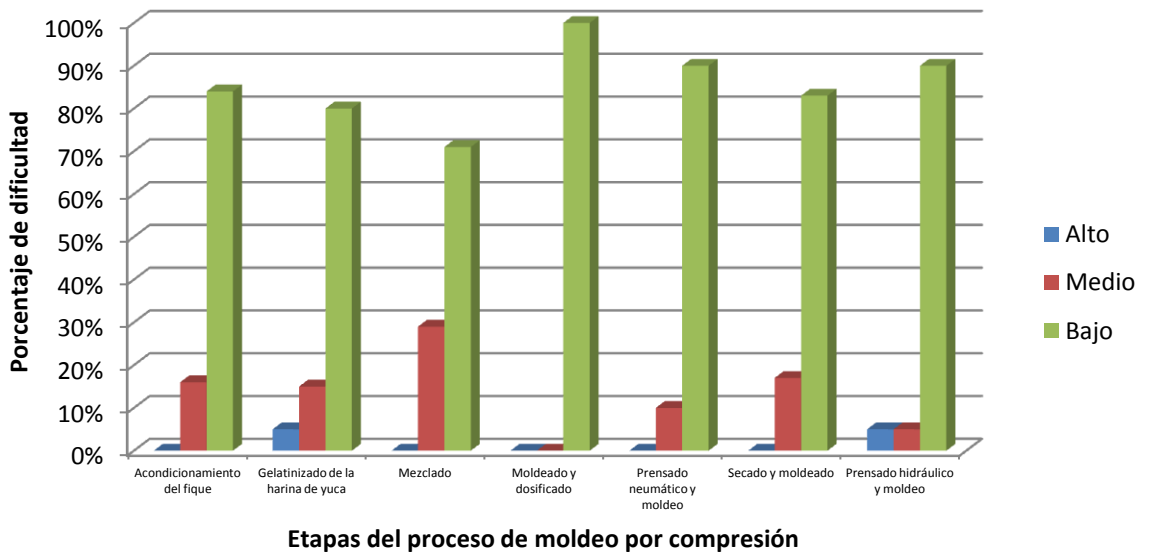


Fuente: El autor, diciembre de 2014.

Se presentan estadísticas del nivel de dificultad en la realización de las fases que pertenecen a cada etapa del proceso, como se ha mencionado anteriormente, las tres primeras: Adecuación del fique, gelatinización de la harina de yuca y mezclado se estudian de igual manera para los dos procedimientos (elaboración de probetas para ensayo de tensión y elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables), es por eso que se adjuntan los datos de las dos etapas que son diferentes para elaborar los dos productos.

La etapa de mezclado tiene un 29% de nivel medio de dificultad ya que se debe bajar y subir el recipiente para adicionar desde la cápsula Petri los aditivos, tomar porciones de la masa para dosificar todo el líquido y finalmente hacer que el módulo funcione de nuevo hasta que se consiga una mezcla homogénea. Se observa que el nivel de dificultad es bajo en la mayoría de las etapas del proceso, (ver Figura 43), debido a que el operario tiene ayuda de módulos de equipo para que la ejecución de las fases sea sencilla.

**Figura 43.** Nivel de dificultad en la realización de fases por etapas del proceso.



Fuente: El autor, diciembre de 2014.

### 2.3.5 Nivel de automatización de la célula de proceso de moldeo por compresión.

Teniendo en cuenta la valoración de la célula actual del proceso, se hace un diagnóstico del nivel de automatización.

- **Realización del procedimiento de elaboración de probetas para ensayo de tensión.** Para establecer el porcentaje del nivel de automatización de la célula de proceso para la elaboración de probetas se tiene en cuenta cada fase del procedimiento y si es realizada de forma manual por el operario o por un equipo, (ver Tabla 9).

**Tabla 9.** Nivel de automatización de la célula de proceso de probetas.

Procedimiento de Unidad	Fases	Nivel de Automatización
Acondicionamiento de fique	Tomar una porción de fique	Manual
	Ubicar el fique sobre la guillotina	Manual
	Medir la longitud a cortar (20 cm)	Manual
	Cortar	Manual
	Adecuar equipo de molienda	Manual
	Conectar equipo de molienda a toma de 110v	Manual
	Tomar fique e ingresarlo a la boca del molino	Manual
	Moler fique	Semiautomática
	Conectar tamizador a toma de 110v	Manual
	Depositar fique molido en tamiz 80	Manual
	Armar y ajustar tamices al módulo de vibración	Manual
	Encender y tamizar (360 segundos)	Semiautomática
	Seleccionar fique de tamiz 60	Manual
Gelatinizado de harina de Yuca	Conectar medidor de humedad a toma de 110v	Manual
	Agregar de 1 a 4g de harina de yuca en la capsula	Manual
	Ingresar capsula al medidor de humedad	Manual
	Sensar y registrar porcentaje de humedad	Semiautomático
	Calcular balance de humedad	Manual
	Pesar <i>beaker1</i> y tarar	Semiautomático
	Agregar agua al <i>beaker1</i> y pesar la cantidad deseada	Manual
	Pesar <i>beaker2</i> y tarar	Semiautomático
	Agregar harina de yuca al <i>beaker2</i>	Manual
	Pesar la cantidad de harina de yuca deseada	Semiautomático
	Agregar el agua pesada en el fique pesado	Manual
	Mezclar	Manual
	Colocar sobre el soporte universal el calefactor	Manual
	Conectar el calefactor a un toma de 110v	Manual
	Sujetar recipiente metálico con las pinzas dentro del calefactor	Manual
	Agregar la mezcla en el recipiente metálico	Manual
	Encender el calefactor <i>turn on</i>	Manual
	Girar la perilla del calefactor	Semiautomático
	Superar los 55°C y medir con el termómetro	Manual
	Agitar la mezcla y regular la temperatura hasta gelatinizar	Manual
Mezclado	Pesar <i>beaker</i> y tarar	Manual
	Agregar el gel de yuca al <i>beaker</i> y pesar	Semiautomático
	Registrar peso y calcular balance de masa	Manual
	Pesar cápsula Petri y tarar	Semiautomático
	Verter glicerol en cápsula Petri	Manual
	Pesar glicerol deseado y tarar	Semiautomático
	Verter aceite vegetal en la capsula Petri	Manual
	Pesar aceite vegetal deseado y tara	Semiautomático
	Verter emulsionante en la capsula Petri	Manual
Pesar emulsionante deseado	Semiautomático	

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

	Pesar <i>beaker</i> y tarar	Semiautomático	
	Agregar fique al <i>beaker</i> y pesar la cantidad deseada	Semiautomático	
	Conectar el mezclador a un toma de 110V	Manual	
	Retirar la tapa del tazón del equipo mezclador	Manual	
	Verter el gel de yuca en el tazón	Manual	
	Subir la palanca que eleva el tazón	Manual	
	Encender mezclador y mezclar (Posición No 3)	Manual	
	Mezclado en vivo agregar fique al tazón	Semiautomático	
	Mezclar hasta obtener una masa	Semiautomático	
	Detener el mezclado y bajar la palanca que desciende el tazón	Manual	
	Dosificar aditivos directamente sobre la masa	Manual	
	Subir palanca y mezclar	Semiautomático	
	Detener mezcladora, bajar el tazón y tomar la materia prima	Manual	
	Mezclar manualmente comprimiendo y desprendiendo pedazos de masa repetidamente, hasta considerar una materia prima lista para ser moldeada	Manual	
Moldeado y dosificado	Amasar manualmente	Manual	
	Tomar porciones de masa y formar esferas de masa	Manual	
	Introducir las esferas en las cavidades del dosificador	Manual	
Prensado neumático y moldeo	Conectar prensa neumática a toma de 120 VAC	Manual	
	Limpiar moldes	Manual	
	Encender la prensa girando la llave maestra del panel de control	Manual	
	Validar credenciales de acceso a la unidad	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR"	Manual	
	Seleccionar modo de operación y la unidad de prensado neumático	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR"	Manual	
	Seleccionar parámetros de temperatura y tiempo de moldeo	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR" y alcanzar los valores de consigna	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR" para dosificar	Manual	
	Llevar dosificador hasta la prensa con las cavidades hacia arriba	Manual	
	Girar el dosificador hacia abajo	Manual	
	Ubicar el dosificador encima del molde hembra	Manual	
	Dosificar	Manual	
	Presionar el botón virtual "CONTINUAR" para cerrar el molde	Manual	
	Aplicar presión	Cerrar molde	Semiautomático
		Dejar conformar	
		Subir molde	Semiautomático
		Subir expulsor	Semiautomático
		Extraer la pieza moldeada	Manual

Fuente: El autor, diciembre de 2014.

- **Realización del procedimiento de elaboración de bandejas semirrígidas** Para establecer el porcentaje del nivel de automatización de la célula de proceso para la elaboración de bandejas se tuvo en cuenta si cada fase del procedimiento es realizada de forma manual por el operario o por un equipo. No se tuvo en cuenta las tres primeras etapas: Acondicionamiento del fique, gelatinización de la harina de yuca y mezclado que son comunes del proceso de moldeo por compresión, (ver Tabla 10).

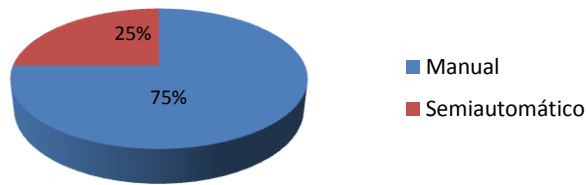
**Tabla 10.** Nivel de automatización de la célula de proceso de bandejas.

Procedimiento de Unidad	Fases	Nivel de Automatización	
Secado y Moldeado	Tomar una porción pequeña de masa	Manual	
	Agregar a la capsula la porción pequeña de masa	Manual	
	Ingresar la capsula al medidor de humedad	Manual	
	Sensar y registrar humedad	Semiautomático	
	Preparar horno a 80°C	Manual	
	Tomar porciones pequeñas de la masa y aplanarlas con los dedos	Manual	
	Depositar las porciones aplanadas en la bandeja metálica hasta Cubrirla	Semiautomático	
	Ingresar la bandeja en el horno y secar por 20 minutos	Semiautomático	
	Retirar bandeja y tomar una porción pequeña de masa	Manual	
	Sensar la humedad de la porción de masa y registrar	Semiautomático	
	Tomar las porciones de masa, comprimirlas y moldearlas manualmente hasta formar una única masa	Manual	
Moldear la masa con el rodillo hasta formar una lámina	Manual		
Prensado Hidráulico y moldeo	Conectar el panel principal a toma de 120 VAC	Manual	
	Limpiar moldes	Manual	
	Encender la prensa girando la llave maestra del panel de control	Manual	
	Validar credenciales de acceso a la unidad	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR"	Manual	
	Seleccionar modo de operación "Manual" y la unidad de prensado "Hidráulico"	Manual	
	Oprimir botón virtual "CONTINUAR"	Manual	
	Seleccionar el botón virtual "Temperatura Automática"	Manual	
	Seleccionar "Temperatura en la placa Superior/Inferior" e ingresar la Temperatura	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR" y alcanzar los valores de consigna	Manual	
	Oprimir botón "CONTINUAR" para dosificar	Manual	
	Llevar el material hasta la prensa manualmente	Manual	
	Ubicar el material encima del molde hembra	Manual	
	Dosificar	Manual	
	Cerrar molde oprimiendo el pulsador de descenso en el panel de control y activar cronometro	Semiautomático	
	Oprimir pulsador de elevación al momento que el molde superior toque el molde inferior para generar alivios de presión	Manual	
	Repetir los alivios de presión (subir y bajar el molde macho)	Manual	
	Aplicar moldeo	Cerrar el molde Dejar conformar	Semiautomático
	Presionar pulsador de ascenso del molde macho		Semiautomático
	Presionar el botón virtual "OK" para accionar el expulsor		Semiautomático
Extraer la pieza moldeada		Manual	

Fuente: El autor, diciembre de 2014.

**2.3.6 Informe estadístico del nivel de automatización de la célula de proceso de moldeo.** El nivel de automatización de la célula del proceso de moldeo por compresión en general. La célula tiene un nivel de automatización 75% manual, el operario es quien debe desarrollar la mayoría de las acciones que se llevan a cabo en los diferentes módulos que componen la célula aunque se dispone de instrumentación adecuada los dos módulos de equipo semiautomáticos (prensado y moldeo), es el operario quien toma la decisión de inicio y ejecución de las tareas por medio de una pantalla táctil HMI para ingresar parámetros y dar continuidad al proceso, (ver Figura 44).

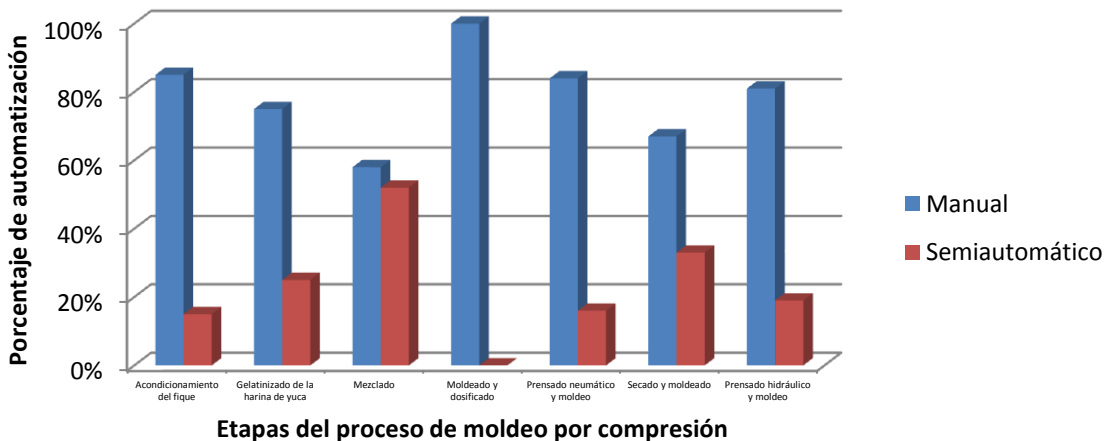
**Figura 44.** Nivel de automatización del proceso en general.



Fuente: El autor, diciembre de 2014.

A continuación se presenta el nivel de automatización de la célula de proceso separada por cada etapa que la compone, se observa que predomina el modo manual de operación pues, a pesar de que se dispone de elementos útiles para el desarrollo de las tareas, el operario es quien determina los tiempos de acción y la forma de llevar a cabo cada fase del procedimiento, (ver Figura 45). En la etapa de mezclado el modo semiautomático tiene alto porcentaje pues el operario no posee la capacidad de obtener una mezcla homogénea sin la ayuda del equipo mezclador y además se debe tener en cuenta que por seguridad el contacto físico con algunos de los aditivos debe ser mínimo. Opuesto a lo anterior, se observa en la etapa de moldeo y dosificado que el 100% de las actividades se llevan a cabo de forma manual, el operario es quien amasa y dispone del material en el elemento dosificador.

**Figura 45.** Nivel de automatización de la célula de proceso por etapas.



Fuente: El autor, diciembre de 2014.



A pesar que las etapas de prensado y moldeo (hidráulico o neumático) poseen módulos de equipo de prensado 100% disponibles y en favorable estado, las maniobras del operario son las que determinan el funcionamiento de las prensas, se necesita de la orden del usuario para seguir con cada fase del procedimiento operando desde los botones táctiles del panel de control HMI dispuesto en el armario 2 de mando.

**2.3.7 Requerimientos de automatización del proceso de moldeo por compresión.** Se determinaron los requerimientos de automatización (RAut) a nivel de laboratorio para el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables en Unicauca para complementar los modelos del proceso basados en la normatividad de ISA 88 (Modelos de proceso, físico y procedimental). Se propusieron modelos de récipes para un lote determinado, se realizó la cadena de valor del producto y bajo normas técnicas de automatización se realizaron P&IDs, PFDs, ILDs y Diagramas de mando y potencia.

**RAut1.** Definir la nueva etapa para el acondicionamiento de los equipos en los modelos de control procedimental basándose en la norma ISA 88.

**RAut2.** Modelar el récipe maestro y de control para el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables para un determinado lote de producto.

**RAut3.** Diseñar la cadena de valor para el proceso de elaboración de semirrígidos biodegradables en Unicauca.

**RAut4.** Definir las variables controladas, manipuladas y de disturbio que sean influyentes en el proceso de moldeo por compresión.

**RAut5.** Hacer uso de la norma ISA 5.1 para la elaboración de PFDs, P&IDs, ILDs. Además elaborar Diagramas de mando y potencia.

**RAut6.** Desarrollar una propuesta de Escalamiento para el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables, definiendo una línea de producción que asegure los requerimientos en la siguiente escala para la manufactura de los productos que se llevan a cabo en el Laboratorio de Reología y Empaques de Unicauca.

**2.3.8 Requerimientos de hardware para el proceso de moldeo por compresión.** Se proponen los siguientes requerimientos de hardware (RHw) de acuerdo a trabajos de investigación que se llevan a cabo en el Laboratorio de Reología y Empaques de Unicauca para elaborar productos semirrígidos biodegradables. Algunos de los requerimientos expuestos a continuación se encuentran en estudio para su posterior compra.

**RHw1.** Adquirir un equipo secador de rodillos para disminuir el número operaciones del proceso. Este equipo eliminaría la etapa de gelatinización de la harina de yuca.

**RHw2.** Reparar los moldes hembra y macho de la prensa hidráulica para un eficiente proceso de moldeo y extracción de la bandeja moldeada.

**RHw3.** Implementar un circuito eficiente de refrigeración sobre los moldes de la prensa hidráulica para lograr un choque térmico sobre el producto.

**RHw4.** Adquirir un equipo para la aplicación de un recubrimiento aislante de humedad sobre la bandeja semirrígida biodegradable para aumentar su vida útil.

**RHw5.** Adquirir un equipo de cómputo (monitor, CPU, teclado, mouse e impresora) para supervisión, reporte y registro del proceso de moldeo por compresión en tiempo real.

**RHw6.** Proponer la sustitución del controlador (PLC) para el proceso, debido a limitaciones del equipo actual, como la saturación de sus entradas y salidas lo que implicaría en la imposibilidad de implementar un nuevo control.

**2.3.9 Requerimientos de software del proceso de moldeo por compresión.** Se proponen algunos requerimientos de software (RSw) como el diseño de una interfaz gráfica HMI para monitorear algunas de las etapas del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables.

**RSw1.** Diseñar un sistema de monitoreo y supervisión para las etapas de prensado y moldeo del proceso de moldeo por compresión.

**RSw2.** Proponer modelos para la generación de reportes y el seguimiento de los parámetros del proceso de moldeo por compresión.

## CAPÍTULO 3. INGENIERÍA BÁSICA

### 3.1 CUMPLIMIENTO DE LOS REQUERIMIENTOS PROPUESTOS PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

El cumplimiento de los requerimientos expuestos en la sección anterior depende del desempeño en cada actividad propuesta en este trabajo de grado. Además se debe tener en cuenta el aporte del conocimiento que los investigadores tienen del proceso que se lleva a cabo en el Laboratorio de Reología y Empaques.

**3.1.1 Cumplimiento de requerimientos de automatización.** Para dar cumplimiento al RAut1, se modeló el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables de Unicauca. Para complementar los modelos desarrollados bajo el estándar ISA 88 en las secciones 2.1 y 2.2 se propone la adición de una nueva etapa denominada “Acondicionamiento de equipos”, (sección 3.2.1), la cual tendrá como fin el alistamiento de cada equipo y elemento necesario en la ejecución del procedimiento, además evitar posibles daños a los equipos, fallas en las operaciones, riesgos para el operario y resultados inesperados de producto terminado.

Para el RAut2, se elaboraron los modelos de récipe basados en la norma ISA 88, (sección 3.2.2), los cuales se desarrollaron para cierta cantidad de lote a producir. La cadena de valor se diseñó para el proceso a nivel de laboratorio para dar cumplimiento al RAut3, (sección 3.2.3), con el fin de dar valor al trabajo realizado por los investigadores transformando materiales naturales y aditivos en semirrígidos biodegradables.

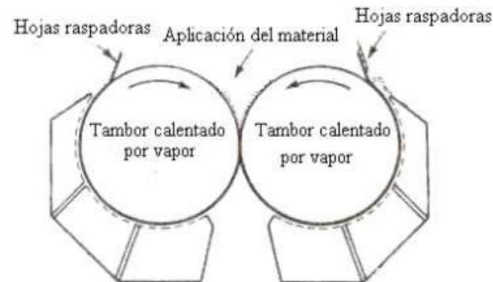
Se realizaron planos bajo normas técnicas de automatización para mostrar los flujos de materiales en el proceso, instrumentación y tuberías, lazo de instrumentos y diagramas de mando y potencia con el fin de dar cumplimiento al RAut4. Se identificaron y se analizaron las variables que influyen en el proceso y así se cumplió con el RAut5 y finalmente para el RAut6 se realizó un estudio de gestión tecnológica para llevar a un nivel piloto el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables del laboratorio de Reología y Empaques.

**3.1.2 Cumplimiento de requerimientos de hardware.** Se propusieron soluciones de hardware para ser atendidas y se sometieron a estudio de manera que se llegó a un acuerdo de pertinencia y factibilidad por parte del grupo y del proyecto de investigación.

- **RHw1. Adquirir equipo secador de rodillos.** Para cumplir con este requerimiento, se propuso un equipo que posee características necesarias para los estudios a nivel de laboratorio. El secador de rodillos es un equipo de secado por contacto, con una superficie caliente, la cual aporta el calor por conducción. Llamado también secador de película. Este tipo de secador se considera indirecto y continuo, ya que el calor de secado se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento y la velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material húmedo y la superficie caliente [18].

Las variables de proceso manipuladas en el equipo son: velocidad de rotación de los rodillos y concentración de sólidos en la muestra, mientras que las variables fijas son: separación entre rodillos y temperatura del vapor [18], (ver Figura 46).

**Figura 46.** Diagrama de un secador de rodillos.



Fuente: Tomado de [18], enero de 2015.

Características del secador:

- El interior de los cilindros se calienta con vapor, agua o algún otro medio.
- En el caso de trabajar con productos termosensibles se puede operar con tambores en cámaras herméticas a vacío [19].

Se propuso un secador de tambor FT32 a escala de laboratorio diseñado para la investigación en diferentes industrias, (ver Figura 47). El FT32 puede ser utilizado tanto en la enseñanza como en el desarrollo de productos, demostrando muchas de las aplicaciones del secado por tambor o rodillos [20].

**Figura 47.** Secador de tambor FT32.



Fuente: Tomado de [20], enero de 2015.

El secador es del fabricante *armfield* que diseña y fabrica equipos para la enseñanza e investigación de la ingeniería. Especificaciones del equipo, remitirse al Anexo D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS PARA CUMPLIMIENTO DE RHW, sección 4.1.

- **RHw2. Reparar moldes hembra y macho de la prensa hidráulica.** Para dar solución a este requerimiento se propuso al grupo de investigación que se efectuara la reparación de los moldes que se encuentran en uso, lo ideal es que fueran recubiertos de teflón .Se

busca con este requerimiento que la etapa de prensado y moldeo termine en las mejores condiciones para la bandeja, debido a que en este momento se presenta un desgaste del material antiadherente de los moldes lo que hace que el producto quede pegado en la parte macho.

- **RHw3. Implementar un sistema de enfriamiento para realizar un choque térmico sobre el producto.** Se sugiere implementar un sistema complementario de enfriamiento, un choque térmico que solo afecte al producto evitando bajar la temperatura de las placas. Para ello se recomienda un equipo que inyecte presión de aire frío sobre la bandeja al momento de finalizar el conformado, un inyector de aire frío 6910.15, (ver Figura 48).

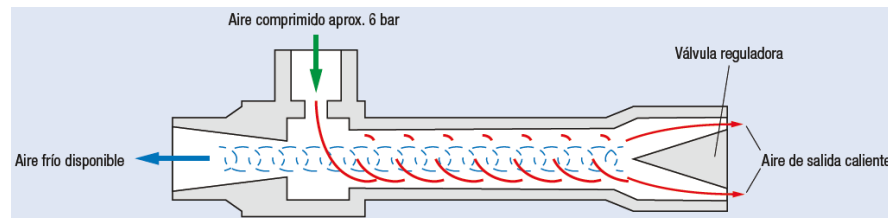
**Figura 48.** Inyector de aire frío 6910.15.



Fuente: Tomado de [21], enero de 2015.

El funcionamiento del inyector de aire frío se basa en el principio del vórtice tubular, en el que se producen dos corrientes de aire rotatorias en marcha contraria (sin componentes móviles). De un extremo sale la corriente interior como aire frío útil hasta  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , (ver Figura 49). Se necesita una fuente de aire comprimido [21].

**Figura 49.** Funcionamiento del inyector de aire frío.



Fuente: Tomado de [21], enero de 2015.

Para conocer las especificaciones técnicas de algunas partes del equipo inyector de aire frío, remitirse al Anexo D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS PARA CUMPLIMIENTO DE RHW, sección 4.2.

- **RHw4. Adquirir un sistema para la aplicación de un recubrimiento aislante de humedad sobre las bandejas.** Los investigadores que trabajan en el proceso de moldeo por compresión, estudian que la bandeja semirrígida mantenga las condiciones adecuadas por un tiempo prudencial después de fabricación, debido a que es un producto biodegradable, elaborado a base de materiales naturales, también se espera que sea durable para efectos de almacenamiento y distribución a gran escala. Se recomienda adquirir un equipo que aplique un revestimiento de una capa fina aislante de humedad a los productos. Un equipo para este fin fue dispuesto en calidad de préstamo por parte de

la empresa fabricante a CYTBIA, un AUTOJET Modelo 1550+Sistema Modular de Spray, (ver Figura 50), con control de flujo por PWM, boquillas de pulverización accionados eléctricamente que se encienden y apagan rápidamente para controlar el caudal. Este ciclo es tan rápido que el flujo a menudo parece ser constante [22].

**Figura 50.** AUTOJET Modelo 1550+Sistema Modular de Spray.

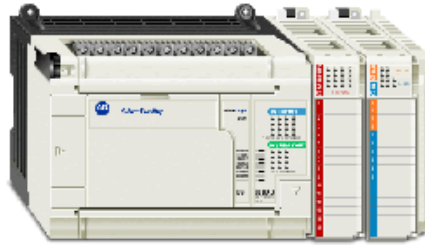


Fuente: Tomado de [22], enero de 2015.

Para conocer las especificaciones técnicas del AUTOJET Modelo 1550, remitirse al Anexo D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS PARA CUMPLIMIENTO DE RHW, sección 4.3.

- **RHw5. Adquirir equipo de cómputo.** Con el fin de tener una base de datos de reportes y registros de actividades del proceso, visualización en interfaces hombre máquina e información detallada de los procedimientos se ve la necesidad de adquirir un computador de mesa capaz de almacenar y gestionar información necesaria del proceso y que funcione eficazmente ante cambios que se realicen durante el proceso. En este caso se propone un Computador de Mesa *Dell INTEL CORE I3*, pantalla: 19", RAM: 4GB DDR3, Disco Duro: 1TERA, Accesorios e Impresora HP1515.
- **RHw6. Reemplazar el PLC.** Para las unidades de prensado y moldeo del proceso de moldeo se requiere mantener las variables controladas mediante un dispositivo electrónico robusto que pueda ser programado por el usuario y resolver problemas de la secuencia del proceso, ahorrando costos de mantenimiento y aumentando la confiabilidad de las prensas. El actual armario de control de las unidades en mención está soportado alrededor de un PLC FP-X C30R de PANASONIC que en la actualidad está sobresaturado, es decir que no tiene capacidad de funcionamiento, adicionalmente el fabricante ofrece precarias herramientas de programación, pobre documentación técnica del mismo y se han encontrado errores en algunos de sus algoritmos. Se propone adquirir un nuevo PLC común para estudios de investigación en laboratorio y en la industria, un *MicroLogix 1500* de *Allen Bradley*, (ver Figura 51). Este puede acceder a *Ethernet* mediante conexión con el módulo ENI (*Ethernet Network Interface*) [23].

**Figura 51.** *MicroLogix 1500* de *Allen Bradley*.



Fuente: Tomado de [23], enero de 2015.

Para conocer las especificaciones importantes de los diferentes componentes que forman el controlador *MicroLogix 1500*, remitirse al Anexo D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS PARA CUMPLIMIENTO DE RHW, sección 4.4.

**3.1.3 Cumplimiento de requerimientos de software.** Se proponen soluciones software al grupo de investigación, deberán ser atendidos y se someterán a estudio de manera que se llegue a un acuerdo de pertinencia y factibilidad por parte del grupo y del proyecto de investigación.

- **RSw1. Diseño del sistema de monitoreo y supervisión.**

Especificación de los componentes software:

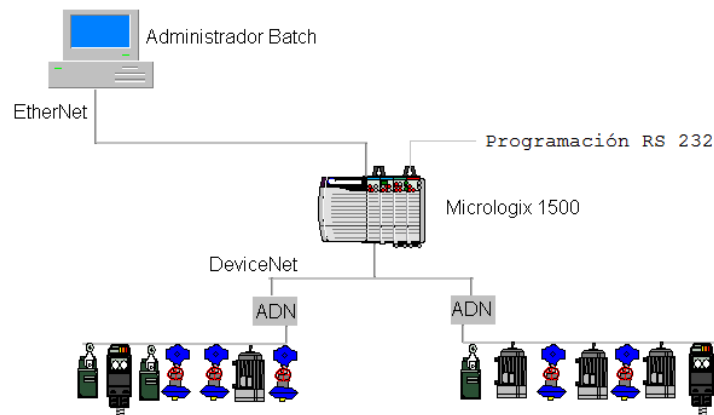
- **Configuración de redes:** Para configurar la red *DiveceNet* se utiliza el programa *RSNetWorkx*, esta aplicación de *Rockwell Software*, es la utilizada para trabajar con PLC *AllenBradley* mediante una interfaz gráfica que permite representar todos los elementos de la red, las direcciones de los nodos y las características de la transmisión.
- **Programación:** Para la programación del controlador se usa el software *RSLogix 500* de *Rockwell Software*. En donde al tener el puerto serial del PLC en utilización, esta programación es directa.
- **Supervisión y Gestión de procesos:** Para la supervisión y el control de este proceso, se propone *RsView 32* el cual es un software para procesos *batch* creado por *AllenBradley* que permite la creación y ejecución de interfaces graficas a distancia con los distintos dispositivos en campo.

Definición de protocolos de comunicación:

- **Red de dispositivos:** Para la comunicación entre los instrumentos y el PLC, se usa una red de bus de campo. Por esta razón se escoge una comunicación *DiveceNet*. La red *DeviceNet* es una red de control determinística que conecta dispositivos con los PLC mediante escaneo *DeviceNet*, tiene un módulo en el PLC que actúa como maestro llamado SDN (*Scanner DeviceNet*) y en cada nodo de la red se tienen elementos esclavos llamados ADN (*Adaptador DeviceNet*). Esta red puede tener hasta 64 nodos con velocidades de 125 kbps a 500 kbps.

- **Red de Control:** Para la red de control se usa comunicación RS-232, esta permite la conexión del PLC con el puerto serial para una programación de manera directa, también permite transmisiones simultáneas entre dos dispositivos en ambas direcciones.
- **Red de Gestión:** Para la red de gestión se utiliza una comunicación *EtherNet*, en donde el PLC estará comunicándose con la computadora mediante ésta utilizando un convertidor. Se sugiere esta red por su facilidad de manejo.
- **Arquitectura del sistema SCADA.** *Supervisory Control And Data Acquisition* (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), es una aplicación de software con acceso a planta mediante comunicación digital con los diferentes instrumentos que ofrece una interfaz gráfica de alto nivel con el usuario. Suponen la evolución hacia los sistemas de control basados en PC el cual proporciona muchas utilidades a nivel de gestión de datos, visualización, trabajo en red, no obstante el control directo lo continúan realizando los reguladores autónomos junto con los PLCs debido a posibles problemas de seguridad, robustez, tiempo real [24]. Se propone un diseño del sistema SCADA, (ver Figura 52), para la etapa de prensado y moldeo del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables de Unicauca.

**Figura 52.** Arquitectura SCADA del sistema.



Fuente: El autor, enero de 2015.

### 3.2 DISEÑO DE MODELOS DE REPORTE PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

Para complementar la propuesta de diseño de un sistema de monitoreo, se propone un modelo de reportes para el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables, organizado acorde con las etapas del proceso representativas de la célula de moldeo, indicando las actividades con su respectivo registro de información, determinando las variables y parámetros de la transformación de materias primas intermedias, con la finalidad de localización rápida del registro y obtener calidad del producto, (ver Figura 53).





para el registro de los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio. Se presenta el listado de hojas Excel de registros propuestos, (ver Tabla 11).

**Tabla 11.** Listado de libros Excel de registro de información.

Libro de proceso	Hoja Excel	Extensión
1-Recepción de pedidos MP	Orden de compra de materiales	.xlsx
2-Elaboración de probetas	Seguimiento de parámetros para probetas	.xlsx
3-Elaboración de bandejas	Seguimiento de parámetros para bandejas	.xlsx

Fuente: El autor, febrero de 2015.

**3.2.1 Modelo de orden de compra de materiales.** En el modelo de orden de compra de materiales se registra la información de los proveedores de la materia prima, fecha y hora de compra de compra, cantidades y precios de los insumos teniendo en cuenta impuestos de valor agregado, el valor total, firma del empleado y su número de identificación, (ver Figura 54).

**Figura 54.** Modelo de orden de compra de materiales.

PROYECTO "INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE EMPAQUES BIODEGRADABLES"			
Elaboración de semirrigidos			
			<b>ORDEN DE COMPRA</b>
[Nombre proveedor]	:		Fecha:
[Nombre de la empresa u origen]	:		
[Dirección]	:		Hora:
[Barrio]	:		
[Ciudad]	:		Autorizado por:
[Teléfono]	:		
[Producto]	:		Transporte:
<b>Emitido para:</b>			
[Laboratorio de Reología y Empaques Universidad del Cauca Facultad de Ciencias Agrarias]			
[Nombre de Operario]	:		
COMPONENTE	UNIDADES	PESO/kg	PRECIO
Harina de yuca			
Fardo de Fique			
Emulsionante			
Plastificante Glicerol			
Aceite vegetal			
		Subtotal	\$
		IVA	
		Otros	
		<b>Total</b>	<b>\$</b>
<b>Firma del empleado</b>			
C.C.:			
El número de la orden de compra debe aparecer en todas las facturas y correspondencia.			

Fuente: El autor, febrero de 2015.

**3.2.2 Modelo de seguimiento de parámetros de proceso.** En este modelo se escriben reportes de cada parámetro por operaciones del proceso, se realizan dos hojas Excel para diferenciar elaboración de probetas y bandejas, (ver Figura 55).

**Figura 55.** Modelo de seguimiento de parámetros de proceso.

ELABORACIÓN DE BANDEJAS SEMIRRÍGIDAS					
[Nombre operario]					
[Fecha]					
[Hora de inicio]					
[Hora finalización]					
TABLA DE REGISTRO DE MEDICIÓN DE PARAMETROS DEL MOLDEO POR COMPRESIÓN DE BANDEJAS					
ETAPA	OPERACIÓN	PARÁMETROS			
Acondicionamiento de fique	Cortar	Fique (cm)			
	Moler	Fique (mm)			
	Tamizar	Fique (micras)			
Gelatinización	Medir humedad	Humedad (%)	Harina de yuca prueba de humedad (g)		
	Mezclar en frío	Agua (ml)	Harina de Yuca (g)		
	Gelatinizar	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Gelatina(g)	
Mezclar	Pesar aditivos	Glicerol (g)	Aceite (g)	Emulsionate (g)	Fique (g)
	Mezclar	Tiempo (s)			
Secado y moldeado	Secado	Humedad inicial (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Humedad final (%)
	Moldeado	Masa (g)			
Prensado Hidráulico y Cocción	Precalear	Temperatura (°C)			
	Disponer Material	Dimensiones (cm <sup>2</sup> )			
	Comprimir material	Presión (bar)	Tiempo (s)		
	Expulsar bandejas	Peso (g)	Presión (bar)		

Fuente: El autor, febrero de 2015.

Para mayor detalle de los modelos en formatos Excel, remitirse al Anexo Digital A: DISEÑO DE MODELOS DE REPORTES, presente en el CD.

### 3.3 COMPLEMENTO MODELADO ISA 88 DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

En el capítulo 2 se realizó un modelado preliminar del proceso de moldeo bajo la norma ISA-88 el cual arrojó resultados satisfactorios teniendo en cuenta que no existía una secuencia ordenada de actividades a realizar para elaborar probetas para ensayo de tensión o bandejas semirrígidas biodegradables. Se pretende dar fin al modelado propuesto con la realización de una etapa que complementará el proceso de moldeo por compresión, definiendo acciones de proceso que aporten al uso adecuado de los equipos necesarios en cada operación evitando daños a los mismos, fallas en las operaciones, riesgos para el operario y resultados inesperados del producto.

**3.3.1 Modelado etapa “Acondicionamiento de equipos” del proceso de moldeo por compresión.** La etapa “Acondicionamiento de Equipos” se plantea como consecuencia de un deficiente cuidado en la limpieza de equipos usados durante el proceso y en ocasiones no se encuentran disponibles en el laboratorio. En ese sentido se realizó el modelado de la nueva etapa uniendo los dos productos (bandejas o probetas para ensayo de tensión) en un solo proceso que se ha denominado *Moldeo por Compresión de Materiales Biodegradables*. Se propone el Modelo de Proceso para determinar las acciones que se deben llevar a cabo antes de usar los equipos en el proceso de producción, (ver Tabla 12).

**Tabla 12.** Modelado de la etapa “Acondicionamiento de equipos”.

Proceso	Etapa	Operación	Acción		
Moldeo por compresión de materiales biodegradables	Adecuación de Equipos	Disposición de equipos y elementos	Disponer de guillotina		
			Disponer de equipo para molienda	Solicitud de equipo a la planta piloto de alimentos Tiempo mínimo de disposición: 1 (una) hora	
			Disponer de equipo tamizador	Aseguramiento del módulo de vibración	
			Disponer de medidor de humedad		
			Disponer de horno industrial		
			Disponer de 1 cápsula metálica		
			Disponer de 4 <i>beaker</i>		
			Disponer de balanza electrónica		
			Disponer de recipiente metálico		
			Disponer de pinzas y soporte universal		
			Disponer de equipo calefactor	Solicitud de equipo al laboratorio de biotecnología Tiempo mínimo de disposición: 2 (dos) horas	
			Disponer de soporte universal y dos pinzas		
			Disponer de 1 mixer		
			Disponer de 1 termómetro		
			Disponer de 2 cápsulas Petri		
			Disponer de equipo mezclador		
			Disponer de bandeja metálica		
			Disponer de rodillo de cocina		
			Disponer de mascara		
			Disponer de cronómetro		
		Disponer de dosificador			
		Disponer de tela			
		Disponer de guantes			
		Disponer de agua			
		Disponer de jabón			
		Limpieza de equipos	Limpieza de equipos	Limpieza de equipos	Limpieza de equipos
			Limpieza de equipos	Limpieza de equipos	Limpieza de equipos
			Limpieza de equipos	Limpieza de equipos	Limpieza de equipos
			Limpieza de equipos	Limpieza de equipos	Limpieza de equipos
			Limpieza de equipos	Limpieza de equipos	Limpieza de equipos
Limpieza de equipos	Limpieza de equipos		Limpieza de equipos		

				Secar completamente
			Limpiar recipiente del mezclador	Lavar con agua y jabón
				Secar completamente
			Limpiar cavidades del dosificador	Retirar residuos de masa con tela seca
			Limpiar bandeja metálica	Retirar residuos de masa con tela seca
			Limpiar moldes de la prensa	Retirar residuos con tela seca
		Lubricación de prensas		Lubricar barras de desplazamiento de la prensa neumática
				Lubricar barras de desplazamiento de la prensa hidráulica

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.3.2 Modelos de récipes del proceso de moldeo por compresión.** Un producto puede hacerse en arreglos diferentes de equipo en sitios diferentes. Los récipes que son apropiados para un sitio o conjunto de equipos pueden no serlo para otro sitio o conjunto de equipos. Esto puede resultar en múltiples Récipes para un solo producto. Debe haber suficiente estructura en la definición de las Récipes para permitir el seguimiento de la genealogía de cualquier récipe determinada [17]. El récipe no contiene el control ni la programación de los equipos. El récipe contiene información relacionada con el proceso de un producto específico. Esto permite que los equipos de un proceso por lotes sirvan para hacer productos diferentes sin tener que afinar el control de los equipos para cada producto. Hay una diferencia sustancial entre los récipes generales / sitio y récipes maestro / control. Los récipes generales y de sitio describen la técnica, es decir, cómo hacerlo, en principio. Los récipes maestros y de control describen las tareas, es decir, cómo hacerlo con los recursos actuales [17].

Para el proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables de Unicauca (elaboración de probetas para ensayo de tensión y bandejas semirrígidas biodegradables) se realizó el modelado de los récipes maestros y de control.

**3.3.3 Modelo de récipe maestra para el proceso de elaboración de probetas.** El récipe maestro es el nivel de récipe que está dirigida a una celda de proceso o un subconjunto de los equipos de celda de proceso. Un récipe maestro se puede derivar de un récipe general o un récipe de sitio. También puede ser creada como una entidad independiente si el creador del récipe tiene el proceso necesario y el conocimiento del producto [17]. Los parámetros del proceso se toman a partir de cada operación del proceso de elaboración de probetas, (ver Tabla 13).

**Tabla 13.** Récipe maestra para el proceso de elaboración de probetas.

<b>RÉCIPE MAESTRO</b>	
<b>PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS</b>	
<b>VERSION 1.0</b>	
<b>AUTORES:</b> Walter Fabián Pabón Juan Manuel Ordóñez	
<b>LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN:</b> Popayán, febrero 23 de 2015	
<b>FÓRMULA</b>	
<b>Entradas de Proceso</b>	Harina de yuca

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

	Fibra de fique	
	Plastificante Glicerol USP	
	Aditivos	
	Aceite vegetal	
	Tween 80 Fisher	
<b>Producto en Proceso</b>	Masa de harina de yuca, fibra de fique y aditivos	
<b>Parámetros de Proceso por operaciones</b>	<b>Operación</b>	
	<b>Parámetro</b>	
	Cortar fique	Longitud de hilo
	Moler fique	Tamaño de partícula
	Tamizar fique	Tamaño de partícula
	Medir humedad	% de humedad
	Mezclar en frío	Peso de agua
		Peso de harina
	Gelatinizar	Temperatura
		Tiempo
	Pesar aditivos	Peso de aditivo
	Mezclar materiales	Tiempo
	Moldear y dosificar	Cantidad
	Precalear moldes	Temperatura
Comprimir	Presión	
Expulsar	Presión	
<b>Salidas de Proceso</b>	Probetas para ensayo de tensión	
<b>REQUERIMIENTOS DE EQUIPOS</b>		
	Cortador	
	Molino	
	Tamizador	
	Medidor de humedad	
	Balanza electrónica	
	Calefactor	
	Mezclador	
	Dosificador	
	Prensa neumática	

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.3.4 Modelo de récipe de control para el proceso de elaboración de probetas.** El récipe de control inicia como una copia de una versión específica de una Récipe maestra y se modifica a continuación según sea necesario con la programación y la información operativa que es específica para un solo lote. Contiene información de proceso específico del producto necesaria para la fabricación de un lote particular de producto. Puede que el récipe se modifique para tener en cuenta las cualidades de la materia prima y equipos concretos reales que se utilizarán. La selección de las unidades y de tamaño apropiado puede hacerse en cualquier momento antes de que se necesite información [17].

Puesto que las modificaciones de una Récipe de control se pueden realizar en un período de tiempo basado en la programación, el equipo, y de información del operador, una Récipe de control puede pasar por varias modificaciones durante el procesamiento por lotes [17].

Se realiza el modelo de Récipe de control para el proceso de elaboración de probetas para ensayo de tensión, el lote a considerar será de seis (6) probetas en moldes que cumplen con la norma internacional ASTM D 638. Se tiene en cuenta especificaciones de las entradas de proceso como materiales, variedad, cantidad necesaria para elaborar dicho lote y unidades, además especificaciones de requerimientos de equipos como marca, capacidades, material de fabricación y rangos de operación, (ver Tabla 14).

**Tabla 14.** Récipe de control para el proceso de elaboración de probetas.

<b>RÉCIPE DE CONTROL</b>			
<b>PROCESO DE ELABORACIÓN DE PROBETAS</b>			
<b>VERSION 1.0</b>			
<b>AUTORES:</b> Walter Fabián Pabón Juan Manuel Ordóñez			
<b>LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN:</b> Popayán, febrero 23 de 2015			
<b>FORMULA</b>			
<b>Entradas de Proceso</b>	<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
	Harina de yuca (Variedad MPER 183)	86	g
	Fibra de fique (Variedad Uña de Águila)	40.5	g
	Plastificante Glicerol USP comercial, pureza 99% (Sigma-Aldrich®)	3.8	g
	Aceite vegetal de oliva ( <i>Olivetto®</i> )	1.9	g
	Emulsionante <i>Tween 80 Fisher (BioReagents®)</i>	1.9	g
	Agua potable	313	g
<b>Producto en Proceso</b>	Masa (mezcla de harina de yuca, fibra de fique, agua y aditivos)	200	g
<b>Parámetros de Proceso por operaciones</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
	Longitud de hilo de fique	20	cm
	Tamaño de partícula de fique molido	2	mm
	Tamaño de partícula de fique tamizado	250	µm
	Peso de harina de yuca para prueba	1.34	g
	Porcentaje de humedad de harina de yuca	7.68	%
	Temperatura de pre-gelatinizado	75	°C
	Temperatura de gelatinizado	80	°C
	Tiempo de gelatinizado	12	min
	Peso harina de yuca gelatinizada	150	g
	Tiempo de mezclado de materiales	3.16	s
	Tiempo de moldeado manual	2	min
	Peso de masa dosificada	60	g
	Área de masa dosificada	144	cm <sup>2</sup>
	Temperatura de moldes	175	°C
	Presión de compresión	80	bar
Tiempo de compresión	2	min	
Presión de expulsión	2	MPa	
<b>Salidas de Proceso</b>	6 (seis) probetas de 3 mm de espesor para ensayo de tensión		
<b>REQUERIMIENTOS DE EQUIPOS</b>			
<b>Equipo</b>	<b>Especificación</b>		
Cortador	Guillotina de dimensiones 30 cm x 40 cm		
Molino	Penagos TP-8 de 8 martillos, con motor de 2-3 HP, RPM del rotor 3200-3500, capacidad 50-300 kg/h		
Tamizador	Motor 1/3 HP marca Siemens 110 V 480 W, capacidad 3 tamices y base, temporizador digital de 999 segundos o minutos, sistema de tamizado por medio de una leva para una vibración horizontal y vertical, sistema montado sobre rodamientos para un mínimo de ruido, dimensiones: 43x75x30 cm, peso: 24.5 kg		
Medidor de humedad	<i>Precisa XM60</i> con fuente de calefacción halógena, con sensor de humedad, rango de T° 30-230 °C, plato de aluminio		
Balanza electrónica	<i>VIBRA SJ</i> , sensor de peso de diapasón de Mono-Metal, capacidad 12000 g, legibilidad 0.01 g		
Calefactor	<i>Heidolph</i> , con recipiente metálico de capacidad 4.5 L, sensor de T° rango 20-210°C, resistencias calefactoras, variador de potencia (1300 W)		
	Soporte universal de hierro de 1 m de altura y pinzas de hierro		
	Agitador de vidrio de 20 cm		
	Termómetro de mercurio		

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

Mezclador	<i>KitchenAid PROFESSIONAL 600</i> con motor de 575 W, sensor electrónico de velocidad, tazón de acero inoxidable con capacidad 5.5 L
Dosificador	Elaborado en hierro a la medida de los moldes de la probeta que cumplen con la norma ASTM D 638.
Compresor	<i>Porter Cable</i> con capacidad de 6 galones, de 0.8 HP, presión del tanque max 150 PSI, motor trifásico de 120 V
Prensa neumática	Manómetro de presión
	Válvula 5/2 vías -Cilindro compresor- FESTO referencia MFH-5-1/8, máxima presión 120 PSI
	Válvula 5/2 vías -Cilindro Expulsor- FESTO referencia MFH-5-1/8, máxima presión 120 PSI
	Válvula manual reguladora de ascenso en el cilindro compresor
	Válvula manual reguladora de descenso en el cilindro compresor
	Válvula manual reguladora de ascenso en el cilindro expulsor
	Válvula manual reguladora de descenso en el cilindro expulsor
	Moldes de hierro que cumplen con la norma ASTM D 638 para las probetas
	Cuatro (4) resistencias de calefacción tipo cartucho de acero inoxidable y alambre de ferro-níquel, coeficiente de resistividad de $0.86 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ , potencia 300 W
	Termocuplas Tipo J, rango 0 - 427°C

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.3.5 Modelo de récipe maestra para el proceso de elaboración de bandejas.** Se debe tener en cuenta que en los récipes para la elaboración de bandejas, las entradas de proceso son las mismas entradas del proceso de elaboración de probetas, puesto que son materias primas comunes para ambos productos, la variación está en el requerimiento de equipo que se tiene actualmente para la elaboración del producto. Los parámetros de proceso se analizaron de acuerdo a cada operación del proceso productivo, (ver Tabla 15).

**Tabla 15.** Récipe maestra para el proceso de elaboración de bandejas.

<b>RÉCIPE MAESTRO</b>		
<b>PROCESO DE ELABORACIÓN DE BANDEJAS</b>		
<b>VERSION 1.0</b>		
<b>AUTORES:</b> Walter Fabián Pabón Juan Manuel Ordóñez		
<b>LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN:</b> Popayán, febrero 23 de 2015		
<b>FÓRMULA</b>		
<b>Entradas de proceso</b>	Harina de yuca	
	Fibra de fique	
	Plastificante Glicerol USP	
	Aditivos	Aceite vegetal Emulsionante
<b>Producto en proceso</b>	Masa de harina de yuca, fibra de fique y aditivos	
<b>Parámetros de proceso</b>	<b>Operación</b>	
	<b>Parámetro</b>	
	Cortar fique	Longitud de hilo
	Moler fique	Tamaño de partícula
	Tamizar fique	Tamaño de partícula
	Medir humedad	% de humedad
	Mezclar en frío	Peso de agua
		Peso de harina
	Gelatinizar	Temperatura
		Tiempo
Pesar aditivos	Peso de aditivo	
Mezclar materiales	Tiempo	



**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

	Moldear y dosificar	Cantidad
	Precalentar moldes	Temperatura
	Comprimir	Presión
	Expulsar	Presión
<b>Salidas de proceso</b>	Bandeja semirrígida biodegradable	
<b>REQUERIMIENTOS DE EQUIPOS</b>		
	Cortador	
	Molino	
	Tamizador	
	Medidor de humedad	
	Balanza electrónica	
	Calefactor	
	Mezclador	
	Horno	
	Rodillo	
	Prensa hidráulica	

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.3.6 Modelo de récipe de control para el proceso de elaboración de bandejas.** Se realiza el modelo de récipe de control para el proceso de elaboración de bandejas, el lote a considerar será de 3 (tres) bandejas de 20 g y 2 mm de espesor. Se tiene en cuenta especificaciones de las entradas de proceso como materiales, su variedad, cantidad necesaria para elaborar dicho lote y las unidades, además algunas especificaciones de requerimientos de equipos como marca, capacidades, material de fabricación y rangos de operación, (ver Tabla 16).

**Tabla 16.** Récipe de control para el proceso de elaboración de bandejas.

<b>RÉCIPE DE CONTROL</b>			
<b>PROCESO DE ELABORACIÓN DE BANDEJAS</b>			
<b>VERSION 1.0</b>			
<b>AUTORES:</b> Walter Fabián Pabón Juan Manuel Ordóñez			
<b>LUGAR Y FECHA DE EXPEDICIÓN:</b> Popayán, febrero 23 de 2015			
<b>FÓRMULA</b>			
<b>Entradas de proceso</b>	<b>Material</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
	Harina de yuca (Variedad MPER 183)	86	g
	Fibra de fique (Variedad Uña de Águila)	40.5	g
	Plastificante Glicerol USP comercial, pureza 99% ( <i>Sigma-Aldrich®</i> )	3.8	g
	Aceite vegetal de oliva ( <i>Olivetto®</i> )	1.9	g
	Emulsionante <i>Tween 80 Fisher (BioReagents®)</i>	1.9	g
	Agua potable	313	g
<b>Producto en proceso</b>	Bandeja semirrígida biodegradable		
<b>Parámetros de proceso por operaciones</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
	Longitud de hilo de fique	20	cm
	Tamaño de partícula de fique molido	2	mm
	Tamaño de partícula de fique tamizado	250	µm
	Peso de harina de yuca para prueba	1.34	g
	Porcentaje de humedad de harina de yuca	7.68	%
	Temperatura de pre-gelatinizado	75	°C
	Temperatura de gelatinizado	80	°C
	Tiempo de gelatinizado	12	min
	Peso harina de yuca gelatinizada	150	g
	Tiempo de mezclado de materiales	3.16	s

**PROPUESTA DE AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE MATERIALES BIODEGRADABLES DEL LABORATORIO DE REOLOGÍA Y EMPAQUES DE LA UNIVERSIDAD DEL CAUCA.**

	Tiempo de moldeado manual	2	min
	Peso de masa dosificada	60	g
	Área de masa dosificada	144	cm <sup>2</sup>
	Temperatura de moldes	175	°C
	Presión de compresión	80	bar
	Tiempo de compresión	2	min
	Presión de expulsión	2	MPa
<b>Salidas de proceso</b>	3 (tres) bandejas semirrígidas biodegradables		
<b>REQUERIMIENTOS DE EQUIPOS</b>			
<b>Equipo</b>	<b>Especificación</b>		
Cortador	Guillotina de dimensiones 30 cm x 40 cm		
Molino	Penagos TP-8 de 8 martillos, con motor de 2-3 HP, capacidad 50-300 kg/h		
Tamizador	Motor 1/3 hp marca Siemens 110 V 480 W, capacidad 3 tamices y base, temporizador digital de 999 segundos o minutos, sistema de tamizado por medio de una leva para una vibración horizontal y vertical, sistema montado sobre rodamientos para un mínimo de ruido, dimensiones: 43x75x30 cm, peso: 24.5 kg		
Medidor de humedad	<i>Precisa XM60</i> con fuente de calefacción halógena, con sensor de humedad, rango de T° 30-230 °C, plato de aluminio		
Balanza electrónica	<i>VIBRA SJ</i> , sensor de peso de diapason de Mono-Metal, capacidad 12000 g, legibilidad 0.01 g		
Calefactor	<i>Heidolph</i> , con recipiente metálico de capacidad 4.5 L, sensor de T° rango 20-210°C, resistencias calefactoras, variador de potencia (1300 W)		
	Soporte universal de hierro de 1 m de altura y pinzas de hierro		
	Agitador de vidrio de 20 cm		
	Termómetro de mercurio		
Mezclador	<i>KitchenAid PROFESSIONAL 600</i> con motor de 575 W, sensor electrónico de velocidad, tazón de acero inoxidable con capacidad 5.5 L		
Horno	<i>Memmert ULP 700</i> de acero inoxidable, rango de T° 200 °C, sensor de °T, capacidad 120 Kg, corriente 5.8 A, 4kW		
Rodillo	Madera cilíndrica de 30 cm		
Prensa hidráulica	Indicador de nivel		
	Motor eléctrico de tres fases		
	Válvula de control de flujo hidráulico - cilindro superior		
	Válvula de control de flujo hidráulico - cilindro inferior		
	Válvula de control de flujo hidráulico de alivio		
	Válvula de control de presión total		
	Válvula de control de flujo total		
	Preostato		
	Manómetro del distribuidor		
	Sensores fin de carrera		
	Sensor de presión		
	Moldes de hierro en forma de bandeja		
	Placas de calentamiento		
	Cuatro (4) resistencias de calefacción tipo cartucho de acero inoxidable y alambre de ferro-níquel, coeficiente de resistividad de 0.86 Ω mm <sup>2</sup> /m, potencia 300 W		
Termocuplas Tipo J, rango 0 - 427°C			

Fuente: El autor, enero de 2015.

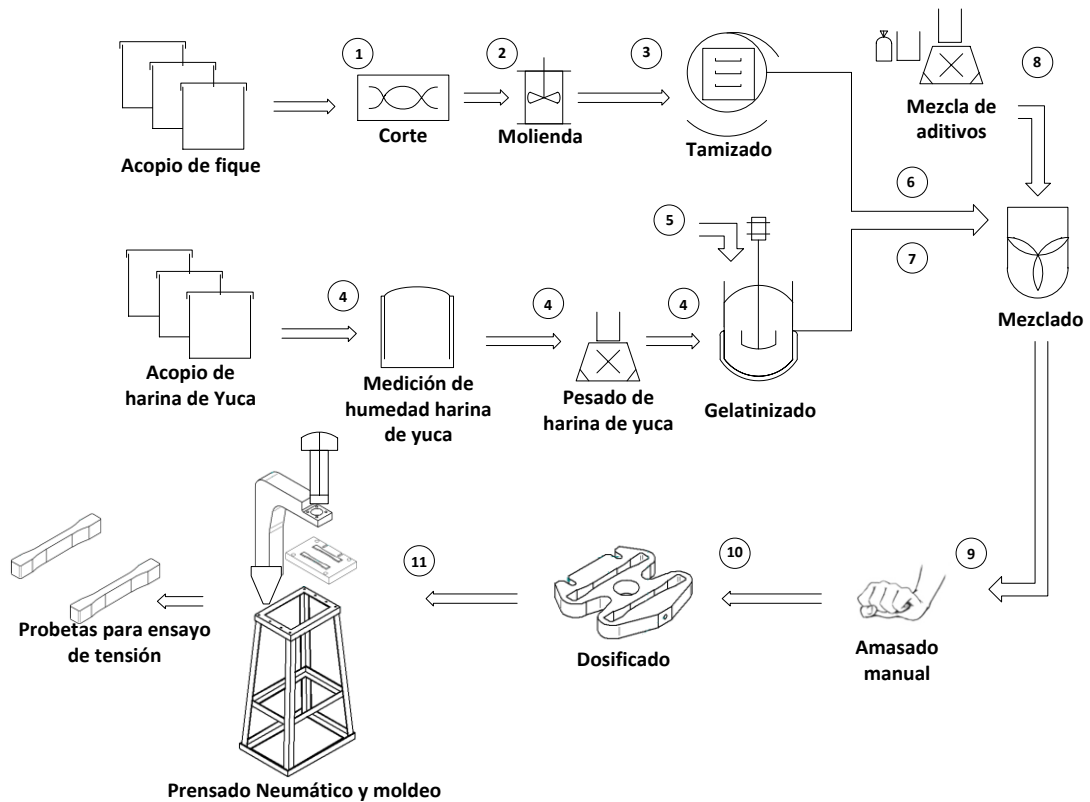
### **3.4 DIAGRAMAS ISA 5, DE ENERGÍA DE FLUIDOS Y CADENA DE VALOR DE LA CÉLULA DE PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN**

Bajo la normatividad ISA 5.1 se elaboran diagramas de flujo de proceso, diagramas de instrumentación y tuberías de las unidades de prensado (neumático e hidráulico) y moldeo y se hace un análisis de los sistemas neumático e hidráulico presentes en las unidades de

presado y moldeo. Las cuatro primeras unidades del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables en su mayoría son dominadas por acciones manuales dependientes del operario, se hace solo lectura de los diagramas de las unidades automatizadas de presado y moldeo del proceso.

**3.4.1 PFD elaboración de probetas para ensayo de tensión.** El diagrama de flujo de proceso contiene la mayor parte de los datos de ingeniería necesaria para el diseño de un proceso. Para todos los esquemas analizados, no existen normas aceptadas universalmente. El PFD de una compañía probablemente contendrá información ligeramente diferente para el mismo proceso de otra compañía. La mayoría de los PFD transmiten información similar [25]. Se desarrolló el flujo general del proceso de moldeo por compresión para elaborar probetas biodegradables para ensayo de tensión y la relación de los principales equipos que pertenecen a cada unidad, no se muestran detalles de menor importancia como datos de tuberías y otras denominaciones, (ver Figura 56).

**Figura 56.** PFD elaboración de probetas para ensayo de tensión.



Fuente: El autor, enero de 2015.

El flujo de materiales se indica en una tabla con numeración y descripción, (ver Tabla 17).

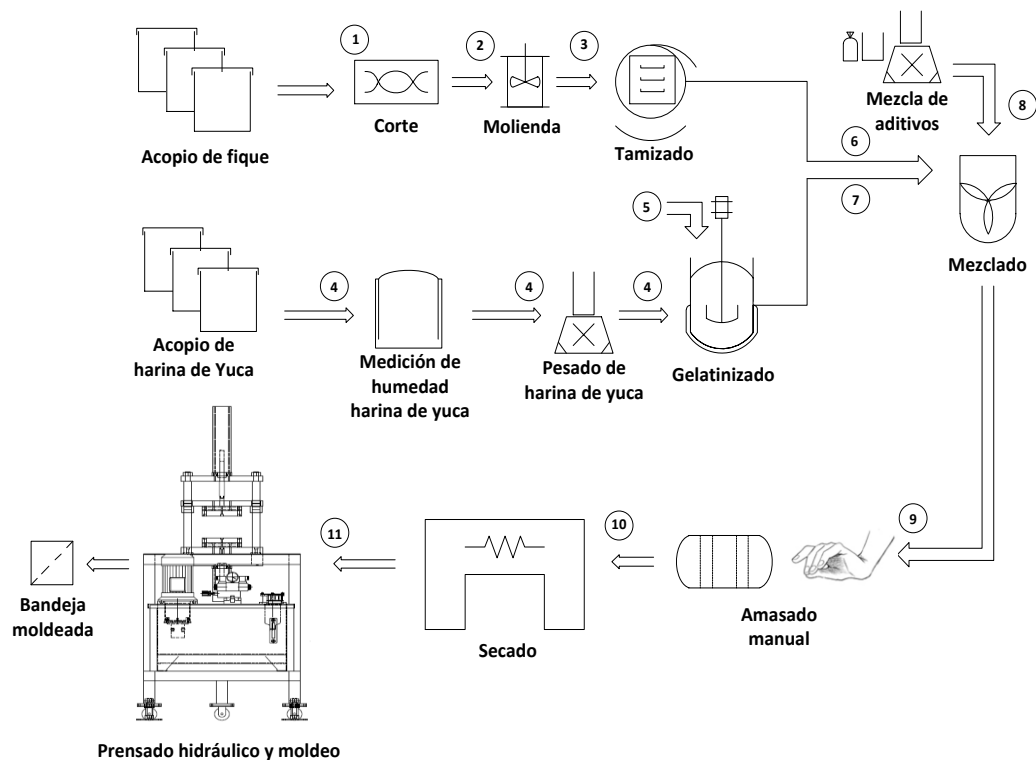
**Tabla 17.** Flujo de materiales - elaboración de probetas.

FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
1	Fique entero
2	Fique cortado
3	Fique molido
4	Harina de yuca
5	Agua
6	Fique tamizado
7	Harina de yuca gelatinizada
8	Aditivos
9	Masa homogénea
10	Masa ablandada
11	Masa dosificada
12	Producto terminado – Probeta para ensayo de tensión

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.4.2 PFD elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables.** Se desarrollo el flujo general del proceso de moldeo por compresión para elaborar bandejas biodegradables y la relación de los principales equipos que pertenecen a cada unidad, no se muestran detalles de menor importancia como datos de tuberías y otras denominaciones, (ver Figura 57).

**Figura 57.** PFD elaboración de bandejas biodegradables.



Fuente: El autor, enero de 2015.

El flujo de materiales se indica en una tabla con numeración y descripción, (ver Tabla 18).

**Tabla 18.** Flujo de materiales - elaboración de bandejas.

FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
1	Fique entero
2	Fique cortado
3	Fique molido
4	Harina de yuca
5	Agua
6	Fique tamizado
7	Harina de yuca gelatinizada
8	Aditivos
9	Masa homogénea
10	Masa en porciones
11	Masa seca
12	Producto terminado – Bandeja semirrígida

Fuente: El autor, enero de 2015.

### 3.5 ESPECIFICACIÓN DE VARIABLES DE LAS ETAPAS DE PRENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

**3.5.1 Variables unidad de prensado hidráulico y moldeo.** Las variables controladas de la unidad de prensado hidráulico y moldeo son: temperatura, presión y posición del cilindro expulsor y compresor.

**Temperatura:** El control de la temperatura en cada parte del molde es importante ya que permite mantener las condiciones requeridas de moldeo en un valor fijo, aunque este valor puede cambiar de acuerdo a las necesidades del investigador.

**Presión:** El control de presión es importante por ser la fuerza que actúa sobre el área de los émbolos y se requiere de la suficiente presión para dar movimiento a los cilindros de expulsión y compresión, se debe mantener en un valor constante la presión en el sistema hidráulico, según haya sido fijado por el operario.

**Posición cilindro expulsor y compresor:** El comportamiento correcto de la variable posición de los cilindros expulsor y compresor es importante ya que permite tener control de movimiento de subida y bajada.

Las variables manipuladas de la unidad de prensado y moldeo hidráulica son: señal PWM, flujo hidráulico y dirección del fluido.

**Señal PWM:** Es la encargada de determinar la potencia suministrada a las celdas de calefacción, modificando el ciclo de trabajo de la señal periódica entre 0% y 100%, donde un ciclo de trabajo de 0% significa no suministrar energía a la carga y 100% significa suministrar toda la energía.

**Flujo hidráulico:** El flujo es manipulado a través de un conjunto de electroválvulas, en su funcionamiento interno modifican la posición de un vástago circulando una corriente a través de un solenoide, con el fin de controlar la presión en el sistema hidráulico.

**Dirección del fluido:** La dirección del fluido es controlada a través del PLC que toma la decisión de accionar la válvula del compresor o expulsor para conmutar la dirección del fluido, esto con el fin de controlar la posición de los cilindros.

Las variables manipuladas de la etapa de prensado hidráulico y moldeo, asociadas a cada variable controlada se disponen en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Variables controladas y manipuladas, etapa de prensado hidráulico.

<b>Variable Controlada</b>	Temperatura	Presión	Posición
<b>Variable Manipulada</b>	Señal PWM	Flujo	Dirección del fluido

Fuente: El autor, enero de 2015.

- **Variables de disturbio unidad prensado hidráulico y moldeo**

Para la variable controlada temperatura los disturbios son:

- La temperatura ambiente: No representativo
- La unión de los moldes: No críticos
- La separación de los moldes: No críticos

Para la variable controlada presión los disturbios son:

- La inercia del sistema hidráulico: disturbio no crítico
- Alimentación eléctrica: No existente

Para la variable controlada posición compresor y expulsor el disturbio es:

- La fricción en los ejes guías del molde superior: No representativo

**3.5.2 Esquemas de control unidad prensado hidráulico y moldeo.** En el control de las variables de la unidad de prensado hidráulico y moldeo se identifican tres lazos de control, temperatura, presión y posición del compresor y expulsor.

El moldeo del material durante el prensado, presenta tres disturbios: 1. La temperatura del ambiente, es considerada no representativo, ya que no se presentan variaciones considerables, 2. La unión de los moldes, la cual se considerada no crítica y 3. La separación de los moldes, considerada no crítica, ya que se pueden propagar en el proceso. Con el fin de atenuar el efecto causado por dichos disturbios se evidencia un lazo de control *feedback*, en el cual se mide la temperatura de los moldes macho y hembra independientemente, de tal forma que se pueda determinar si la señal PWM entregada es suficiente, teniendo en cuenta el efecto de tener las placas juntas o separadas.

En el prensado del material se presenta un disturbio, la inercia en el sistema hidráulico, ya que la histéresis e incertidumbre son altas y no permite controlar las electroválvulas en régimen continuo, la cual se considera No Crítica, con el fin de mitigar el efecto causado por el disturbio se evidencia dos lazos de control, un lazo de control discreto (ON /OFF) en el cilindro compresor , donde se mide la presión, de tal forma que se pueda determinar si el flujo es suficiente manipulando las electroválvulas, teniendo en cuenta el efecto de la inercia del sistema hidráulico. El otro control, es un esquema de lazo abierto en el

expulsor, el operario fija manualmente la presión de consigna ajustado la válvula de presión en el distribuidor.

La posición de la placa de prensado presenta un disturbio, la fricción en el eje guía del molde superior que se considera no representativo. Se evidencian 2 lazos de control discretos (ON/OFF) en el cilindro compresor y expulsor, cada uno para controlar dos posiciones arriba y abajo, donde se acota la distancia de separación de los moldes, y se determina si la dirección del flujo es la adecuada teniendo en cuenta el estado de los fines de carrera.

### **3.5.3 Escenario de automatización de la unidad de prensado hidráulico y moldeo.**

Se evidencia un escenario de automatización basado en PLC, un lector de señal para el sensor transmisor de presión y un acondicionador de señal para las termocuplas. Tres lazos de control, presión, posición y temperatura, un motor AC trifásico que hace parte de la potencia hidráulica y un panel de control con pantalla HMI con comunicación RS232c.

- **Lazo de control de temperatura.**

#### **Molde parte hembra**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Pre actuador:* Relé de estado sólido de 25A a 110VAC

*Actuador:* Juego de cuatro resistencias de calefacción

*Sensor:* Termocupla tipo J

Las termocuplas tipo J ubicadas en el molde inferior, convierten la temperatura en una señal en mili voltios, se acondiciona la señal en el módulo AFPX-TC2 y se envía al PLC, al interior del controlador se compara la temperatura con el valor deseado, se pasa la señal de error a un algoritmo PI, el cual genera una señal esfuerzo de control codificada en una señal PWM aplicada al relé de estado sólido, quien conmuta la potencia eléctrica al arreglo de celdas de calefacción.

#### **Molde parte macho**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Pre actuador:* Relé de estado sólido de 25A a 110VAC

*Actuador:* Juego de cuatro resistencias de calefacción

*Sensor:* Termocupla tipo J

El control de temperatura en la parte macho se realiza igual forma que en el molde hembra.

- **Lazo de control de presión.**

#### **Cilindro compresor**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Actuador:* Juego de dos electroválvulas 4/3

*Sensor:* sensor transmisor *Turck*

Para el control de presión, el PLC recibe la señal de 0 a 20mA del sensor transmisor de presión *Turck* a través del módulo A21 que lee la señal y la comunica, internamente se

compara la señal con un set point, si está por encima de la referencia se desenergiza las electro válvulas, debido a la inercia del sistema el control fue implementado por ensayo y error es decir si el usuario fija el valor en 40 bar, el *set point* real dentro del controlador es 30 bar, así cuando llegue a 30 bar el controlador apaga las electro válvulas y por inercia la presión sube hasta 40 +/- 5 bar.

#### **Cilindro expulsor**

*Controlador:* Operario

*Actuador:* Válvula manual

*Sensor:* Manómetro

Para el control de presión en el expulsor es necesario que el operario cierre el lazo de control manipulando la válvula manual de presión del distribuidor de acuerdo a la presión requerida, visualizando en el manómetro el valor deseado en el distribuidor.

- **Lazo de control de posición.**

#### **Cilindro compresor**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Pre actuador:* Juego de dos electroválvulas 4/3

*Actuador:* Cilindro compresor hidráulico

*Sensor:* Conjunto de dos fin de carrera *Moller* LS-11

Los fines de carrera superior e inferior ubicados en el cilindro compresor o superior permiten controlar dos posiciones arriba o abajo y son accionados mecánicamente al desplazarse el molde superior macho, al activarse se envía una señal de 24VDC a la entrada del PLC, internamente se toma la decisión de control que permite o inhibe el flujo hacia el cilindro superior, el controlador envía una señal de 110VAC que activa las electroválvulas encargadas de direccionar el flujo a la cámara inferior o superior del cilindro compresor.

#### **Cilindro expulsor**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Pre actuador:* Juego de dos electroválvulas 4/3

*Actuador:* Cilindro expulsor hidráulico

*Sensor:* Conjunto de dos fin de carrera *Moller* LS-11

El control de posición expulsor funciona de forma similar que en el cilindro compresor.

**3.5.4 Variables de la unidad de prensado neumático y moldeo.** Las variables controladas de la unidad (temperatura, presión y posición) y variables manipuladas (PWM, flujo y dirección del flujo) respectivamente, son las mismas variables que se presentan en la unidad de prensado hidráulico y moldeo, por esto no se describen. La diferencia son los disturbios que se presentan en las variables controladas presión y dirección de flujo, que se determinaron como no existentes.



**3.5.5 Esquemas de control de la unidad prensado neumático y moldeo.** En el control de las variables de la unidad de prensado neumático y moldeo se identificaron tres lazos de control, temperatura, presión y posición del compresor y expulsor. El control de temperatura en el molde es el encargado de mantener la temperatura 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).

El control de presión del sistema neumático es el encargado de mantener la presión de aire comprimido en un valor constante para la compresión y 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. El control de posición del sistema de compresión y expulsión es el encargado de permitir o inhibir el flujo de aire a presión hacia el cilindro inferior o superior, opera en lazo abierto cuando se da la orden de comprimir o expulsar el producto terminado.

**3.5.6 Escenario de automatización de la unidad de prensado neumático y moldeo.** Se evidencia un escenario de automatización basado en PLC, en el cual se conectan los sistemas de compresión y expulsión en combinación con un control realimentado de temperatura.

- **Lazo de control de temperatura.**

**Molde parte hembra**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Pre actuador:* Relé de estado sólido de 25A a 110VAC

*Actuador:* Juego de cuatro resistencias de calefacción

*Sensor:* Termocupla tipo J

**Molde parte macho**

*Controlador:* PLC Panasonic FP-X C30R

*Pre actuador:* Relé de estado sólido de 25A a 110VAC

*Actuador:* Juego de cuatro resistencias de calefacción

*Sensor:* Termocupla tipo J

El control de temperatura en los moldes macho y hembra se realiza bajo un esquema *feedback* igual que en la unidad de prensado y moldeo hidráulica.

- **Lazo de control de presión.**

**Cilindro compresor**

*Controlador:* Operario

*Actuador:* Válvula manual reguladora de presión

*Sensor:* Manómetro

El control de presión es realizado en lazo abierto por medio de una válvula la cual manipula el operario mientras registra la presión deseada en el manómetro.

### Cilindro expulsor

Controlador: Operario

Actuador: Válvula manual reguladora de presión

El esquema de control en lazo abierto funciona cuando el operario manipula la válvula, no tiene sensor indicador de presión, por lo tanto se desconoce la presión en el expulsor pero se sabe que la presión máxima está limitada por la presión generada por el compresor de aire.

- **Lazo de control de posición.**

### Cilindro expulsor

Controlador: Operario

Pre actuador: Válvula neumática

Actuador: Cilindro expulsor neumática

Sensor: Operario

### Cilindro compresor

Controlador: Operario

Pre actuador: Válvula neumática

Actuador: Cilindro compresor neumática

Sensor: Operario

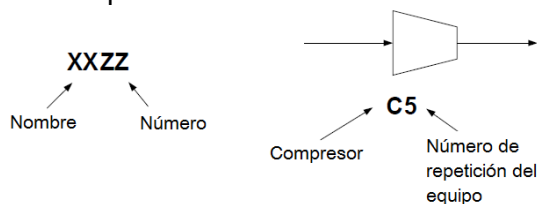
El control de posición funciona en lazo abierto, el operario sensa visualmente la posición de la placa y toma la decisión de control para accionar las válvulas que permiten el flujo neumático y desplazan los cilindros a la posición deseada.

**3.5.7 Etiquetado de dispositivos e instrumentos de la célula de proceso de moldeo por compresión.** Se debe tener un orden en la disposición de elementos que conforman las unidades de prensado y moldeo del proceso (equipos e instrumentación) además claridad en la interpretación de los planos y diagramas, por ello se aplica la siguiente convención para el etiquetado, se utilizó como base el estándar ISA 5.1 y se adaptó en este proyecto de grado para realizar el etiquetado conveniente para el seguimiento de los diagramas e interpretación de las unidades.

XX: De uno a cuatro caracteres alfabéticos para indicar el tipo de equipo, instrumento o accesorio de la unidad.

ZZ: De uno a dos caracteres numéricos para indicar el consecutivo de equipos de la misma característica y en la misma sección [26], (ver Figura 58).

**Figura 58.** Interpretación de etiquetas.



Fuente: Tomado de [27], enero de 2015.

**3.5.8 Etiquetado de la unidad de prensado neumático.** A continuación se listan las etiquetas de los equipos, instrumentos y accesorios utilizados en la automatización de la unidad de prensado neumático, debido a que las otras unidades de la célula de proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables no tienen un nivel de automatización, no es necesario definir etiquetas para ellas. Todos los equipos están en el mismo lugar dentro del Laboratorio de Reología y Empaques por lo tanto no se utilizan los caracteres de identificación de área, (ver Tabla 20).

**Tabla 20.** Etiquetado de la unidad de prensado neumático.

<b>Equipos</b>	<b>Etiqueta</b>
Parte macho del molde	M1
Parte hembra del molde	M2
Cilindro compresor neumático	C1
Cilindro expulsor neumático	C2
Compresor	MC
<b>Instrumentos</b>	
Juego de cuatro resistencias en la parte macho del molde neumático	R1
Juego de cuatro resistencias en la parte hembra del molde neumático	R2
Válvula manual de presión que actúa en la cámara superior de C1	PHV1
Válvula de presión que actúa en la cámara inferior de C1	PHV2
Válvula de presión que actúa en la cámara superior de C2	PHV3
Válvula de presión que actúa en la cámara inferior de C2	PHV4
Electro válvula de 5/2 posiciones que maneja C2	EV1
Electro válvula de 5/2 posiciones que maneja C1	EV2
Válvula manual de apertura y cierre	HV1
Contactador compresor neumático	KM2
Relé térmico compresor neumático	F1
Relé electromecánico maniobra compresor	S10
Relé electromecánico maniobra válvula compresor	S2
Relé electromecánico maniobra válvula expulsor	S3
Relé térmico resistencias de calefacción	F2
Contactador resistencias de calefacción	KR1
Manómetro analógico prensa neumática	PI1
Termocuplas molde macho neumático	TE1
Termocuplas molde hembra neumático	TE2
<b>Accesorios</b>	
Caja de distribución neumática	DBX1
Luz piloto de funcionamiento compresor	LHD
Breaker potencia compresor	Q3
Breaker potencia electroválvulas	Q10

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.5.9 Etiquetado de la unidad de prensado hidráulico.** A continuación se listan las etiquetas de todos los equipos, instrumentos y accesorios utilizados en la automatización de la unidad de prensado hidráulico del proceso, (ver Tabla 21). Todos los equipos están en el mismo lugar dentro del Laboratorio de Reología y Empaques por lo tanto no se utilizan los caracteres de identificación de área.

**Tabla 21.** Etiquetado de la unidad de prensado hidráulico.

<b>Equipos</b>	<b>Etiqueta</b>
Parte macho del molde	M3
Parte hembra del molde	M4
Cilindro compresor hidráulico	C3
Cilindro expulsor hidráulico	C4
Motor trifásico <i>Weg</i>	MW
<b>Instrumentos</b>	
Electro válvula expulsor cámara superior	EV3
Electro válvula expulsor cámara inferior	EV4
Electro válvula de alivio	EV5
Electro válvula compresor cámara inferior	EV6
Electro válvula compresor cámara superior	EV7
Juego de cuatro resistencias de calefacción molde macho	R3
Juego de cuatro resistencias de calefacción molde hembra	R4
Sensor transmisor indicador de presión <i>Turck</i>	PIT
Adaptador analógico I/O AFPX-A21	A21
Contactador electromecánico motor	KM1
Relé térmico motor	F4
Contactador electromecánico resistencias de calefacción	KR2
Relé térmico celdas de calefacción	F3
Presostato	PRE
Sensor <i>Moller</i> LS-11 Fin de carrera inferior cilindro compresor	FCCI
Sensor <i>Moller</i> LS-11 Fin de carrera superior cilindro compresor	FCCS
Sensor <i>Moller</i> LS-11 Fin de carrera medio cilindro compresor	FCCM
Sensor <i>Moller</i> LS-11 Fin de carrera inferior cilindro expulsor	FCEI
Sensor <i>Moller</i> LS-11 Fin de carrera superior cilindro expulsor	FCES
Termocuplas tipo J molde macho	TE4
Termocuplas tipo J molde hembra	TE3
Relé electromecánico maniobra la válvula del compresor cámara superior	S4
Relé electromecánico maniobra la válvula del compresor cámara inferior	S5
Relé electromecánico maniobra la válvula de alivio del distribuidor	S6
Relé electromecánico maniobra la válvula del expulsor cámara inferior	S7
Relé electromecánico maniobra la válvula del expulsor cámara superior	S9
Relé electromecánico que maniobra el motor <i>Weg</i>	S12
Válvula manual de presión que actúa en la cámara superior de C3	PHV5
Válvula manual de presión que actúa en la cámara inferior de C3	PHV 6
Válvula manual de presión que actúa en la cámara superior de C4	PHV 7
Válvula manual de presión que actúa en la cámara inferior de C4	PHV 8
Válvula manual de control de presión en el distribuidor	PCHV
Válvula manual de control de flujo en el distribuidor	FCHV
Manómetro indicador de presión en el distribuidor	PI2
Indicador de nivel y temperatura de aceite	LTI
Manómetro indicador de presión en la cámara superior del cilindro compresor	PI3
<b>Accesorios</b>	
Caja de distribución hidráulica	DBX2
Luz piloto de funcionamiento motor	HC
Breaker de mando electroválvulas	Q7
Breaker de potencia electroválvulas	Q9
Breaker de alimentación del motor <i>Weg</i>	Q1

Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.5.10 Etiquetado de los equipos en común de las dos unidades de prensado.** Debido a la implementación de un sistema de mando (movimiento de moldes) y control de temperatura en común para las unidades de prensado neumático e hidráulico, se evidencia la utilidad de dispositivos de automatización compartidos para ambas unidades de prensado y moldeo del proceso de moldeo por compresión, (ver Tabla 22).

**Tabla 22.** Etiquetado de los equipos en común de las dos unidades de prensado.

Equipos	Etiqueta
PLC Panasonic FP-X C30R	PLC
Pantalla HMI GT32 M	HMI
Instrumentos	
Relé electromecánico maniobra resistencias de calefacción Neumática/Hidráulica	S11
Relé de estado sólido 1 de 25A a 110VAC	SSR1
Relé de estado sólido 2 de 25A a 110VAC	SSR2
Adaptador de comunicación AFPX-RS232	COM5
Adaptador de temperatura AFPX-TC2	TC2
Contactador de potencia	K1
Accesorios	
Luz piloto de funcionamiento Automático/Manual	LHE
Luz piloto sobrecarga motor/compresor	LHA
Luz piloto sobrecarga en las resistencias	LHB
Llave de dos posiciones de encendido	PW
Pulsador de parada Stop	ST
Pulsador de subida	UP
Pulsador de bajada	DW
Breaker potencia relés de estado solido	Q2
Breaker mando motor/compresor	Q4
Breaker mando resistencias de calefacción hidráulica/neumática	Q5
Breaker de potencia PLC	Q6

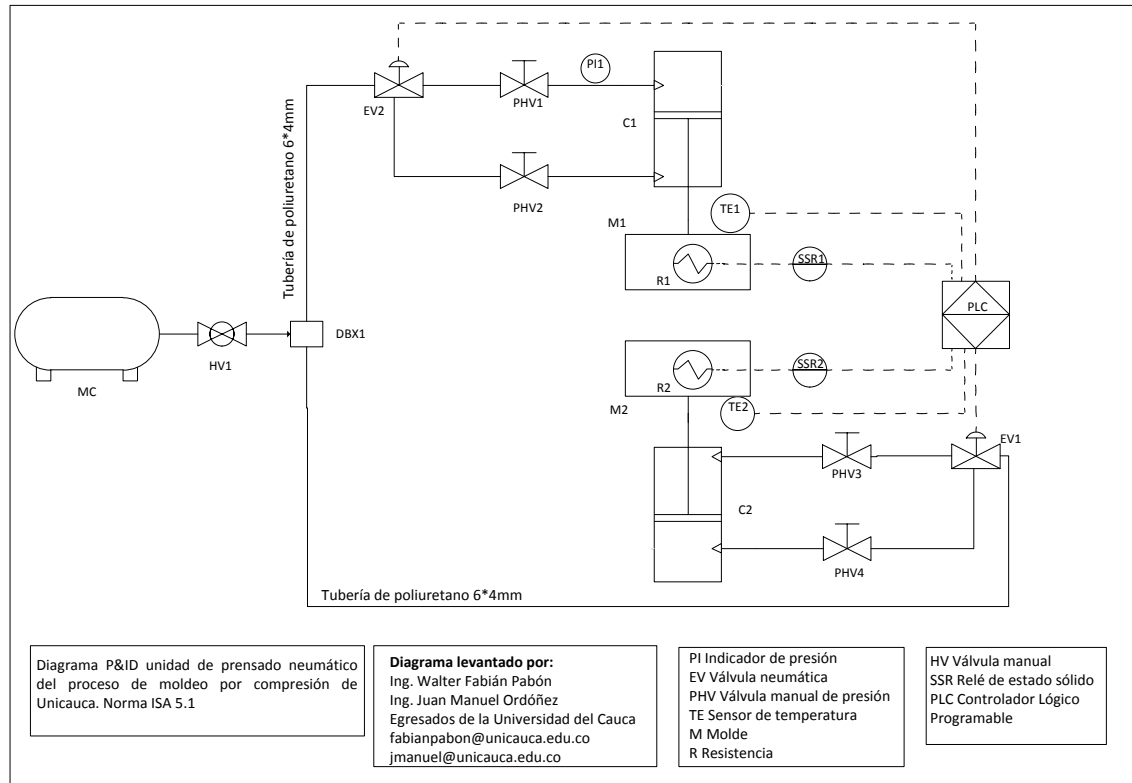
Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.5.11 P&ID de la unidad de prensado neumático y moldeo.** Se presenta el diagrama P&ID según ISA S5.1 de la unidad, (ver Figura 59). El control de temperatura se hace a través de dos termocuplas TE1 y TE2, dos relé de estado sólido SSR1 y SSR2, dos juegos de cuatro resistencias de calefacción R1 y R2 y un controlador PLC. El lazo funciona así: se fija el valor de temperatura deseada por el operario, el PLC escala este valor, lo compara con el valor obtenido por las termocuplas a través del módulo TC2, se determina las acciones de control según el PID y se envía una señal PWM a los dos relé de estado sólido que ejecutan la acción correspondiente en las resistencias de calefacción R1 y R2 para mantener la temperatura en los moldes M1 y M2.

El control de presión se realiza con: manómetro analógico PI1, válvula manual de presión PHV1 y operario. El lazo de control funciona así: el operario fija la presión manualmente, se manipula la válvula y visualiza en el manómetro PI1 hasta alcanzar la presión deseada en la cámara superior del cilindro compresor. El control de posición se realiza con: electroválvulas neumáticas EV1 y EV2, cilindros neumáticos C1 y C2 y el controlador PLC. El lazo de control permite dos posiciones y funciona accionado las electroválvulas neumáticas EV1 y EV2 que dirigen el flujo a la cámara superior o inferior del cilindro expulsor o compresor.

La válvula manual PHV2 regula la presión en la cámara inferior del compresor, válvula PHV3 regula la presión en la cámara superior del expulsor, válvula PHV4 regula la presión en la cámara inferior del expulsor. La válvula HV1 restringe el paso de aire del compresor a la prensa.

Figura 59. P&ID unidad de prensado neumático.

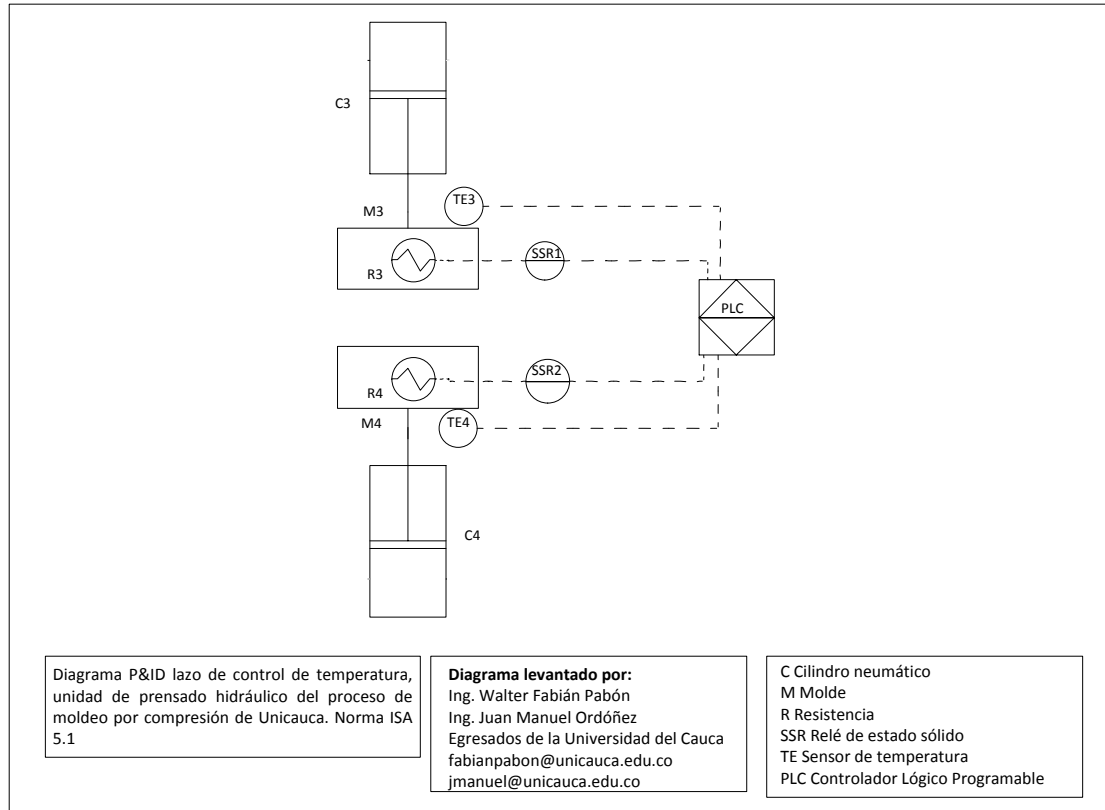


Fuente: El autor, enero de 2015.

### 3.5.12 P&ID unidad de prensado hidráulico y moldeo.

• **P&ID Lazo de control de temperatura.** EL control de temperatura en los moldes M3 y M4 se hace por medio de termocuplas TE3 y TE4, relés de estado sólido SSR1 y SSR2, dos juegos de cuatro resistencias de calefacción R3 y R4 y el controlador PLC. El lazo funciona fijando el valor de temperatura deseada por el operario, el controlador adecúa la consigna y la compara con la tomada por las termocuplas a través del módulo TC2, se determina las acciones de control según el PID y se envía una señal PWM a los dos relé de estado sólido que ejecutan la acción en el juego de resistencias R3 y R4 para mantener la temperatura de los moldes M3-y M4, (ver Figura 60).

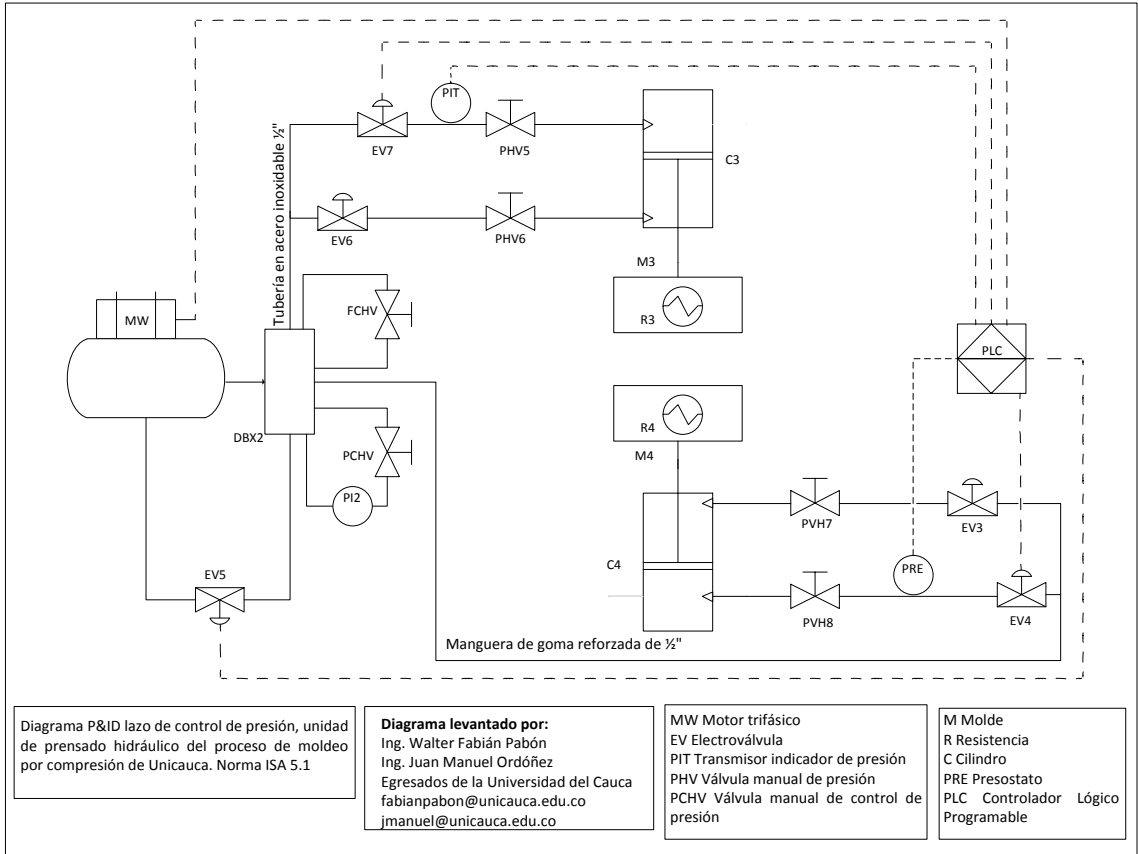
Figura 60. P&ID Lazo de control de temperatura unidad de prensado hidráulico.



Fuente: El autor, enero de 2015.

- P&ID Lazo de control de presión.** El lazo de control de presión de la cámara superior del compresor, se hace a través del sensor transmisor indicador de presión PIT, electroválvula EV3, electroválvula de alivio EV5 y controlador PLC, para el resto de cámaras la válvula manual de control de presión en el distribuidor PCHV y manómetro PI2. Funciona fijando el valor de presión deseada por el operario, el PLC realiza la adaptación de la señal digital a unidades de ingeniería, lo compara con el valor obtenido por el sensor de presión a través del módulo A21, se toma la decisión de control y se corta el flujo en las electroválvulas EV3 y EV5. En el resto de cámaras (compresor inferior, expulsor superior e inferior), el control se realiza en lazo abierto, se visualiza la presión en el manómetro PI2 y el operario manipula la válvula manual PCHV hasta alcanzar el valor de presión fijado, (ver Figura 61).

Figura 61. P&ID Lazo de control de presión unidad de prensado hidráulico.

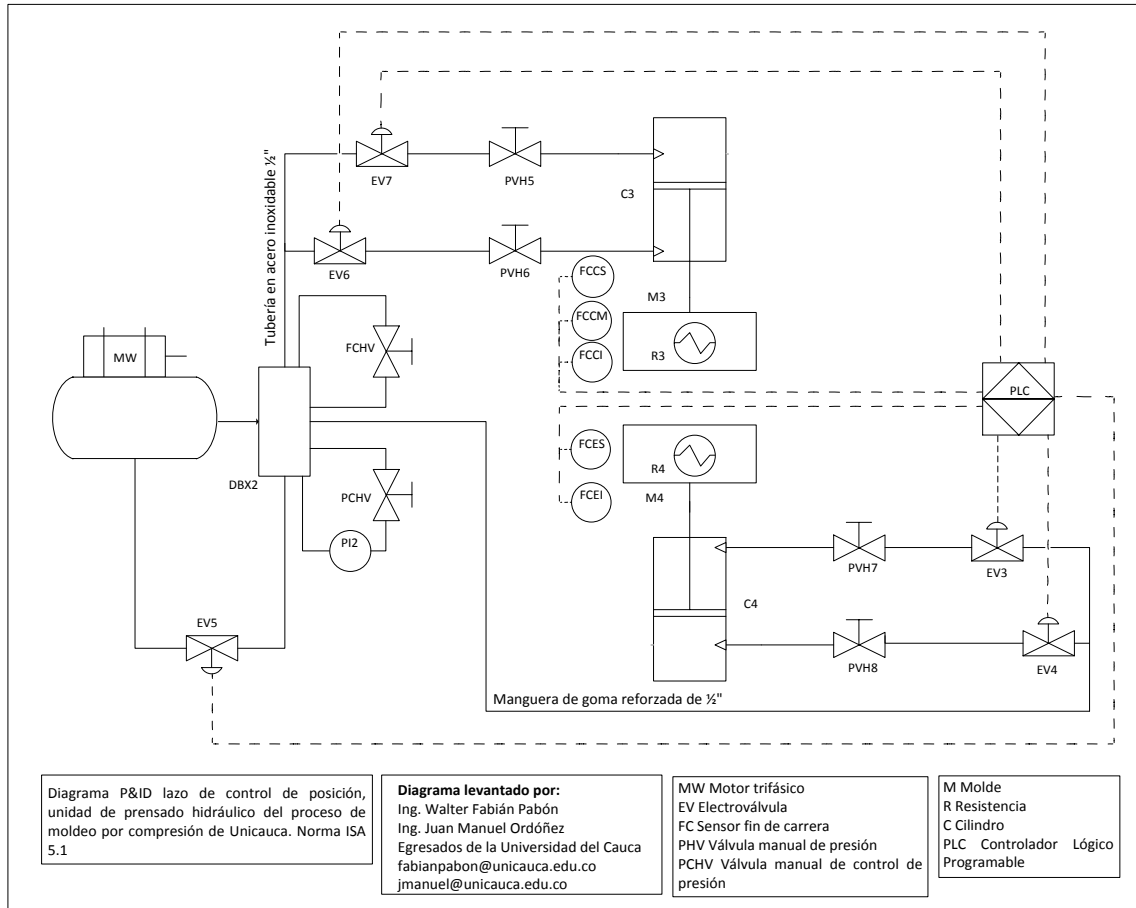


Fuente: El autor, enero de 2015.

- **P&ID Lazo de control de posición.** El control de posición del compresor C3 y expulsor C4, se hace por medio de fines de carrera FCCS, FCCM, FCES, FCEI, electroválvulas EV3, EV4, EV6, EV7 y el controlador PLC. Los fines de carrera se activan al desplazamiento del cilindro expulsor o compresor, indicando al PLC si esta en carrera ascendente o descendente, se toma la decisión de control y se envía una señal de 110VAC a la electroválvula correspondiente cambiando la dirección del flujo. Las válvulas manuales de presión PHV5, PHV6, PHV7, PHV8 son de seguridad, cortan el flujo para desmontar el equipo o variar la velocidad de desplazamiento en los cilindros. El fin de carrera FCCI está instalado pero nunca es activado por el molde macho, (ver Figura 62).



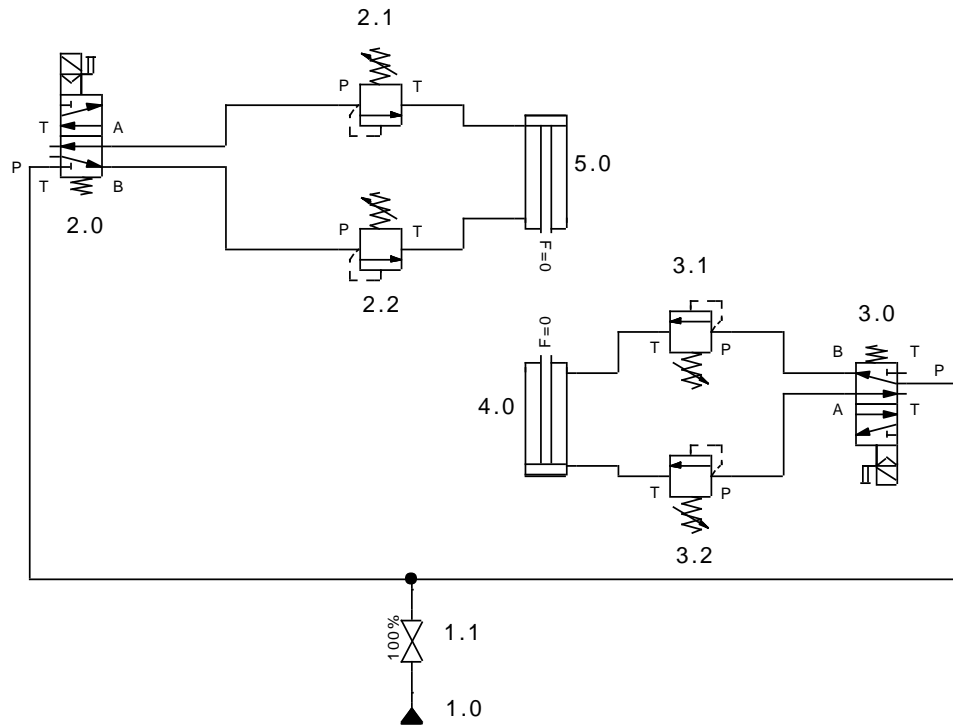
Figura 62. P&ID Lazo de control de posición unidad de prensado hidráulico.



Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.5.13 Diagrama de energía de fluido neumático.** Se presenta el diagrama del circuito neumático de la unidad de prensado neumático y moldeo, se describe cada elemento así: 1.0 generador simplificado de aire comprimido consta de compresor, deposito, filtro y manómetro, 1.1 válvula manual de cierre, 2.0 válvula de control cilindro de compresión 5/2 (cinco vías dos posiciones), 2.1 válvula reguladora de presión , 2.2 válvula reguladora de presión, 3.0 válvula controladora del cilindro de expulsión 5/2 (cinco vías dos posiciones), 3.1 válvula reguladora de presión, 3.2 válvula reguladora de presión, 4.0 cilindro de compresión, 5.0 cilindro de expulsión. La elaboración de este diagrama se realizó en la herramienta de simulación de circuitos neumáticos *FESTO FluidSIM 3.6*, (ver Figura 63).

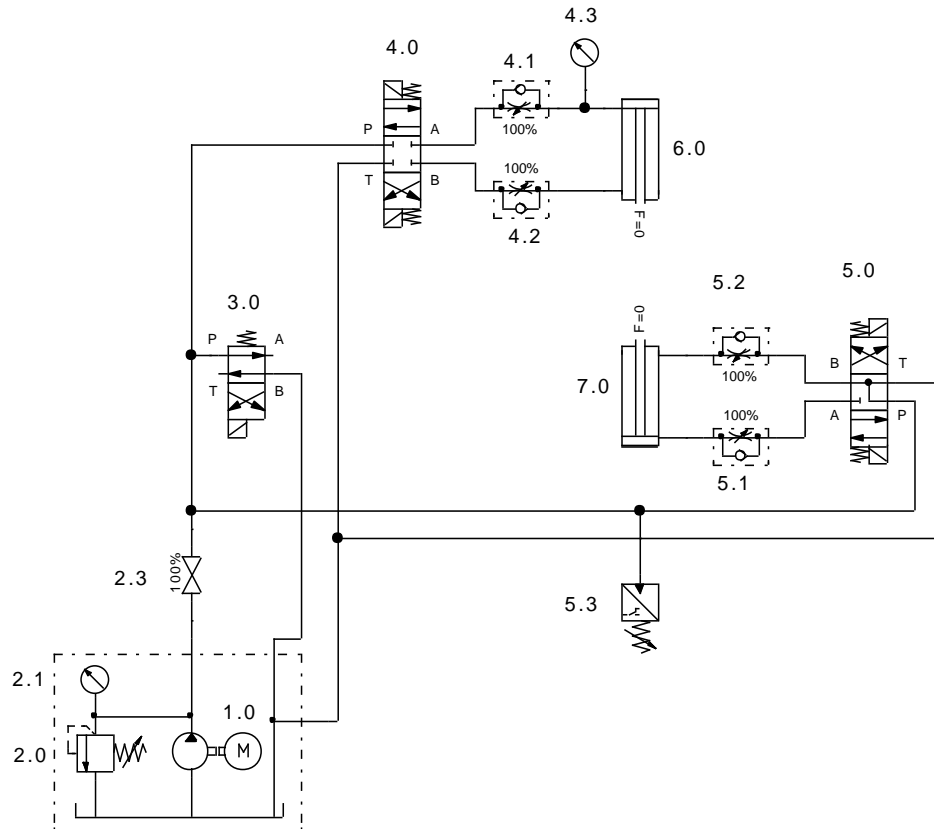
Figura 63. Diagrama de energía de fluido neumático.



Fuente: El autor, enero de 2015.

**3.5.14 Diagrama de energía de fluido hidráulico.** Se presenta el diagrama del circuito hidráulico de la unidad de prensado hidráulico y moldeo, se describe cada elemento así: 1.0 la unidad motriz simplificada se compone del motor, depósito de aceite y distribuidor que son los encargados de generar la potencia hidráulica y dirigirla al sistema, 2.0 la válvula manual reguladora de presión en el distribuidor, 2.1 manómetro analógico, 2.3 válvula manual de control de flujo en el distribuidor, 3.0 válvula de control de alivio, 4.0 válvula de control del cilindro superior 4/3 (cuatro vías tres posiciones), 4.1 válvula estranguladora que regula la velocidad de bajada del cilindro superior, 4.2 válvula estranguladora que regula la velocidad de subida del cilindro superior, 4.3 manómetro analógico, 5.0 válvula de control cilindro inferior, 5.1 válvula estranguladora que regula la velocidad de subida del expulsor, 5.2 válvula estranguladora que regula la velocidad de bajada del expulsor, 5.3 presostato, 6.0 cilindro superior, 7.0 cilindro de expulsión. El diagrama se elaboró en la herramienta de simulación de circuitos hidráulicos *FESTO FluidSIM* 3.6, (ver Figura 64).

Figura 64. Diagrama de energía de fluido hidráulico.



Fuente: El autor, enero de 2015.

### 3.6 CADENA DE VALOR DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

La cadena de valor es una herramienta de análisis, que facilita la comprensión de algo tan dinámico e interactivo como es la estrategia de una empresa. La primera herramienta desarrollada para sistematizar y facilitar el análisis estratégico, tuvo su origen alrededor de los años 60 en la “Escuela de Harvard” de pensamiento estratégico, y es conocida por las siglas “DAFO” (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) en castellano y SWOT en inglés [28]. En su aplicación práctica en la empresa, los inconvenientes que se encuentra cuando se utiliza este método analítico, son fundamentalmente dos:

- a) La dificultad a la hora de clasificar algunos acontecimientos bajo un epígrafe u otro;
- b) Su falta de sistemática para buscar los hechos que deben incluirse en uno u otro [28].

Con el esquema de cadena de valor, se va un poco más allá en la línea de paliar los inconvenientes mencionados, ya que se persigue facilitar un proceso sistemático de análisis interno de la empresa – las “fortalezas” y “debilidades” – desde una perspectiva estratégica [28].

- **Cadena de valor del proceso de moldeo por compresión a escala de laboratorio.** Se propone el modelo de cadena de valor para el proceso de moldeo por compresión.

Debido a que es un proceso que se realiza a nivel de laboratorio se propone la cadena para dar valor al servicio que podría prestar el producto “*Probetas para ensayo de tensión a base de materiales biodegradables*”, para estudios que se realicen internamente de| ensayos de tensión que resistirían productos elaborados a base de materiales con los cuales se fabrica la probeta.

Este modelo se realiza con los eslabones para la elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables: “secado y moldeado” y “prensado hidráulico y moldeo” debido a que actualmente el grupo CYTBIA ha decidido prescindir de la unidad de prensado neumático y ahora se fabrican las probetas con moldes diseñados para la unidad de Prensado Hidráulico, además se incluye el eslabón de la nueva etapa propuesta “Acondicionamiento de equipos” para la célula de proceso, (ver Figura 65).

**Figura 65.** Cadena de valor escala laboratorio del proceso de moldeo por compresión.



Fuente: El autor, enero de 2015.

## CAPÍTULO 4. INGENIERÍA DETALLADA

### 4.1 ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LA INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPOS DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

**4.1.1 Planos del sistema de distribución de planta e instalación.** El Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, es el lugar donde se encuentra instalada la célula de proceso para el moldeo por compresión de materiales biodegradables, (ver Figura 66), las dimensiones aproximadas son: 11 metros de largo y 8 metros de ancho. El Laboratorio se divide en dos estancias, en la parte lateral izquierda una oficina con equipos de pruebas, una serie de equipos de cómputo, escritorios y sillas. En la parte lateral derecha se encuentran instaladas las unidades de prensado y moldeo hidráulica y neumática, en la losa superior equipos para la preparación del fique y la harina de yuca al igual que en la losa del costado inferior derecho contigua a una columna de concreto. En el exterior se encuentran dispuestos equipos que por seguridad no están en el Laboratorio, como el compresor a la izquierda y el módulo de equipo molino de fique a la derecha.

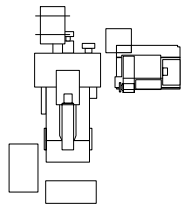
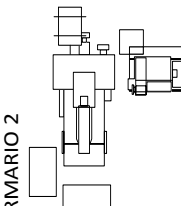
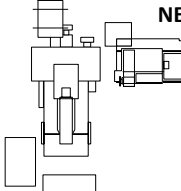

**Figura 66.** Distribución Laboratorio de Reología y Empaques FACA Unicauca.



Fuente: El autor, enero de 2015.

**4.1.2 Especificación técnica de equipos e instrumentos.** Los equipos e instrumentos que hacen parte del sistema de control para las unidades de prensado (hidráulico / neumático) y moldeo del proceso de moldeo por compresión, están reunidos en dos armarios, el armario 1: Panel de potencia y el armario 2: Panel de control y HMI. Los equipos e instrumentos de los armarios y los de campo están ordenados en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Localización de equipos e instrumentos unidades de prensado y moldeo.

Localización	Equipos e instrumentos
<p>Armario 1</p>  <p>ARMARIO 1</p>	<p>Contactador</p> <p>Relé térmico</p> <p>Relé electromecánico</p> <p>Breaker</p> <p>Rieles din, canaletas y borneras</p> <p>Relé de estado sólido</p> <p>PLC FP-X C30R</p>
<p>Armario 2</p>  <p>ARMARIO 2</p>	<p>Pantalla táctil GT32 M</p> <p>Indicador de sobrecarga resistencias eléctricas</p> <p>Indicador de sobrecarga motor bomba hidráulica / motor compresor</p> <p>Indicadores de funcionamiento sistema hidráulico / neumático</p> <p>Indicador de modo MANUAL/AUTOMÁTICO</p> <p>Pulsador para elevación del cilindro hidráulico superior</p> <p>Pulsador para descenso del cilindro hidráulico inferior</p> <p>Llave maestra de encendido</p> <p>Botón de parada de emergencia</p>
<p>Campo unidad neumática</p>  <p>PRENSA NEUMÁTICA</p>	<p>Regulador de presión y manómetro</p> <p>Válvulas de 5/2 posiciones</p> <p>Cilindro neumático superior de doble efecto</p> <p>Cilindro neumático inferior de doble efecto</p> <p>Termocuplas tipo J</p> <p>Resistencias tipo cartucho en acero inoxidable</p>
<p>Campo unidad hidráulica</p>  <p>PRENSA HIDRÁULICA</p>	<p>Indicador de nivel y temperatura de aceite</p> <p>Motor eléctrico de 3 fases conectado en estrella (3 Φ Y)</p> <p>Distribuidor hidráulico</p> <p>Válvula de control de flujo de fluido hidráulico cilindro superior</p> <p>Válvula de control de flujo de fluido hidráulico cilindro inferior</p> <p>Válvula de control de flujo de fluido hidráulico de alivio</p> <p>Válvula de control de flujo total en el distribuidor</p> <p>Válvula de control de presión total en el distribuidor</p> <p>Presostato indicador de sobrepresión en cilindro</p> <p>Manómetro indicador analógico de presión del distribuidor</p> <p>Transmisor electrónico de presión</p> <p>Cilindro hidráulico superior</p> <p>Cilindro hidráulico inferior</p> <p>Sensores de fin de carrera de la plataforma móvil</p> <p>Termocuplas tipo J</p> <p>Resistencias tipo cartucho en acero inoxidable</p>

Fuente: El autor, enero de 2015.

Se especifican detalles técnicos de los equipos, instrumentos y elementos del proceso de moldeo por compresión, ubicados en los armarios y en campo tanto de las unidades de prensado y moldeo como de las otras unidades que caracterizan el proceso, para obtener

detalles de esta información remitirse al Anexo E: ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS.

#### 4.2 ILD DE LAS UNIDADES DE PENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

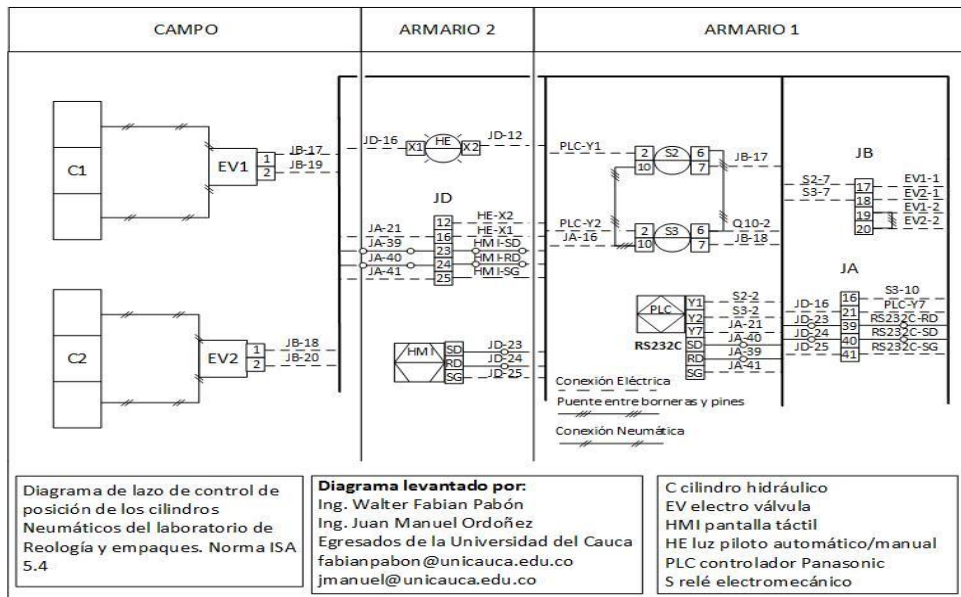
ILD siglas en ingles de Diagramas de Lazo de Instrumentos, es una representación compuesta de información del lazo. Contiene todo lo asociado a conexiones eléctricas y contiene la información necesaria para proveer los usos proyectados. Clasificado bajo estos requisitos mínimos y estableciendo algunos opcionales que pueden usarse para ajustarse a los usos deseados [29].

Mediante la norma ISA-5.4 que establece la información mínima requerida y adicional para un lazo de instrumentación; donde este lazo forma parte de un proceso descrito sobre alguna clase de dibujo de ingeniería como por ejemplo un P&ID (*Piping and Instruments Drawings*) [29], se realizan los diagramas de lazo de instrumentos de las unidades de prensado (neumático e hidráulico) y moldeo del proceso de moldeo por compresión, buscando una comprensión de los sistemas y la lógica de control además, mejorar la comunicación entre el personal técnico y los investigadores del laboratorio.

##### 4.2.1 Diagramas de lazo de control unidad de prensado neumático y moldeo.

- **Diagrama de lazo control posición de los cilindros neumáticos.** El diagrama de lazo muestra la ubicación y las conexiones eléctricas de cada componente del control de posición de los cilindros neumáticos que hacen parte del módulo de equipo de prensado neumático en el proceso de moldeo por compresión, de acuerdo con la norma ISA 5.4, (ver Figura 67).

**Figura 67.** Diagrama de lazo control de posición de los cilindros neumáticos.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

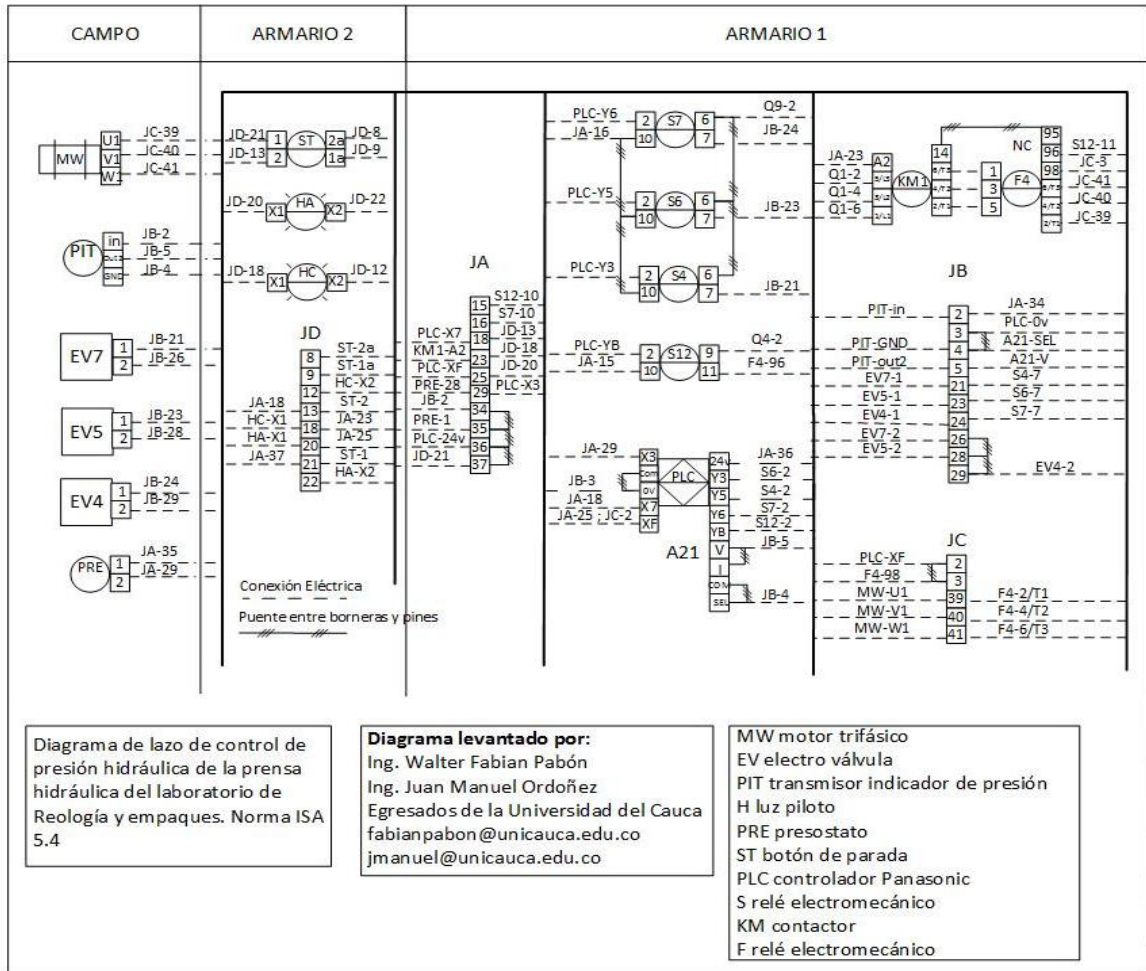








Figura 71. Diagrama de lazo control de presión hidráulica.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

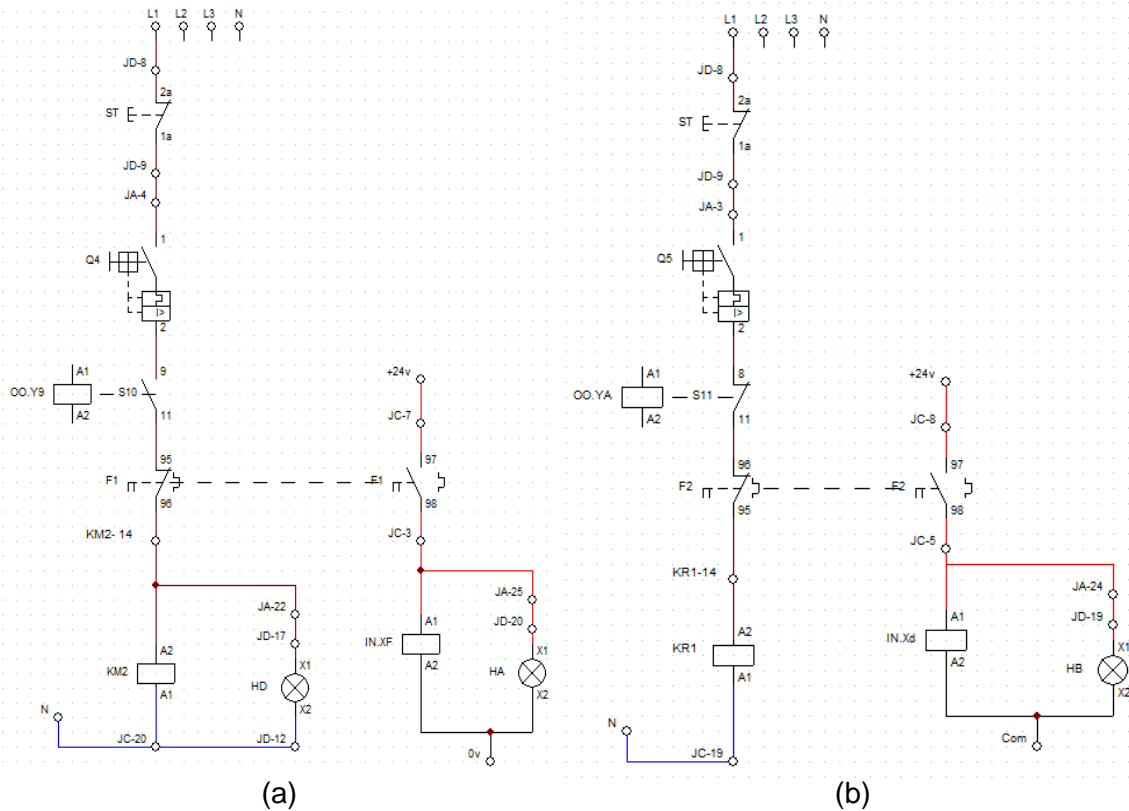
Para mayor detalle y seguimiento del diagrama de lazo control de presión hidráulica, remitirse al Anexo F: DIAGRAMAS DE LAZO DE INSTRUMENTOS UNIDADES DE PRENSADO Y MOLDEO, sección 6.2.3.

#### 4.3 DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE PRENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

El diagrama o circuito de mando es encargado de controlar el funcionamiento del contactor. Normalmente consta de elementos de mando (pulsadores, interruptores, etc.), elementos de protección, bobinas de contactores, temporizadores y contactos auxiliares. Este circuito está separado eléctricamente del circuito de potencia, es decir, que ambos circuitos pueden trabajar a tensiones diferentes, por ejemplo, el de potencia a 380 VAC y el de mando a 24 VDC [30]. Se realizan diagramas de mando de la unidad de prensado neumático, (compresor y resistencias de calefacción), y diagramas de mando de la unidad de prensado hidráulico (motor y resistencias de calefacción).

**4.3.1 Diagramas de mando unidad de prensado neumático y moldeo.** Se presentan el diagrama de mando del compresor, (ver Figura 72 (a)), y el diagrama de mando de las resistencias eléctricas, (ver Figura 72 (b)) de la unidad de prensado neumático y moldeo.

**Figura 72.** Diagramas de Mando unidad de prensado neumático y moldeo.  
(a) Diagrama de mando compresor; (b) Diagrama de mando resistencias eléctricas.

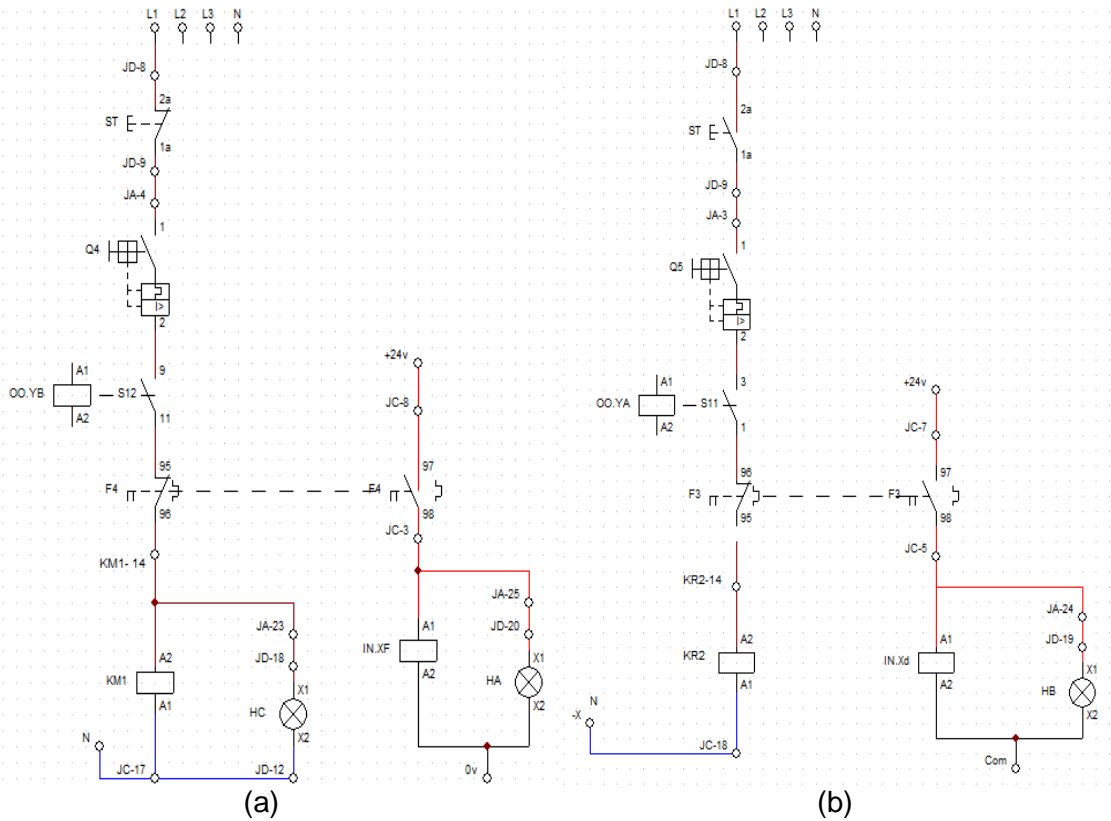


Fuente: El autor, diciembre de 2014.

Para ver los diagramas de mando de la unidad de prensado neumático y moldeo con mayor detalle remitirse al Anexo G: DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE PENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN, sección 6.1.

**4.3.2 Diagramas de mando unidad de prensado hidráulico y moldeo.** Se presentan el diagrama de mando del motor, (ver Figura 73 (a)), y el diagrama de mando de las resistencias eléctricas, (ver Figura 73 (b)) de la unidad de prensado hidráulico y moldeo.

**Figura 73.** Diagramas de mando unidad de prensado hidráulico y moldeo.  
 (a) Diagrama de mando del motor; (b) Diagrama de mando resistencias eléctricas.



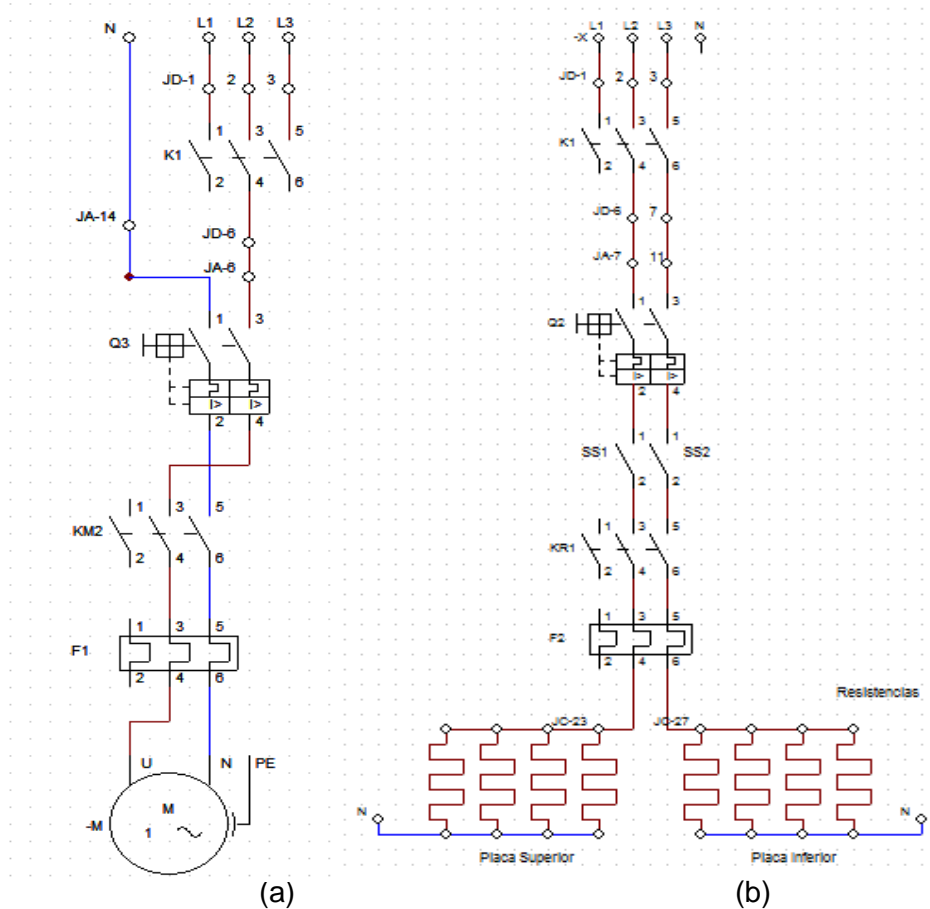
Fuente: El autor, diciembre de 2014.

Para ver los diagramas de mando de la unidad de prensado hidráulico y moldeo con mayor detalle remitirse al Anexo G: DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE Prensado Y Moldeo del proceso de moldeo por compresión, sección 6.2.

El diagrama o circuito de potencia es el encargado de alimentar al receptor (p.ej. motor, calefacción, electrofreno, iluminación, etc.). Está compuesto por el contactor (identificado con la letra K), elementos de protección (identificados con la letra F como pueden ser los fusibles F1, relé térmico F2, etc.) y un interruptor trifásico general (Q). Dicho circuito estará dimensionado a la tensión e intensidad que necesita el motor [30]. Se realizan los diagramas de potencia de la unidad de prensado neumático, (compresor y resistencias de calefacción), y diagramas de potencia de la unidad de prensado hidráulico (motor y resistencias de calefacción).

**4.3.3 Diagramas de Potencia unidad de prensado neumático y moldeo.** Se presentan el diagrama de potencia del compresor, (ver Figura 74 (a)), y el diagrama de potencia de las resistencias eléctricas, (ver Figura 74 (b)) de la unidad de prensado neumático y moldeo.

**Figura 74.** Diagramas de potencia unidad de prensado neumático y moldeo.  
(a) Diagrama de potencia compresor; (b) Diagrama de potencia resistencias eléctricas.

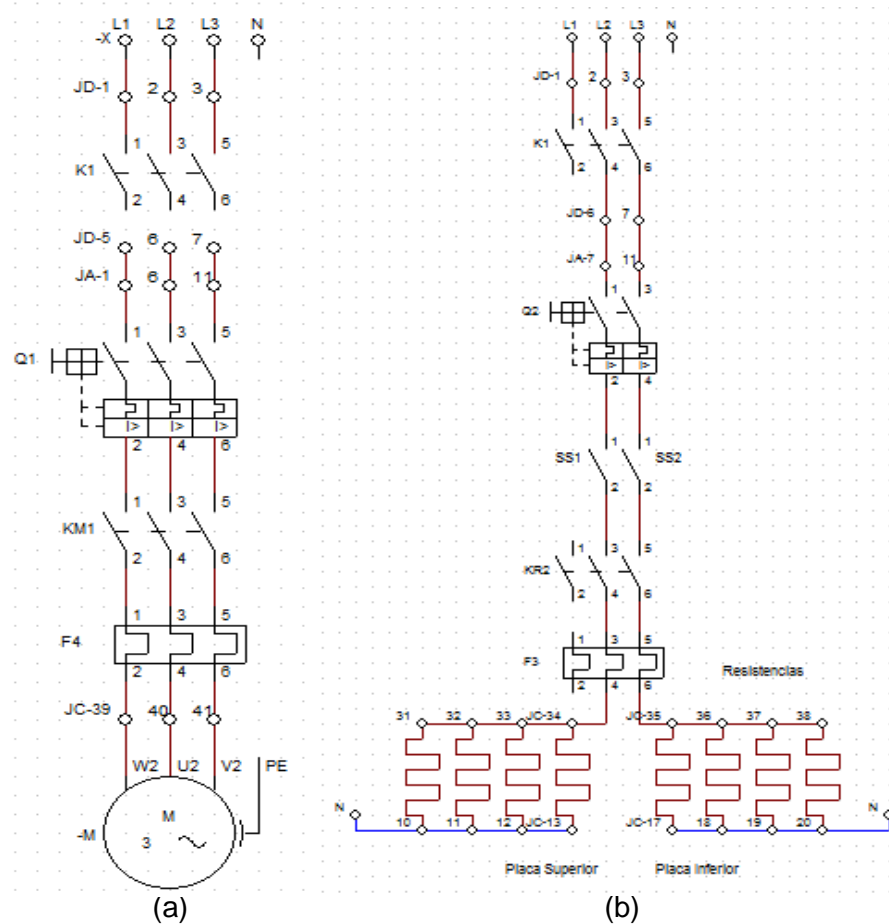


Fuente: El autor, diciembre de 2014.

Para ver los diagramas de potencia de la unidad de prensado neumático y moldeo con mayor detalle remitirse al Anexo G: DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE Prensado Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN, sección 6.3.

**4.3.4 Diagramas de Potencia de la unidad de prensado hidráulico y moldeo.** Se presenta el diagrama de potencia del motor, (ver Figura 75 (a)), y el diagrama de potencia de las resistencias eléctricas, (ver Figura 75 (b)) de la unidad de prensado hidráulico y moldeo.

**Figura 75.** Diagrama de potencia de la unidad de prensado hidráulico y moldeo. (a) Diagrama de potencia del motor; (b) Diagrama de potencia de resistencias eléctricas.

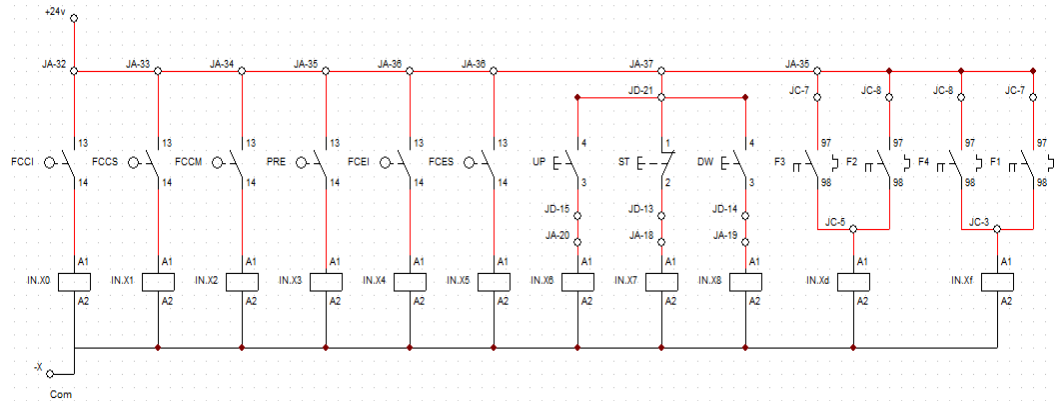


Fuente: El autor, diciembre de 2014.

Para ver los diagramas de potencia de la unidad de prensado hidráulico y moldeo con mayor detalle remitirse al Anexo G: DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE Prensado Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN, sección 6.4.

**4.3.5 Diagramas de entradas y salidas del PLC.** Se realiza el diagramas de entradas del PLC, (ver Figura 76).

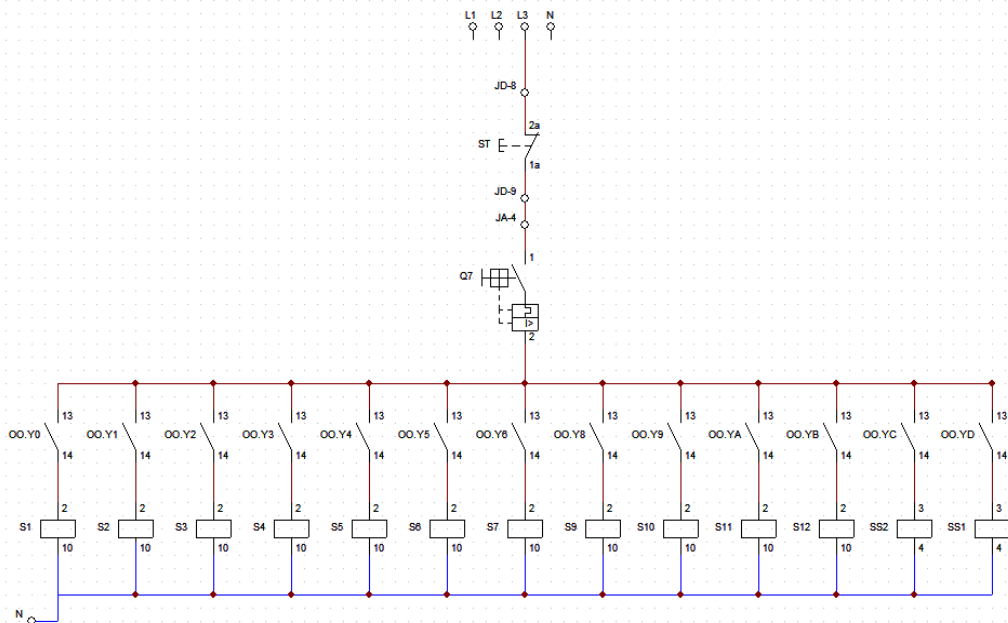
Figura 76. Diagrama de entradas del PLC.



Fuente: El autor, diciembre de 2014.

Se realiza el diagrama de salidas del PLC, (ver Figura 77).

Figura 77. Diagrama de salidas del PLC.



Fuente: El autor, diciembre de 2014.

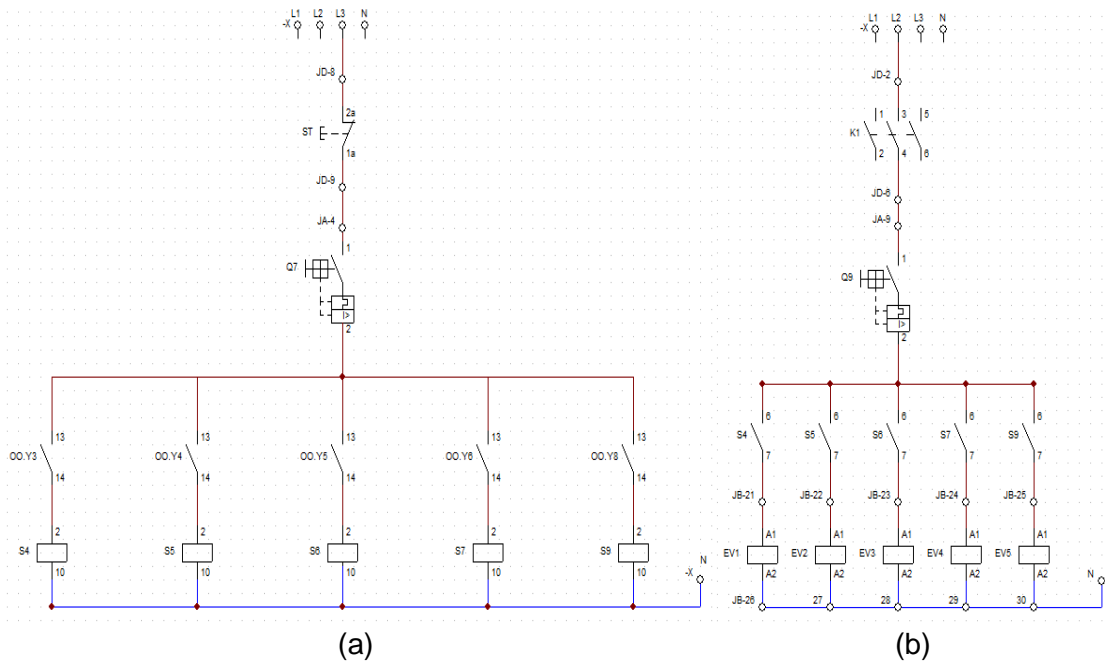
Para ver los diagramas de entradas y salidas del PLC con mayor detalle, remitirse al Anexo G: DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE PRENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN sección 6.5.



**4.3.6 Diagramas de mando y potencia de electroválvulas hidráulicas.** Se realizan diagramas de mando de las electroválvulas, (ver Figura 78 (a)) y los diagramas de potencia de las electroválvulas, (ver Figura 78 (b)) de la unidad de prensado hidráulico y moldeo.

**Figura 78.** Diagramas de mando y potencia de electroválvulas hidráulicas.

(a) Diagrama de mando de electroválvulas; (b) Diagrama de potencia de electroválvulas.



Fuente: El autor, diciembre de 2014.

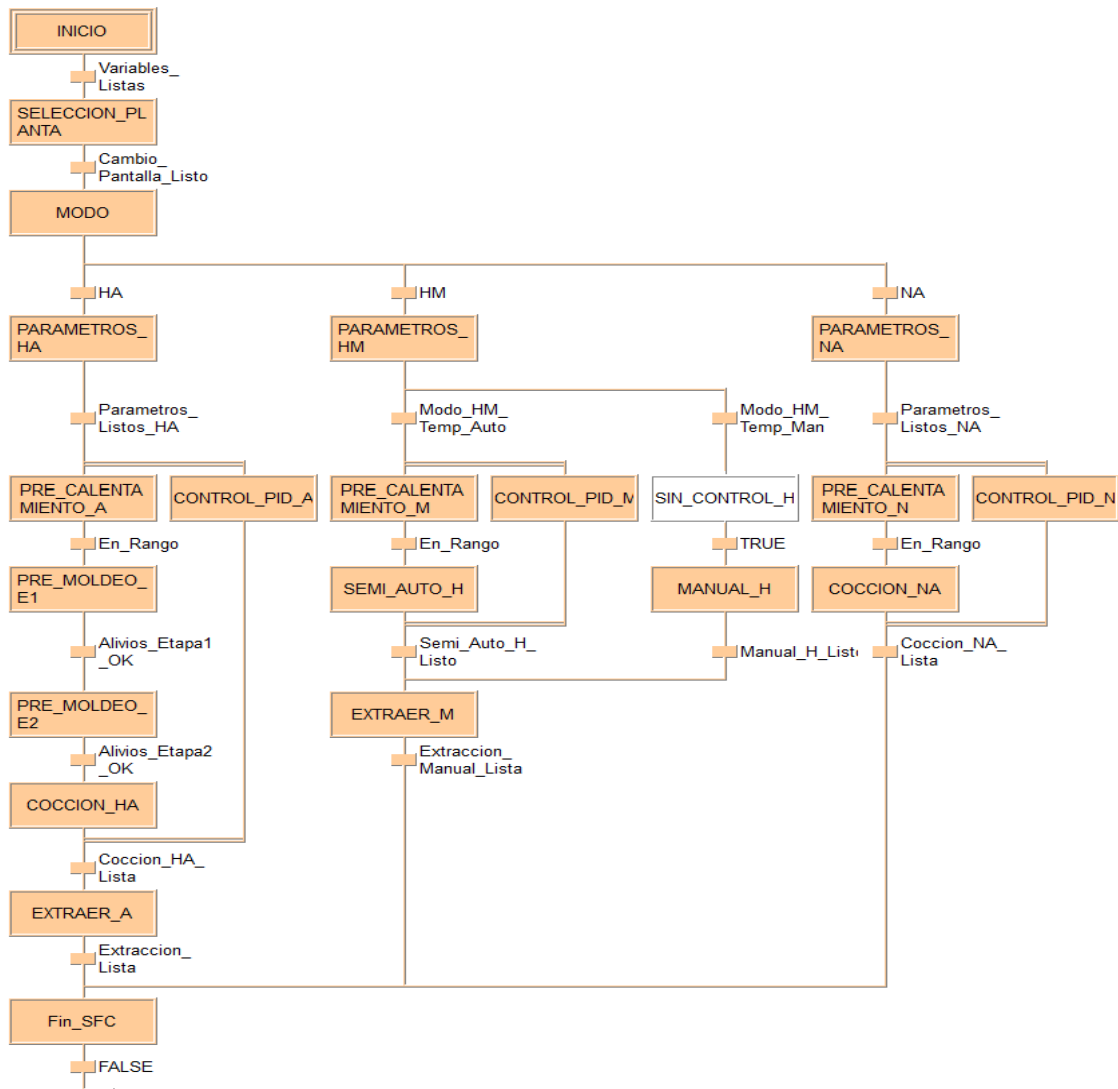
Para ver los diagramas de mando y potencia de las electroválvulas hidráulicas con mayor detalle, remitirse al Anexo G: DIAGRAMAS DE MANDO Y POTENCIA DE LAS UNIDADES DE PENSADO Y MOLDEO DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN sección 6.6.

#### 4.4 DIAGRAMAS DE PROGRAMACIÓN DEL PLC PARA EL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

Las unidades de prensado (Hidráulico/Neumático) y moldeo están controladas por un único sistema de control gobernado por un PLC. El Ingeniero Ernesto Felipe González logró integrar los sistemas de control de temperatura y posición de las unidades mediante la instalación de dos armarios de control equipados de instrumentación necesaria para dicho propósito. Dentro de este trabajo el ingeniero realizó la programación del controlador con el *software FPWIN Pro 6*. *Software* de programación según el estándar internacional IEC61131-3 propio de la empresa Panasonic. Esta versión del *software* permite programar cualquier PLC de la serie FP.

**4.4.1 Grafcet de programación del PLC unidades de prensado y moldeo.** La programación del PLC empieza con la construcción del *Grafcet*, el “Gráfico de Orden Etapa Transición” es un diagrama de secuencia de etapas que tienen asociadas unas determinadas acciones a realizar sobre el proceso junto con las condiciones o transiciones que provocan que se produzca el paso de una etapa a otra [31]. El *Grafcet* muestra el inicio, una transición de variables listas, continúa con la etapa selección de la prensa (hidráulica o neumática), la transición de cambio de pantalla lleva a la etapa para elegir el modo de operación (manual o automático), según el modo, las transiciones HA; HM y HN llevan a seleccionar los parámetros de operación y mediante transiciones de parámetros listos se continúa con la ejecución de acciones de control hasta finalizar, (ver Figura 79).

**Figura 79.** *Grafcet* de programación del PLC unidades de prensado y moldeo.



Fuente: Ingeniero Ernesto Felipe González, marzo de 2014.

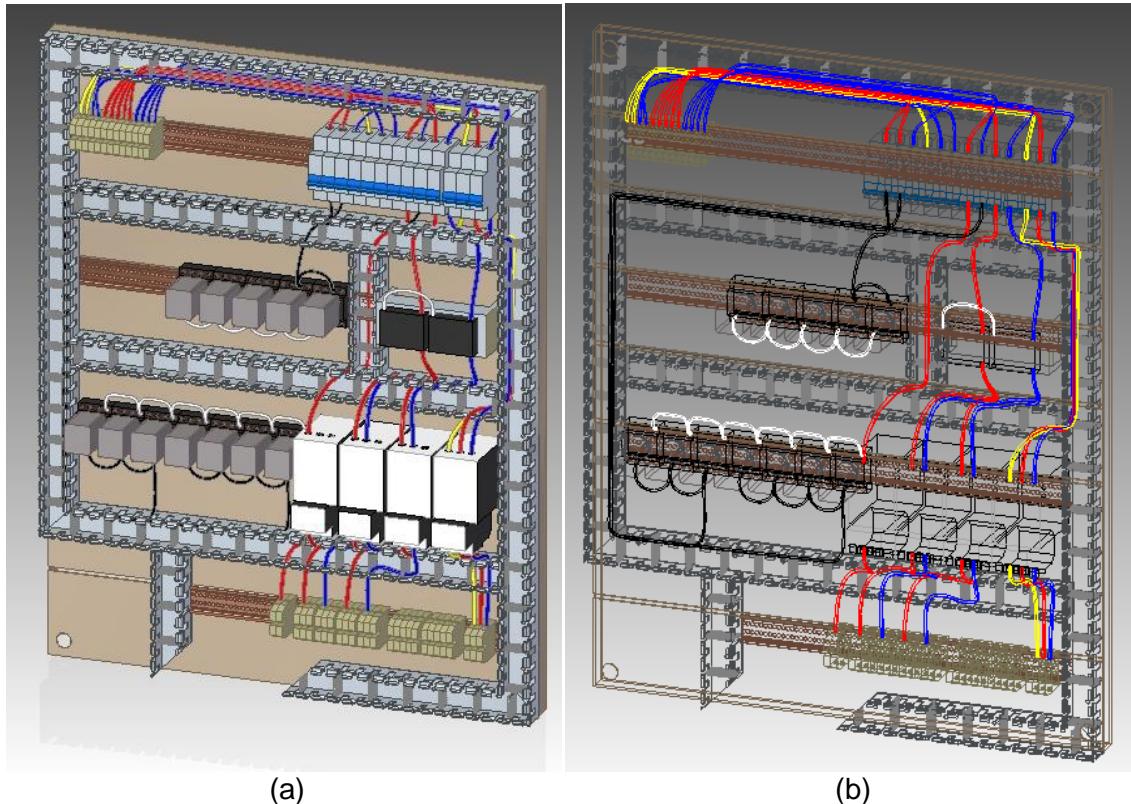
**4.4.2 Ladder de programación del PLC unidades de prensado y moldeo.** La programación del PLC en lenguaje *Ladder* o escalera es la más común, los diagramas de escalera son esquemas para representar la lógica de control de sistemas industriales. Se le llama diagrama "escalera" porque se asemejan a una escalera, con dos rieles verticales (de alimentación) y "escalones" (líneas horizontales), en las que hay circuitos de control que definen la lógica a través de funciones [32]. El ingeniero Ernesto Felipe González realizó la programación *Ladder* del PLC para controlar la temperatura y posición de moldes de las unidades de prensado y moldeo del proceso de moldeo por compresión, para ver los diagramas de la programación remitirse al Anexo H: DIAGRAMAS PROGRAMACIÓN LADDER DEL PLC UNIDADES DE PRENSADO Y MOLDEO.

#### 4.5 PLANOS EN SOLID EDGE DEL ARMARIO 1 DE CONTROL DEL PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN

Paralelo al trabajo de la sección 4.4 se llevaron a cabo diseños 3D del armario 1 de control, el panel de potencia equipado de relés térmicos, relés electromecánicos, relés de estado sólido, *breakers*, rieles, canaletas y borneras, cada uno de estos fue simulado en un software CAD, *Solid Edge* versión ST5. Los elementos se visualizan sólidos, (ver Figura 80 (a)) y la secuencia del cableado, (ver Figura 80 (b)).

**Figura 80.** Planos CAD en *Solid Edge* ST5 del Armario 1 de control.

(a) Elementos sólidos del armario 1; (b) Secuencia de cableado del armario 1.



Fuente: Ingeniero Ernesto Felipe González, marzo de 2014.

#### 4.6 PRUEBA DE MOLDEO EN LA CÉLULA DE PROCESO

Con el fin de validar los modelos ISA-88 del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables, se programó y se realizó una prueba de moldeo por compresión en el laboratorio de Reología de Unicauca, en la que participaron dos ingenieros investigadores del paquete tecnológico de semirrígidos, (ver ficha técnica de la prueba en la Tabla 24).

**Tabla 24.** Ficha técnica: Prueba de moldeo en la célula de proceso.

PRUEBA DE MOLDEO EN LA CÉLULA DE PROCESO	
Fecha:	Febrero 23 de 2015
Participantes PIAI:	Juan Manuel Ordóñez Fabián Pabón Carabalí
Participantes CYTBIA:	Susana Cajiao Deyvid Mera Mamián
Producto:	Lote de 3 bandejas semirrígidas
Tiempo:	4 horas
Herramientas:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo de control procedimental impreso de elaboración de bandejas, sección 2.2.3</li> <li>• Formatos Excel impresos de seguimientos de parámetros, ver Anexo digital A: DISEÑO DE MODELOS DE REPORTES</li> </ul>

Fuente: El autor, febrero de 2015.

La prueba se realizó para producir un lote de 3 bandejas semirrígidas, (ver Figura 81).

**Figura 81.** Evidencia fotográfica prueba de moldeo: elaboración de bandejas.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

- **Resultado de la prueba de moldeo.** El resultado de la prueba de moldeo fue una bandeja de 20 g y 2 mm de espesor que no cumple con los requerimientos del producto deseados debido a dos factores: 1. Variación en la formulación de la récipe de control y 2. Fallas en los módulos de equipo de secado y prensado. Una bandeja reseca, se notaban

las partículas gruesas de fique y además se había prensado más de uno de los lados de la bandeja, (ver Figura 82).

**Figura 82.** Bandeja de 20 g y 2 mm de espesor.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

Para mayor detalle de las evidencias y resultados de la prueba de moldeo en la célula de proceso, remitirse al Anexo I: PRUEBA DE MOLDEO EN LA CÉLULA DE PROCESO.

#### **4.7 ESCALAMIENTO DE LA CÉLULA DE PROCESO DE MOLDEO POR COMPRESIÓN DE UNICAUCA**

Se entiende por escalamiento la adquisición de capacidades tecnológicas y vínculos de mercado que permiten a las empresas mejorar su competitividad y moverse hacia actividades de mayor valor, es decir, el escalamiento es hacer mejores productos, hacerlos con más eficiencia o cambiar hacia actividades de mayor capacidad, además de incorporar una mejor actitud hacia la innovación y lograr más valor agregado, ya sea entrando a nuevos nichos de mercado de alto valor o a nuevos sectores, o adquiriendo nuevas funciones productivas o de servicios [33].

Es posible configurar el escalamiento en cuatro tipos:

1. *Escalamiento de proceso:* Consiste en mejorar de forma más eficiente reorganizando el sistema de producción o introduciendo tecnología superior.
2. *Escalamiento de producto:* Consiste en cambiar hacia productos más sofisticados en términos de incrementar el valor agregado.
3. *Escalamiento de funciones:* Representa la adquisición de nuevas y superiores funciones en la cadena, como el diseño, el marketing o abandonar las funciones de bajo valor agregado, escalamiento de maquila hacia el paquete completo.
4. *Escalamiento entre sectores:* Consiste en aplicar las competencias adquiridas en una particular función para moverse en un nuevo sector [33].

Un procedimiento de escalado satisfactorio puede requerir un enfoque empírico paso a paso, en el cual el tamaño del reactor, por citar un ejemplo de módulo de equipo, se va incrementando paulatinamente, para poder conocer en detalle el efecto del cambio de escala en la velocidad y rendimiento de la reacción. Este procedimiento es largo y costoso

y por ello se han desarrollado un número de métodos semi empíricos alternativos para aliviar esta situación [34].

**4.7.1 Proceso de Investigación y Desarrollo (I + D).** El proceso de Investigación y Desarrollo se divide en 5 etapas, niveles o escalas:

- *Laboratorio:* El laboratorio constituye la unidad primaria de investigación en la que quedan determinadas las metodicas de síntesis o procesamiento y se establecen las condiciones bajo las cuales se obtienen los mejores resultados [34].
- *Banco:* En esta etapa la investigación comienza a adquirir un carácter tecnológico y posee sus particularidades que la distinguen como un mayor nivel de instrumentación y automatización y que el trabajo experimental se orienta hacia el completamiento y precisión de la información de laboratorio [34].
- *Piloto:* Los estudios de escala piloto resultan de especial importancia para el cambio de escala en muchos procesos, pero poseen un alto costo y la decisión de su realización debe estar subordinada a un conjunto de factores entre los cuales se destacan: tipo de proceso, nivel de información disponible y tamaño propuesto para la unidad industrial [34].
- *Semi-industrial:* Esta es una etapa cara del proceso de escalado que puede prolongar excesivamente la introducción de una nueva tecnología en el mercado y sólo se realiza para aquellas tecnologías de una gran complejidad y que representan un salto apreciable en el nivel de desarrollo existente [34].
- *Industrial:* Normalmente esta escala no se considera una parte del proceso de investigación y desarrollo y esto constituye un error conceptual con fuertes implicaciones de índole práctico. Realmente la industria constituye, no sólo una prueba de validación de las experiencias precedentes, sino que enriquece la información ingenieril disponible y los modelos matemáticos formulados y brinda información de gran valor para el perfeccionamiento de equipos y para la optimización del propio proceso productivo [34].

Esta división es convencional y por ello no son muy precisos los límites entre una escala y otra, ni tienen que considerarse siempre necesariamente todas las escalas, siendo bastante común, por ejemplo, obviar la escala semi-industrial. También hay casos, cuando el proceso es suficientemente conocido y sus características lo permiten, en que puede pasarse directamente de la escala de laboratorio a la escala industrial. En su concepción más simple, el concepto de escalado se refiere al paso de una escala a otra, durante el proceso de desarrollo de un nuevo producto o tecnología. En ese caso se acostumbra a utilizar el término “escalado ascendente” (*scale-up*) [34].

**4.7.2 Escalamiento del proceso de elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables.** Para el estudio de escalamiento se tomará el procedimiento de elaboración de bandejas, ya que se fabrica un producto para un nicho de mercado, mientras la elaboración de probetas biodegradables para ensayo se fabrica con el fin de realizar pruebas mecánicas de tensión las cuales se estudian para aumentar la calidad de la bandeja. La propuesta de escalamiento en este trabajo de grado es un “*Escalamiento de proceso*” ya que la estrategia es replicar las condiciones de laboratorio y llevarlas a un nivel de “*Escala Piloto*” con la adquisición de capacidades tecnológicas, el objetivo es organizar la línea de producción e integrar nuevos módulos de equipo que cumplan con las condiciones necesarias para la elaboración de bandejas y sean capaces de transformar mayores volúmenes de materia prima respecto a la escala de laboratorio.

**4.7.3 Situación actual escala de laboratorio del proceso de elaboración de bandejas.** La célula de elaboración de bandejas a nivel de laboratorio está compuesta por 5 unidades de equipo, cada una necesaria para la manufactura de una bandeja semirrígida biodegradable pero para producir a nivel piloto es necesario definir una nueva línea de producción y formular la adquisición de capacidades tecnológicas, en el diseño de la nueva célula de proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables se tomará como base la experimentación y operación a escala de laboratorio. Para propósitos de este proyecto y aumentar su factibilidad se propone aumentar el número de etapas de proceso y reemplazar operaciones dependientes de la habilidad del operario, lo cual disminuiría la complejidad del procedimiento.

Con el fin de dar relevancia a que el producto siga siendo totalmente biodegradable se citan las materias primas que han sido objeto de estudio en secciones anteriores con buenos resultados a nivel de laboratorio: harina de yuca de variedad MPER 183, fibra de Fique variedad uña de águila, emulsionante *Tween* 80 Fisher, plastificante Glicerol USP comercial de pureza 99%, aceite vegetal de oliva y Agua (de llave del circuito de agua potable). Para las condiciones en que estas materias primas se acopian se requiere recipientes plásticos inocuos y cerrados, separados del piso y que se encuentren en un ambiente relativamente seco.

**4.7.4 Propuesta de escala piloto de la célula de proceso de elaboración de bandejas.** Debido a observaciones que se han hecho y el análisis de los procedimientos que se llevan a cabo en el laboratorio de Reología, en este trabajo de grado se proponen recomendaciones de tecnología dura, elementos tangibles como la maquinaria y equipos para una planta piloto del proceso de elaboración de bandejas semirrígidas biodegradables. Hasta el momento el grupo de investigadores ha registrado todo tipo de información de las bandejas, que junto con las pruebas de tensión que se hacen a las probetas, se consideran estudios de investigación y desarrollo, por tanto se sugiere empezar el escalamiento industrial pasando primero por el escalamiento a nivel piloto.

La planta piloto debe montarse y operarse de manera que permita satisfacer al menos uno de los siguientes objetivos principales:

1. Evaluar la factibilidad de un proceso tecnológico.
2. Obtener la información para el diseño de una planta comercial.
3. Obtener cantidades de productos con fines de ensayo o promoción.
4. Obtener “Know - How” del proceso.

5. Probar métodos de análisis de procesos y control de calidad.
6. Estudiar sistemas para el control de procesos.
7. Entrenar al personal [34].

**4.7.5 Concepto de ingenierización para escalamiento.** Para llevar a cabo un proceso de escalamiento, se debe tener en cuenta el concepto de ingenierización, que contempla la interacción de los ingenieros de las distintas especialidades (químicos, bioquímicos, mecánicos, eléctricos, industriales, etc.) junto con los investigadores de laboratorio (químicos, bioquímicos, biólogos, médicos, físicos, etc.), desde el inicio mismo del proceso de I+D. Además se debe introducir el concepto de ingeniería concurrente, para aplicarlo se necesitan requisitos elementales como: facilidades de comunicación entre el colectivo, uso de técnicas de trabajo en grupo, disponer de lugares adecuados de trabajo y disponer de bases de datos comunes [34].

**4.7.6 Diseño de la célula de proceso de elaboración de bandejas para escala piloto.** Se proponen 6 unidades para el diseño de la nueva célula de proceso, algunas cambian y otras serán las mismas que se han trabajado en escala de laboratorio: Acondicionamiento del fique, mezclado, pre-cocido, amasado y corte, prensado neumático y moldeo y la unidad de recubrimiento, conformarán la nueva célula de proceso de elaboración de bandejas a nivel piloto. A continuación se expone cada unidad indicando actividades y parámetros relevantes del proceso.

- **Unidad de acondicionamiento de fique.** En esta unidad se ejecuta la etapa de proceso de acondicionamiento de Fique, como objetivo, se debe reducir el tamaño del hilo que viene arreglado en fardos de Fique, primero es cortado en hilos de 20 cm para pasar por una molienda y se seleccionan las partículas de 250 micras que salen de la operación de tamizado, es el tamaño óptimo para que las fibras de fique se entremezclen con la harina de yuca.
- **Unidad de mezclado.** En esta unidad se realiza la etapa de proceso mezclado, previamente se debe formular las cantidades de harina de yuca, fique tamizado, agua y aditivos para un lote de producción y determinar las proporciones adecuadas que debe agregarse a la mezcla. El parámetro humedad de la harina de Yuca es indispensable para el balance, sabiendo esto se sabrá qué cantidad de agua debe adicionarse a la mezcla. Calculadas las proporciones a dosificar se vierten en el módulo de equipo mezclador y se mezcla hasta homogenizar.
- **Unidad de pre-moldeo.** Esta unidad se propone para remplazar la unidad de gelatinización de harina de yuca del proceso en laboratorio. Gracias a investigaciones que se llevaron a cabo con resultados satisfactorios, la unidad de gelatinizado cambia por la unidad de pre-moldeo mediante un secado por rodillos, teniendo en cuenta la temperatura en los cilindros, la humedad de la materia prima, la velocidad de giro de los cilindros, la distancia entre cilindros y la altura en la alimentación. Se dispone de la mezcla de harina de yuca, fique tamizado agua y aditivos para ser pasada por un tambor caliente a 90°C que realice una pre-moldeo de la mezcla y reducir su porcentaje de humedad.
- **Unidad de amasado y corte.** Esta unidad se propone para remplazar el secado de la masa (mezcla fibra de fique, harina de yuca, agua y aditivos) con el horno en laboratorio.



Se propone que la masa proveniente de la etapa de pre-moldeo, que viene seca, pase a ser amasada mediante un equipo que termine de compactar la masa. La idea es obtener una pasta plana y ancha de masa para que pase a la siguiente unidad. Se debe tener en cuenta la forma y el tamaño que tenga la pasta al salir del amasado pues al finalizar el amasado, la unidad debe cortar en trozos estandarizados la pasta seca, cada trozo tendrá las dimensiones adecuadas para no incurrir en exceso de rebabas, o por el contrario, productos defectuosos en la etapa de prensado.

- **Unidad de prensado neumático y moldeo.** En esta unidad los trozos de pasta plana de masa (mezcla de harina de yuca, fique tamizado, agua y aditivos) son moldeados con la unidad de prensado neumático y finaliza el moldeo de la masa. La prensa deberá tener los moldes adecuados según la forma y la dimensión deseada de la bandeja y mantener el recubrimiento de teflón para que no haya adherencia del producto. En esta unidad se debe tener en cuenta la temperatura de los moldes y además controlar el suministro de presión de moldeo.

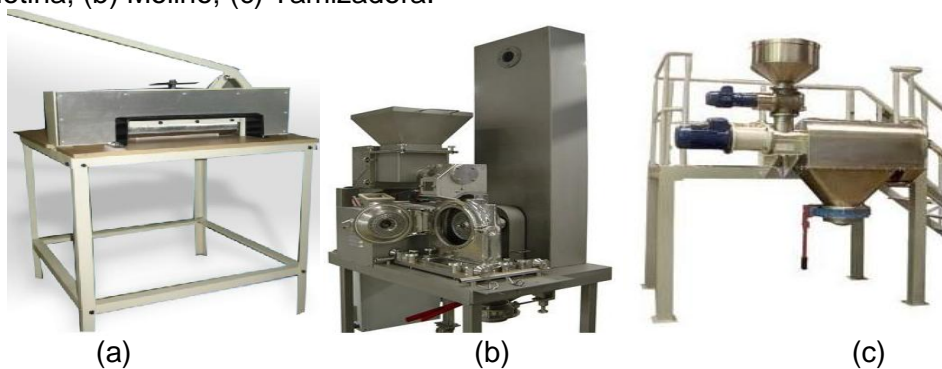
- **Unidad de recubrimiento.** La función de esta unidad es revestir la bandeja de una capa fina de material hidrofóbico e inocuo, brindando calidad y propiedades anticorrosivas al contacto esporádico con el agua. Además para efectos de almacenamiento a gran escala, es necesario pensar en que se mantenga la vida útil del producto.

#### 4.7.7 Propuesta tecnológica para escala piloto de la célula de proceso de elaboración de bandejas.

- **Unidad de acondicionamiento de fique escala piloto.** Esta unidad se propone para el módulo de corte una guillotina manual con cuchillas de acero inoxidable [35], del fabricante Mundial de guillotinas, (ver Figura 83 (a)). Para el módulo de molienda se propone un *KOMODÍN K-160*, un molino destinado al trabajo a escala piloto. Se pueden procesar pequeñas muestras o cantidades de hasta 150 kg/h en servicio continuo y según las propiedades del producto a moler [36], del fabricante Lleal S.A., (ver Figura 83 (b)). Para el módulo de tamizado se propone una tamizadora CEN-650 montada sobre una pequeña estructura de hierro y alimentada mediante una válvula rotativa D-2,5 con tolva de 70 litros para productos tanto secos como húmedos, en ejecución fija o móvil, fabricada en acero inoxidable AISI-316L [36], del fabricante Lleal S.A., (ver Figura 83 (c)).

**Figura 83.** Unidad de acondicionamiento de fique escala piloto.

(a) Guillotina; (b) Molino; (c) Tamizadora.



Fuente: Tomado de [35], [36], febrero de 2015.

Para la alimentación de cada una de las unidades, corte, molienda y tamizado, se requiere de personal capacitado que conozca el procedimiento y maneje el récipe de control. Según el lote a producir la récipe debe contener información necesaria de la cantidad de hilo de fique a cortar y parámetros que se tienen en cuenta, como el tiempo de tamizado y el número de tamiz que se debe elegir para llevar el material resultante a la siguiente etapa del proceso.

- **Unidad de Mezclado escala piloto.** Para la unidad de mezclado, debido a que la mezcla de harina de yuca y fibra de fique se le debe adicionar materiales viscosos, se propone un módulo de equipo mezcladora Planetaria *Plamixer* PL-30 con el cuadro eléctrico adosado al equipo. Son indispensables para procesos de alta y media viscosidad cuyo denominador común es su alto contenido en sólidos en vehículos de dispersión muy pequeños y de difícil mezcla, del fabricante Lleal S.A., (ver Figura 84). Esta versión tiene capacidad de 30 L, fabricada en acero inoxidable, incorpora: un sistema de elevación del cabezal mediante una central hidráulica; una pala rascadora que conduce el producto hacia la zona de mezcla, 2 ó 3 palas de mezcla que se desplazan circularmente y sobre sí mismas; un eje rápido con disco *cowles* (opcional); una tapa para trabajar al vacío y un depósito que puede ser con doble cámara para refrigeración y calefacción [36].

**Figura 84.** Módulo de equipo mezcladora Planetaria *Plamixer* PL-30.



Fuente: Tomado de [36], febrero de 2015.

Para la alimentación del módulo de equipo mezclador, se requiere de un operario que manipule la cantidad de aditivos según el lote a producir, teniendo en cuenta las normas de seguridad para su protección, como la máscara de respiración ya que las fibras de fique se consideran dañinas para los pulmones y además al manipular grandes cantidades de aditivos químicos para la mezcla, hay repercusiones en el oxígeno.

- **Unidad de pre-moldeo escala piloto.** Se propone el modulo de equipo secador *Simon Drum* de doble tambor del fabricante *Simondryers*, construido en hierro fundido y tambor cromado con sistema de tornillo de ajuste entre los tambores. El sistema de propulsión del tambor incluye un motor y una caja de engranajes con velocidad variable y control, el sistema de temperatura es alimentado con vapor al interior de cada tambor, las condensaciones de vapor son extraídas con trampas de condensación, cuenta con

campana de captura para el vapor generado por el proceso de secado, cuchillas paralelas a cada tambor para remover el producto seco de la superficie del tambor y transportador de producto seco para el material removido por las cuchillas [37], (ver Figura 85).

**Figura 85.** Modulo de equipo secador *Simon Drum* de doble tambor.



Fuente: Tomado de [37], febrero de 2015.

- **Unidad de amasado y corte escala piloto.** Para la unidad de amasado se propone el modulo de equipo amasadora AME-7 con tornillo extrusor, es una máquina ideal para el amasado de productos de muy alta viscosidad. Incluye un panel eléctrico de accionamiento, con inversor de sistema de giro de las palas “Z” y husillo extrusor, (ver Figura 86). En la versión AME el cabezal de salida del husillo extrusor se puede diseñar según la forma del extrusionado deseada [36].

**Figura 86.** Modulo de equipo amasadora AME-7 con tornillo extrusor.



Fuente: Tomado de [36], febrero de 2015.

La alimentación de la amasadora se propone que sea manual, un operario debe traer la masa proveniente del secador de tambor e introducirla. El diseño del cabezal de salida del extrusor de la amasadora es importante, el material debe tener una forma cuadrada con dimensiones ajustadas para que en la unidad de prensado no haya exceso de rebabas o bandejas incompletas, por esto se propone que el diseño del cabezal sea laminar (Film laminado en extrusión). La pasta laminada rectangular sale de la amasadora para ser cortada en trozos según las especificaciones del molde de la unidad de prensado, el material es cortado mediante una guillotina de movimiento, que se posiciona en el lugar de corte avanzando al compás de la lámina y realizando el corte acompañándola a su

salida. Luego avanza por una banda, utilizando separadores para proteger los bordes de cada lámina.

- **Unidad de prensado neumático y moldeo escala piloto.** Para esta unidad se propone una prensa de cigüeñal neumática serie JE21 con carrera ajustable, del fabricante por *Anhui Laifu NC Machine Co., Ltda.*, (ver Figura 87). Esta prensa realiza moldeos rápidos en un solo prensado, debido a su cigüeñal, la acción de subir y bajar el molde macho es más dinámica agilizando los tiempos de prensado a solo segundos, utiliza materiales de fricción y semi fricción, con doble válvula de seguridad, garantiza la precisión de la implantación del cigüeñal y tiene un control centralizado con PLC que mejora las funciones de la máquina. La prensa tiene barrera protectora y un seguro garantiza que la operación sea más segura y además, es más fácil de operar gracias a su pedal [38].

**Figura 87.** Unidad de prensado: Prensa de cigüeñal neumática serie JE21.



Fuente: Tomado de [38], febrero de 2015.

La alimentación de esta unidad se hace automáticamente, las láminas cortadas en dimensiones aproximadas al molde se transportan por una banda que va alimentando la prensa y se detiene por los segundos que demora el prensado. Las láminas de masa deben ser un poco más grandes que el molde para que las rebabas después del prensado sean mínimas. Para su extracción se recomienda utilizar aire comprimido que las va expulsando de las cavidades hembra de la prensa y son dispuestas por un operario en una banda para la siguiente unidad.

- **Unidad de recubrimiento escala piloto.** Para esta unidad se propone el módulo de equipo recomendado en el capítulo 3, sección 3.1.2 cumplimiento del requerimiento hardware para el recubrimiento de aislante de humedad o hidrofóbico a la bandeja, un *AUTOJET* Modelo 1550+Sistema Modular de *Spray*, este sistema de rocío fue estudiado por los investigadores es laboratorio con resultados satisfactorios para dichos propósitos.

Para que las bandejas sean recubiertas del material hidrofóbico, se requiere que sean dispuestas por un operario en una banda transportadora de forma ordenada, una línea del producto que vaya siendo transportada a velocidad baja y con retardos de tiempo para

que el sistema modular de *spray* del *AUTOJET* vaya recubriendo de manera uniforme cada bandeja, esta operación depende de la cantidad de *sprays* que se dispongan.

Según la posición en que el operario ordene las bandejas en la banda y a medida que van saliendo las tandas recubiertas, van cambiando de cara de forma mecánica por medio de una pestaña adecuada en la trayectoria de la banda, esto después de que haya pasado por un sistema de secado por aireación. Para el secado se propone el uso de un sistema conectado de varios inyectores de aire frío, un modulo de equipo Tubo de *Vortex* 21000 en acero inoxidable, (ver Figura 88), del fabricante *Meech*, convierte un flujo de aire comprimido en aire frío por un extremo y por el otro aire caliente [39].

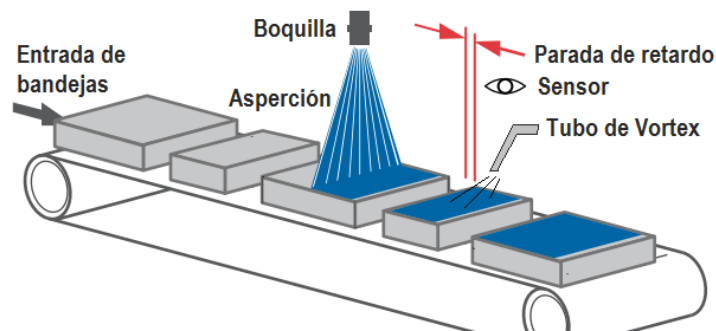
**Figura 88.** Módulo de equipo Tubo de *Vortex* 21000.



Fuente: Tomado de [39], febrero de 2015.

Para la línea de aspersión de las bandejas se requiere que después de la capa del material hidrofóbico, este sea secado mediante el aire frío que inyecte el Tubo de *Vortex*. Para el transporte de las bandejas se requiere de una banda transportadora diseñada para la velocidad y el control de tiempos de parada que necesite el sistema para recubrir y secar el producto, (ver Figura 89). Este diseño debe tener en cuenta especificaciones del producto, como el tamaño y material de la bandeja y especificaciones del laboratorio, como espacio disponible y disposición del sistema modular de *spray* y de inyectores de aire frío.

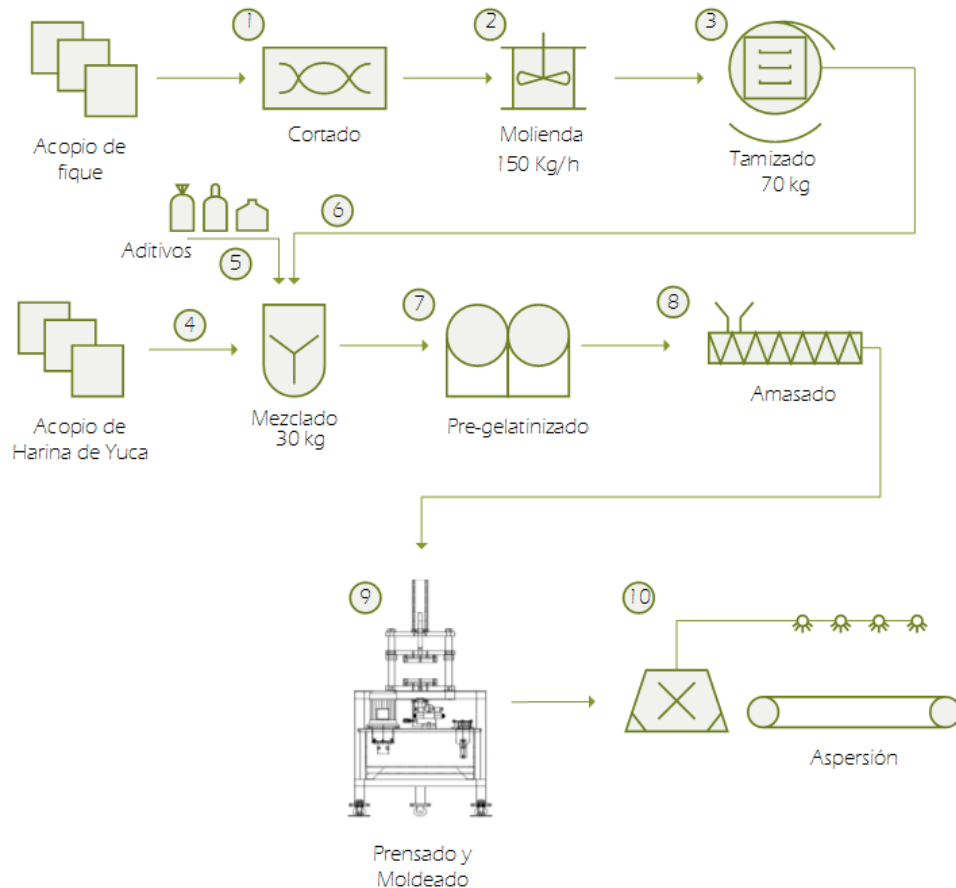
**Figura 89.** Sistema de aspersión y secado de bandejas.



Fuente: Modificado de [22], febrero de 2015.

**4.7.8 PFD célula de proceso de elaboración de bandejas a escala piloto.** Para el reconocimiento del flujo de materiales a lo largo de la nueva célula de proceso de elaboración de bandejas y establecer de manera teórica la capacidad instalada de la misma, se presenta el diagrama de flujo de proceso y la caja de descripción de los materiales, (ver Figura 90).

**Figura 90.** PFD célula de proceso de elaboración de bandejas a escala piloto.



FLUJO DE MATERIALES	
NUMERO	DESCRIPCIÓN
1	Fique entero
2	Fique cortado
3	Fique molido
4	Harina de yuca
5	Aditivos
6	Fique tamizado
7	Mezcla de fique, harina de yuca y aditivos
8	Masa pre-gelatinizada
9	Masa homogénea en lámina
10	Bandeja semirrígida

Fuente: El autor, marzo de 2015.

**4.7.9 Lote de producto de la célula de proceso de elaboración de bandejas a escala piloto.** La unidad a escala piloto que se considera un cuello de botella en la célula de proceso es la de mezclado, debido a que su capacidad no supera los 30 kg y considerando que un operario debe dosificar en el depósito de la mezcladora de forma separada harina de yuca, fique tamizado, agua y aditivos, se considera que el tiempo que demoran estas acciones es de 10 minutos. Para la operación de mezclado, se considera que el módulo de equipo mezcla y extrae los 30 kg de los materiales en 10 minutos, lo que quiere decir que la unidad de mezclado tiene una capacidad aproximada de 90 kg/hora. La mezcla que proviene de la unidad, debe pasar por una etapa de secado, mediante el módulo de equipo secador de tambor, el cual reducirá el porcentaje de humedad de la mezcla y por tanto su volumen, lo cual implica que la masa pesará menos. De acuerdo a eso, se supone una cantidad aproximada de 70 kg de masa seca que sale de la unidad de secado cada media hora o 140.000 g/hora.

Según los investigadores del proceso en escala de laboratorio, el producto que actualmente obtienen es el resultado de dosificar en el molde hembra de la unidad de prensado y moldeo 60 g de masa con un porcentaje de humedad del 30 a 35%, después del prensado, resultan bandejas de 2 mm de espesor que pesan 20 g, lo cual indica que el peso del material se ha reducido en un 50%. Se parte de estos valores para realizar los cálculos del lote y se supondrá que la masa resultante de la etapa de secado a escala piloto, se maneja el mismo peso para dosificar en el molde hembra de la unidad de prensado y tiene el mismo porcentaje de humedad.

$$\frac{140.000 \text{ g (masa por hora que llega)}}{60 \text{ g (peso por porción a dosificar)}} = 2.333 \text{ unidades de masa para prensar por hora}$$

La unidad de prensado se considera el segundo cuello de botella, se espera que la prensa moldee 6 bandejas en 1 (un) minuto, en 1 (una) hora serán 360 bandejas, lo que significa que las 2.333 unidades de masa se moldearán en 6.5 horas, es decir, 2.333 bandejas de 20 g y 2 mm de espesor c/u, se fabricarán en un tiempo aproximado de 6 (seis) horas y 30 (treinta) minutos.

#### **4.8 CADENA DE VALOR EMPRESARIAL DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE BANDEJAS**

Se propone una cadena de valor del proceso de elaboración de bandejas con eslabones que cumplen actividades gerenciales y complementan actividades primarias de la cadena a nivel de laboratorio. Hay cuatro categorías genéricas de actividades primarias relacionadas con la competencia en cualquier empresa. Cada categoría es divisible en varias actividades distintas que dependen del sector industrial en particular y de la estrategia de la empresa [40].

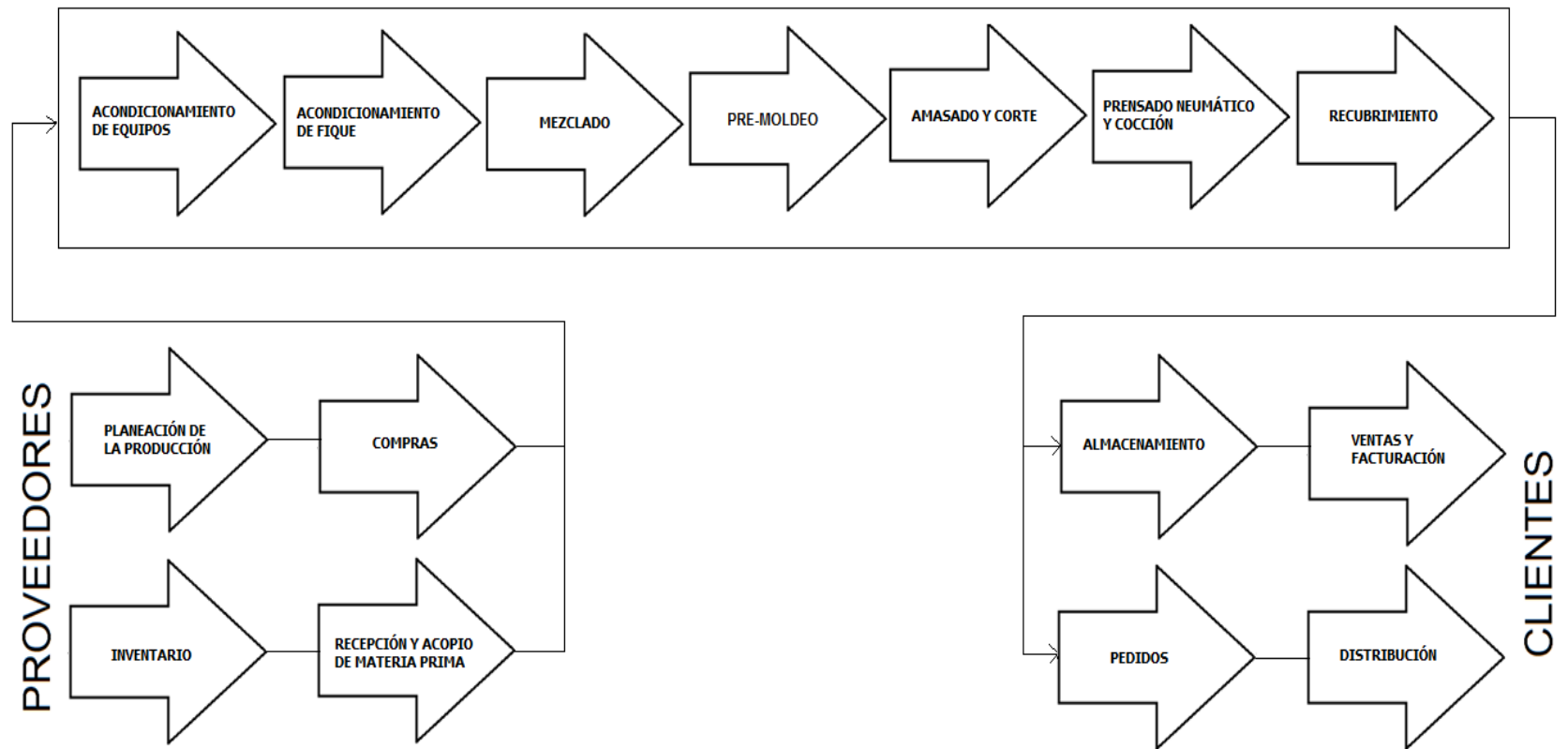
- *Logística interna.* Las actividades asociadas con recibo, almacenamiento y disseminación de insumos del producto, como manejo de materiales, almacenamiento, control de inventarios, programación de vehículos y retorno a los proveedores [40].

- *Operaciones.* Actividades asociadas con la transformación de insumos en la forma final del producto, como maquinado, empaque, ensamble, mantenimiento del equipo, pruebas, impresión u operaciones de instalación [40].
- *Logística externa.* Actividades asociadas con la recopilación, almacenamiento y distribución física del producto a los compradores, como almacenes de materias terminadas, manejo de materiales, operación de vehículos de entrega, procesamiento de pedidos y programación [40].
- *Mercadotecnia y ventas.* Actividades asociadas con proporcionar un medio por el cual los compradores puedan comprar el producto e inducirlos a hacerlo, como publicidad, promoción, fuerza de ventas, cuotas, selecciones del canal, relaciones del canal y precio [40].

Se propone el modelo de cadena de valor del proceso de elaboración de bandejas biodegradables para un nivel de empresa, teniendo en cuenta las cuatro categorías mencionadas anteriormente, se adicionan eslabones para cada etapa propuesta en la nueva célula de proceso a escala piloto y el eslabón de adecuación de equipos que al igual que en la escala de laboratorio, es importante tener en cuenta el adecuado uso y la disposición de los equipos y elementos que se utilizan durante el proceso productivo. Además se adicionan eslabones necesarios para desarrollar actividades gerenciales de logística interna y externa como la planeación de la producción, inventarios, almacenamiento del producto y pedidos, además la categoría de ventas y mercadotecnia, todas estas serán actividades que determinarán la dinámica del producto dentro de la empresa para finalmente lograr su distribución al cliente según la demanda del sector, (ver Figura 91).



Figura 91. Cadena de valor empresarial del proceso de elaboración de bandejas.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

De forma extendida, se describieron 7 etapas del proceso de moldeo por compresión de materiales biodegradables en Unicauca, y se hizo una división del proceso para dar detalles de los dos productos que se elaboran en la misma célula de proceso, bandejas semirrígidas y probetas para ensayo de tensión.

Bajo la norma internacional ISA-88 parte 1, se realizaron modelos de proceso, físico y de control procedimental para ordenar el proceso de manera jerárquica, siguiendo una secuencia ordenada por etapas, operaciones, fases y/o acciones, los modelos arrojaron para el procedimiento de elaboración de bandejas 104 fases, correspondientes a 14 operaciones, acudiendo a terminología estándar que aporta características de estandarización. Después de seguir paso a paso cada acción de los investigadores a lo largo del proceso y consolidar la información proporcionada en los modelos, se hizo un diagnóstico de automatización que evidenció la inexistencia de documentación y además proporcionó resultados estadísticos que magnificaron el nivel de automatización de la célula de proceso, un 75% es manual y un 25% es automático y para el nivel de dificultad en la realización de las fases que lo componen es bajo en un 83%, medio en un 15% y un nivel alto en 2%. En ese sentido se propusieron requerimientos de automatización para aumentar la eficiencia de los procedimientos y disminuir la dificultad de las tareas del investigador, se propusieron 6 requerimientos de automatización, 6 *hardware* y 2 *software*, los cuales a lo largo del trabajo de grado se les dio solución a nivel de propuesta.

Para dar cumplimiento a los requerimientos propuestos para la célula de proceso, se propusieron soluciones de automatización con el modelado bajo la norma ISA-88, complementándolo con 1 (una) etapa necesaria para el manejo de los equipos que conforman la célula de proceso y para los requerimientos hardware se propusieron soluciones tecnológicas que mitigarán las dificultades por parte del investigador para llevar a cabo las acciones del proceso, soluciones hardware que están en el mercado y se proponen basándose en las capacidades del proyecto y el laboratorio. Para lograr un mismo producto y aumentar su calidad, basándose en la norma ISA-88, se propusieron 2 modelos de récipes maestros y 2 de control que contienen datos detallados para la producción de un determinado lote de bandejas o probetas para ensayo de tensión. Se realizaron 2 diagramas de flujo de proceso (elaboración de probetas y bandejas), bajo la norma ISA-5 se realizaron 4 diagramas de instrumentación y tuberías de las unidades de prensado y moldeo de la célula de proceso, determinando para cada elemento e instrumento una etiqueta que lo identifica, además 2 diagramas de energía de fluidos. Se propone 1 (un) diagrama de cadena de valor a escala de laboratorio del proceso de moldeo por compresión.

Se caracterizaron las unidades de prensado y moldeo de la célula de proceso de moldeo por compresión, se identificó cada equipo, elemento e instrumento que las conforman y se especificaron detalles técnicos y utilidad de cada uno de ellos. Se levantó un diagrama que muestra la distribución e instalación de la célula de proceso, de manera que se identifique la ubicación de cada equipo en campo y los elementos e instrumentos en los armarios de control de las unidades de prensado y moldeo. Para estas unidades, bajo la norma ISA 5 parte 4, se realizaron 5 diagramas de lazo de instrumentos buscando la comprensión de los sistemas y la lógica de control para mejorar la comunicación entre el

personal técnico y los investigadores del proyecto. Para determinar quién controla el funcionamiento del contactor y el encargado de alimentar al receptor en un sistema eléctrico, se realizaron 12 diagramas de mando y potencia respectivamente, para las unidades de prensado y moldeo.

Como propuesta de automatización para el proceso de moldeo por compresión de Unicauca, se propuso escalar a un nivel piloto la célula de proceso, diseñando una nueva célula con unidades existentes y proponiendo otras 2 unidades que proponen un aumento en la productividad con una gestión tecnológica la cual permitió calcular un lote de producción de 2.333 bandejas en 6 horas y 30 minutos. Para obtener una visión empresarial de la producción de bandejas semirrígidas biodegradables, se propuso un esquema de cadena de valor con eslabones para cuatro categorías genéricas de actividades empresariales.

Se realizó una prueba de moldeo por compresión en la célula de proceso para elaborar un lote de 3 bandejas semirrígidas de 2 g y 2 mm de espesor, que evidenció la falta de seguimiento de métodos para la secuencia de actividades en el procedimiento, de las 104 fases del modelo de control procedimental no se realizaron 11, lo cual implicó resultados no deseados, agregando el cambio en la formulación del producto y la falta de disponibilidad del módulo de equipo de secado de la célula de proceso de moldeo por compresión.

## CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un diseño e implementación de un sistema de dosificación de los aditivos que se agregan a la mezcla de harina de yuca gelatinizada y fibra de fique, en esta etapa se evidencia un desperdicio de material pues al dosificar cada aditivo, lo hacen de manera imprecisa y el sobrante lo depositan en un papel que luego se desecha, es por esto que se recomienda un equipo que dosifique la cantidad requerida sin desperdiciar.

Implementar un software de supervisión en la etapa de prensado y moldeo, por medio de una interfaz hombre-máquina para controlar la temperatura y la posición de los moldes y supervisar cada operación.

Registrar los tiempos y distancias mediante un cursograma analítico, es un diagrama que muestra las operaciones, inspecciones, demoras, transportes y almacenamientos de cada actividad que se lleva a cabo en el proceso productivo y así detectar necesidades.

Realizar una guía que involucre los modelos experimentales de laboratorio, los modelos ISA-88 y una forma metódica de llevar a cabo la producción que implique una lista de chequeo de materiales y una lista de disponibilidad, capacidades y buen estado de los módulos de equipo de la célula de proceso de moldeo por compresión. Se recomienda el uso de modelos de materiales y equipos basados en la norma ISA-95, los cuales aportan organización en las prácticas de manufactura y detalla información necesaria de la disposición de materiales y de los equipos.

Modelar bajo la norma ISA-95 un sistema de seguridad industrial, se recomienda la implementación de métodos y procedimientos de seguridad. Además es necesario que para el procedimiento que se lleva a cabo en el laboratorio de Reología y Empaques, se haga uso de equipos y elementos que mantengan al operario en óptimas condiciones de seguridad.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Métodos de moldeo de plásticos.” [Online]. Available: [http://148.204.211.134/polilibros/Portal/Polilibros/P\\_terminados/procmanuf-p-admon-Malpica/74.htm](http://148.204.211.134/polilibros/Portal/Polilibros/P_terminados/procmanuf-p-admon-Malpica/74.htm). [Accessed: 28-Oct-2014].
- [2] T. Científicos, “Moldeado, Inyección, Extrusión.” [Online]. Available: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/moldeado>. [Accessed: 24-Oct-2014].
- [3] M. Beltrán and A. Marcilla, “Tecnología de Polímeros.” [Online]. Available: <http://iq.ua.es/TPO/Tema6.pdf>. [Accessed: 28-Oct-2014].
- [4] G. Bavaresco, “PRENSAS.” [Online]. Available: <http://gabpingeneria.weebly.com/uploads/2/0/1/6/20162823/prensas.pdf>. [Accessed: 31-Oct-2014].
- [5] C. Ávila Altamirano, “Proyecto de Mejoramiento de Tecnología de Estampado y Troquelado.” [Online]. Available: [http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/eventosieg/archivos/2do\\_Seminario\\_Tema\\_1.pdf](http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/eventosieg/archivos/2do_Seminario_Tema_1.pdf). [Accessed: 31-Oct-2014].
- [6] “Accionamiento hidráulico.” [Online]. Available: [http://centrodeartigo.com/articulos-noticias-consejos/article\\_126021.html](http://centrodeartigo.com/articulos-noticias-consejos/article_126021.html). [Accessed: 31-Oct-2014].
- [7] “Actuadores.” [Online]. Available: [http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr\\_0204/ctrl\\_rob/robotica/sistema/actuadores.htm](http://platea.pntic.mec.es/vgonzale/cyr_0204/ctrl_rob/robotica/sistema/actuadores.htm). [Accessed: 31-Oct-2014].
- [8] “Circuitos hidráulicos y neumáticos: elementos componentes y circuitos típicos de potencia y control.” [Online]. Available: <http://www.v-espino.com/~tecnologia/tecnoll/4neumatica/Ampliaci%F3n-Sist hidr%E1ulicos y neum%E1ticos.pdf>. [Accessed: 31-Oct-2014].
- [9] “CIRCUITOS NEUMÁTICOS E HIDRÁULICOS.” [Online]. Available: <http://wikitecnotarraga.wikispaces.com/TEMA+3+-+CIRCUITOS+NEUM%C3%81TICOS+E+HIDR%C3%81ULICOS>. [Accessed: 31-Oct-2014].
- [10] “Estática De Fluidos - Parte II PRENSA HIDRÁULICA.” [Online]. Available: [http://www.juansanmartin.net/temas\\_pdf/fluidos2.pdf](http://www.juansanmartin.net/temas_pdf/fluidos2.pdf). [Accessed: 05-Nov-2014].
- [11] “SISTEMAS HIDRÁULICOS.” [Online]. Available: [https://cursos.aiu.edu/Sistemas\\_Hidraulicas\\_y\\_Neumaticos/PDF/Tema\\_1.pdf](https://cursos.aiu.edu/Sistemas_Hidraulicas_y_Neumaticos/PDF/Tema_1.pdf). [Accessed: 05-Nov-2014].

- [12] "MANUAL DEL ESTUDIANTE INSTRUCCIÓN TÉCNICA: Hidráulica I y II." [Online]. Available: [http://www.ceduc.cl/aula/lebu/materiales/IC/IC-410/MANUAL DEL ESTUDIANTE HIDRAULICO.pdf](http://www.ceduc.cl/aula/lebu/materiales/IC/IC-410/MANUAL_DEL_ESTUDIANTE_HIDRAULICO.pdf). [Accessed: 31-Oct-2014].
- [13] "Sistemas Hidráulicos de Transmisión de Potencia." [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn212.html>. [Accessed: 31-Oct-2014].
- [14] J. Meneses, C. M. Corrales, and M. Valencia, "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN POLÍMERO BIODEGRADABLE A PARTIR DEL ALMIDÓN DE YUCA." [Online]. Available: <http://revista.eia.edu.co/articulos8/Art.5.pdf>. [Accessed: 31-Oct-2014].
- [15] F. Díaz del Castillo Rodríguez, "CONFORMADO DE MATERIALES PLÁSTICOS," 2012. [Online]. Available: [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m6/conformado de plasticos.pdf](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m6/conformado_de_plasticos.pdf). [Accessed: 13-Nov-2014].
- [16] H. S. Villada Castillo, D. P. Navia Porras, and J. P. Castañeda Niño, "Biodegradable packaging obtained from cassava flour and fique fiber and their manufacture process," 28-Mar-2013.
- [17] A. N. Standard, *AMERICAN NATIONAL STANDARD Batch Control Part 1 : Models and Terminology*, no. October. 1995.
- [18] A. F. Acosta Hurtado and J. A. Burgos Mejía, "CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN SECADOR DE RODILLOS EN LA DESHIDRATACION DE RESIDUOS DE TOMATE (*Lycopersicum esculentum* Mill).," 2012. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/4165/4/CB-0460922.pdf>. [Accessed: 09-Jan-2015].
- [19] "Deshidratación - Procesado de alimentos." [Online]. Available: [http://web.udl.es/usuarios/w3511782/Procesado\\_de\\_Alimentos/13.\\_Secado\\_files/Deshidratacion.pdf](http://web.udl.es/usuarios/w3511782/Procesado_de_Alimentos/13._Secado_files/Deshidratacion.pdf). [Accessed: 09-Jan-2015].
- [20] "FT32 : Secador de Tambor." [Online]. Available: <http://discoverarmfield.com/es/products/view/ft32/secador-de-tambor>. [Accessed: 09-Jan-2015].
- [21] "FRANKEN Tecnología de fresado." [Online]. Available: [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/86256/ZP20059\\_ES\\_FRANKEN\\_Duplex-Fraser.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/86256/ZP20059_ES_FRANKEN_Duplex-Fraser.pdf). [Accessed: 04-Feb-2015].
- [22] S. Systems Co., "AUTOJET® MODEL 1550+ MODULAR SPRAY SYSTEM." [Online]. Available: [http://www.spray.com/literature\\_pdfs/B626D\\_AutoJet\\_1550-plus\\_Modular\\_Spray\\_System.pdf](http://www.spray.com/literature_pdfs/B626D_AutoJet_1550-plus_Modular_Spray_System.pdf). [Accessed: 28-Jan-2015].

- [23] “PLC MicroLogix 1500 de Allen Bradley.” [Online]. Available: [http://www.infopl.net/files/descargas/rockwell/infoPLC\\_net\\_Intro\\_Micrologix1500.pdf](http://www.infopl.net/files/descargas/rockwell/infoPLC_net_Intro_Micrologix1500.pdf). [Accessed: 14-Jan-2015].
- [24] R. Vilanova, “Sistemas SCADA.” [Online]. Available: [http://www.epsevg.upc.edu/hcd/SAF/PDF/2007\\_Sistemas\\_SCADA.pdf](http://www.epsevg.upc.edu/hcd/SAF/PDF/2007_Sistemas_SCADA.pdf). [Accessed: 14-Jan-2015].
- [25] “Process Flow Diagram (PFD).” [Online]. Available: <http://www.informit.com/articles/article.aspx?p=1915161&seqNum=2>. [Accessed: 22-Jan-2015].
- [26] A. N. Standard, “AMERICAN NATIONAL STANDARD Instrumentation Symbols and Identification.” [Online]. Available: [https://instrumentacionhuertas.files.wordpress.com/2013/07/s\\_51.pdf](https://instrumentacionhuertas.files.wordpress.com/2013/07/s_51.pdf). [Accessed: 21-Jan-2015].
- [27] “TIPOS DE DIAGRAMAS DE PROCESO.” [Online]. Available: [http://www.galeon.com/mcoronado/CLASES\\_I/CLASE\\_1.pdf](http://www.galeon.com/mcoronado/CLASES_I/CLASE_1.pdf). [Accessed: 21-Jan-2015].
- [28] J. Garralda Ruíz de Velasco, “LA CADENA DE VALOR,” 1999. [Online]. Available: [http://openmultimedia.ie.edu/OpenProducts/cdv/cdv/Cadena\\_de\\_valor.pdf](http://openmultimedia.ie.edu/OpenProducts/cdv/cdv/Cadena_de_valor.pdf). [Accessed: 16-Jan-2015].
- [29] J. E. Durá and M. L. Guillén Peña, “Standard ANSI/ISA 5.4 Instrument Loop Diagrams.” [Online]. Available: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/CursosDictados/Sobre el Blog Arturo Rondon/ISA S54 PRESENTACION\\_PDF.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/CursosDictados/Sobre%20el%20Blog%20Arturo%20Rondon/ISA%20S54%20PRESENTACION_PDF.pdf). [Accessed: 12-Feb-2015].
- [30] J. M. Gea, “AUTOMATISMOS ELÉCTRICOS.” [Online]. Available: [http://ingenierovizcaino.com/ecci/mqe/corte2/guia 4.pdf](http://ingenierovizcaino.com/ecci/mqe/corte2/guia%204.pdf). [Accessed: 09-Feb-2015].
- [31] I.-U. ©. TDOC-99, “AUTÓMATAS PROGRAMABLES - Programación de Autómatas Introducción al Grafcet.” [Online]. Available: <http://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/30/30528/presentaciongrafcet.pdf>. [Accessed: 13-Feb-2015].
- [32] “PROGRAMACION LADDER PLC BASICA.” [Online]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos-pdf4/programacion-ladder/programacion-ladder.pdf>. [Accessed: 16-Feb-2015].
- [33] R. López Salazar and J. Carrillo, “Escalamiento y trabajo: El caso de la industria electrónica de Tijuana,” 2010. [Online]. Available: <http://www.colef.mx/fronteranorte/articulos/FN43/4-f43.pdf>. [Accessed: 10-Feb-2015].

- [34] R. A. González Castellanos, "PRINCIPIOS BÁSICOS DE ESCALADO," 2000. [Online]. Available: <http://monografias.umcc.cu/monos/2001/MONOGRAFIA10.htm>. [Accessed: 14-Feb-2015].
- [35] "MUNDIAL DE GUILLOTINAS." [Online]. Available: <http://www.mundialdeguillotinas.com/productos/>. [Accessed: 14-Feb-2015].
- [36] "Lleal S.A." [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/Quimica/FeriaVirtual/Presentacion-Lleal-S-A-2690.html>. [Accessed: 14-Feb-2015].
- [37] "Simon Secadoras Ltd - Fabricantes de equipos de secado industrial." [Online]. Available: [http://www.simon-dryers.co.uk/drumdryers\\_construction.html](http://www.simon-dryers.co.uk/drumdryers_construction.html). [Accessed: 16-Feb-2015].
- [38] "Prensa cigüeñal neumática con carrera ajustable series JE21." [Online]. Available: <http://www.accurl.es/11-je21-series-pneumatic-crank-press-with-adjustable-stroke.html>. [Accessed: 16-Feb-2015].
- [39] Meech, "Hoja de producto - Tubo Vortex Meech," 2013. [Online]. Available: [file:///C:/Users/usuario/Downloads/Vortex\\_Tube\\_13.06.2013.pdf](file:///C:/Users/usuario/Downloads/Vortex_Tube_13.06.2013.pdf). [Accessed: 16-Feb-2015].
- [40] "La Cadena de Valor y la Ventaja Competitiva." [Online]. Available: [http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catadprod/material/AO\\_8\\_porter\\_2.pdf](http://www.ccee.edu.uy/ensenian/catadprod/material/AO_8_porter_2.pdf). [Accessed: 16-Jan-2015].