

Propuesta de Escalamiento Industrial del Proceso de Extrusión para Películas Biodegradables bajo el Marco del Proyecto “Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables”



Edgardo Martínez Narváez

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, Noviembre de 2015

Propuesta de Escalamiento Industrial del Proceso de Extrusión para Películas Biodegradables bajo el Marco del Proyecto “Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables”



Edgardo Martínez Narváez

Monografía presentada como requisito parcial para optar el título de
Ingeniero En Automática Industrial

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, Noviembre de 2015

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Contaminación ambiental causada por plásticos	1
1.1.1.	Crecimiento de la población y generación de Residuos Sólidos Urbanos	1
1.1.2.	Contaminación por Residuos Plásticos	2
1.1.3.	Plásticos biodegradables como alternativa	2
1.2.	Investigaciones sobre materiales biodegradables para extrusión de películas.....	3
1.2.1.	Clasificación de polímeros plásticos	4
1.2.2.	Productores comerciales internacionalmente de materiales biodegradables	5
1.2.3.	Investigaciones nacionales y regionales sobre materiales biodegradables	7
1.3.	Extrusión de películas para producción de plásticos	8
1.3.1.	Proceso general de extrusión de películas.....	8
1.3.2.	Componentes principales de un extrusor	12
1.3.3.	Extrusores marca <i>Thermo Scientific</i> HAAKE PolyLab OS [28].....	13
1.4.	Descripción del proceso de Producción de Películas Biodegradables a Partir de Almidón de Yuca.....	15
1.4.1.	Etapas de obtención de almidón de yuca modificado	15
1.4.2.	Etapas de obtención de <i>pellets</i> de almidón termoplástico	17
1.4.3.	Etapas de obtención de <i>pellets</i> de ácido poliláctico injertado.....	19
1.4.4.	Etapas de obtención de película biodegradable	20
1.5.	Descripción de la planta de PROPEBIPAY.....	22
1.5.1.	Unidad de obtención de almidón de yuca modificado	22
1.5.2.	Unidad de obtención de <i>pellets</i> de almidón termoplástico.....	23
1.5.3.	Unidad de obtención de <i>pellets</i> de ácido poliláctico injertado	25
1.5.4.	Unidad de obtención de película biodegradable	25
2.	INGENIERÍA CONCEPTUAL.....	27
2.1.	Cadena de valor del proceso PROPEBIPAY	27
2.2.	Diagrama de flujo del proceso PROPEBIPAY	28
2.3.	Modelos ISA S88.01 del proceso y la planta PROPEBIPAY	30
2.3.1.	Modelo de proceso	30
2.3.2.	Modelo físico.....	32

2.3.3.	Modelo de control procedimental.....	36
2.3.4.	Relación entre los modelos ISA S88.01.....	40
2.4.	Diagnóstico del proceso PROPEBIPAY.....	41
2.4.1.	Nivel de dificultad en la realización del proceso.....	41
2.4.2.	Nivel de automatización	46
2.4.3.	Análisis de los modelos ISA S88.01	48
2.4.4.	Aspectos de ámbito general relacionados con las necesidades del proceso	49
2.5.	Requerimientos del proceso PROPEBIPAY.....	52
2.5.1.	Requerimientos generales	52
2.5.2.	Requerimientos de automatización.....	53
2.5.3.	Requerimientos hardware	53
2.5.4.	Requerimientos software	53
3.	INGENIERÍA BÁSICA.....	54
3.1.	Cumplimiento de requerimientos generales del proceso PROPEBIPAY	54
3.1.1.	Formato de seguimiento de parámetros y documentación formal.....	54
3.1.2.	Estudio de determinación de parámetros para extrusión con módulo de doble tornillo	55
3.1.3.	Sistema de refrigeración del cordón de PLA injertado	56
3.2.	Cumplimiento de requerimientos de automatización del proceso PROPEBIPAY.....	57
3.2.1.	Organización del proceso mediante modelos ISA S88.01.....	57
3.2.2.	Cadena de valor	61
3.2.3.	Variables interactuantes en el proceso	62
3.2.4.	Diagramas para documentación gráfica del proceso.....	63
3.2.5.	Modelos de receta maestra y de control de ISA S88.01	66
3.2.6.	Control automático de operación de soplado de la película biodegradable.....	70
3.3.	Cumplimiento de requerimientos hardware del proceso PROPEBIPAY	73
3.3.1.	Tubular para refrigeración del cordón de PLA injertado	73
3.3.2.	Uso del módulo de vibración adjunto a la tolva del extrusor	74
3.3.3.	Dispositivos y equipos para control automático de operación de soplado de la película biodegradable.....	75
3.4.	Cumplimiento de requerimientos software del proceso PROPEBIPAY	75

3.4.1.	Software para programar el control por visión de máquina de operación de soplado	
	76	
4.	ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE PROCESOS PRODUCTIVOS	77
4.1.	Escalamientos aplicados alrededor del mundo en diversos procesos	77
4.1.1.	Condiciones de operación de extrusores de tornillo simple para mezclas de harina de trigo. Parte 2: montaje, arranque y operación de una planta industrial [72].....	77
4.1.2.	Propuesta del diseño para el escalamiento a planta industrial, partiendo de una planta piloto, para el precocido y beneficiado de arroz [73].....	78
4.1.3.	Proceso de escalamiento de pastilla ibuprofeno [74]	79
4.1.4.	Desarrollo tecnológico para elaborar vino blanco común en Misiones, con evaluación económica a escala industrial [75]	80
4.1.5.	Diseño de una planta para la extracción del aceite esencial de palo santo (<i>bursera graveolens</i>) mediante destilación por arrastre de vapor [76]	81
4.1.6.	Diseño de equipos de planta de demostración y escalamiento desde planta piloto de un proceso de lixiviación y extracción de solventes [77].....	82
4.1.7.	Escalamiento mediante modelos matemáticos.....	83
4.2.	Planteamiento del procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos	83
4.2.1.	Estudio del proceso a escala menor	84
4.2.2.	Estudio del proceso a escala mínimamente aumentada	86
4.2.3.	Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento	88
4.2.4.	Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente	89
4.2.5.	Determinación de la planta física en la escala industrial.....	90
4.2.6.	Organización del escalamiento industrial logrado.....	91
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94
5.1.	Conclusiones	94
5.2.	Recomendaciones.....	94
6.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	95

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. División de plásticos según su composición.	4
Figura 2. Etapas conformantes del proceso de extrusión de películas.	8
Figura 3. Componentes principales de un extrusor.	9
Figura 4. Proceso de fusión en el interior del extrusor.	10
Figura 5. Tipos de configuraciones de tornillos para un mezclado homogéneo.	11
Figura 6. Tornillo simple para extrusión.	12
Figura 7. Bulto del almidón de yuca proveniente de Almidones Sucre.	16
Figura 8. Almidón modificado.	16
Figura 9. Ingreso del almidón modificado para la primera extrusión.	17
Figura 10. Cordón de almidón termoplástico que resulta de la primera extrusión.	17
Figura 11. Sistema de rodillos para el transporte del material.	18
Figura 12. <i>Pellets</i> de almidón termoplástico listos para el secado.	18
Figura 13. Lote de <i>pellets</i> de almidón termoplástico almacenado en un recipiente hermético.	18
Figura 14. Bulto de ácido poliláctico 2002D utilizado en el proceso.	20
Figura 15. Salida del material extruido y soplado.	21
Figura 16. Tubular de la película flexible biodegradable.	22
Figura 17. Bobina obtenida de la célula completa de producción.	22
Figura 18. Horno de convección forzada marca memmert.	23
Figura 19. Balanza digital de humedad marca Precisa.	23
Figura 20. Balanza digital de masa marca ViBRA.	23
Figura 21. Mezclador de alta velocidad marca <i>Kitchen Aid Professional</i>	23
Figura 22. Máster de control marca Thermo Scientific.	24
Figura 23. Módulo de doble tornillo marca Thermo Scientific.	24
Figura 24. Peletizador marca INMAGRAF.	24
Figura 25. Motor trifásico marca SIEMENS adjunto al peletizador.	24
Figura 26. Módulo de tornillo simple marca Thermo Scientific.	25
Figura 27. Compresor de aire marca POWER, usado para la refrigeración del extrusor de tornillo simple.	25
Figura 28. Sistema de soplado de la película biodegradable.	26
Figura 29. Compresor de aire marca Stanprof, usado para el soplado de la película biodegradable.	26
Figura 30. Cadena de valor de PROPEBIPAY.	27
Figura 31. Diagrama de flujo por etapas de PROPEBIPAY.	29
Figura 32. Diagrama de flujo por operaciones de PROPEBIPAY.	29
Figura 33. Modelo de proceso de PROPEBIPAY.	31
Figura 34. Modelo físico de PROPEBIPAY.	33
Figura 35. Modelo físico de la unidad: Obtención de almidón modificado.	33
Figura 36. Modelo físico de la unidad: Obtención de <i>pellets</i> de TPS.	34
Figura 37. Modelo físico de la unidad: Obtención de <i>pellets</i> de PLA injertado.	35
Figura 38. Modelo físico de la unidad: Obtención de película biodegradable.	35
Figura 39. Modelo de control procedimental de PROPEBIPAY.	36
Figura 40. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener almidón modificado.	37
Figura 41. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener <i>pellets</i> de TPS.	38

Figura 42. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado.	39
Figura 43. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener película biodegradable.	39
Figura 44. Ejemplo de la relación entre los tres modelos ISA S88.01 del calentado de almidón de yuca.	40
Figura 45. Porcentaje del nivel de dificultad general de PROPEBIPAY respecto a sus fases.	45
Figura 46. Porcentaje del nivel de dificultad de las operaciones de PROPEBIPAY.	46
Figura 47. Nivel de automatización mediante la relación entre materiales, personas y equipos.	46
Figura 48. Porcentaje del nivel de automatización general de PROPEBIPAY respecto a sus fases.	48
Figura 49. Sistema propuesto para refrigeración del cordón de PLA injertado.	57
Figura 50. Modelo modificado de proceso de PROPEBIPAY.	58
Figura 51. Modelo físico modificado de unidad: obtención de <i>pellets</i> de PLA injertado.	59
Figura 52. Modelo físico modificado de unidad: obtención de película biodegradable.	60
Figura 53. Modelo modificado de control procedimental de procedimiento de unidad: obtener <i>pellets</i> de PLA injertado.	60
Figura 54. Modelo modificado de control procedimental de procedimiento de unidad: obtener película biodegradable.	61
Figura 55. P&ID de etapa de proceso de obtención de almidón modificado.	64
Figura 56. P&ID de etapa de proceso de obtención de <i>pellets</i> de TPS.	64
Figura 57. P&ID de etapa de proceso de obtención de <i>pellets</i> de PLA injertado.	65
Figura 58. P&ID de etapa de proceso de obtención de película biodegradable.	65
Figura 59. Control manual de operación de soplado de la película biodegradable.	71
Figura 60. P&ID del control por visión de máquina de la operación de soplado.	72
Figura 61. Tubular y accesorios propuestos para la refrigeración del cordón de PLA injertado.	73
Figura 62. Empuje del material ingresado.	74
Figura 63. Tolva para alimentación y vibrador neumático de rodillo.	74
Figura 64. Dispositivos recomendados para control por visión de máquina de operación de soplado.	75
Figura 65. Diagrama de proceso del procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos.	93

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Polímeros biocompuestos, contenido de carbono en el biocompuesto, compañías productoras con ubicaciones y capacidades de producción.....	3
Tabla 2. Biopolímeros comerciales a base de materiales naturales.....	5
Tabla 3. Biopolímeros comerciales de origen sintético.....	6
Tabla 4. Listado de materias primas interactuantes en cada etapa de PROPEBIPAY.	28
Tabla 5. Convenciones para relacionar los ítems de los modelos ISA S88.01.....	40
Tabla 6. Respuestas de dificultad en realización de las fases de PROPEBIPAY.....	41
Tabla 7. Nivel de dificultad en realización de las fases de PROPEBIPAY.....	43
Tabla 8. Nivel de dificultad en realización de las operaciones de PROPEBIPAY.....	44
Tabla 9. Nivel de automanitación de las fases de PROPEBIPAY.....	47
Tabla 10. Respuestas sobre documentación de PROPEBIPAY.....	49
Tabla 11. Respuestas sobre necesidad de automatizar algunas fases de PROPEBIPAY.	50
Tabla 12. Respuestas sobre mantenimiento de equipos de PROPEBIPAY.....	52
Tabla 13. Formato de seguimiento de parámetros del proceso PROPEBIPAY.....	54
Tabla 14. Variables del proceso PROPEBIPAY.....	62
Tabla 15. Modelo de receta maestra del proceso PROPEBIPAY.....	66
Tabla 16. Modelo de receta de control del proceso PROPEBIPAY.....	68
Tabla 17. Análisis del estado del arte sobre escalamiento industrial de procesos.....	84

LISTADO DE ECUACIONES

1)	$\rho = mv$	85
2)	$v = m\rho$	88
3)	$k = m'm$	89

RESUMEN

Actualmente, en la Universidad del Cauca, en el Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias, se lleva a cabo el proyecto de “Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables”. Específicamente, en el paquete tecnológico sobre producción de películas biodegradables se tiene el objetivo de generar productos dirigidos principalmente al sector agroindustrial. En ese sentido, los investigadores se encargan de dicha tarea con la visión de lograr la producción a nivel industrial, por ejemplo, de bolsas biodegradables para almácigos, haciendo un aporte tecnológico y ambiental en la industria y sociedad colombiana. No obstante, surge la necesidad principal de tener un proceso de producción debidamente documentado y organizado, que permita la obtención del producto a nivel industrial, ya que aún se presentan necesidades e inconvenientes desde el laboratorio para conseguir un escalamiento industrial adecuado. Esto no solo implica aumentar volúmenes de producción, sino establecer las características del equipamiento necesario y los procedimientos de producción adecuados.

En ese sentido, el presente trabajo de grado tiene como objetivo general “Proponer mejoras técnicas al proceso de extrusión de películas biodegradables que se realiza en el Laboratorio de Reología y Empaques”, llevando a cabo esta solución mediante una propuesta de automatización y un escalamiento industrial. Lo anterior implica elaborar una ingeniería conceptual, donde se conoce la planta en términos de la descripción técnica del proceso de extrusión de películas biodegradables, realizado en el equipo HaakePolylab OS de *Thermo Scientific*. Además, es necesario proponer una ingeniería básica, donde se diseña la propuesta de automatización que dé cumplimiento a los requerimientos del proceso. Por último, se plantea un procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos.

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se considera temas sobre contaminación de plásticos, investigaciones sobre materiales biodegradables presentados como alternativa o solución a la contaminación y extrusión de películas para producción de plásticos. Además, se detalla la descripción detallada del proceso y planta de la Extrusión para Producir Películas Biodegradables a Partir de Almidón de Yuca (caso de estudio).

Lo anterior con el fin de introducir el proceso en cuestión desde todos los aspectos principales con los que se relaciona.

1.1. Contaminación ambiental causada por plásticos

La sociedad ha incrementado drásticamente el número de su población, lo que implica el aumento del desarrollo urbano que conduce a satisfacer necesidades puntuales, muchas de las cuales requirieren el uso de plásticos. Generalmente, estos materiales se desechan una vez son usados, convirtiéndose en residuos contaminantes. La generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), específicamente Residuos Plásticos (RP), ha conllevado a considerar alternativas para disminuir el impacto negativo ambiental, entre las cuales, los plásticos biodegradables.

1.1.1. Crecimiento de la población y generación de Residuos Sólidos Urbanos

Es evidente que la sociedad ha venido en un continuo aumento de su población, a comienzos del siglo XXI, en el año 2000, la población mundial era alrededor de 6.100 millones de habitantes, mientras que en la actualidad ya se alcanzan cerca de 7.300 millones de personas [1], [2]. Se observa que la población seguirá creciendo progresivamente, tal como lo informa la ONU en el estudio *World Population Prospects*, donde estima que para el año 2050 la cantidad de habitantes en el mundo ascenderá a 9.600 millones [3].

Cuando se hace referencia al aumento poblacional, ello implica gran desarrollo urbano que conduce a nuevos requisitos como: cambio en las condiciones de vida, incremento del consumo energético y necesidad de aumentar la producción de alimentos y de bienes de consumo en general. Esto también hace parte del progreso tecnológico [4]. En ese sentido, una exigencia puntual en la vida cotidiana son los plásticos, estos tienen características bastante apetecidas por la sociedad de consumo; es el caso del embalaje, envasado, conservación y distribución de alimentos y de otros productos que llegan a la población en forma segura, higiénica y práctica [5].

Lamentablemente, una vez los plásticos son utilizados generalmente se desechan, formando parte de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), causantes directos de graves problemas en la contaminación del agua y suelo e indirectamente originan polución en el aire [5].

En resumen, los RSU son definidos por la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) como materiales resultantes de actividades de producción y consumo que no tiene algún valor económico [6]. Sin embargo, una investigación realizada por el *World Watch Institute* muestra que los miembros de la OCDE, un grupo de 34 naciones

industrializadas, realizan el mayor aporte de residuos por día en el mundo, cerca de 1,6 millones de toneladas, siendo EE.UU. el líder mundial con 621.000 toneladas al día. Además, se pronostica que para el año 2025 los RSU pasarán de 1.300 millones de toneladas anuales a 2.600 millones de toneladas, incrementándose aún más los problemas ambientales y sociales en el mundo [7].

1.1.2. Contaminación por Residuos Plásticos

Dentro de los RSU se encuentran varios elementos conformantes como: materiales orgánicos, vidrio, papel/cartón y plástico. En lo que corresponde a Residuos Plásticos (RP), aportan un aproximado del 11 % (± 3 %) de los RSU. No obstante, estas estimaciones dependen de diversos factores, tanto económicos y sociales, como de caracterización de la población (clima, cultura y costumbres) [8].

La acumulación anual de RP en el mundo es de aproximadamente 25 millones de toneladas [5]. Por ejemplo, se presentan las dos “islas” de desechos ubicadas en el océano Pacífico denominadas en conjunto como “La Gran Isla de Basura del Pacífico”. Entre Hawaii y California flota la isla del Este, mientras que la del Oeste marina entre Hawaii y Japón. Cerca del 90 % de los residuos en dichas acumulaciones son plásticos, y aproximadamente de los 100 millones de toneladas de plásticos que se producen en el mundo cada año, el 10 % termina en el océano, en otras palabras, se estarían acumulando anualmente en el mar alrededor de 10 millones de toneladas de RP [9].

A nivel local, Colombia hace un aporte considerable de RP, en las principales ciudades: Bogotá, Cali, Medellín y Barranquilla, se estima que semanalmente se producen unas 88.000 toneladas de RSU, de las cuales solo se recolecta “adecuadamente” el 70 % [10]. Al observar con más detalle la situación en Bogotá, sus RP son del 17,83 % de un total de 77,8 toneladas de RSU producidas diariamente, es decir, cada día se estarían generando casi 14 toneladas de RP, de las cuales, 7 toneladas corresponden a polietileno (bolsas) [11].

Como se presentó previamente, existe una gran cantidad de RP a nivel mundial y nacional. Resulta que el impacto negativo generado por plástico se sustenta en notables aspectos, es el caso de la lenta degradación que tienen, ya que al tratarse de materiales sintéticos generalmente derivados del petróleo, tardan entre 100 y 1.000 años en “descomponerse”, según el tipo de plástico. Como segundo aspecto, afectan en profundidad a los ecosistemas con los que interactúan, debido a que se transforman en “microplásticos” de tamaño inferior a 5 mm, siendo compuestos tóxicos altamente penetrantes [12].

1.1.3. Plásticos biodegradables como alternativa

Como seres humanos dotados de intelecto, se debe tener la capacidad de proponer algún alivio a la problemática de contaminación por RSU, específicamente por RP. En ese sentido, existen varias formas de ayudar, una es el reciclado, pero en este proceso se generan diversos inconvenientes. Por ejemplo, no todos los RP tiene la posibilidad de ser reciclados, además, los que logran entrar en este proceso van disminuyendo la opción de volver a ingresar al ciclo, es decir, el proceso de reciclado de plásticos es finito. Por otro

lado, reciclar es más costoso que realizar una producción a partir de materia prima nueva, debido a que existe gran variedad en el RP y se requiere un conocimiento considerable para su separación adecuada, lo que implica inversión en socialización de las personas para que logren reciclar separando correctamente. No obstante, no debe descartarse esta opción.

Por otro lado, los problemas en el reciclado conducen a pensar en alternativas con mejores resultados, es el caso de los materiales biodegradables. Los plásticos que tengan la propiedad de biodegradación se descomponen en un tiempo considerablemente menor, si se compara con los productos sintéticos. Un segundo aspecto considerable es que algunos bioplásticos son fabricados a base de recursos renovables (celulosa, almidones de maíz, yuca, trigo o papa), mientras que la gran mayoría de plásticos convencionales se basan en petróleo. Además, resultado de la degradación, se tiene dióxido de carbono, agua y biomasa (abono orgánico) [13]. A nivel mundial ya se ofrecen productos con características de biodegradabilidad [14]–[16]. En el marco nacional, se han realizado algunas investigaciones sobre polímeros biodegradables [17]–[19] en aras de aportar alternativas de solución a la contaminación por RP.

1.2. Investigaciones sobre materiales biodegradables para extrusión de películas

Debido a la contaminación ambiental a causa de los plásticos, existen múltiples empresas y grupos de investigación alrededor del mundo dedicados al estudio y producción de polímeros biodegradables. Cuantitativamente, en 2013 habían 112 compañías produciendo biocompuestos en 129 sitios, teniendo una capacidad total de producción de 5,132 millones de toneladas (ver Tabla 1). Además, se estima que la capacidad de producción aumentará de 7 millones de toneladas actualmente, a cerca de 12 millones de toneladas para el 2020, llegando al 3 % de la producción total esperada de polímeros para ese año [20].

Tabla 1. Polímeros biocompuestos, contenido de carbono en el biocompuesto, compañías productoras con ubicaciones y capacidades de producción.

Polímeros estructurales biocompuestos		Contenido de carbono en el biocompuesto	Compañías productoras en 2013	Ubicaciones en 2013	Capacidades de producción en 2013 (toneladas)
Acetato celulósico	CA	50 %	17	20	850.000
Epoxis	-	30 %	-	-	1.210.000
Monómero diénico de propileno y etileno de caucho	EPDM	50 % a 70 %	1	1	45.000
Poliamidas	PA	40 % a 100 %	9	11	85.000
Polibutilen adipato teleftalato	PBAT	Hasta 50 %	4	5	75.000
Succinato de polibutileno	PBS	Hasta 100 %	10	11	100.000
Polietileno	PE	100 %	1	1	200.000
Teleftalato de polietileno	PET	20 %	5	5	600.000
Polihidroxialcanoatos	PHA	100 %	14	16	32.000
Ácido poliláctico	PLA	100 %	28	34	195.000

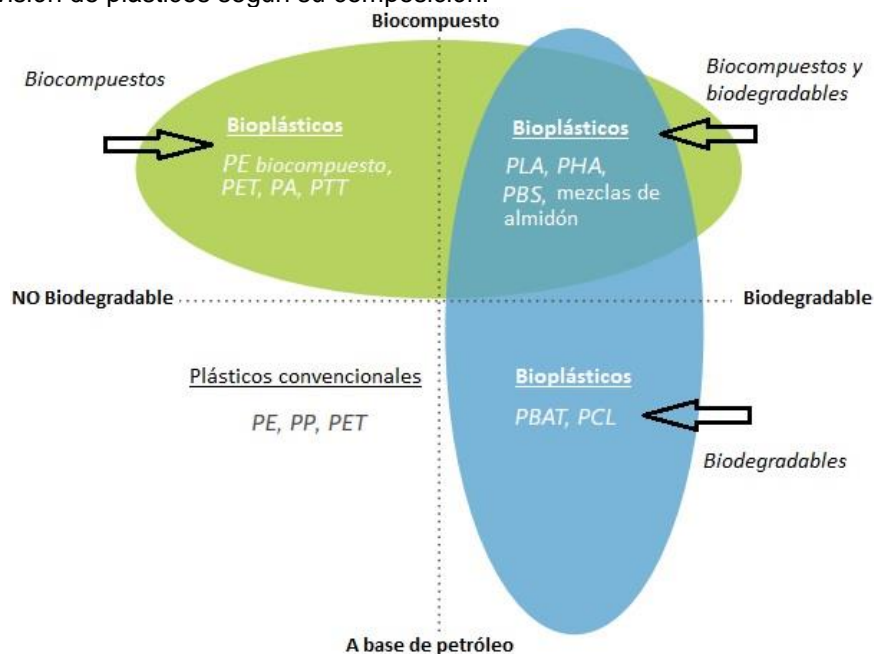
Teleftalato de polítrimetileno	PTT	27 %	1	2	110.000
Poliuretanos	PUR	10 % a 100 %	7	7	1.200.000
Mezclas de almidón	-	25 % a 100 %	15	16	430.000
Total			112	129	5.132.000

Fuente: Modificada de [21], septiembre de 2015.

1.2.1. Clasificación de polímeros plásticos

Es importante tener en cuenta que los bioplásticos son, parcial o totalmente, biocompuesto, biodegradables, o ambos [22]. En ese sentido, los polímeros se dividen en 4 grupos: de base natural (renovables), compuestos por petróleo (no renovables), biodegradables y no biodegradables; por lo que los materiales plásticos se categorizan en: bioplásticos biocompuestos, bioplásticos biodegradables de origen natural, bioplásticos biodegradables a base de petróleo y plásticos sintéticos convencionales (ver Figura 1).

Figura 1. División de plásticos según su composición.



Fuente: Modificada de [22], marzo de 2015.

En otras palabras, los bioplásticos que provengan de compuestos biológicos no son necesariamente biodegradables, y los que se fabrican a base de petróleo pueden ser biodegradables. Como aporte real y positivo al medio ambiente, teniendo total eficiencia en el ciclo completo de vida del producto, los polímeros biocompuestos y biodegradables (PLA, PHA, PBS, mezclas de almidón) se presentan como la mejor opción.

1.2.2. Productores comerciales internacionalmente de materiales biodegradables

De acuerdo a la clasificación de los bioplásticos, se hizo una segmentación de las empresas productoras de biopolímeros a nivel mundial, organizándolas en 2 grupos: biopolímeros basados en materiales naturales y biopolímeros de origen sintético:

1.2.2.1. Productores comerciales de biopolímeros a base de materiales naturales

Alrededor del mundo se han venido formando empresas comprometidas con la producción de productos biocompuesto y biodegradables, actualmente se dispone de 20 biopolímeros de escogencia en todo el mundo (ver Tabla 2), esto sin contar las pequeñas organización en formación.

Tabla 2. Biopolímeros comerciales a base de materiales naturales.

Polímero	Producto	Empresa	Pais
Almidón	MATER-BI®	Novamont	Italia
	GRACEBIO®	Grace Biotech Europe	España
	BIOPLAST®	Biotec GmbH & Co. KG.	Alemania
	PLANTIC®	Plantic Technologies, Ltd.	Australia
	PSM®	PSM North America	USA
	BIOSTARCH®	Biostarch Technology Pte, Ltd.	Australia
	BIOLICE®	Limagrain Céréales Ingrédients	Francia
	SOLANYL®	Rodenburg Biopolymers	Holanda
Celulosa	NATUREFLEX®	Innovia Films	UK
	CLARIFOIL®	Clarifoil	UK
	PORTABIO®	API Laminates Limited	UK
	BIOGRADE®	Fkur Kunststoff GmbH	Alemania
	VEGEMAT®	Vegeplast	Francia
Polihidroxicanoatos PHA PHB	ENMAT®	Tianan Biologic	China
	BIOCYCLE®	PHB Industrial, S.A.	Brasil
	MIREL®	Metabolix	USA
	BIOPOL®	Monsanto – Metabolix	USA
	NODAX®	Meredian – Procter&Gamble	USA
	BIOMER L®	Biomer	Alemania

Fuente: Modificada de [23], [24], septiembre de 2015.

Dentro de las compañías más reconocidas en el estudio y producción de productos biodegradables esta Novamont, empresa industrial italiana interesada en la integración entre química, agricultura y ambiente, mediante el uso de recursos renovables para sus productos. Esta ofrece MATER-BI®, bioplástico conformado por almidón de maíz y polímeros totalmente biodegradables, que puede ser implementado en procesos tradicionales de soplado, moldeado, extrusión y modelo por inyección [16].

1.2.2.2. Productores comerciales de biopolímeros de origen sintético

Para los productos biodegradables de origen sintético, también hay grandes empresas como Toyota y Mitsubishi, dedicadas a su producción, que junto a más de 20 compañías, satisfacen un mercado mundial de biopolímeros sintéticos (ver Tabla 3).

Tabla 3. Biopolímeros comerciales de origen sintético.

Polímero	Producto	Empresa	País
Ácido Poliláctico	NATUREWORKS® INGEO®	Natureworks LLC Cargill-Dow LLC	USA
	CEREPLAST®	Cereplast, Inc.	USA
	HYCAIL®	Hycail	Finlandia
	REVODE®	Zhejiang Hisun Biomaterials Co., Ltd.	China
	GALACID®	Galactic – Futerro	Bélgica
	LACTY®	Shimadzu	Japón
	LACEA®	Mitsui Chemicals	Japón
	HEPLON®	Chronopol	USA
	ECO PLASTIC®	Toyota	Japón
	ECOLOJU®	Mitsubishi	Japón
	PLA, PLLA, PDLA	Corbion	Holanda
Policaprolactona	TONE®	Union Carbide Corporation	USA
	CAPA®	Solvay	Bélgica
	CELGREEN®	Daicel	Japón
Polibutilen succinato, Succinato adipato	BIONOLLE®	Showa Highpolymer Co.	Japón
	SKY GREEN BDP®	SK Polymers	Korea
Polibutilen adipato teleftalato	ECOFLEX® ECOVIO®	BASF	Alemania
	BIO-FLEX®	Fkur Kunststoff GmbH	Alemania
	BIOPAR®	BIOP Biopolymer Technologies AG	Alemania

Fuente: Modificada de [23], [24], septiembre de 2015.

Dejando a un lado las compañías asiáticas, BASF y FKUR son grandes empresas alemanas con larga trayectoria en la producción de biopolímeros sintéticos. Entre sus productos, BASF ofrece a ECOVIO® como su primer plástico biodegradable obtenido, en parte, de materias primas renovables. Este producto se compone de ECOFLEX® y PLA (ácido poliláctico que se obtiene del maíz). El empleo de ECOVIO® se presta particularmente para la extrusión de láminas y películas biodegradables, pero también puede ser modificado y adaptado para otras aplicaciones [14]. Como se citó anteriormente, uno de los componentes de ECOVIO® es ECOFLEX®, otro producto ofrecido por BASF, el cual es un polímero compostable (que sirve para hacer abono orgánico) de base petroquímica que conforma una mezcla ideal para los bioplásticos, permite ser implementado en plantas de soplado, y es apto para el contacto con alimentos [25].

Respecto a FKUR, ofrece una amplia gama de resinas biocompuestas y compostables, listas para el uso directo en diversas soluciones como bolsas, cubiertas para mouse electrónicos, mangos para cuchillos y botelleros [15]. Como producto de interés, FKUR ofrece BIO-FLEX®, un compuesto biodegradable para extrusión de películas, conformado por mezclas a base de PLA con copoliéster. Podría contener casi un 100 % de materia prima natural, sin embargo, la marca BIO-FLEX® no posee almidón o derivados del mismo. Dentro de las características que pueden ser cumplidas por los diferentes tipos de BIO-FLEX®, se encuentran la elevada barrera contra la humedad, procesable en máquinas convencionales de extrusión con alto nivel de producción, biodegradable y compostable [26].

1.2.3. Investigaciones nacionales y regionales sobre materiales biodegradables

En Colombia se han realizado diferentes estudios a fin de obtener resultados contundentes sobre materiales biodegradables y su posterior aplicación a nivel industrial en plásticos biodegradables.

En la Escuela de Ingeniería de Antioquia en Medellín, se realizó una investigación que permitió la elaboración de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. El almidón dulce de yuca se mezcló con reactivos que cumplen la función de plastificantes (agua, glicerina y alcohol polivinílico), extensores (polisacáridos), espesantes, lubricantes (aceite de linaza o de soya), humectantes y desmoldantes (estearato de magnesio). Estas mezclas se sometieron a procesos tradicionales para polímeros convencionales en un molino abierto, una inyectora y una prensa de vulcanización. El proceso experimental arrojó como resultado seis muestras poliméricas con características adecuadas, según la medición de sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y de biodegradabilidad. Sin embargo, el material que presentó las mejores propiedades fue el proveniente del almidón fabricado por Industrias del Maíz S.A., presentando una caracterización adecuada: color blanco agradable estéticamente, resistencia a la tracción de 3,249 MPa, módulo de elasticidad de 1,284 MPa, dureza de 59,9 Shore A y densidad de 1,05 g/cm³. El comportamiento frente al agua se evidencia en un incremento de masa del 185,6 % y en el área superficial del 20 %. Finalmente, se pudo concluir que es viable la realización de productos que no requieran una alta resistencia a la tracción, y que no deban estar expuestos al agua ni condiciones de humedad elevadas, proponiendo la fabricación de recubrimientos plásticos (como cápsulas) y bolsas o empaques plásticos [17].

En la Universidad de San Buenaventura en Cali, el grupo de investigación Biotecnología Vegetal trabajó en la elaboración de un polímero biodegradable a partir de almidón de yuca, específicamente la variedad MBRA 383 (escogida con ayuda de información aportada por el Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, a través del Proyecto de Mejoramiento de Yuca). En el proceso de obtención del polímero, se tuvieron en cuenta dos fórmulas. En la primera se mantuvieron constantes los derivados del petróleo, variando las cantidades de almidón. En la segunda se variaron tanto las cantidades de almidón como los derivados del petróleo. Para seleccionar la fórmula más apropiada, se realizó un diseño experimental estadístico de confiabilidad del 95 % con base a la degradación y la expansión polimérica, escogiendo la primera formulación para pruebas de degradación con ácido sulfúrico [18].

En la Universidad Nacional de Colombia en Medellín, se realizó un estudio sobre la producción y caracterización de polihidroxialcanoatos (PHA, plásticos biocompatibles y biodegradables), sintetizados por microorganismos nativos a partir de residuos grasos (aceites de *Jatropha*, ricino, frituras, lactosuero y glicerol residual). Como resultado obtenido, el residuo graso más indicado fue el sistema B. megaterium-glicerol residual para la producción de PHB. Esto representa una conclusión doblemente verde, ya que se solucionaría el problema de la industria del Biodiesel asociado a la generación de glicerol residual y se originaría un producto que contribuiría a disminuir la contaminación por plásticos sintéticos [19].

Finalmente, a nivel regional, la Universidad del Cauca en su programa “Cierre de Brechas” fabricó películas flexibles biodegradables por extrusión a partir de derivados de

almidón de yuca, plastificante y PLA (ácido poliláctico), esto con el fin de generar una bolsa biodegradable con características similares a las bolsas plásticas convencionales. Actualmente se pretende seguir con tal objetivo dentro del marco del proyecto “Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables”, ejecutado por el grupo de investigación CYTBIA (Ciencia y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial) en el Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias, financiando por el Sistema General de Regalías del Gobierno Nacional. Con este proyecto se busca la elaboración de películas biodegradables para diferentes aplicaciones agroindustriales, entre las cuales están: bolsas para almárgicos y embolsado para cubrir racimos de plátanos.

El proyecto anterior de producción de películas biodegradables en la Universidad del Cauca es el caso de estudio para el desarrollo del presente trabajo de grado.

1.3. Extrusión de películas para producción de plásticos

La temática de extrusión de películas para producción de plásticos se soporta en el cuarto tema del libro “Tecnología de Polímeros” de los autores Maribel Beltrán y Antonio Marcilla de la Universidad de Alicante en España [27], específicamente para las secciones 1.3.1 y 1.3.2 mostradas a continuación.

1.3.1. Proceso general de extrusión de películas

El término “extrusión” hace referencia a la acción de fundir un material (generalmente presentado en polvo o en gránulos) con la adición de fuerzas físicas y mecánicas a una temperatura determinada para tal fin. En otras palabras, la extrusión permite transformar un sólido (en el mayor de los casos) en un material fundido de sección transversal constante.

Al tomar el proceso desde una perspectiva generalizada, la extrusión se clasifica en 5 etapas principales: ingreso y transporte del material, termoplastificado por fusión, presurización, mezclado y conformado. Además, en la extrusión existen subsistemas como: transporte, presurización y homogeneización (mezcla del material en proporciones semejantes), lo cuales están presentes durante todo el proceso (ver Figura 2).

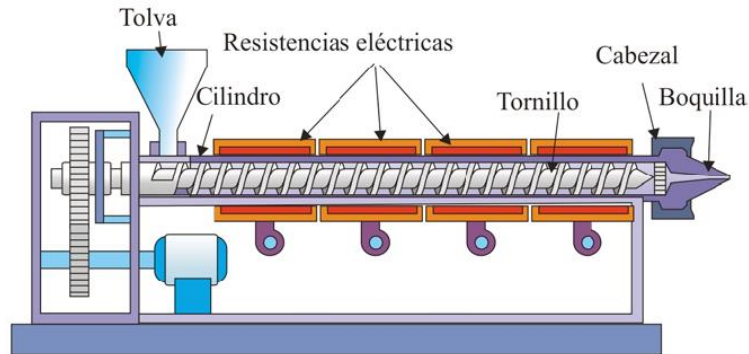
Figura 2. Etapas conformantes del proceso de extrusión de películas.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

El proceso de extrusión clasificado anteriormente se realiza en un equipo denominado extrusor. Esta máquina posee componentes especificados según las funciones o etapas que conforman la extrusión. Es decir, mediante la tolva se realiza ingreso y transporte vertical, el cilindro y tornillo se relacionan con todas las etapas, las resistencias eléctricas permiten el termoplastificado, y el conjunto cabezal – boquilla se encargan del conformado (ver Figura 3).

Figura 3. Componentes principales de un extrusor.



Fuente: Tomada de [27], marzo de 2015.

A continuación se presenta la descripción de dichas etapas, teniendo en cuenta que cada etapa está ligada a algún componente del extrusor.

1.3.1.1. Ingreso y transporte

El ingreso del material se realiza en una tolva, donde el descenso generalmente se produce gracias a la gravedad. No obstante, puede originarse estancamiento en el proceso, creándose arcos o puentes en el fondo de la tolva. Para evitar el problema anterior, es recomendable acciones vibratorias, ayudar al descenso del material mediante el empuje, o usar una tolva de sección circular, donde la compresión del producto sea gradual en toda su superficie.

Al ingreso del material en la tolva se le podría denominar transporte vertical. Posteriormente comienza el flujo horizontal del producto en el interior del extrusor. En este punto el transporte es inducido por la fricción que debe existir entre el cilindro y el tornillo del extrusor, en otras palabras, el flujo del material es provocado por acción de arrastre. Es aconsejable que la fuerza de fricción del cilindro sea mayor que la del tornillo, ya que la fricción en la superficie de cilindro es la que causa el movimiento de la masa, y la fricción en la superficie del tornillo es la fuerza que retarda.

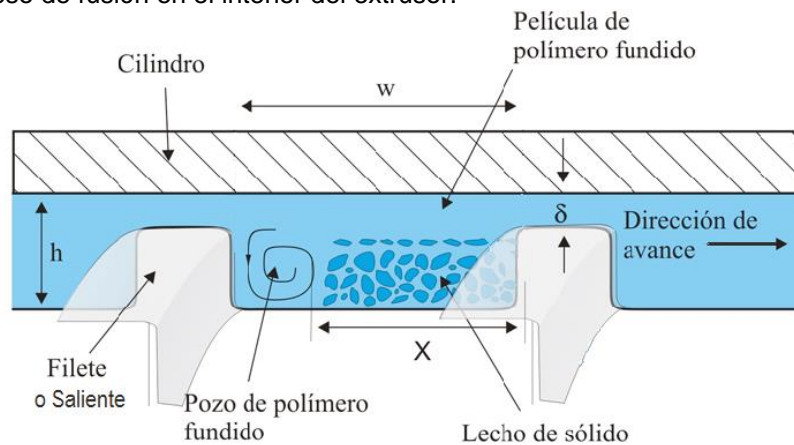
1.3.1.2. Termoplastificado por fusión

La “termoplastificación” es el proceso en el que los polímeros de un material se derriten con el aumento de temperatura, mezclándose entre sí. En ese sentido, el término que resume el proceso de termoplastificado es la fusión, y se representa en la extrusión cuando el material ingresado, generalmente en estado sólido, se va transformando en estado líquido (viscoso) gracias a la acción del calor.

En el caso específico de un extrusor, la fusión es ocasionada por el calor que genera la potencia disipada por las resistencias eléctricas sobre la superficie del cilindro. Además, la fricción entre dicha superficie y el tornillo también generan calor. La masa fundida se va acumulando en la superficie del cilindro hasta que es barrida por las salientes o filetes del tornillo (ver Figura 4). Así, entre las salientes del tornillo se reúne el material fundido que se transporta a lo largo del extrusor.

Las variables que actúan en el proceso de fusión son: h (altura del material fundido y barrido por los filetes del tornillo), δ (distancia entre el borde del filete y la superficie del cilindro), W (espacio entre cada filete, donde se transporta y alberga la fundición que se va solidificando), y X (ancho del lecho sólido que tiene a volverse más angosto a través de la extrusión) (ver Figura 4).

Figura 4. Proceso de fusión en el interior del extrusor.



Fuente: Modificada de [27], marzo de 2015.

1.3.1.3. Presurización

Cuando ocurre la presurización en algún sistema o ambiente, se hace referencia al hecho de mantener la presión constante en toda su superficie. Este proceso es generado por el giro y transporte que proporciona el sistema cilindro – tornillo del extrusor.

La presurización sucede a lo largo de todo el extrusor, iniciando con la presión de ambiente en la tolva y aumentando hasta el final del extrusor. Sin embargo, al detallarse en términos precisos, la presurización “toma forma esencial” en la parte final del sistema interno de extrusión, cerca de la boquilla. En este punto el tornillo tiene una forma diferente, ya que la profundidad entre la superficie del cilindro y la del tornillo se reduce considerablemente hasta volverse constante. Esto permite que el material extruido atraviese a presión la boquilla de conformado.

1.3.1.4. Mezclado

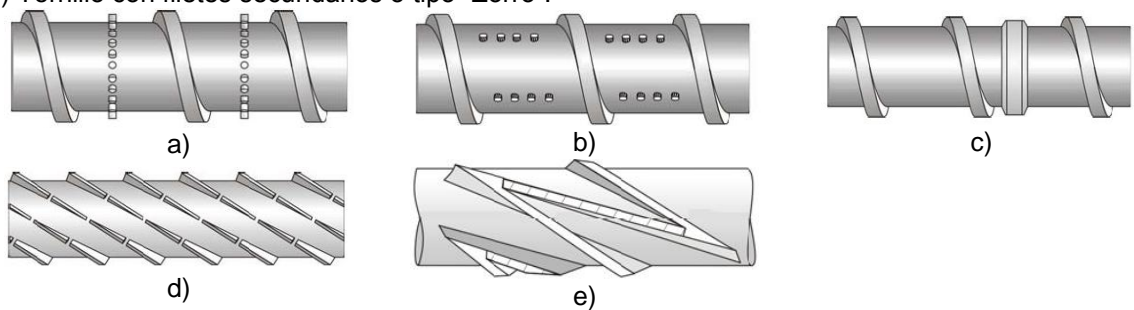
A través de todo el proceso de extrusión ocurre el mezclado del material. No obstante, para lograr que la composición del producto sea realmente homogénea debe agregarse una sección especializada de mezclado.

Las zonas especializadas de mezclado se ubican en el mismo tornillo y poseen una configuración determinada para obligar que el material procesado se reoriente. Específicamente, estas secciones de mezcla homogénea tienen los objetivos de barrer completamente la fundición alojada en la superficie del cilindro, evitar que el producto quede estancado en algunos tramos, y afectar lo menos posible el flujo de la mezcla con la ayuda de caídas de presión.

Existen algunas configuraciones de tornillos para mezclado homogéneo como tornillo con agujas de orientación perimetral, tornillo con agujas de orientación axial, tornillo con anillo, tornillo con filetes desiguales o tipo "Saxton" y tornillo con filetes secundarios o tipo "Zorro" (ver Figura 5). Todas las formas de estos tornillos cumplen con la función principal de mezclar homogéneamente el material fundido, sin embargo se diferencian considerablemente en la manera en que realizan dicha tarea, teniendo ventajas y desventajas entre sí.

Figura 5. Tipos de configuraciones de tornillos para un mezclado homogéneo.

- a) Tornillo con agujas de orientación perimetral.
- b) Tornillo con agujas de orientación axial.
- c) Tornillo con anillo.
- d) Tornillo con filetes desiguales o tipo "Saxton".
- e) Tornillo con filetes secundarios o tipo "Zorro".



Fuente: Tomada de [27], marzo de 2015.

1.3.1.5. Conformado

El conformado ocurre en la parte final del extrusor y es gobernado por la boquilla que se adapta junto al cabezal (generalmente esta juntura se conoce como dado de conformado). Es claro que el material extruido ha pasado por un proceso en el que se le han hecho alteraciones considerables, por lo tanto la boquilla se diseña para contrarrestar y dirigir la forma que deberá tener el producto al salir del extrusor. Teniendo esto en cuenta, existen fenómenos de tensión, relajación y enfriado, que provocan cambios en el tamaño y forma de la masa fundida, los cuales deben considerarse para usar una boquilla adecuada.

La tensión ocurre cuando se utiliza algún sistema de transporte por rodillos, lo que hace que el material este forzado y sufra cambios en su forma, reduciéndose su tamaño.

Por otro lado, la relajación da lugar a que el material tienda a expandirse, ya que en el interior del extrusor el producto está sometido a presiones altas, y al salir se encuentra con una presión menor.

Finalmente, el enfriado hace que el material reduzca su tamaño o se contraiga, debido a que en el extrusor la fundición se procesa a temperaturas elevadas, y al salir interactúa con una temperatura menor.

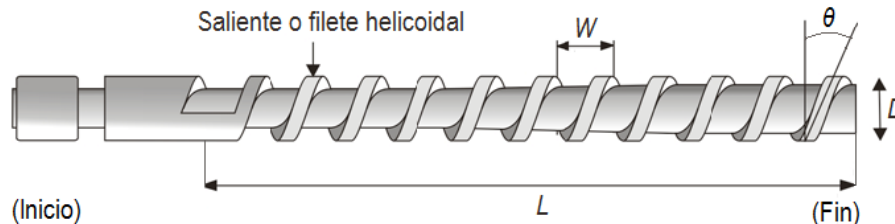
1.3.2. Componentes principales de un extrusor

1.3.2.1. Tornillo

El tipo de extrusor depende del tornillo o husillo que conforma el sistema, por ejemplo, existen extrusoras de doble tornillo. Sin embargo, la caracterización de un husillo se hará con respecto a las extrusoras de tornillo simple.

Gracias al tornillo se realizan las etapas de transporte, aumento de temperatura, fusión y mezclado de material, por esta razón es uno de los componentes más importantes del extrusor. En definición, un husillo es un cilindro macizo bordeado de una saliente o filete helicoidal (ver Figura 6). Sus características paramétricas son: L (longitud), D (diámetro), θ (ángulo del filete con respecto a la coordenada vertical), y W (distancia entre el espacio de cada filete). Además el tornillo tiene un diámetro mayor en la parte final con el propósito de realizar la función de presurización.

Figura 6. Tornillo simple para extrusión.



Fuente: Modificada de [27], marzo de 2015.

Se debe tener presente que cada material tiene diversas características como elasticidad, temperatura de fusión, coeficiente de fricción, viscosidad, entre otros; por lo tanto los parámetros del tornillo mencionados previamente deben estar diseñados para trabajar en el proceso adecuado, es decir, se utiliza un tornillo teniendo en cuenta el producto a extruir.

1.3.2.2. Cilindro

Es el componente donde se alberga el tornillo, sus funciones principales son: transferencia de calor al proceso y transporte del material. Para la primera tarea cuenta con resistencias eléctricas de bloque en bloque a lo largo de toda su longitud; mientras que para la segunda función tiene una superficie rugosa. Como es visto, el cilindro debe ser resistente, en la mayoría de los casos está fabricado de acero y algunas veces está cubierto con un revestimiento bimetálico.

La temperatura en el proceso de extrusión tiene a elevarse sustancialmente debido a la generación interna de calor por fricción. Por esta razón el cilindro cuenta con un sistema de refrigeración para mantener la temperatura nominal de proceso. Generalmente este enfriamiento se hace por flujo de aire. Finalmente, es importante tener en cuenta que la temperatura real del material siempre es algo mayor que la indicada por el controlador del extrusor, ya que los sensores de medición de temperatura están ubicados en el cilindro.

1.3.2.3. Tolva

Hace referencia al contenedor en el que se ingrese el material a extruir. Debe estar diseñada adecuadamente para que el flujo vertical del producto sea conciso y constante. Por lo general, los extrusores tienen tolvas de sección rectangular, sin embargo, es aconsejable usar las de sección circular, ya que permiten una compresión gradual en toda su superficie, evitándose problemas de estancamiento y flujo variable de material. Si bien las tolvas de sección circular son mejores, también son más costosas y de difícil fabricación.

Algunas tolvas tienen sistemas vibratorios o de agitación para asegurar el flujo constante de material.

En cuanto a tiempo de funcionamiento del extrusor, las tolvas se construyen con la capacidad de albergar material para una producción cercana a las 2 horas.

1.3.2.4. Cabezal – Boquilla

El cabezal es el componente en el que se soporta la boquilla. Generalmente a esta junta se le conoce como dado de conformado y está ubicada al final del extrusor. En la mayoría de los casos el cabezal está sujeto al cilindro. Además de servir de soporte a la boquilla, el cabezal cumple la función de facilitar el ingreso del material con una velocidad constante a la boquilla.

El moldeo final de la fundición es realizado por la boquilla. Su forma está directamente relacionada con el tipo de producto extruido, es decir, no es común implementar una boquilla para varias clases de materiales. Por ejemplo, existen boquillas anulares (para producción de productos cilíndricos), boquillas planas, boquillas circulares, boquillas cuadradas, entre otras. Acorde a lo anterior, las dimensiones de las boquillas necesariamente no son las mismas que las del material final obtenido de la extrusión, esto se explica debido a los fenómenos de tensión, relajación y enfriado que ocurren en el proceso de conformado. Finalmente, las partes principales de una boquilla son el canal de entrada, la sección de distribución y la zona de salida.

1.3.3. Extrusores marca *Thermo Scientific* HAAKE PolyLab OS [28]

Para el proceso en cuestión, producción de películas biodegradables a partir de almidón de yuca, ejecutado en el Laboratorio de Reología y Empaques en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, se utiliza un sistema marca *Thermo Scientific*, razón por la cual se presenta la información principal del mismo.

Dentro de la amplia gama de equipos enfocados al procesamiento de polímeros, *Thermo Scientific* cuenta con el sistema HAAKE PolyLab OS, el cual se compone principalmente de: un máster de control, un extrusor y un sistema de rodillos para transporte. El extrusor posee básicamente: rotores, un sistema de alimentación, un tornillo, un cilindro y un dado de conformado.

En el sistema HAAKE PolyLab OS, el equipo RheoDrive es el máster de control encargado de regular las variables y monitorear los resultados en el proceso a través de

una computadora central. Esta funciona bajo el sistema operativo *Windows XP* con software propietario y se conecta vía USB o con una interfaz TCP/IP opcional.

La gama de extrusores del sistema HAAKE PolyLab OS se cataloga como mezcladores de medición ofrecidos para operar en diferentes aplicaciones. Independientemente de su modelo, estos extrusores tienen una cámara de mezclado en la que se controla la temperatura de manera precisa mediante zonas independientes de calentado y enfriado. Además, se tiene en cuenta el calor generado por fricción en el cilindro, por lo que el cambio en la temperatura de fundición del material se observa y se registra como una señal de medida.

A continuación se detallan los extrusores con módulo de tornillo simple y doble tornillo que pertenecen al sistema HAAKE PolyLab OS:

1.3.3.1. Módulos de tornillo simple HAAKE Rheomex OS

La serie de módulos de tornillo simple HAAKE PolyLab OS Rheomex OS entrega datos confiables en la extrusión, lo que permite verificar los parámetros propios de proceso: velocidad de giro del tornillo, temperatura y energía. Se enfoca en la fabricación de pequeñas cantidades de nuevos polímeros en diferentes presentaciones: cordones, láminas, gránulos y películas sopladas, las cuales se logran gracias al dado que se conecta al final del cilindro del extrusor.

Algunas características específicas del extrusor de tornillo simple son iguales entre modelos diferentes, por ejemplo: diámetro del tornillo (19.05 mm), material (acero inoxidable DIN 1.8550), temperatura máxima (450 °C), presión máxima (10.153 psi), velocidad de giro máxima (250 min⁻¹) y toque máximo (160 N.m). Sin embargo, los modelos varían entre sí de acuerdo a longitud del tornillo, número de zonas de calefacción (1, 3, 4) y tipo de aplicación.

1.3.3.2. Módulos de doble tornillo HAAKE Rheomex OS

Los extrusores de doble tornillo HAAKE PolyLab OS Rheomex OS permiten el mezclado continuo en la alimentación y dosificación de diferentes aditivos a lo largo del cilindro del extrusor. Una unidad de extrusión con módulo de doble tornillo en conjunto con sensores adicionales ofrece la posibilidad de medir propiedades de materiales en la fundición.

Las aplicaciones típicas para extrusores de doble tornillo son: procesamiento de alimentos, procesos de alto desempeño e ingeniería en polímeros, extrusión y mezclado de componentes cerámicos, tonalidad de colores con cubrimiento de polvo, entre otros.

Respecto a las características específicas de estos extrusores, hay menos semejanza entre modelos, por ejemplo: velocidad de giro máxima (1.100 min⁻¹), temperatura máxima (350 °C, opcional de 400/450 °C), presión máxima (1.450 psi) y número de calentadores externos (2). En cuanto a las particularidades entre los modelos, se tiene: diámetro del tornillo (16 mm, 24 mm), longitud del tornillo, torque máximo (130 N.m, 180 N.m), número de zonas de calefacción (7, 10) y tipo de enfriado (por convección, circulación interna de agua).

1.4. Descripción del proceso de Producción de Películas Biodegradables a Partir de Almidón de Yuca

En el Laboratorio de Reología y Empaques en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca, se han venido realizando investigaciones aplicadas sobre el desarrollo de películas flexibles biodegradables. En resumen, entre los años 2008 y 2011 se ejecutó un proyecto de investigación que permitió obtener una película flexible biodegradable. Más adelante, en el año 2013, el grupo de investigación CYTBIA con el apoyo financiero del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – COLCIENCIAS, desarrolló ajustes al proceso de obtención de un prototipo de película biodegradable por extrusión y soplado a partir de almidón de yuca. Actualmente se continúan dichas investigaciones y modificaciones en el campo, pero con miras de producción industrial.

A continuación se presenta la descripción de la Producción de Películas Biodegradables a Partir de Almidón de Yuca (PROPEBIPAY), organizado en 4 etapas: obtención del almidón de yuca modificado, obtención de gránulos de almidón termoplástico, obtención de gránulos de ácido poliláctico injertado y obtención de película biodegradable. Esta sección se soporta en el Manual Técnico “Elaboración de Películas Flexibles Biodegradables” realizado por el grupo de investigación CYTBIA [29] y en visitas presenciales al Laboratorio de Reología y Empaques.

1.4.1. Etapa de obtención de almidón de yuca modificado

En la producción de almidón de yuca existen tres tipos principales de almidones según su disposición final: uso alimenticio, fines no alimenticios y almidones híbridos o mixtos. Según estudios realizados por el grupo de investigación CYTBIA, se llegó a la conclusión que en el proceso PROPEBIPAY se debe utilizar almidón de yuca de fines no alimenticios, debido a su contenido de amilosa y amilopectina (moléculas compuestas de cadenas largas de glucosa, alrededor del 20 %, en la mayoría de los almidones, es amilosa y aproximadamente 80 % es amilopectina, esta última es insoluble en agua [30]).

En Colombia la producción de almidón de yuca se realiza en sitios agroindustriales denominados “rallanderías”. En un inicio el almidón usado en el proceso PROPEBIPAY provenía de la Rallandería La Agustina, ubicada en el municipio de Mondomo en el departamento del Cauca, Colombia. Sin embargo, dicho material tenía un tamaño de partícula inadecuado (granulometría entre 11 μm a 15 μm), por lo tanto, se necesitaba de una operación de molienda y tamizado para obtener el tamaño deseado del almidón para el proceso.

Actualmente se utiliza el almidón de yuca de la empresa Almidones de Sucre en el departamento de Sucre, Colombia. Su presentación llega en bultos de 25 kg (ver Figura 7) y es mejor en cuanto a granulometría y pureza, por lo tanto se evita la molienda y tamizado.

Las materias primas principales en el proceso PROPEBIPAY son: almidón de yuca y ácido poliláctico (PLA). Además se agregan algunos aditivos necesarios como: glicerol (compuesto alcohólico con la propiedad de ser higroscópico [31]), ácido esteárico (uno de los ácidos grasos de cadena larga más comunes, que poseen la propiedad de ser

hidrófobo o insolubles en agua [32]), anhídrido maléico (AM, reactivo implementado en el proceso como agente acoplador) y peróxido de benzoilo (utilizado como catalizador o iniciador en las resinas de poliéster termoestable [33]).

Figura 7. Bulto del almidón de yuca proveniente de Almidones Sucre.

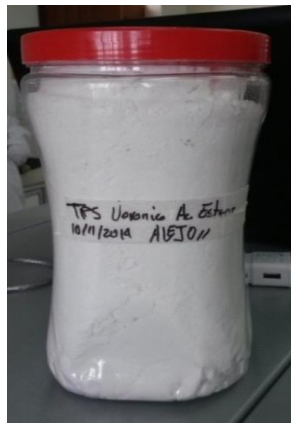


Fuente: El autor, marzo de 2015.

Después de conocer las materias primas a usar, se prepara del almidón de yuca antes del ingreso a cada etapa de producción. En primera instancia, se adecúa la humedad del almidón de yuca recibido, desde un porcentaje de humedad estimado del 13 % a uno aproximado del 5 %. El secado del almidón de yuca se realiza en un horno de convección forzada marca memmert, sobre bandejas metálicas, durante un tiempo promedio de 16 horas a una temperatura de 60 °C.

En segunda instancia, el almidón de yuca “seco” se mezcla con glicerol (plastificante que proviene de la empresa DISAN S.A. sede Cali, Colombia) de pureza 99,5 % bajo una relación 70:30, es decir, 70 % almidón de yuca y 30 % glicerol. Además, se agrega ácido esteárico (aditivo suministrado por MERCK sede Medellín, Colombia) con pureza de 99,3 % en una proporción cercana a 1 % con respecto a la masa del almidón de yuca. Se agitan todos los componentes en un mezclador de alta velocidad marca *Kitchen Aid Professional* con el fin de obtener una mezcla homogénea y sin grumos. Finalmente, el almidón modificado se guarda en un recipiente hermético (ver Figura 8).

Figura 8. Almidón modificado.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

1.4.2. Etapa de obtención de *pellets* de almidón termoplástico

El almidón termoplástico (TPS por sus siglas en inglés) se logra mediante modificaciones físicas que incluyen adición de fuerzas térmicas y mecánicas (extrusión), agregando plastificantes de difícil evaporación (en el proceso se usa glicerol y ácido esteárico). Este material es biodegradable, renovable, flexible y se utiliza en diferentes procesos de termoplastificación [34].

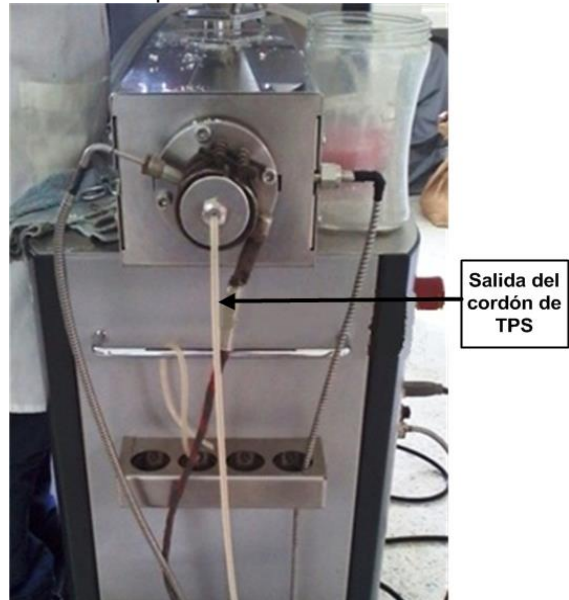
Con el almidón de yuca modificado, se realiza el termoplastificado del material en un extrusor con módulo de doble tornillo marca *Thermo Scientific*. Antes de ingresar el material al extrusor, se debe hacer precalentamiento del equipo a un valor de temperatura deseada de 130 °C. Esta magnitud se encuentra establecida dentro del perfil de parámetros de velocidad (120 min^{-1}) y temperaturas. Para este extrusor de doble tornillo, se modifican 7 valores de temperatura (6 a lo largo del cilindro y 1 en el dado de conformado) alrededor de un promedio de 130 °C. Una vez se alcanza el calor al interior del extrusor, se alimenta con el almidón modificado (ver Figura 9), obteniéndose el cordón de TPS (ver Figura 10).

Figura 9. Ingreso del almidón modificado para la primera extrusión.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

Figura 10. Cordón de almidón termoplástico que resulta de la primera extrusión.



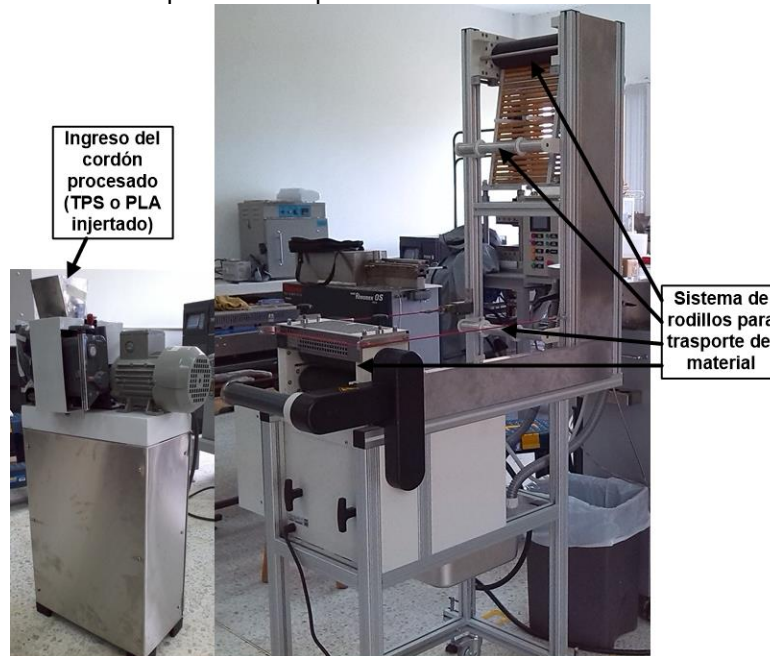
Fuente: El autor, noviembre de 2014.

En esta etapa, anteriormente se utilizaba el extrusor con módulo de tornillo simple marca *Thermo Scientific*, sin embargo, al usar el módulo de doble tornillo, se redujeron las pérdidas y se hizo más eficiente el proceso, obteniéndose más *pellets* de TPS con el mismo material ingresado.

El cordón de TPS se transporta mediante una serie de rodillos para lograr la disminución de temperatura y aumento de consistencia. Al final del sistema de rodillos se ubica un

peletizador marca INMAGRAF que transforma el cordón de TPS en gránulos o *pellets* (ver Figura 11).

Figura 11. Sistema de rodillos para el transporte del material.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

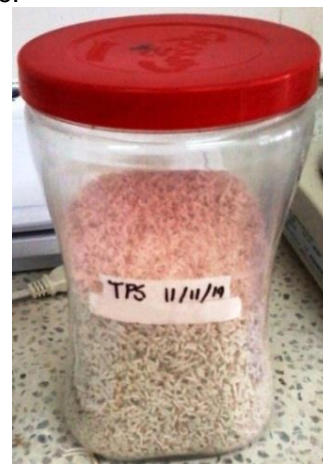
Se seca el lote de *pellets* obtenido, depositándolo en bandejas metálicas (ver Figura 12) para su ingreso al horno de convección forzada, donde se deja durante 1 hora a una temperatura de 80 °C. En este secado se pretende asegurar un porcentaje de humedad menor al 2 % en los gránulos de TPS. Finalmente el lote de *pellets* de TPS se guarda en un recipiente hermético (ver Figura 13).

Figura 12. *Pellets* de almidón termoplástico listos para el secado.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

Figura 13. Lote de *pellets* de almidón termoplástico almacenado en un recipiente hermético.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

1.4.2.1. Limpieza de extrusor de doble tornillo

Paralelo al tiempo que tarda el secado de los *pellets* de TPS, se realiza la limpieza del módulo de doble tornillo usado en la obtención del cordón de TPS. En este punto se usa glicerol debido a que tiene un punto de ebullición/evaporación de 290 °C [31], magnitud considerablemente mayor comparada con el agua. Hay que considerar que el limpiado se realiza justo después de haber ejecutado la primera extrusión, por lo tanto el glicerol no se evaporará dentro del módulo de doble tornillo.

1.4.3. Etapa de obtención de *pellets* de ácido poliláctico injertado

El ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) es un poliéster termoplástico biodegradable con algunas propiedades como: dureza, rigidez, flexibilidad y variedad de resistencias. Esto le permite ser similar a los polímeros sintéticos o petroquímicos. Se obtiene a partir de ácido láctico, bien sea por vía química o biotecnológica. Para su producción pueden usarse diversos materiales: sacarosa de azúcar de caña o de remolacha, lacto suero, fibra de alfalfa y almidones de yuca, papa, trigo o maíz [35].

Una vez limpiado el extrusor de doble tornillo, se procede a la instalación del extrusor con módulo de tornillo simple marca *Thermo Scientific*, usado para la obtención del cordón de PLA injertado. De igual manera que en la primera extrusión, se debe hacer un precalentamiento del equipo a un valor de temperatura deseada de 160 °C. Esta magnitud pertenece al nuevo perfil de parámetros de velocidad (30 min⁻¹) y temperaturas. Para este extrusor de tornillo simple, se modifican 4 valores de temperatura (3 a lo largo del cilindro y 1 en el dado de conformado) alrededor de un promedio de 160 °C.

Cuando se ha alcanzado la temperatura deseada, es posible iniciar la extrusión del PLA, ingresando los siguientes materiales de manera discreta¹: PLA, anhídrido maléico (AM) con pureza del 99 % (reactivo proveniente de MERCK sede Medellín, Colombia) en una cantidad aproximado del 2 % con respecto a la masa del PLA, y peróxido de benzoilo con un factor aproximado de 0,3 respecto a la masa del AM.

En un inicio, a los materiales anteriores se les adicionaba policaprolactona (PCL, poliéster biodegradable fabricado a partir de derivados del petróleo, se funde fácilmente y no es toxico [36]) en una relación de 70:30 con respecto al PLA, es decir, 70 % de PLA y 30 % de PCL. Sin embargo, el grupo de investigación CYTBIA decidió suprimir el PCL del proceso ya que al obviarlos no se registraban cambios considerables en las propiedades de película biodegradable, pero si se lograba una reducción de costos.

El PLA que se usa en el proceso proviene de la empresa norteamericana Cargill Dow Polymers LLC, tiene la referencia 2002D, su presentación llega en bultos de 25 kg, en forma de *pellets* y de color blanco opaco (ver Figura 14).

En esta etapa, los aditivos usados en los materiales tienen funciones particulares, ya que el peróxido de benzoilo permite la polimerización y acelera las reacciones químicas,

¹ El ingreso de los materiales se realiza por experiencia de los investigadores en el proceso, es decir, se tienen las cantidades correspondientes a cada material y se van ingresando en proporciones a juicio del operario.

permaneciendo inalterado. A su vez, el AM logra la unión e interacción entre el TPS y el PLA, esto se debe a que el primero es polar (enlace en el que se comparten electrones de forma desigual, es decir que cada átomo atrae electrones a su propio nivel [37]) y el segundo es apolar (enlace en el que dos átomos atraen electrones de forma igual entre sí [37]).

Figura 14. Bulto de ácido poliláctico 2002D utilizado en el proceso.



Fuente: Tomado de [29], marzo de 2015.

Similar a la primera etapa donde se obtiene el cordón de TPS, el cordón de PLA injertado se transporta por una serie de rodillos (ver Figura 11) para que pierda calor y aumente su rigidez. Además, se adecua el disco del dado de soplado para ayudar a la refrigeración del cordón. Este disco o anillo permite que haya una circulación de aire desde la alimentación hasta el centro, por donde se atraviesa el cordón que entra en contacto con el aire de refrigeración. Este montaje es artesanal y los investigadores lo realizan con el fin de simular un sistema de refrigeración.

Finalmente, el cordón de PLA injertado es peletizado y convertido en gránulos, los cuales se almacenan en recipientes herméticos para su disposición final en el proceso posterior de soplado.

1.4.4. Etapa de obtención de película biodegradable

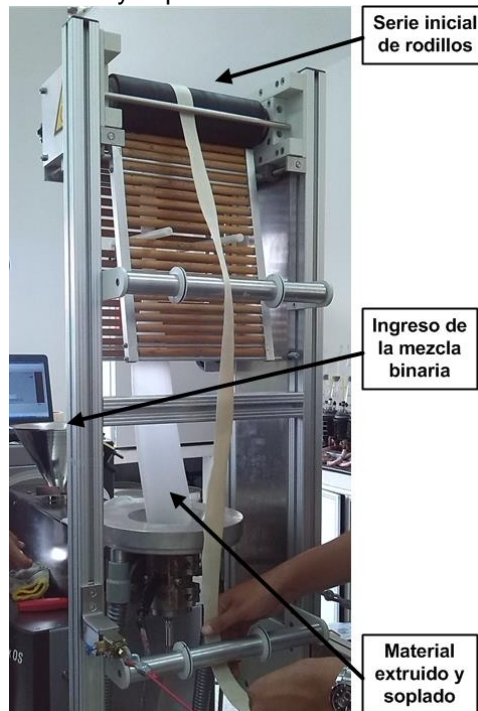
En la etapa final se obtiene la película flexible biodegradable mediante la extrusión y conformado por soplado de los *pellets* de TPS y de PLA injertado. Estos materiales se procesan a una relación aproximada de 75:25, es decir, 75 % de gránulos de TPS y 25 % de PLA injertado.

Esta etapa se lleva a cabo en el mismo extrusor marca *Thermo Scientific* con módulo de tornillo simple utilizado en la etapa precedente, por lo tanto se hace una limpieza en caliente del equipo, ingresando la mezcla binaria (*pellets* de TPS y de PLA injertado) de manera continua y agregando pequeños recortes de papel negro, estos funcionan como muestras que indican cuando el material ha recorrido todo el extrusor, realizándose un “barrido” del PLA injertado que se usó en la etapa anterior.

La limpieza en caliente del extrusor se hace con la configuración de temperatura deseada de 165 °C, magnitud que pertenece al nuevo perfil de parámetros de velocidad (35 min^{-1}) y temperaturas. Para este extrusor también modifican 4 valores de temperatura (3 a lo largo del cilindro y 1 en el dado de conformado) alrededor de un promedio de 165 °C.

Se inicia el ingreso formal del material, una vez se tiene certeza que el módulo de tornillo simple está totalmente “contaminado” con la mezcla binaria. Se debe esperar que la composición extruida alcance la altura donde está ubicada la primera serie de rodillos (ver Figura 15). Una vez en el tope se comienza el soplado, donde la presión de aire se controla manualmente a $29 \pm 0,5 \text{ psi}$, según el diámetro de la película que observa el operario.

Figura 15. Salida del material extruido y soplado.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

Se hace control del suministro de aire al tubular soplado, ya que la superficie del material biodegradable tiene una porosidad microscópica por donde se escapa parte del aire suministrado. Además, se pueden presentar rupturas en la película soplada, ocasionando el rápido escape del aire en el interior. En resumen, el operario debe abrir o cerrar la válvula para permitir o no el aporte de aire al tubular biodegradable, según la forma que va tomando la película.

Finalmente se extraen algunos tubulares de la película flexible biodegradable y la bobina que resulta del proceso de las 4 etapas (ver Figura 16 y 17). Este producto se almacena para su estudio posterior de caracterización para obtener un perfil mejorado de parámetros, teniendo en cuenta la elongación y pigmentación de la película biodegradable.

Figura 16. Tubular de la película flexible biodegradable.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

Figura 17. Bobina obtenida de la célula completa de producción.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

1.5. Descripción de la planta de PROPEBIPAY

La célula de la planta de PROPEBIPAY está compuesta de 4 unidades de producción: obtención de almidón modificado, obtención de *pellets* de TPS, obtención de *pellets* de PLA injertado y obtención de película biodegradable. A continuación se presenta la descripción de la planta en términos de las 4 unidades:

1.5.1. Unidad de obtención de almidón de yuca modificado

En esta primera unidad se detallan 5 elementos divididos en 2 procesos: secado de almidón de yuca y su mezclado con plastificante y aditivo.

Para el secado de almidón de yuca se usan 2 equipos: horno de convección forzada marca memmert, serie *Perfect* (ver Figura 18) y balanza digital de humedad² marca Precisa, modelo XM 60 (ver Figura 19).

En cuanto al mezclado de almidón de yuca, plastificante y aditivo, se tienen 3 elementos: balanza digital de masa marca ViBRA, modelo SJ (ver Figura 20), mezclador de alta velocidad marca *Kitchen Aid Professional*, modelo 600, serie 6QT de 575 W de Estados Unidos de América (ver Figura 21) y recipiente hermético donde se almacena el almidón modificado.

² La balanza de humedad es el nombre técnico que hace referencia a un equipo encargado de calcular la humedad de masas, pastas, adhesivos, polvos, entre otros. También se conoce como "humidímetro", sin embargo es una traducción inadecuada del inglés.

Figura 18. Horno de convección forzada marca memmert.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

Figura 19. Balanza digital de humedad marca Precisa.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

Figura 20. Balanza digital de masa marca ViBRA.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

Figura 21. Mezclador de alta velocidad marca Kitchen Aid Professional.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

1.5.2. Unidad de obtención de *pellets* de almidón termoplástico

Para esta segunda unidad se cuenta con 8 elementos divididos en 3 procesos: extrusión de almidón modificado, peletizado de cordón de TPS y secado de *pellets* de TPS.

Para la extrusión de almidón modificado se usan 4 elementos: máster de control marca *Thermo Scientific*, modelo HAAKE PolyLab OS RheoDrive 4 de Alemania (ver Figura 22), tolva de sección circular, módulo de doble tornillo marca *Thermo Scientific*, modelo

HAAKE Rheomex OS PTW16 de Alemania (ver Figura 23) y sistema de rodillos para transporte del material marca *Thermo Scientific*, modelo FP1 FILM POSTEX de Alemania (ver Figura 11). Estos equipos del fabricante *Thermo Scientific* fueron adquiridos por la Universidad del Cauca en el año 2009 en convenio con el Centro Regional de Productividad e Innovación del Cauca – CREPIC.

Figura 22. Máster de control marca Thermo Scientific.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

Figura 23. Módulo de doble tornillo marca Thermo Scientific.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

En cuanto al peletizado de cordón de TPS, se tiene un peletizador marca INMAGRAF, modelo 2014, serial 4790001 de Colombia (ver Figura 24). A su vez, este tiene adjunto un motor trifásico marca SIEMENS, modelo 1LA7 072-6YA60 (ver Figura 25).

Figura 24. Peletizador marca INMAGRAF.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

Figura 25. Motor trifásico marca SIEMENS adjunto al peletizador.



Fuente: El autor, febrero de 2015.

Finalmente, respecto al secado de *pellets* de TPS, se utilizan 3 elementos: horno de convección forzada, balanza de humedad, usados en la primera unidad, y recipiente hermético donde se almacenan los *pellets* de TPS.

1.5.3. Unidad de obtención de *pellets* de ácido poliláctico injertado

En esta tercera unidad se detallan 8 elementos divididos en 2 procesos: extrusión de PLA injertado y peletizado de cordón de PLA injertado.

Para la extrusión de PLA injertado se usan 6 elementos: balanza digital de masa utilizada en la primera unidad, máster de control, tolva de sección circular, sistema de rodillos, citados en la segunda unidad, módulo de tornillo simple marca *Thermo Scientific*, modelo HAAKE Rheomex OS (ver Figura 26) y compresor de aire marca POWER de la empresa Compresores Fabriles de Cali – Colombia (ver Figura 27), el cual es usado para la refrigeración del extrusor de tornillo simple y del cordón de PLA injertado (en funcionamiento la presión de aire es de 21 ± 1 psi).

Figura 26. Módulo de tornillo simple marca Thermo Scientific.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

Figura 27. Compresor de aire marca POWER, usado para la refrigeración del extrusor de tornillo simple.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

En cuanto al peletizado de cordón de PLA injertado, se tienen 2 elementos: peletizador con el motor trifásico nombrado en la segunda unidad y un recipiente hermético para guardar los *pellets* de PLA injertado.

1.5.4. Unidad de obtención de película biodegradable

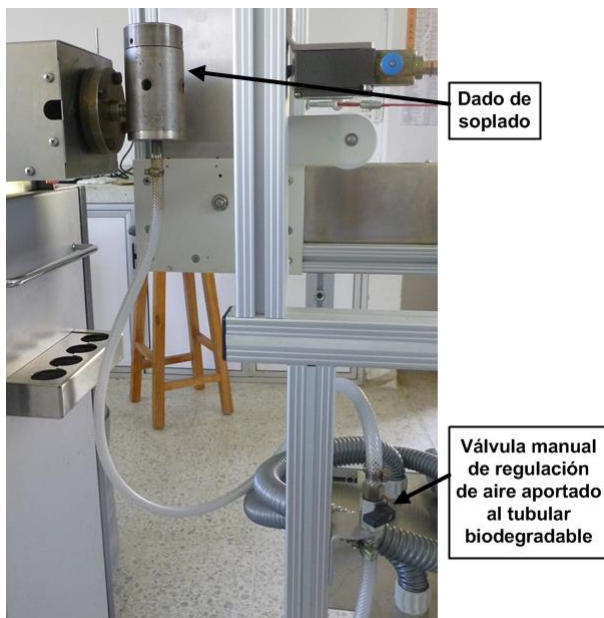
En la cuarta y última unidad se cuenta con 10 elementos divididos en 3 procesos: mezclado, extrusión y soplado de unión binaria.

Para el mezclado de unión binaria se usan 2 elementos: balanza de masa utilizada en primera y tercera unidad, y recipiente hermético donde se mezcla manualmente la unión binaria.

En cuanto a la extrusión de mezcla binaria, se tiene 4 elementos: máster de control, tolva de sección circular, usados en la segunda y tercera unidad, módulo de tornillo simple y compresor de aire citados en la tercera unidad.

Finalmente, respecto al soplado de mezcla binaria fundida, se utilizan 4 elementos: dado de soplado con abertura de 70 μm acoplado a la salida del extrusor de tornillo simple (ver Figura 28), compresor de aire marca STANPROF que proporciona la presión de aire a la película (ver Figura 29), válvula manual para la regulación del aire aportado a la película biodegradable (ver Figura 28), y el sistema de rodillos usado en la segunda y tercera unidad.

Figura 28. Sistema de soplado de la película biodegradable.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

Figura 29. Compresor de aire marca Stanprof, usado para el soplado de la película biodegradable.



Fuente: El autor, noviembre de 2014.

2. INGENIERÍA CONCEPTUAL

Realizar el diseño correcto de un proyecto de automatización implica la documentación adecuada y ordenada de la información que tiene el proceso en cuestión. En ese sentido, se recomienda implementar ingeniería conceptual, básica y detallada. La primera permite recoger la información fundamental del proceso, en la segunda se organiza dicha información usando diagramas técnicos y en la tercera se garantiza la implementación de la solución de ingeniería con un nivel alto de especificación.

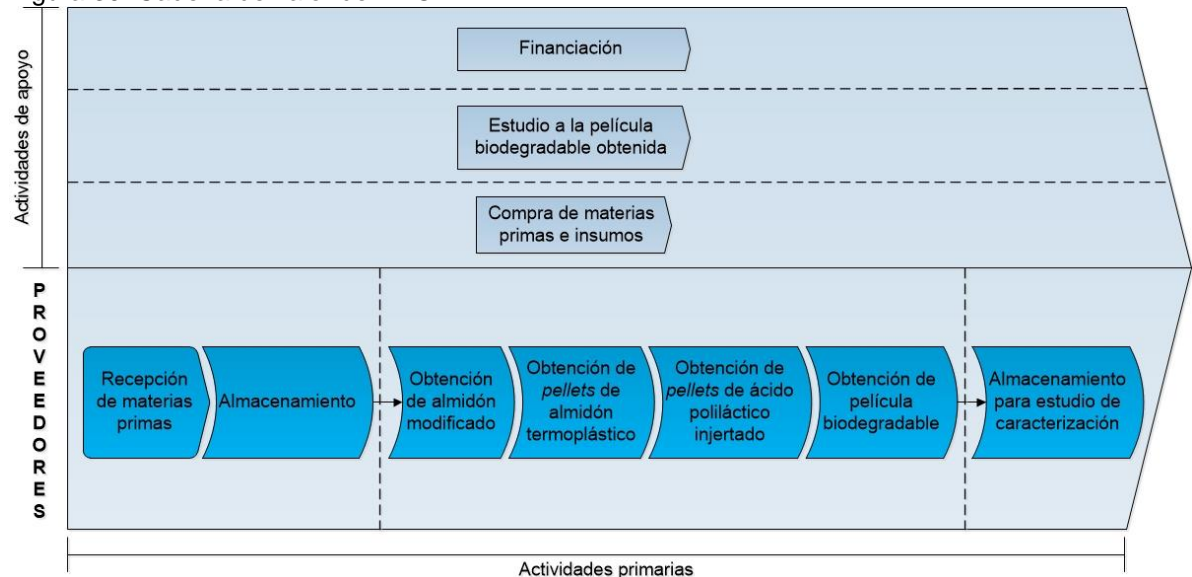
La ingeniería conceptual se resume en la viabilidad técnica y económica de un proyecto. Sin embargo, en este capítulo se hará el desarrollo de la descripción técnica del proceso PROPEBIPAY, teniendo presente que este se realiza a nivel de laboratorio.

Después de conocer en detalle el proceso, se realiza la cadena de valor. Posteriormente, se hace el diagrama de flujo de proceso. Paso a seguir, se tiene en cuenta el estándar ISA 88.01 [38] para describir el proceso y la planta en términos de los modelos de proceso, físico y de control procedimental. Finalmente, se realiza un diagnóstico con las necesidades propias del proceso y sus requerimientos.

2.1. Cadena de valor del proceso PROPEBIPAY

Mediante la cadena de valor [39] se representan las principales actividades que generan valor en el proceso PROPEBIPAY. La cadena de valor de este se compone de 7 actividades primarias y 3 actividades de apoyo (Figura 30).

Figura 30. Cadena de valor de PROPEBIPAY.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

La línea principal de actividades comienza con la recepción y almacenamiento de las materias primas aportadas por los diferentes proveedores (logística de entrada). Posteriormente siguen las actividades para obtener: almidón modificado, *pellets* de almidón termoplástico, *pellets* de ácido poliláctico injertado y película biodegradable

(operaciones). Por último, se encuentra el almacenamiento de la película biodegradable (logística de salida).

Las actividades de soporte se componen de la financiación del “Proyecto de Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables” (infraestructura de la empresa). Después se encuentra el estudio de caracterización realizado a la película biodegradable obtenida (desarrollo de tecnología). Finalmente, está la compra de los materiales e insumos necesarios en el proceso (aprovisionamiento).

2.2. Diagrama de flujo del proceso PROPEBIPAY

Con el Diagrama de Flujo de Proceso (PFD por sus siglas en francés) se muestra la secuencia que recorre el flujo de materia prima hasta converger en la película biodegradable. Antes de construir dicho esquema, es importante tener en cuenta las entradas y salidas en las etapas que abarcan el proceso general PROPEBIPAY (ver Tabla 4).

Tabla 4. Listado de materias primas interactuantes en cada etapa de PROPEBIPAY.

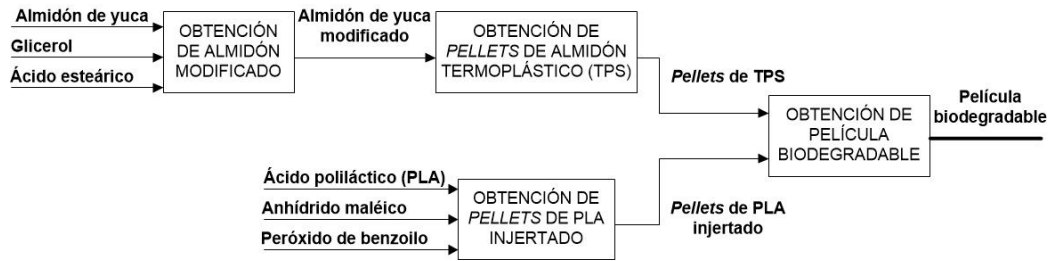
Entrada	Etapas	Salida
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Almidón de yuca. ✓ Glicerol. ✓ Ácido esteárico. 	Obtención de almidón modificado.	✓ Almidón modificado.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Almidón modificado. 	Obtención de <i>pellets</i> de almidón termoplástico (TPS).	✓ <i>Pellets</i> de TPS.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ácido poliláctico (PLA). ✓ Anhídrido maléico. ✓ Peróxido de benzoilo. 	Obtención de <i>pellets</i> de PLA injertado.	✓ <i>Pellets</i> de PLA injertado.
<ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Pellets</i> de TPS. ✓ <i>Pellets</i> de PLA injertado. 	Obtención de película biodegradable.	✓ Película biodegradable.

Fuente: El autor, marzo de 2015.

Con ayuda de la descripción del proceso expuesta en la sección 1.4 y el listado materias primas que ingresan y salen en cada etapa (ver Tabla 4), se diseña 2 PFD: uno por etapas y otro por operaciones. Aunque ambos tienen el fin de ilustrar el recorrido de la materia prima a través del proceso, el primero representa el flujo de materiales que ingresan en cada etapa de proceso, y a su vez los subproductos que salen de las mismas; mientras que el segundo detalla las transformaciones que sufren los materiales al interactuar con cada operación del proceso.

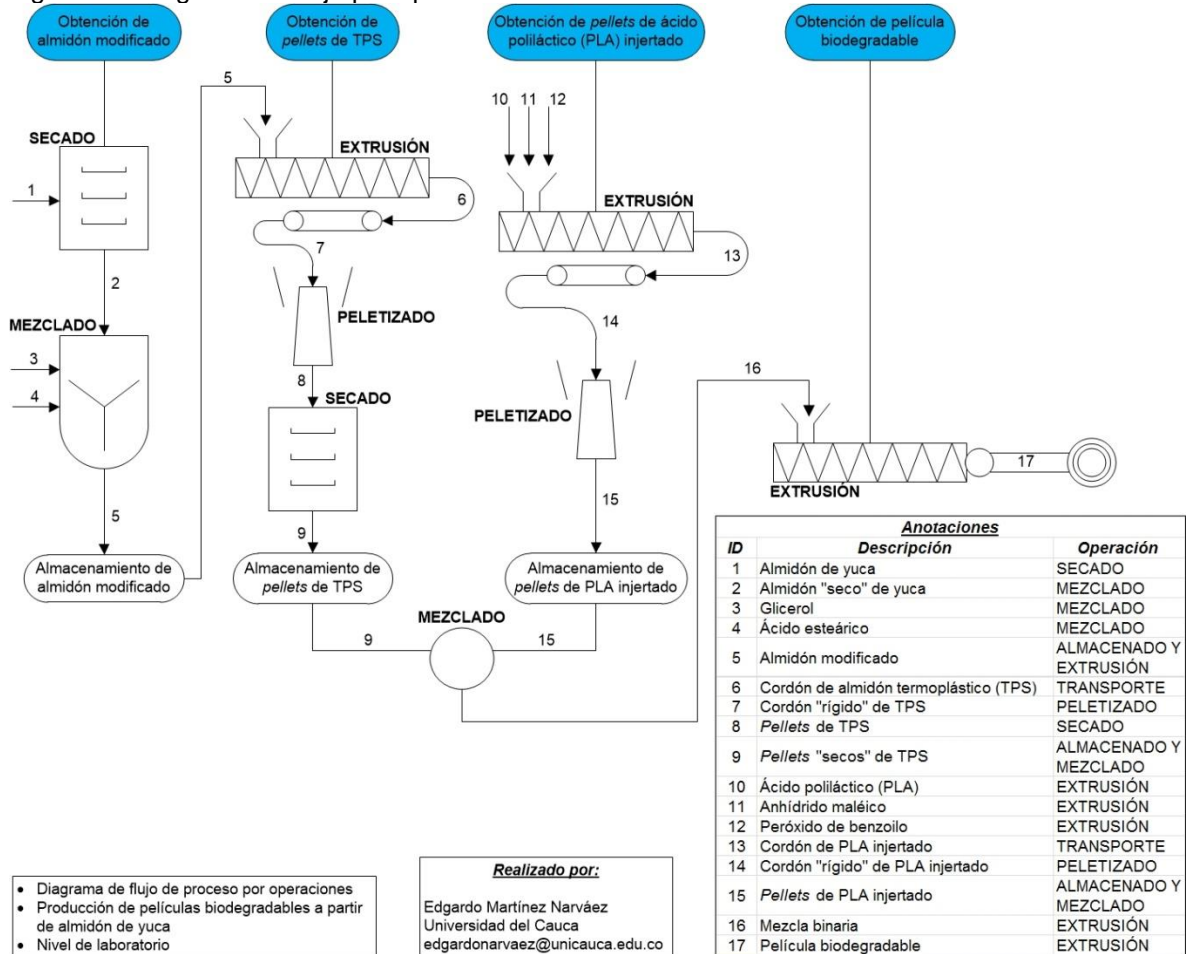
El primer PFD de PROPEBIPAY (ver Figura 31) que indica las etapas de proceso, inicia con la de obtención de almidón modificado donde se necesita: almidón de yuca, glicerol y ácido esteárico, los cuales se procesan para obtener almidón modificado. Este último ingresa en la etapa de obtención de *pellets* de almidón termoplástico (TPS) para producir los gránulos del mismo. Por otro lado, para la obtención de *pellets* de ácido poliláctico (PLA) injertado se recibe: PLA, anhídrido maléico y peróxido de benzoilo, procesándose para lograr los gránulos de PLA injertado. Los *pellets* de TPS y de PLA injertado conforman la mezcla binaria con la cual se obtiene la película biodegradable.

Figura 31. Diagrama de flujo por etapas de PROPEBIPAY.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

Figura 32. Diagrama de flujo por operaciones de PROPEBIPAY.



Fuente: El autor, marzo de 2015.

En el segundo PFD de PROPEBIPAY (ver Figura 32), se tiene un esquema más detallado del recorrido de los materiales a través de las operaciones de proceso hasta converger en los productos modificados. En ese sentido, se inicia con la obtención de almidón modificado, donde se ingresa almidón de yuca para su secado y posterior mezclado

homogéneo con glicerol y ácido esteárico. Producto de lo anterior se obtiene almidón modificado, material necesario para comenzar la primera extrusión del proceso, con lo cual resulta el cordón de almidón termoplástico (TPS) que se transporta en un sistema de rodillos hacia el peletizado, lográndose los *pellets* de TPS que pasan por un proceso de secado y almacenamiento. En una segunda extrusión ingresan: ácido poliláctico (PLA), anhídrido maléico y peróxido de benzoilo, obteniéndose el cordón de PLA injertado que es peletizado y almacenado. Finalmente, se realiza el mezclado de los *pellets* de TPS y de PLA injertado para conformar la mezcla binaria que alimenta la tercera extrusión, convergiendo en la película biodegradable.

2.3. Modelos ISA S88.01 del proceso y la planta PROPEBIPAY

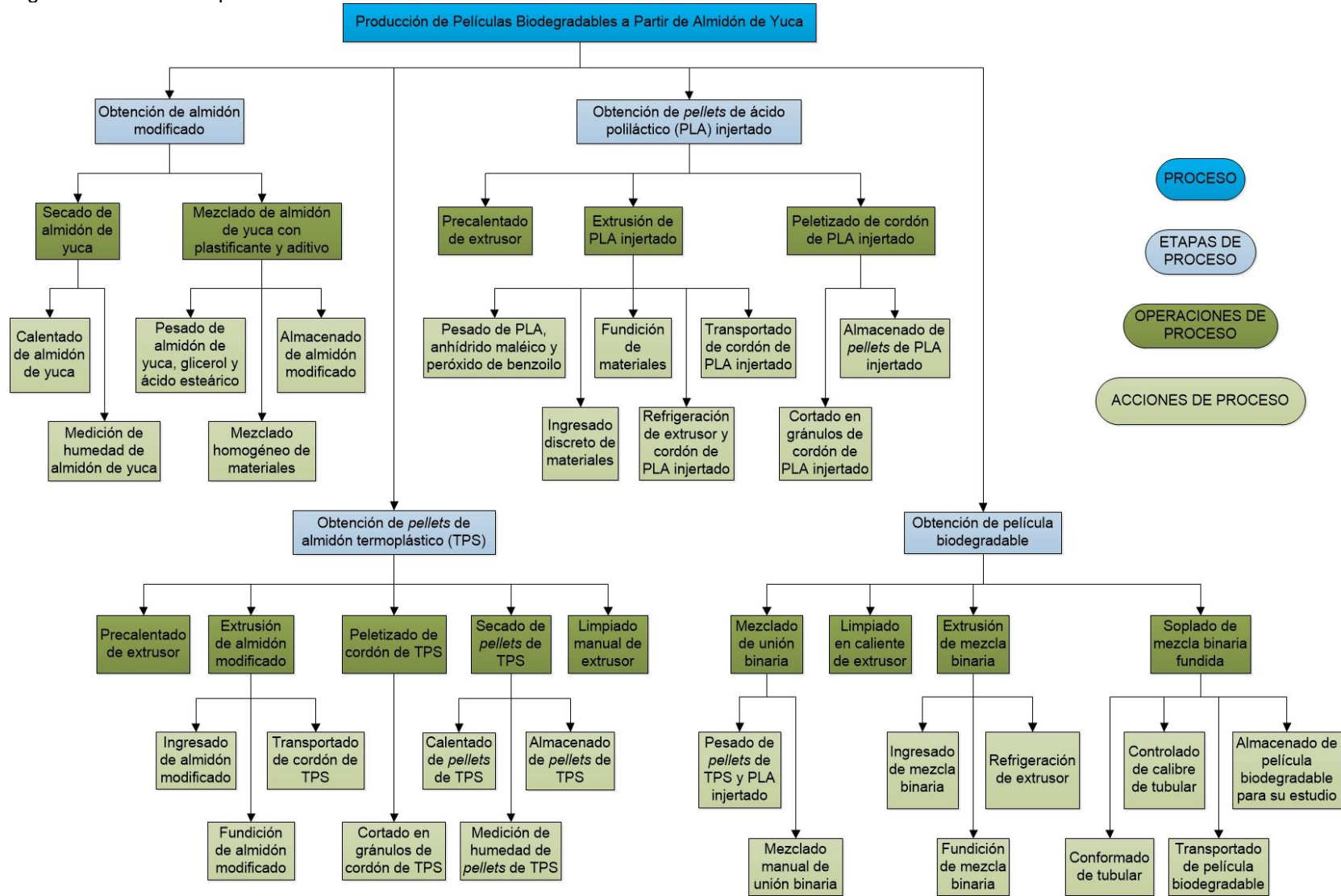
El estándar ISA 88.01 [38] permite detallar separadamente el proceso y la planta, es decir, por un lado se organiza toda la información del conocimiento que se tenga sobre el proceso, incluyendo las recetas para diversos productos, y por otro lado se documenta la planta en términos de las capacidades de equipos. Además, ISA S88.01 le proporciona versatilidad al proceso, ya que en una misma planta se pueden obtener múltiples productos, originándose múltiple manufactura.

El proceso y la planta PROPEBIPAY se organizará en términos de 3 modelos de ISA S88.01: el modelo de proceso que visualiza lo que generan las acciones procedimentales, el modelo físico que muestra en dónde se ejecuta el proceso (planta y capacidad de equipos) y el modelo de control procedimental que indica cómo se realiza el proceso.

2.3.1. Modelo de proceso

El modelo de proceso permite una descripción organizada del proceso. Su estructura se conforma de 4 niveles: “proceso” (nivel superior que contiene las estaciones de proceso), “etapas de proceso” (por lo general operan independientemente y proporcionan cambios físicos y químicos al material procesado), “operaciones de proceso” (actividades principales conformadas por tareas menores) y “acciones de proceso” (órdenes menores de procesamiento). El proceso PROPEBIPAY cuenta con 4 etapas de proceso, 14 operaciones de proceso y 28 acciones de proceso (ver Figura 33).

Figura 33. Modelo de proceso de PROPEBIPAY.



Fuente: El autor, abril de 2015.

Como se observa (ver Figura 33), el modelo de proceso permite una descripción simple, completa y organizada de PROPEBIPAY. En ese sentido, se inicia con la etapa de proceso obtención de almidón modificado, donde se tiene el secado del almidón de yuca y su posterior mezclado con un plastificante (glicerol) y un aditivo (ácido esteárico).

En la segunda etapa de proceso, obtención de *pellets* de almidón termoplástico (TPS), se inicia con el precalentado del extrusor a utilizar, después se realiza la extrusión del almidón modificado que se logró en la etapa de proceso anterior. En este punto resulta el cordón de TPS que es peletizado para generar *pellets* de TPS. Finalmente estos gránulos son secados y paralelo a esta operación, se limpia manualmente el extrusor usado.

Para la tercera etapa de proceso, obtención de *pellets* de ácido poliláctico (PLA) injertado, se realiza el precalentado del extrusor a usar, luego se inicia con la extrusión del PLA injertado, donde los componentes (PLA, anhídrido maléico y peróxido de benzoilo) se ingresan discretamente. Resultado de lo anterior se tiene el cordón de PLA injertado que es peletizado para lograr *pellets* de PLA injertado.

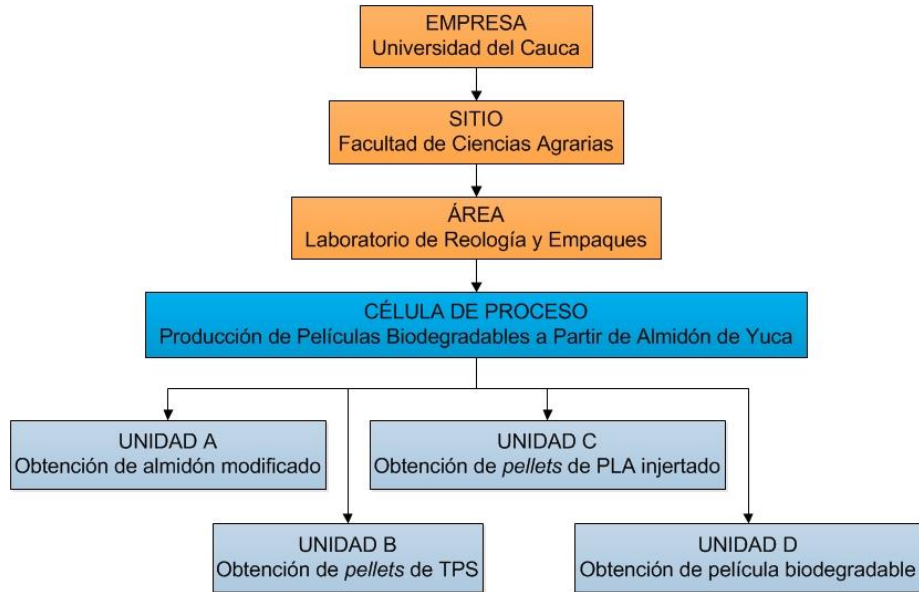
Finalmente, en la etapa de proceso obtención de película biodegradable se mezcla la unión binaria (*pellets* de TPS y de PLA injertado). Se debe limpiar en caliente el extrusor a utilizar, ya que es el mismo que se utiliza en la etapa de proceso inmediatamente anterior, por lo tanto está contaminado de PLA injertado. Después se inicia la extrusión de la mezcla binaria y el soplado de la fundición resultante para lograr la película biodegradable, la cual se almacena para estudios posteriores de caracterización.

2.3.2. Modelo físico

El modelo físico identifica y jerarquiza los componentes de la planta de producción. Es importante conocer los 4 niveles que conforman este modelo: “célula de proceso” (representa el agrupamiento general de todos los equipos que permiten la producción de uno o más lotes), “unidades” (conformadas por módulos de equipo y de control que llevan a cabo actividades principales en el proceso), “módulos de equipo” (grupo de actividades menores y específicas en el proceso) y “módulos de control” (por lo general es un dispositivo que funciona como una sola entidad, proporcionando una conexión directa en el proceso). Lo anterior se enfoca a nivel de la planta de producción, sin embargo, también existe una jerarquización más amplia en la que se aborda la ubicación del proceso y sus consideraciones de negocio, es decir, “empresa”, “sitio” y “área”. Estos tres ítems hacen referencia a niveles de alta gerencia, por lo que se mostrarán en el modelo físico del proceso en cuestión, pero no se detallarán en profundidad.

El modelo físico general de PROPEBIPAY (ver Figura 34) muestra su jerarquización así: a nivel de empresa está la Universidad del Cauca, ubicada en la ciudad de Popayán, Colombia; a nivel de sitio se encuentra la Facultad de Ciencias Agrarias de Universidad del Cauca, situada al norte de Popayán, y a nivel de área está el Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias. En cuanto a la planta de PROPEBIPAY, su célula de proceso se conforma jerárquicamente de 4 unidades: obtención de almidón modificado, obtención de *pellets* de TPS, obtención de *pellets* de PLA injertado y obtención de película biodegradable.

Figura 34. Modelo físico de PROPEBIPAY.

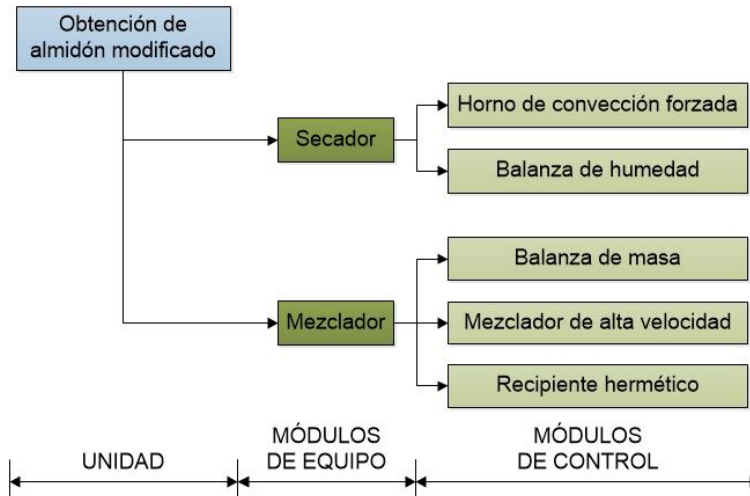


Fuente: El autor, abril de 2015.

Al interiorizar en cada unidad, se obtiene la información detallada de los activos físicos que componen todo el proceso. En resumen, la descripción física de la célula de proceso de PROPEBIPAY muestra que en total existen 4 unidades, 10 módulos de equipo y 31 módulos de control (ver Figura 35, 36, 37 y 38).

En primera instancia, el modelo físico de la unidad de obtención de almidón modificado (ver Figura 35) muestra que el módulo de equipo secador se conforma de 2 módulos de control: horno de convección forzada y balanza de humedad. En cuanto al módulo de equipo mezclador, está ligado a 3 módulos de control: balanza de masa, mezclador de alta velocidad y recipiente hermético.

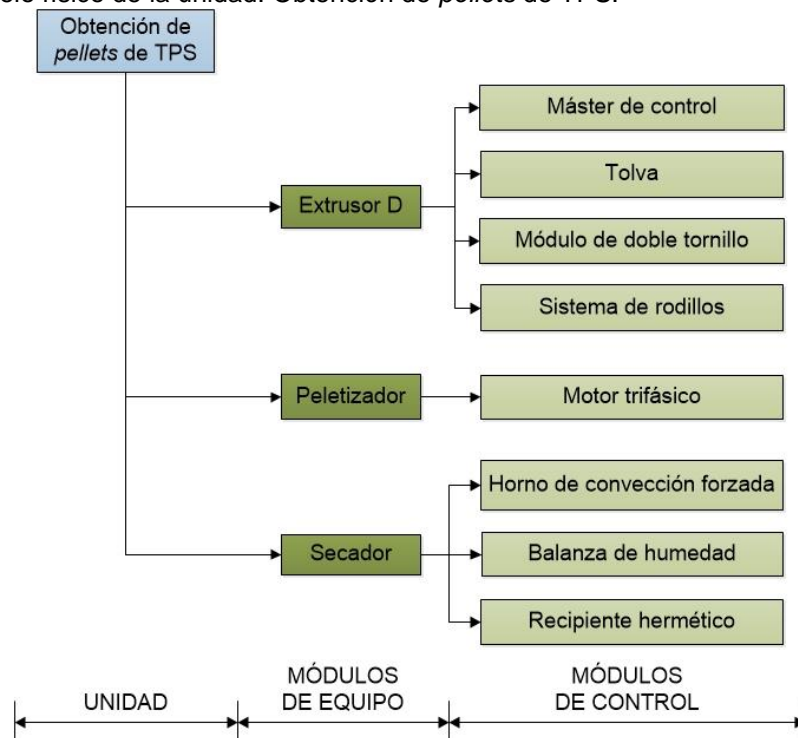
Figura 35. Modelo físico de la unidad: Obtención de almidón modificado.



Fuente: El autor, abril de 2015.

En cuanto a la unidad de obtención de *pellets* de TPS, su modelo físico (ver Figura 36) ilustra que el módulo de equipo extrusor D tiene 4 módulos de control: máster de control, tolva, módulo de doble tornillo y sistema de rodillos. Respecto al módulo de equipo peletizador, solo tiene un motor trifásico como módulo de control. Y el módulo de equipo secador se gobierna por 3 módulos de control: horno de convección forzada, balanza de humedad y recipiente hermético.

Figura 36. Modelo físico de la unidad: Obtención de *pellets* de TPS.

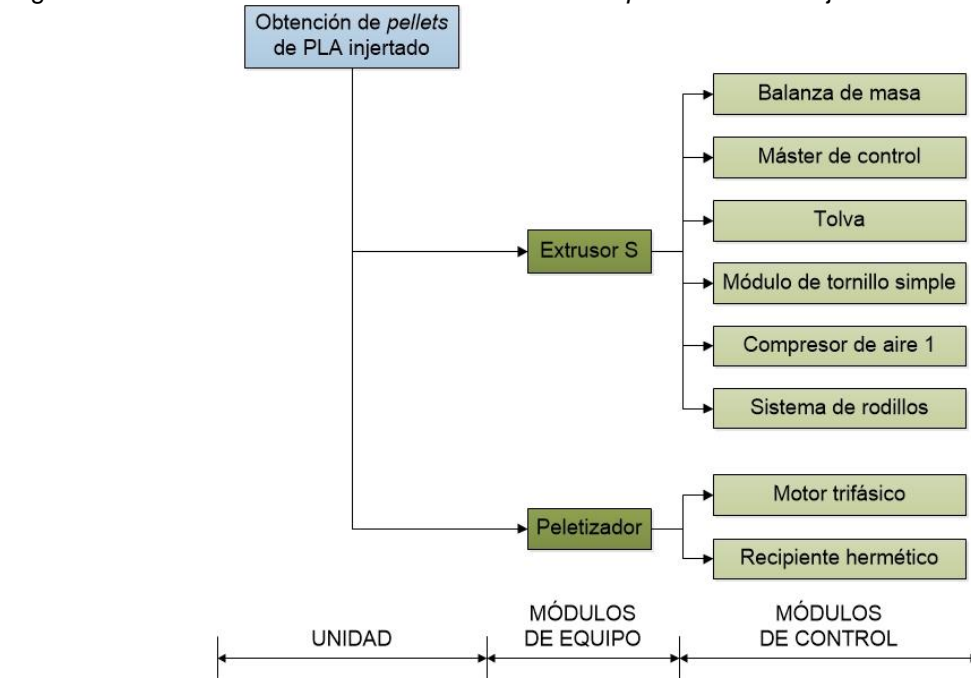


Fuente: El autor, abril de 2015.

El modelo físico de la unidad de obtención de *pellets* de PLA injertado (ver Figura 37) muestra que el módulo de equipo extrusor S posee 6 módulos de control: balanza de masa, máster de control, tolva, módulo de tornillo simple, compresor de aire 1 y sistema de rodillos. Además, el módulo equipo peletizador se relaciona con 2 módulos de control: motor trifásico y recipiente hermético.

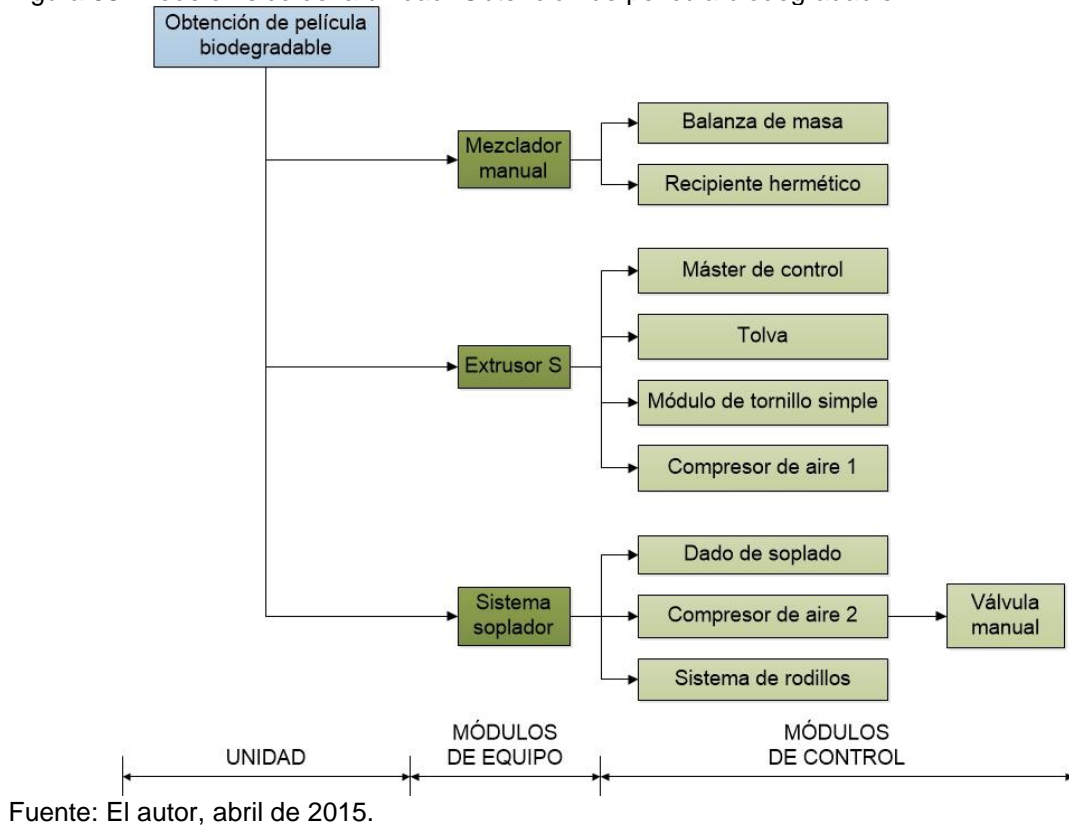
Finalmente, el modelo físico de la unidad de obtención de película biodegradable (ver Figura 38), ilustra que el módulo de equipo mezclador manual se conforma de 2 módulos de control: balanza de masa y recipiente hermético. Mientras que el módulo de equipo extrusor S posee 4 módulos de control: máster de control, tolva, módulo de tornillo simple y compresor de aire 1. Para el módulo de equipo sistema soplador, se tienen 4 módulos de control: dado de soplado, válvula manual, compresor de aire 2 y sistema de rodillos.

Figura 37. Modelo físico de la unidad: Obtención de *pellets* de PLA injertado.



Fuente: El autor, abril de 2015.

Figura 38. Modelo físico de la unidad: Obtención de película biodegradable.



Fuente: El autor, abril de 2015.

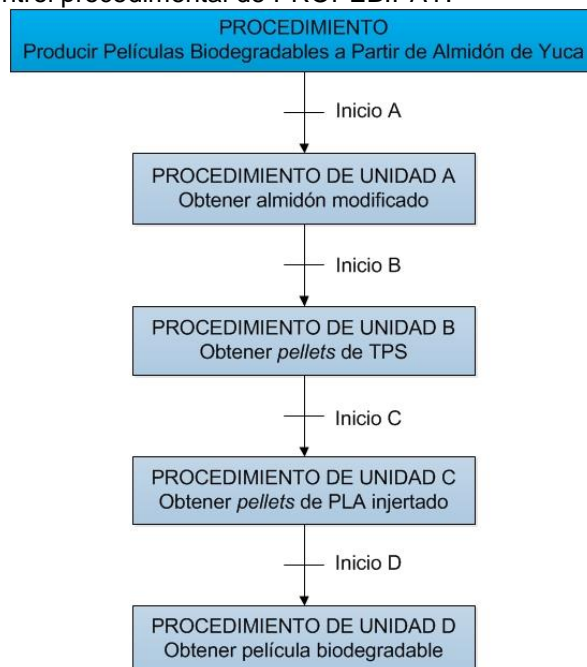
2.3.3. Modelo de control procedimental

El modelo de control procedimental identifica y jerarquiza las tareas de producción de manera secuencial y organizada. Las órdenes que se emiten en este modelo se relacionan directamente con los equipos, produciéndose un proceso determinado. Los niveles que componen este modelo son: “procedimiento” (nivel más elevado que agrupa todas las acciones necesarias para realizar un lote), “procedimientos de unidad” (conjunto de operaciones que se ejecutan dentro de una unidad, donde solo una operación puede estar activa al tiempo, sin embargo múltiples operaciones pueden ejecutarse concurrentemente, pero cada una en su unidad correspondiente), “operaciones” (conjunto de órdenes menores que generalmente causan cambios físicos o químicos en el material procesado) y “fases” (tareas menores que realizan una o más acciones orientadas al proceso, además pueden subdividirse en otras ordenes aún menores).

Para la representación esquemática de las fases que conforman cada operación, el estándar ISA 88.01 propone el documento normalizado IEC 848 [40]. La IEC 848 homologa el Gráfico Funcional de Control de Etapa – Transición (GRAFCET por sus siglas en francés) que permite la descripción gráfica de una secuencia de control [41]. En ese sentido, para el modelo de control procedimental, las etapas iniciales serían las operaciones, las etapas siguientes serían las fases y las transiciones serían las especificaciones de transición de cada etapa.

El modelo de control procedimental general de PROPEBIPAY (ver Figura 39) muestra que a nivel de procedimiento se encuentra PROPEBIPAY, el cual se conforma de 4 procedimientos de unidad: obtener almidón modificado, obtener *pellets* de TPS, obtener *pellets* de PLA injertado y obtener película biodegradable.

Figura 39. Modelo de control procedimental de PROPEBIPAY.

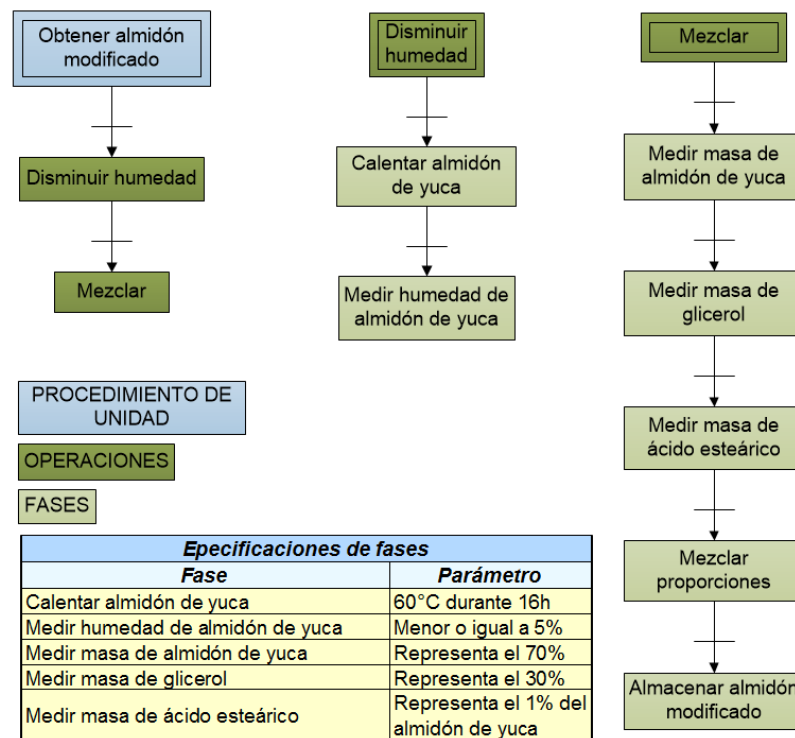


Fuente: El autor, abril de 2015.

Al profundizar en cada procedimiento de unidad, se obtiene la información detallada de la secuencia de control que se realiza a lo largo de todo el proceso. En resumen, el procedimiento PROPEBIPAY tiene un total de 4 procedimientos de unidad, 10 operaciones y 33 fases (ver Figura 40, 41, 42 y 43).

En primera instancia, el modelo de control procedimental del procedimiento de unidad para obtener almidón modificado (ver Figura 40) muestra que primero se ejecuta la operación de disminuir humedad, la cual se conforma de 2 fases: calentar almidón de yuca (a 60 °C durante 16 horas) y medir humedad de almidón de yuca (debe ser menor o igual a 5 %). Una vez finalizada la disminución de humedad, comienza la operación de mezclar, la cual contiene 5 fases: medir masa de almidón de yuca (debe representar el 70 % del total a producir), medir masa de glicerol (debe representar el 30 % del total a producir), medir masa de ácido esteárico (debe representar el 1 % de la masa del almidón), mezclar proporciones y almacenar almidón modificado.

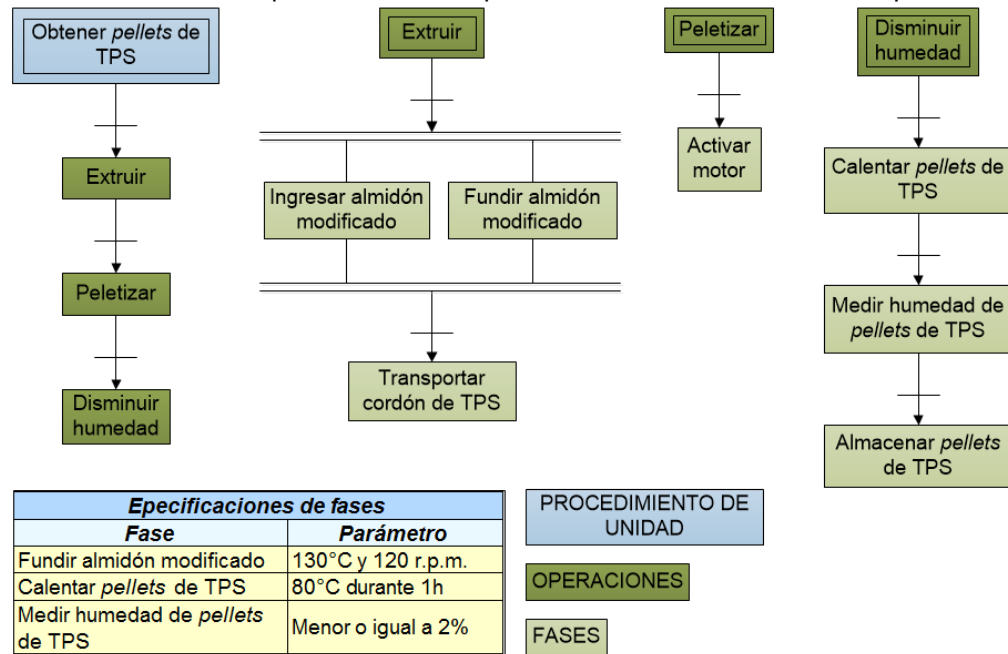
Figura 40. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener almidón modificado.



Fuente: El autor, abril de 2015.

En cuanto al modelo de control procedimental del procedimiento de unidad para obtener *pellets* de TPS (ver Figura 41), en primera instancia se realiza la operación extruir, conformada por 3 fases: ingresar almidón modificado, fundir almidón modificado (a 130 °C y 120 min⁻¹) y transportar cordón de TPS. En una segunda iteración comienza la operación peletizar que solo tiene la fase de activar motor. Finalmente, se da inicio a la operación disminuir humedad que contiene 3 fases: calentar *pellets* de TPS (a 80 °C durante 1 hora), medir humedad de *pellets* de TPS (debe ser menor o igual a 2 %) y almacenar *pellets* de TPS.

Figura 41. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener *pellets* de TPS.

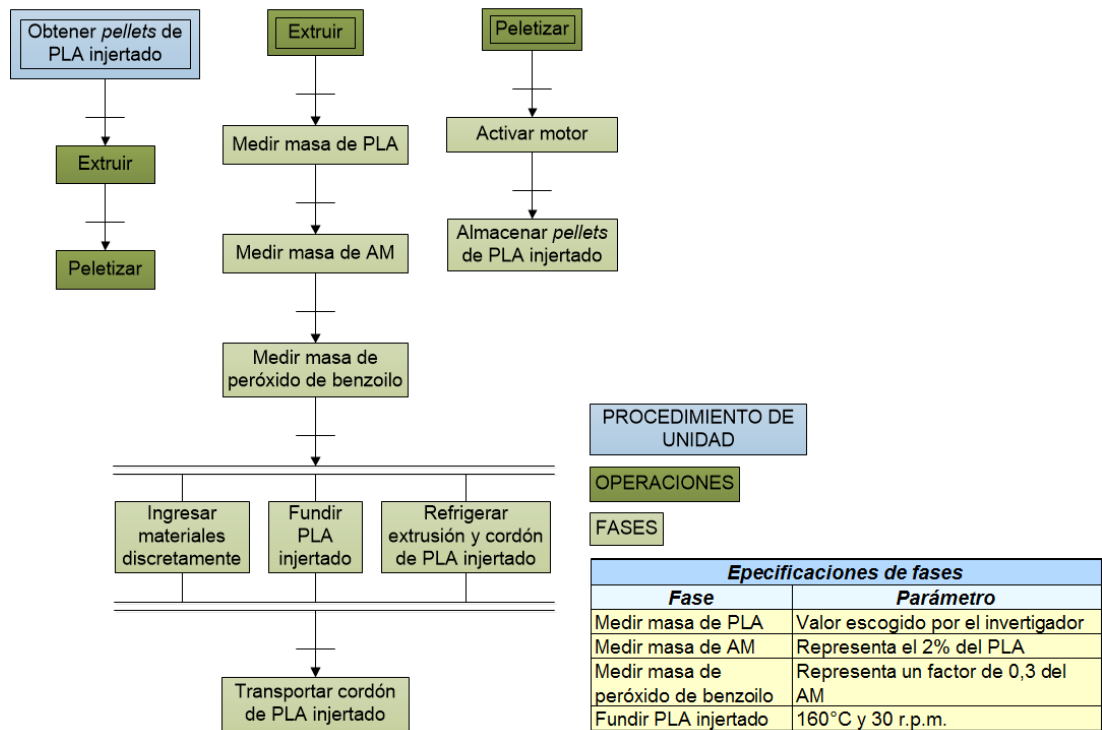


Fuente: El autor, abril de 2015.

El modelo de control procedimental del procedimiento de unidad para obtener *pellets* de PLA injertado (ver Figura 42) muestra que la primera operación de extruir tiene 7 fases: medir masa de PLA (este valor lo escoge el investigador), medir masa de AM (debe representar el 2 % de la masa del PLA), medir masa de peróxido de benzoilo (debe representar un factor de 0,3 respecto al AM), ingresar materiales de manera discreta, fundir PLA injertado (a 160 °C y 30 min⁻¹), refrigerar extrusión y cordón de PLA injertado, y transportar cordón de PLA injertado. Cuando termina dicha extrusión, se da inicio a la operación peletizar que posee 2 fases: activar motor y almacenar *pellets* de PLA injertado.

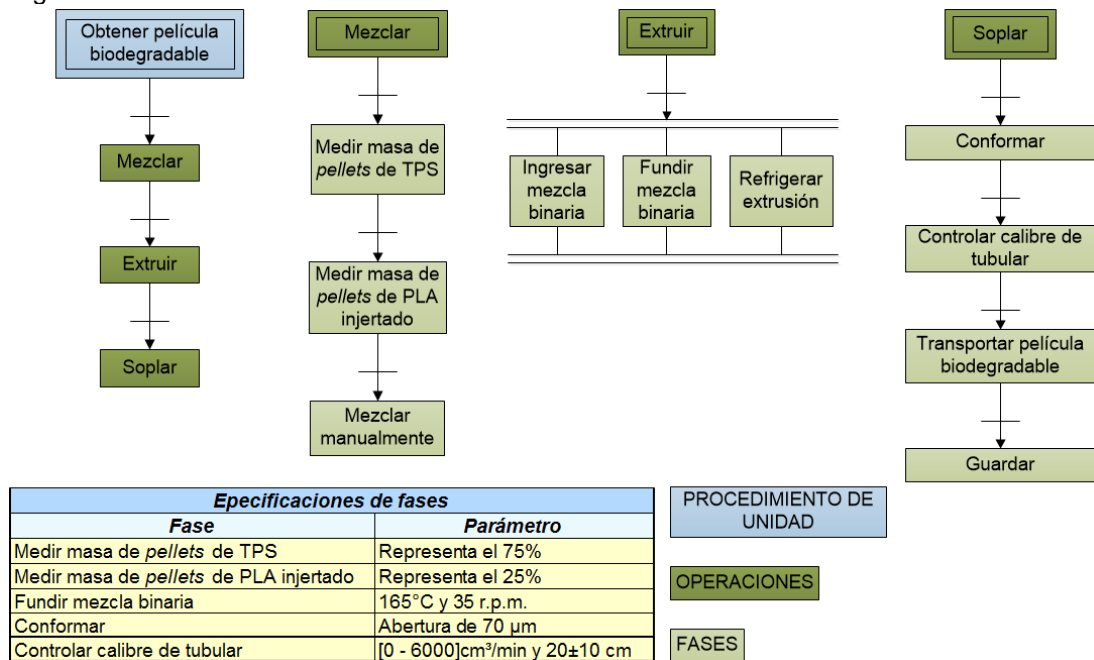
Finalmente, el modelo de control procedimental del procedimiento de unidad para obtener película biodegradable (ver Figura 43) ilustra que en primera instancia se realiza la operación mezclar, la cual se conforma de 3 fases: medir masa de *pellets* de TPS (debe representar el 75 % del total a producir), medir masa de *pellets* de PLA injertado (debe representar el 25 % del total a producir) y mezclar manualmente. El segundo paso es ejecutar la operación extruir que tiene 3 fases: ingresar mezcla binaria, fundir mezcla binaria (a 165 °C y 35 min⁻¹) y refrigerar extrusión. La última iteración realizada es la operación soplar, constituida por 4 fases: conformar (con una abertura del dado de soplado de 70 μm), controlar calibre de tubular (de 0 a 6.000 cm³/min y 20±10 cm), transportar película biodegradable y guardar.

Figura 42. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener *pellets* de PLA injertado.



Fuente: El autor, abril de 2015.

Figura 43. Modelo de control procedimental de procedimiento de unidad: Obtener película biodegradable.



Fuente: El autor, abril de 2015.

2.3.4. Relación entre los modelos ISA S88.01

Existe una relación general entre el modelo de control procedimental, modelo físico y modelo de proceso. La lógica de dicha relación determina que las tareas emitidas en el modelo de control procedimental se ejecutan sobre los equipos detallados en el modelo físico, proporcionando las funciones de proceso que conforman el modelo de proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron las convenciones necesarias para relacionar los 3 modelos, esto en cuanto a los colores de cada uno de los ítems detallados en los modelos. Por ejemplo, para el modelo de control procedimental se tiene azul, azul claro, verde y verde claro, representando el procedimiento, procedimiento de unidad, operación y fase, respectivamente (ver Tabla 5).

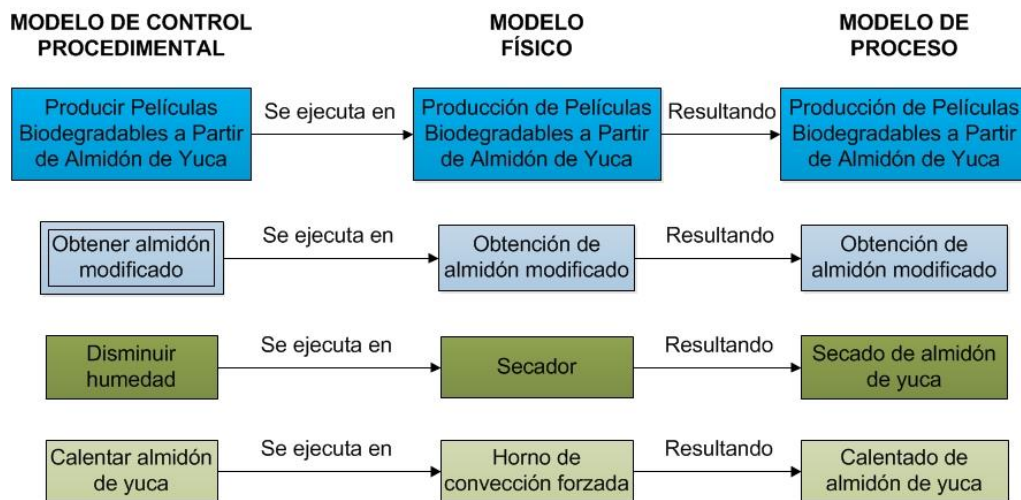
Tabla 5. Convenciones para relacionar los ítems de los modelos ISA S88.01.

Modelo de control procedimental	Modelo físico	Modelo de proceso	Color
Procedimiento	Célula de proceso	Proceso	
Procedimiento de unidad	Unidad	Etapa de proceso	
Operación	Módulo de equipo	Operación de proceso	
Fase	Módulo de control	Acción de proceso	

Fuente: El autor, mayo de 2015.

Para entender mejor la relación entre los tres modelos y sus convenciones de colores, se presenta un ejemplo respecto al proceso PROPEBIPAY (ver Figura 44), donde la operación “disminuir humedad” se ejecuta en el módulo de equipo “secador”, resultando la operación de proceso “secado de almidón de yuca”, y la fase “calentar almidón de yuca” se realiza en el módulo de control “horno de convección forzada”, causando la acción de proceso “calentado de almidón de yuca”. La relación del ejemplo anterior funciona de manera igual para los demás ítems de los 3 modelos, los cuales corresponden adecuadamente entre sí según la convención de colores y su relación.

Figura 44. Ejemplo de la relación entre los tres modelos ISA S88.01 del calentado de almidón de yuca.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

2.4. Diagnóstico del proceso PROPEBIPAY

En el diagnóstico del proceso PROPEBIPAY se determina el nivel de dificultad general, por fases y operaciones de acuerdo a la valoración propia de los investigadores, se establece el nivel de automatización general conforme a la ejecución de cada una de las fases, se analizan cada uno de los modelos ISA S88.01 y se muestran aspectos de ámbito general relacionados con las necesidades del proceso.

2.4.1. Nivel de dificultad en la realización del proceso

El grado de dificultad de PROPEBIPAY se estableció cualitativamente de acuerdo a una entrevista realizada a los investigadores del grupo CYTBIA encargados del paquete tecnológico del proceso en cuestión. Las respuestas se organizaron cuantitativamente para determinar la dificultad resultante de cada una de las operaciones respecto al proceso general.

La entrevista se realizó a una población de 4 ingenieros investigadores, quienes tienen experiencia y conocimiento global del proceso, formulando la pregunta “¿Qué tan difícil es llevar a cabo las siguientes fases?” enfocada a 32 fases. En cuanto a las respuestas, se formaron 3 ítems: “bajo”, “medio” y “alto”; además de un espacio para anotaciones capturadas de las respuestas de los encuestados. Se recogieron 87 respuestas para nivel bajo, 26 para medio y 15 para alto; así mismo se consignaron 3 anotaciones importantes de las respuestas dadas (ver Tabla 6).

Tabla 6. Respuestas de dificultad en realización de las fases de PROPEBIPAY.

Procedimiento de unidad	Fase	Respuesta			Anotación
		Bajo	Medio	Alto	
Obtener almidón modificado	Calentar almidón de yuca	4			
	Medir humedad de almidón de yuca	4			
	Medir masa de almidón de yuca	3	1		
	Medir masa de glicerol	3	1		
	Medir masa de ácido esteárico	3	1		
	Mezclar proporciones	4			
	Almacenar almidón modificado	4			
Obtener <i>pellets</i> de TPS	Ingresar almidón modificado	4			
	Fundir almidón modificado	2	1	1	Fácil porque ya se ha logrado un perfil de parámetros para la extrusión.
	Transportar cordón de TPS	2	2		
	Activar motor	3	1		
	Calentar <i>pellets</i> de TPS	4			
	Medir humedad de <i>pellets</i> de TPS	4			

	Almacenar <i>pellets</i> de TPS	4			
Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado	Medir masa de PLA	4			
	Medir masa de AM	3	1		
	Medir masa de peróxido de benzoilo	2	2		
	Ingresar materiales discretamente		1	3	
	Fundir PLA injertado	1	2	1	Fácil porque además de tener un perfil de parámetros, al trabajar con PLA se cuenta con una ficha técnica que hace el proceso más estándar.
	Refrigerar cordón de PLA injertado	1	2	1	
	Transportar cordón de PLA injertado		3	1	
	Activar motor	3	1		
	Almacenar <i>pellets</i> de PLA injertado	4			
Obtener película biodegradable	Medir masa de <i>pellets</i> de TPS	4			
	Medir masa de <i>pellets</i> de PLA injertado	4			
	Mezclar manualmente	4			Entre más parecido sea el tamaño de los gránulos entre sí, mejor será su homogeneización.
	Ingresar mezcla binaria	3	1		
	Fundir mezcla binaria		3	1	
	Conformar		1	3	
	Controlar calibre de tubular		1	3	
	Transportar película biodegradable	2	1	1	
Guardar	4				

Fuente: El autor, mayo de 2015.

2.4.1.1. Análisis de resultados de las encuesta para determinar dificultad de las fases y operaciones

A pesar de realizar la encuesta a 4 investigadores diferentes, se logró obtener una convergencia hacia la dificultad que implica la realización de cada una de las fases conformantes del proceso PROPEBIPAY (ver Tabla 7), mediante ponderación de las respuestas dadas. En otras palabras, se obtuvo una única respuesta al promediar los pesos asignados a cada contestación: 1 para “bajo”, 3 para “medio” y 5 para “alto”, razonando lógicamente el valor promedio para determinar su dificultad en palabras.

Tabla 7. Nivel de dificultad en realización de las fases de PROPEBIPAY.

Procedimiento de unidad	Fase	Dificultad
Obtener almidón modificado	Calentar almidón de yuca	Bajo
	Medir humedad de almidón de yuca	Bajo
	Medir masa de almidón de yuca	Bajo
	Medir masa de glicerol	Bajo
	Medir masa de ácido esteárico	Bajo
	Mezclar proporciones	Bajo
	Almacenar almidón modificado	Bajo
Obtener <i>pellets</i> de TPS	Ingresar almidón modificado	Bajo
	Fundir almidón modificado	Medio
	Transportar cordón de TPS	Bajo
	Activar motor	Bajo
	Calentar <i>pellets</i> de TPS	Bajo
	Medir humedad de <i>pellets</i> de TPS	Bajo
	Almacenar <i>pellets</i> de TPS	Bajo
Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado	Medir masa de PLA	Bajo
	Medir masa de AM	Bajo
	Medir masa de peróxido de benzoilo	Bajo
	Ingresar materiales discretamente	Alto
	Fundir PLA injertado	Medio
	Refrigerar cordón de PLA injertado	Medio
	Transportar cordón de PLA injertado	Medio
	Activar motor	Bajo
	Almacenar <i>pellets</i> de PLA injertado	Bajo
Obtener película biodegradable	Medir masa de <i>pellets</i> de TPS	Bajo
	Medir masa de <i>pellets</i> de PLA injertado	Bajo
	Mezclar manualmente	Bajo
	Ingresar mezcla binaria	Bajo
	Fundir mezcla binaria	Medio
	Conformar	Alto
	Controlar calibre de tubular	Alto
	Transportar película biodegradable	Medio
	Guardar	Bajo

Fuente: El autor, mayo de 2015.

Para la fase “fundir almidón modificado” se tiene una dificultad media y se recogió la anotación que explica que debido a que se cuenta un perfil de parámetros para la extrusión, el nivel de dificultad no es complicado. Esto gracias a estudios previos de los investigadores para obtener dichos parámetros de extrusión.

En cuanto a la fase “fundir PLA injertado” de dificultad media, además de contar con un perfil de parámetros obtenido por estudios previos, se tiene una ficha técnica relacionada al PLA que permite tener una guía en cuanto a posibles parámetros a utilizar en la extrusión, haciendo el proceso más estándar.

Para la fase “mezclar manualmente” se tuvo una dificultad baja y se recogió la consideración de que en cuanto más parecidos sean los *pellets* de TPS y de PLA injertado, más homogénea será la mezcla entre sí.

En términos globales, el nivel de dificultad por fases se distribuyó así: 23 para bajo, 6 para medio y 3 para alto (ver Tabla 7). Además, al organizar las 32 fases en las 10 operaciones conformantes de todo el proceso PROPEBIPAY y ponderar de nuevo las respuestas, resultaron 8 con nivel de dificultad bajo, 1 medio y 1 alto (ver Tabla 8).

Tabla 8. Nivel de dificultad en realización de las operaciones de PROPEBIPAY.

Procedimiento de unidad	Fase	Operación	Dificultad
Obtener almidón modificado	Calentar almidón modificado	Disminuir humedad	Bajo
	Medir humedad de almidón de yuca		
	Medir masa de almidón de yuca	Mezclar	Bajo
	Medir masa de glicerol		
	Medir masa de ácido esteárico		
	Mezclar proporciones		
	Almacenar almidón modificado		
Obtener <i>pellets</i> de TPS	Ingresar almidón modificado	Extruir	Bajo
	Fundir almidón modificado		
	Transportar cordón de TPS		
	Activar motor	Peletizar	Bajo
	Calentar <i>pellets</i> de TPS	Disminuir humedad	Bajo
	Medir humedad de <i>pellets</i> de TPS		
	Almacenar <i>pellets</i> de TPS		
Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado	Medir masa de PLA	Extruir	Medio
	Medir masa de AM		
	Medir masa de peróxido de benzoilo		
	Ingresar materiales discretamente		
	Fundir PLA injertado		
	Refrigerar cordón de PLA injertado		
	Transportar cordón de PLA injertado		
	Activar motor	Peletizar	Bajo
	Almacenar <i>pellets</i> de PLA injertado		
Obtener película biodegradable	Medir masa de <i>pellets</i> de TPS	Mezclar	Bajo
	Medir masa de <i>pellets</i> de PLA injertado		
	Mezclar manualmente		
	Ingresar mezcla binaria	Extruir	Bajo
	Fundir mezcla binaria		
	Conformar	Soplar	Alto
	Controlar calibre de tubular		
	Transportar película biodegradable		
Guardar			

Fuente: El autor, mayo de 2015.

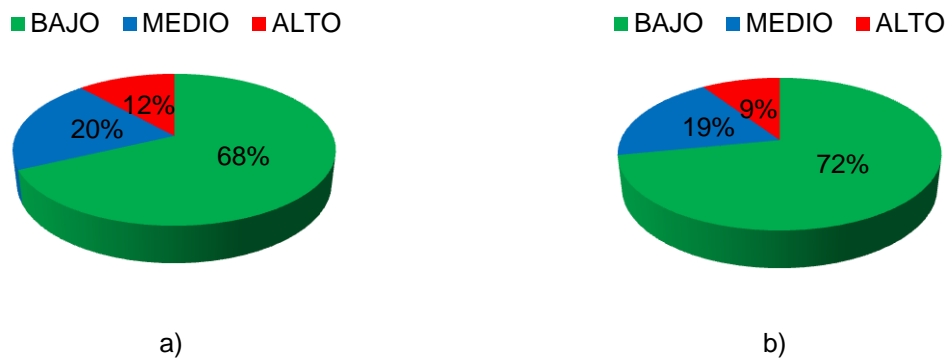
Finalmente, las operaciones “extruir”, en el procedimiento de unidad para obtener *pellets* de PLA injertado, y “soplar”, en el procedimiento de unidad para obtener película biodegradable, calificadas con una dificultad media y alta, respectivamente, coincidieron con las 3 únicas fases de dificultad alta: “ingresar materiales discretamente”, “conformar” y “controlar calibre de tubular”.

2.4.1.2. Desarrollo estadístico del nivel de dificultad

Mediante el estudio estadístico se presenta un reflejo más claro de la dificultad en la realización de PROPEBIPAY. En ese sentido, se obtuvo que alrededor del 70 % del proceso tiene un nivel de dificultad bajo, cerca del 20 % es medio y un 10 % es alto (ver Figura 45).

Figura 45. Porcentaje del nivel de dificultad general de PROPEBIPAY respecto a sus fases.

a) Con datos de todas las respuestas aportadas por los investigadores. b) Con datos de la dificultad obtenida en cada fase.

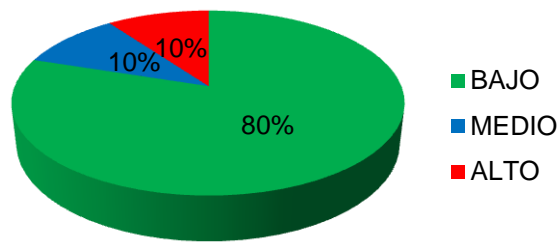


Fuente: El autor, mayo de 2015.

El nivel de dificultad general del proceso PROPEBIPAY en términos estadísticos se obtuvo al hacer la comparación entre: datos porcentuales de 128 respuestas aportadas por 4 investigadores encuestados y la dificultad obtenida de cada una de las 32 fases después del análisis de resultados. En otras palabras, se calculó el porcentaje de 87 respuestas de dificultad bajo, 26 de medio y 15 de alto (ver Figura 45a), y por otro lado se halló el porcentaje de 23 fases con dificultad bajo, 6 de medio y 3 de alto (ver Figura 45b).

Respecto a las operaciones, cada una se conforma de fases con diferentes niveles de dificultad, sin embargo se notará una convergencia de mayor número de operaciones de fácil realización. Los valores porcentuales de las operaciones fueron: 80 % bajo, 10 % medio y 10 % alto (ver Figura 46). Las operaciones de dificultad media y alta con el 10 % cada una, se ubican en los procedimientos de unidad para obtener *pellets* de PLA injertado y obtener película biodegradable, respectivamente. En ese sentido, existe un peso porcentual del 20 % distribuido en dichos procedimientos de unidad.

Figura 46. Porcentaje del nivel de dificultad de las operaciones de PROPEBIPAY.



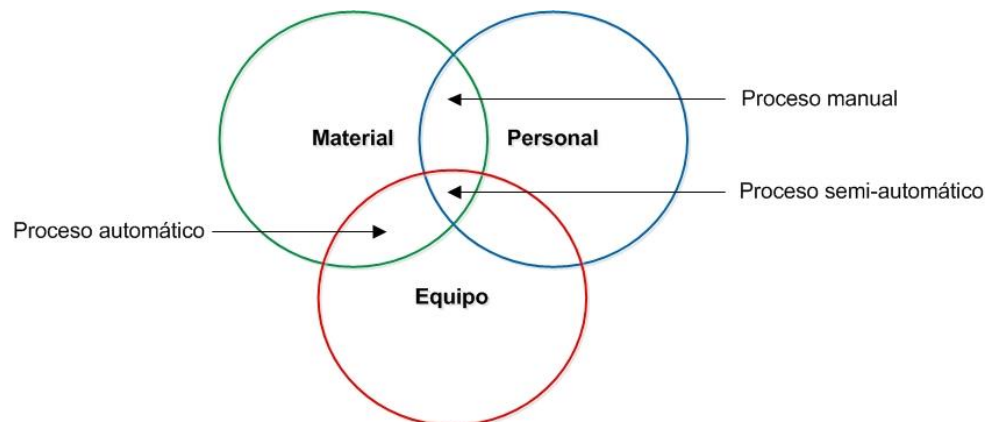
Fuente: El autor, mayo de 2015.

2.4.2. Nivel de automatización

Para entender el criterio de evaluación que determina el nivel de automatización de un proceso, es importante considerar algunos conceptos de automatización. Entre varias definiciones del término “automatización”, se tiene en cuenta la mencionada en el Diccionario Inglés de Oxford que la expresa como el control automático de la fabricación de un producto (proceso de manufactura), mediante la implementación de dispositivos electrónicos o mecánicos, aliviando la labor humana. En ese sentido, el nivel de automatización se enfoca en la manera en que se comparten las tareas entre humanos y máquinas, dividiéndose en: nivel manual (el humano ejecuta todo, considerando o no las sugerencias de la máquina), semi-automático (el humano selecciona las tareas y da órdenes para que la máquina ejecute) y automático (el humano es “ignorado” y la máquina selecciona tareas y ejecuta ordenes de manera autónoma) [42].

Una mejor manera de entender y determinar el nivel de automatización, es mediante la relación entre capacidad de material, personal y equipo que se muestra en el estándar ISA 95 parte I [43], ya que según su interacción se tendría un segmento de proceso manual con material y personal, semi-automático con material, personal y equipo, y automático con material y equipo (ver Figura 47).

Figura 47. Nivel de automatización mediante la relación entre materiales, personas y equipos.



Fuente: Modificada de [43], mayo de 2015.

Con la consideración de la información anterior, se evaluaron las 32 fases del proceso PROPEBIPAY, resultando 9 fase manuales, 23 semi-automáticas y ninguna automática (ver Tabla 9).

Tabla 9. Nivel de automanitación de las fases de PROPEBIPAY.

Procedimiento de unidad	Fase	Nivel de automatización
Obtener almidón modificado	Calentar almidón de yuca	Semi-automático
	Medir humedad de almidón de yuca	Semi-automático
	Medir masa de almidón de yuca	Semi-automático
	Medir masa de glicerol	Semi-automático
	Medir masa de ácido esteárico	Semi-automático
	Mezclar proporciones	Semi-automático
	Almacenar almidón modificado	Manual
Obtener <i>pellets</i> de TPS	Ingresar almidón modificado	Manual
	Fundir almidón modificado	Semi-automático
	Transportar cordón de TPS	Semi-automático
	Activar motor	Semi-automático
	Calentar <i>pellets</i> de TPS	Semi-automático
	Medir humedad de <i>pellets</i> de TPS	Semi-automático
	Almacenar <i>pellets</i> de TPS	Manual
Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado	Medir masa de PLA	Semi-automático
	Medir masa de AM	Semi-automático
	Medir masa de peróxido de benzoilo	Semi-automático
	Ingresar materiales discretamente	Manual
	Fundir PLA injertado	Semi-automático
	Refrigerar cordón de PLA injertado	Semi-automático
	Transportar cordón de PLA injertado	Semi-automático
	Activar motor	Semi-automático
	Almacenar <i>pellets</i> de PLA injertado	Manual
Obtener película biodegradable	Medir masa de <i>pellets</i> de TPS	Semi-automático
	Medir masa de <i>pellets</i> de PLA injertado	Semi-automático
	Mezclar manualmente	Manual
	Ingresar mezcla binaria	Manual
	Fundir mezcla binaria	Semi-automático
	Conformar	Semi-automático
	Controlar calibre de tubular	Manual
	Transportar película biodegradable	Semi-automático
	Guardar	Manual

Fuente: El autor, mayo de 2015.

Por otro lado, es posible ubicar un proceso en la pirámide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) según su nivel de automatización. Desde una visión completa, la pirámide CIM se jerarquiza en 5 niveles respecto a las actividades realizadas en cada uno: 0 define el proceso físico real (instrumentación), 1 realiza medición y manipulación del proceso físico (control en campo), 2 involucra el monitoreo, supervisión y control del proceso físico

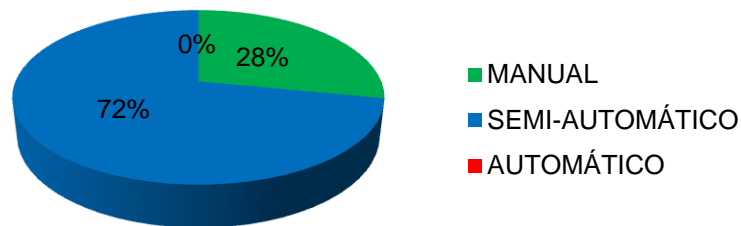
(supervisión de la célula), 3 especifica el flujo de trabajo para generar los productos deseados (planta), y 4 ejecuta actividades de negocio necesarias para la administración de la manufactura de toda la organización (factoría) [44], [45].

Según el conocimiento anterior, PROPEBIPAY se ubica en el nivel 1 respecto a su automatización, ya que realiza tareas de medición y manipulación del proceso físico real.

2.4.2.1. Desarrollo estadístico del nivel de automatización

La información estadística procesada con la cantidad de fases manuales, semi-automáticas y automáticas, muestra que PROPEBIPAY tiene un nivel de automatización manual del 28 %, semi-automático del 72 % y no se tiene alguna fase completamente automática (ver Figura 48).

Figura 48. Porcentaje del nivel de automatización general de PROPEBIPAY respecto a sus fases.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

2.4.3. Análisis de los modelos ISA S88.01

PROPEBIPAY se realiza a nivel de laboratorio, su ejecución completa para un lote de 1.000 g de almidón de yuca tarda entre 7 y 8 horas y es realizado por el grupo de investigación CYTBIA en el Laboratorio de Reología y Empaques de la Universidad del Cauca. Previamente se construyeron los modelos de proceso, físico y de control procedimental de ISA S88.01 (ver secciones 2.3.1, 2.3.2 y 2.3.3), de los cuales se puede realizar un estudio general que muestra sus características principales.

2.4.3.1. Análisis general del modelo de proceso

El proceso de PROPEBIPAY es tipo *batch* porque en cada una de sus 4 etapas de proceso se tratan cantidades de materiales finitas, sometiéndolas a tareas ordenadas de procesamiento y usando uno o varios equipos durante un tiempo definido [38].

Como operaciones de proceso, existen actividades de precalentamiento y limpieza de equipos (extrusores). La limpieza del extrusor entre etapas se debe a que solo se cuenta con el perfil de parámetros para la extrusión del almidón modificado en el módulo de doble tornillo, por lo tanto las otras 2 extrusiones deben realizarse en el módulo de tornillo simple. También se considera que posterior a la obtención de la película biodegradable, los investigadores la predisponen para un estudio futuro de caracterización.

Finalmente, como se infiere de la información sobre el nivel de dificultad en la realización del proceso, se consideraría que el 70 % de los operarios requieren un nivel bajo de experiencia en el proceso, el 20 % deben conocer aspectos importantes y el 10 % necesitan ser expertos en el proceso.

2.4.3.2. Análisis general del modelo físico

La planta de PROPEBIPAY requiere de 28 módulos de control, los cuales se resumen en 14 equipos y elementos usados para ejecutar las tareas de proceso.

A pesar que los investigadores ejecutan el proceso a nivel de laboratorio, existen equipos adecuados para la realización de cada fase, esto se refleja en que el 72 % del proceso es semi-automático. Además, éste se ubica en el nivel 1 de automatización debido a que existen actividades de medición y manipulación de algunas fases en el proceso.

2.4.3.3. Análisis general del modelo de control procedimental

La ejecución de PROPEBIPAY se conforma por 33 fases que representan cada una de las actividades que deben realizarse para fabricar la película biodegradable.

Existe un 28 % del proceso que se lleva a cabo manualmente, ya que hay fases tan simples como almacenar los materiales (ejecutadas sin inconvenientes), y tan complejas como ingresar materiales discretamente en la obtención de *pellets* de PLA injertado y controlar calibre de tubular en la obtención de película biodegradable (requieren experiencia elevada porque tiene alto nivel de dificultad).

2.4.4. Aspectos de ámbito general relacionados con las necesidades del proceso

Después de realizar un diagnóstico general al proceso PROPEBIPAY, se obtuvieron necesidades de documentación, automatización y mantenimiento preventivo del proceso. Además del sondeo realizado, se establecieron encuestas para determinar las necesidades mencionadas.

2.4.4.1. Documentación

Para completar la información obtenida en las visitas presenciales al Laboratorio de Reología y Empaques de la Universidad del Cauca, se realizó una encuesta a cada uno de los 4 principales ingenieros investigadores del proceso (ver Tabla 10).

Tabla 10. Respuestas sobre documentación de PROPEBIPAY.

Pregunta	Respuesta			Anotación
	SI	NO	En proceso	
¿Realiza un formato de seguimiento de parámetros?		4		Se realizan bitácoras.
¿Existe un formato para consignar anomalías en el proceso?	1	3		
¿Documenta formalmente la ejecución del proceso?	1	1	2	Hay un manual en revisión.
¿Documenta las órdenes de compra de	4			

materias primas?				
¿Existe un control documentado de las compras de materias primas?	4			

Fuente: El autor, mayo de 2015.

En la ejecución del proceso PROPEBIPAY por parte de los investigadores de CYTBIA, se detalla que el registro de los datos propios de la elaboración de cada una de las unidades se realiza en bitácoras. Sin embargo no se manejan formatos establecidos por consenso ya que cada investigador asume sus propias notas. En este punto, no se asegura la reproducción de los datos propios del proceso, por lo tanto surgen problemas de salidas de productos defectuosos, ya que se pretende la continuidad de la ejecución del proceso, sin contar con datos previos de otros operarios. También cabe mencionar que no existe un documento para anotar las anomalías que se presenten en la elaboración del proceso, con el fin de evitar su reproducción a futuro.

En cuanto a un documento formal con la información de la manera en la que se lleva a cabo el proceso, existe un manual [29] en proceso de revisión. Dicho manual no asegura una herencia completa de la información del proceso a los futuros investigadores, ya que se omite parte de la información, además no sigue un esquema estandarizado con modelos técnicos del proceso.

Respecto a las órdenes de compra y su registro de control, los ingenieros encargados realizan la documentación pertinente para tal fin.

2.4.4.2. Necesidad en la automatización de operaciones

A pesar que el proceso PROPEBIPAY cuenta con equipos adecuados para ejecutar las fases, teniendo un 72 % del proceso semi-automático, no existe ninguna fase u operación que se realice de manera automática. En ese sentido surge la necesidad manifestada por los investigadores de la automatización de gran parte de las fases. Lo anterior se refleja en una encuesta realizada a los 4 principales ingenieros investigadores del proceso, donde se preguntó: “De las siguientes fases ¿Cuáles considera que deberían ser automáticas?”, obteniéndose 103 respuestas afirmativas y 25 negativas (ver Tabla 11).

Tabla 11. Respuestas sobre necesidad de automatizar algunas fases de PROPEBIPAY.

Procedimiento de unidad	Fase	Respuesta		Justificación
		SI	NO	
Obtener almidón modificado	Calentar almidón de yuca	4		Estimación de los tiempos de secado.
	Medir humedad de almidón de yuca	3	1	
	Medir masa de almidón de yuca	4		Evitar errores por parte del operario.
	Medir masa de glicerol	4		
	Medir masa de ácido esteárico	4		
	Mezclar proporciones	4		
	Almacenar almidón modificado		4	
Obtener <i>pellets</i> de TPS	Ingresar almidón modificado	4		Lograr los mismos valores de flujo del material.
	Fundir almidón modificado	3	1	
	Transportar cordón de TPS	3	1	

	Activar motor	3	1	
	Calentar <i>pellets</i> de TPS	4		
	Medir humedad de <i>pellets</i> de TPS	4		
	Almacenar <i>pellets</i> de TPS		4	
Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado	Medir masa de PLA	4		
	Medir masa de AM	4		
	Medir masa de peróxido de benzoilo	4		
	Ingresar materiales discretamente	4		Es una fase crítica por las proporciones de los materiales a ingresar.
	Fundir PLA injertado	3	1	
	Refrigerar cordón de PLA injertado	3	1	
	Transportar cordón de PLA injertado	3	1	
	Activar motor	3	1	
	Almacenar <i>pellets</i> de PLA injertado		4	
Obtener película biodegradable	Medir masa de <i>pellets</i> de TPS	4		
	Medir masa de <i>pellets</i> de PLA injertado	4		
	Mezclar manualmente	3	1	
	Ingresar mezcla binaria	3	1	
	Fundir mezcla binaria	3	1	
	Conformar	4		
	Controlar calibre de tubular	4		
	Transportar película biodegradable	3	1	
	Guardar	3	1	

Fuente: El autor, mayo de 2015.

Del análisis de los resultados de la encuesta, se calculó que alrededor del 80 % del proceso debería ser automatizado, mientras que el 20 % restante no lo necesita. Además, se obtuvieron algunas anotaciones importantes de lo que se lograría con la automatización de algunas operaciones en concreto, por ejemplo: estimación de tiempo óptimo de secado, evitar errores de medida por ejecución del operario, obtener flujo de material constate en la extrusión, y tener un mejor desempeño y facilidad en el ingreso crítico del PLA injertado.

2.4.4.3. Mantenimiento de equipos

Con base al cuestionario realizado a los 4 investigadores, se encontró que se realiza mantenimiento del extrusor, específicamente del máster de control, módulo de tornillo simple y módulo de doble tornillo. Además, se realiza la calibración de la balanza de humedad y de masa (ver Tabla 12).

Tabla 12. Respuestas sobre mantenimiento de equipos de PROPEBIPAY.

Pregunta	Respuesta			Anotación
	SI	NO	En proceso	
¿Realiza mantenimiento de equipo(s)? (Si su respuesta es SI, especificar a qué equipos)	4			Del extrusor: máster de control, módulo de tornillo simple y de doble tornillo.
¿Realiza calibración de equipo(s) de medición? (Si su respuesta es SI, especificar a qué equipos)	4			Balanzas de humedad y de masa.
¿Cuenta con manual(es) de equipo(s)? (Si su respuesta es SI, especificar de qué equipos)	3	1		
¿Considera que tiene las herramientas adecuadas para la limpieza de los extrusores?	4			

Fuente: El autor, mayo de 2015.

A pesar de que se realiza el mantenimiento de algunos equipos, hay otros que interactúan directamente en el proceso y no tienen dicho fin, estos son: sistema de rodillo, peletizador, computador del máster de control, horno de convección forzada y compresores.

2.5. Requerimientos del proceso PROPEBIPAY

El proceso PROPEBIPAY se modeló y analizó previamente, surgiendo requerimientos generales, de automatización, de hardware y de software.

Se debe tener en cuenta que los requerimientos que se listarán posteriormente, corresponden a la situación y ejecución actual del proceso a nivel de laboratorio. Más adelante, en el presente trabajo de grado se propondrán nuevos requerimientos enfocados al escalamiento industrial que se pretende con el proceso PROPEBIPAY.

2.5.1. Requerimientos generales

A lo largo del análisis de todo el proceso surgieron aspectos de ámbito general que podrían tenerse en cuenta para llegar a mejores resultados en la realización del proceso. Estos requerimientos generales (RG) se basan en los problemas más significativos que tiene el proceso y se citan a continuación:

- **RG1.** Establecer un formato por consenso para apuntes del seguimiento de parámetros y anomalías durante la ejecución del proceso.
- **RG2.** Realizar la documentación formal y completa de todo el proceso, asegurando la reproducción de la información y evitando la dependencia absoluta de los investigadores.
- **RG3.** Realizar el estudio pertinente para obtener los parámetros de extrusión con el módulo de doble tornillo para las unidades de obtención de los *pellets* de PLA injertado y de la película biodegradable, debido a la necesidad del proceso de tener una fundición realmente homogénea entre los componentes.
- **RG4.** Proponer un sistema de refrigeración del cordón de PLA injertado.

2.5.2. Requerimientos de automatización

El deseo de un proceso idealmente automático se refleja en que los investigadores consideran que el 85 % del proceso debería ser automatizado. Sin embargo, al tratarse de un proceso en ejecución a nivel de laboratorio, se cuenta con un buen porcentaje del 72 % del proceso semi-automático, por lo tanto los requerimientos de automatización (RA) mostrados a continuación, se enfocan en aspectos principales del proceso:

- **RA1.** Organizar el proceso, modelándolo en términos de ISA S88.01.
- **RA2.** Diseñar la cadena de valor del proceso.
- **RA3.** Definir las variables interactuantes en el proceso, es decir: variables controladas, manipuladas y de disturbios.
- **RA4.** Documentar gráficamente el proceso mediante Diagramas de Flujo de Proceso (PFD por sus siglas en inglés) y Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID por sus siglas en inglés), apoyándose en la estándar ISA 5.1 [46].
- **RA5.** Modelar la receta maestra y de control con base al estándar ISA 88.01.
- **RA6.** Controlar automáticamente la operación de soplado para obtener la película biodegradable.

2.5.3. Requerimientos hardware

El proceso PROPEBIPAY cuenta con los equipos adecuados para cumplir con parte de las 33 fases que lo conforman en su totalidad. Esto se refleja en que el 72 % del proceso es semi-automático, sin embargo existen los siguientes requerimientos hardware (RH) necesarios en el proceso:

- **RH1.** Equipo o mecanismo que permita implementar el sistema de refrigeración del RG4.
- **RH2.** Utilizar el módulo de vibración adjunto a la tolva, donde se ingresan los materiales al extrusor.
- **RH3.** Establecer los dispositivos y equipos que permitan implementar el sistema de control automático del RA6.

2.5.4. Requerimientos software

El requerimiento software (RS) que se presenta a continuación está enfocado básicamente a la implementación del control de la operación de soplado:

- **RS1.** Establecer el software para la programación del control automático del RA6.

3. INGENIERÍA BÁSICA

La ingeniería básica hace parte del diseño de un proyecto de automatización, la cual refleja soluciones a problemas detallados en la ingeniería conceptual.

Mediante la aplicación de ingeniería básica se pretenden mostrar los requerimientos del usuario con las especificaciones básicas y el cronograma de ejecución, además de la valoración económica. Sin embargo, en este capítulo se hará el desarrollo de la especificación funcional del proceso PROPEBIPAY, donde las soluciones planteadas cumplan los requerimientos previstos.

3.1. Cumplimiento de requerimientos generales del proceso PROPEBIPAY

Se presentan las propuestas de solución relacionadas con los requerimientos generales (ver sección 2.5.1) que se establecieron según las necesidades agrupadas en la ingeniería conceptual.

3.1.1. Formato de seguimiento de parámetros y documentación formal

Durante la ejecución del proceso PROPEBIPAY es importante realizar un registro formal de los parámetros utilizados. Además, existe la posibilidad que se presenten anomalías en el transcurso del proceso debido a que aún se realizan estudios de mejora del producto final.

El formato propuesto de seguimiento de parámetros (ver Tabla 13) tiene en cuenta 30 parámetros distribuidos en 24 fases principales que suministran dicha información. Además, se agrega un espacio para anotar anomalías que surjan durante la ejecución de los 4 procedimientos de unidad.

Tabla 13. Formato de seguimiento de parámetros del proceso PROPEBIPAY.

PRODUCCIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA			
Nombre del operario			
Fecha			
Hora de inicio			
Hora de finalización			
Procedimiento de unidad	Fase	Parámetro	Anomalía
Obtener almidón modificado	Calentar almidón de yuca	Cantidad (g)	
		Temperatura (°C)	
		Tiempo de secado (h)	
	Medir humedad del almidón de yuca	Humedad (%)	
	Medir masa del almidón de yuca	Cantidad (g)	
	Medir masa del glicerol	Cantidad (g)	
	Medir masa del ácido esteárico	Cantidad (g)	
Almacenar almidón de yuca	Cantidad (g)		
Obtener <i>pellets</i> de TPS	Ingresar almidón modificado	Cantidad general (g)	
	Fundir almidón modificado	Temperatura (°C)	
		Velocidad (min ⁻¹)	

	Calentar <i>pellets</i> de TPS	Cantidad (g)	
		Temperatura (°C)	
		Tiempo de secado (h)	
	Medir humedad de los <i>pellets</i> de TPS	Humedad (%)	
Obtener <i>pellets</i> de PLA injertado	Almacenar <i>pellets</i> de TPS	Cantidad (g)	
	Medir masa del PLA	Cantidad (g)	
	Medir masa del AM	Cantidad (g)	
	Medir masa del peróxido de benzoilo	Cantidad (g)	
	Ingresar materiales discretamente	Cantidad general (g)	
	Fundir PLA injertado	Temperatura (°C)	
		Velocidad (min ⁻¹)	
Almacenar <i>pellets</i> de PLA injertado	Cantidad (g)		
Obtener película biodegradable	Medir masa de los <i>pellets</i> de TPS	Cantidad (g)	
	Medir masa de los <i>pellets</i> de PLA injertado	Cantidad (g)	
	Ingresar mezcla binaria	Cantidad general (g)	
	Fundir mezcla binaria	Temperatura (°C)	
		Velocidad (min ⁻¹)	
	Conformar	Abertura (µm)	
Guardar	Cantidad (m)		

Fuente: El autor, mayo de 2015.

Con respecto a la documentación formal del proceso PROPEBIPAY se propone el presente trabajo de grado, donde se describe textual y explícitamente el proceso y la planta, además, se modela la ejecución, planta y proceso con una representación sencilla.

En este punto se da el cumplimiento de los requerimientos: RG1 y RG2.

3.1.2. Estudio de determinación de parámetros para extrusión con módulo de doble tornillo

En la ejecución del proceso PROPEBIPAY se utiliza el módulo de tornillo simple para realizar la extrusión del PLA injertado y mezcla binaria. En un inicio, también se implementaba el módulo de tornillo simple para extruir el almidón modificado, sin embargo, al implementar el módulo de doble tornillo se reducen las pérdidas, haciendo más eficiente el proceso, ya que con el mismo material de ingreso se obtienen más *pellets* de TPS.

Generalmente las extrusoras con módulo de tornillo simple se caracterizan por tener una capacidad de mezclado relativamente pobre, por lo tanto se orientan a materiales con pre-acondicionamiento y de procesamiento “húmedo”. Normalmente en el formado de esos materiales se presenta baja cizalla y temperatura [47].

En cuanto a las extrusoras con módulo de doble tornillo, se dirigen principalmente a la fundición de materiales especializados, desde plásticos hasta caramelos pegajosos.

Permiten un control flexible de los parámetros de proceso, teniendo mejor dominio ante la variabilidad del material procesado. También funcionan bajo rangos de humedad estrechos. Específicamente, se considera utilizar un extrusor con módulo de doble tornillo cuando el material procesado es cambiante, tamaño de partícula pequeño, forma uniforme y polvos de baja densidad [47].

El PLA injertado es un material especial que necesita de una mezcla adecuada y homogénea, ya que contiene los aditivos: peróxido de benzoilo que permite la polimerización y acelera las reacciones químicas, y el anhídrido maléico que logra la unión e interacción entre el TPS (polar) y el PLA (apolar). En cuanto a la mezcla binaria, su unión es importante debido a que determina los buenos resultados de los parámetros y características propias de la película biodegradable.

En este punto se justifica el cumplimiento del requerimiento RG3. No obstante, se tiene presente la alta dificultad en el uso del extrusor de doble tornillo en lugar del de tornillo simple, ya que en el primero se deben configurar 7 temperaturas para completar el perfil de parámetros en la extrusión, mientras que en el segundo son 4 temperaturas a establecer. Sin embargo, actualmente un grupo de jóvenes investigadores, de CYTBIA, están encargados de realizar los estudios en cuestión y en particular ya se hacen pruebas reales de proceso, implementando el extrusor de doble tornillo para extrusión de PLA injertado.

3.1.3. Sistema de refrigeración del cordón de PLA injertado

Para la industria del plástico la refrigeración es importante porque el material extruido debe conservar su forma y adquirir rigidez. En cuanto al proceso PROPEBIPAY, es fundamental que los cordones que resultan de la extrusión sean rígidos antes de ingresar al peletizado para que los gránulos puedan ser cortados correctamente.

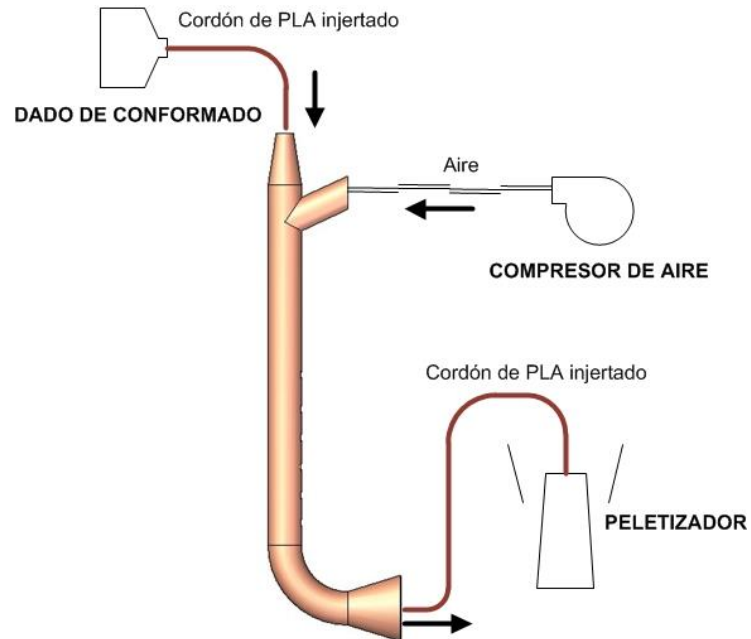
Existen sistemas de refrigeración o *chillers* que generalmente son torres de enfriamiento compuestas de maquinaria compleja y con requerimientos de personal especializado para su puesta en marcha [48].

El enfriamiento debe ser uniforme, evitando secciones con gradiente de temperatura [27]. Además, no es factible usar agua para refrigerar el cordón de PLA injertado, ya que el acople entre TPS y PLA injertado se vería afectado por la volatilidad del anhídrido maléico.

Considerando lo anterior, el sistema a proponer debe ser sencillo, eficaz y utilizar aire para la refrigeración, cubriendo las necesidades reales del proceso en cuestión. El sistema sugerido (ver Figura 49) cuenta con 2 entradas: orificio de ingreso del cordón de PLA injertado y acople para el suministro del aire de enfriamiento. Además, se tiene una salida principal para el cordón refrigerado y pequeños orificios de “respiración”.

Respecto al funcionamiento del sistema, el cordón que sale del extrusor ingresa al tubular de refrigeración, donde el aire de enfriamiento generado por un compresor se distribuye por toda el área del tubular, dirigiéndose solo al cordón en el interior, lo que causa una refrigeración eficiente y dirigida.

Figura 49. Sistema propuesto para refrigeración del cordón de PLA injertado.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

Con el sistema presentado previamente se da cumplimiento al requerimiento RG4. Los componentes y características del tubular propuesto se detallan más adelante (ver sección 3.3.1).

3.2. Cumplimiento de requerimientos de automatización del proceso PROPEBIPAY

Se desarrollan las soluciones propuestas para dar cumplimiento a los requerimientos de automatización (ver sección 2.5.2) que se establecieron en el capítulo anterior.

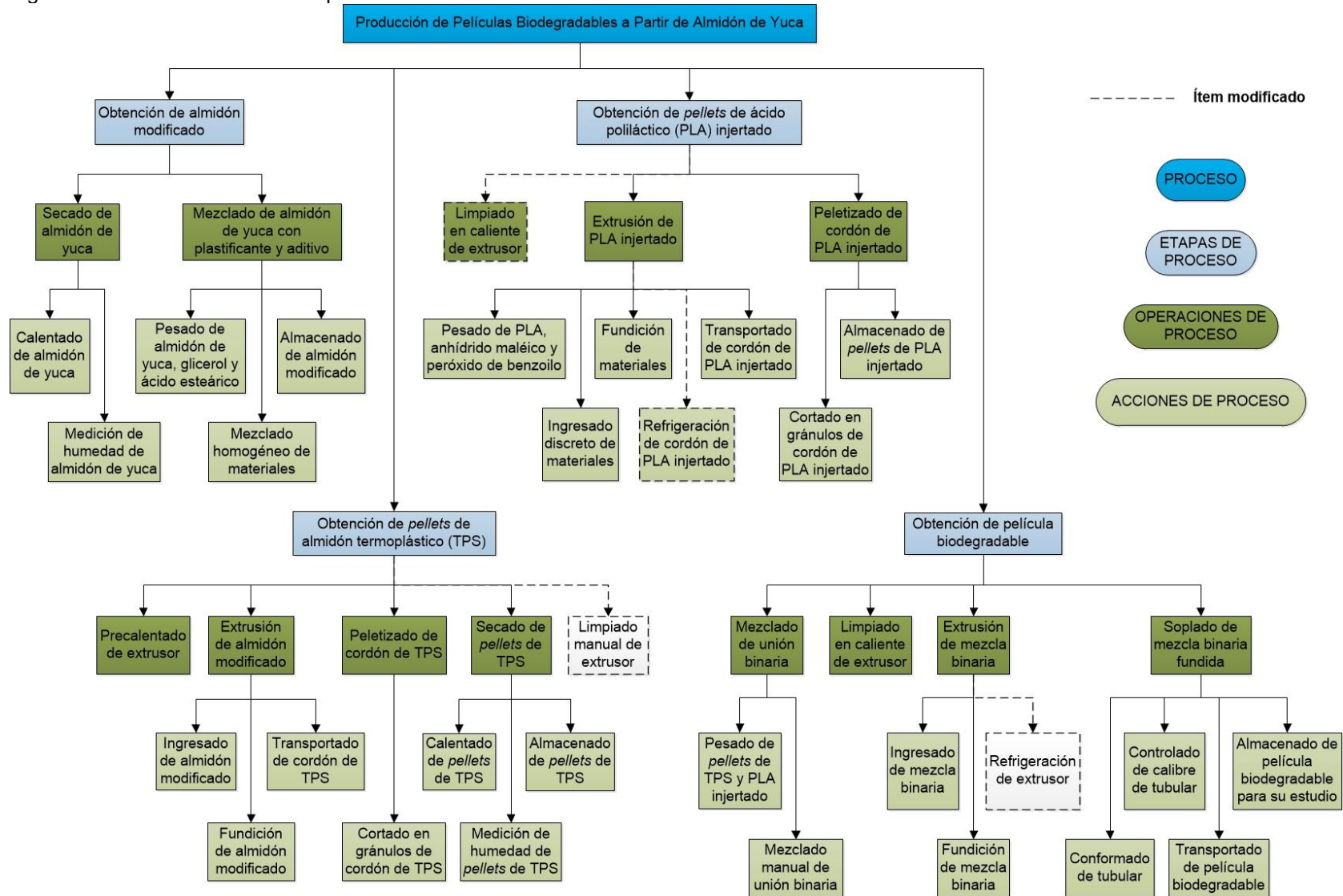
3.2.1. Organización del proceso mediante modelos ISA S88.01

Mediante estándar ISA 88.01 [38], específicamente los modelos de proceso, físico y de control procedimental, se tiene una visión organizada de todo el proceso en cuestión.

Previamente se construyeron los 3 modelos alusivos al proceso PROPEBIPAY (ver sección 2.3), sin embargo, al tener presente el cumplimiento y realización de los RG3, RG4 y RA6 (ver sección 3.1.2, 3.1.3, 3.2.6), dichos modelos se verán modificados.

En cuanto al modelo de proceso, en la etapa de obtención de *pellets* de TPS se elimina la operación "limpiado manual de extrusor"; en la etapa de obtención de *pellets* de PLA injertado se excluye la acción de "refrigeración de extrusor" y se cambia la operación de "precalentado de extrusor" por "limpiado en caliente de extrusor". Finalmente, en la etapa de obtención de película biodegradable se elimina la acción de "refrigeración de extrusor" (ver Figura 50).

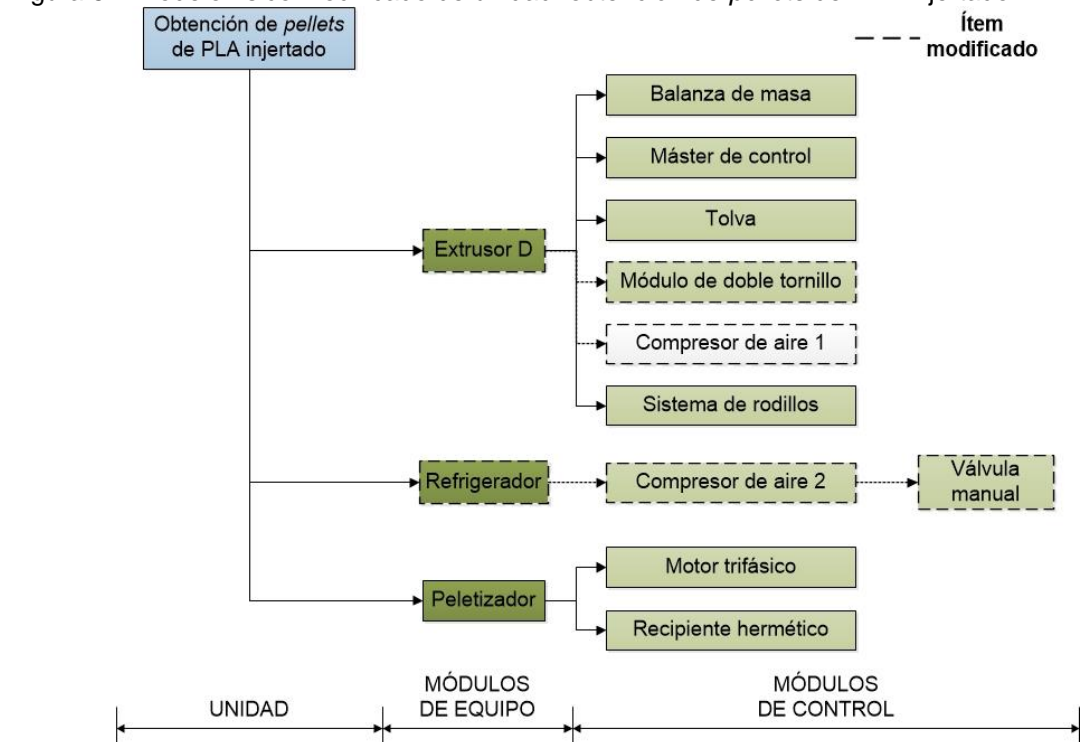
Figura 50. Modelo modificado de proceso de PROPEBIPAY.



Fuente: El autor, agosto de 2015.

Respecto al modelo físico, en la unidad obtención de *pellets* de PLA injertado se agrega el módulo de equipo “refrigerador” que contiene los módulos de control: “compresor de aire 2” y “válvula manual”. Además, ya no se utilizaría el “módulo de tornillo simple”, sino el “módulo de doble tornillo”. Y por último, se elimina el módulo de control “compresor de aire 1” ya que no es necesario refrigerar la extrusión externamente cuando se usa el módulo de doble tornillo (ver Figura 51).

Figura 51. Modelo físico modificado de unidad: obtención de *pellets* de PLA injertado.

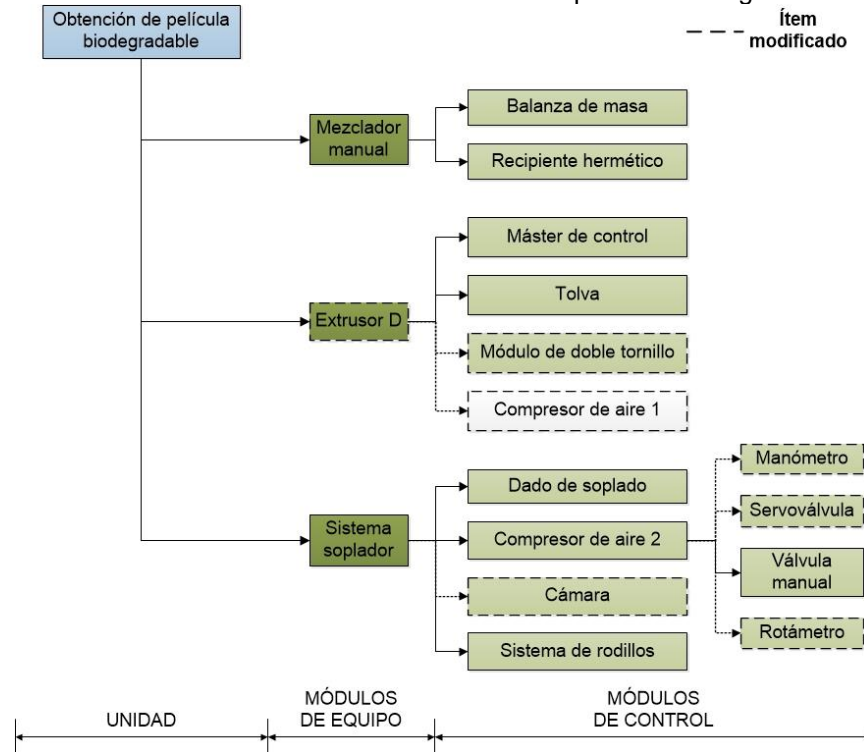


Fuente: El autor, agosto de 2015.

Por otro lado, en la unidad obtención de película biodegradable se agregan 4 nuevos módulos de control al módulo de equipo sistema soplador: “cámara”, “manómetro”, “servoválvula” y “rotámetro” (relacionados con el sistema de control por visión de máquina). Finalmente, también se haría uso del “módulo de doble tornillo”, por lo que se elimina el “compresor de aire 1” (ver Figura 52).

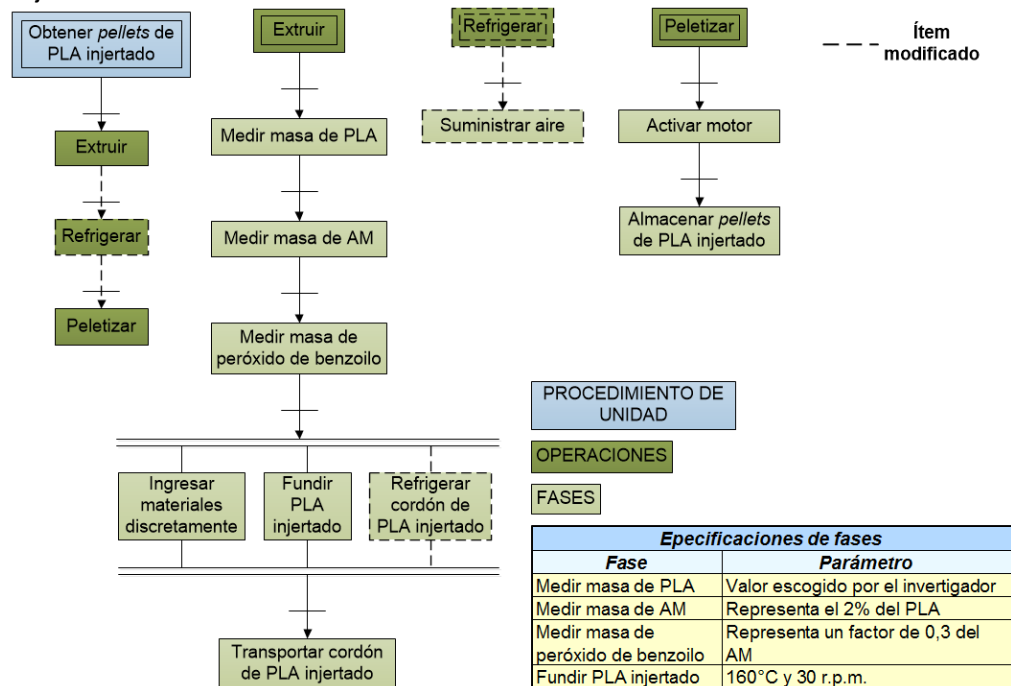
En lo concerniente al modelo de control procedimental, en el procedimiento de unidad obtener *pellets* de PLA injertado se elimina la fase “refrigerar extrusión”, ya que al utilizar el módulo de doble tornillo no es necesaria esa acción externa (ver Figura 53). Además, se agrega la operación “refrigerar” que contiene las fases “suministrar aire”.

Figura 52. Modelo físico modificado de unidad: obtención de película biodegradable.



Fuente: El autor, abril de 2015.

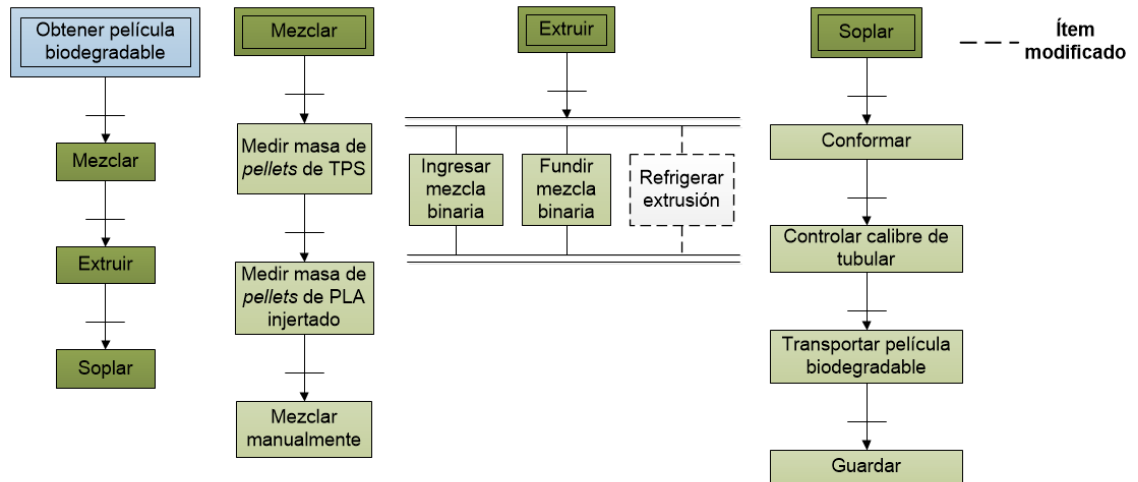
Figura 53. Modelo modificado de control procedimental de procedimiento de unidad: obtener *pellets* de PLA injertado.



Fuente: El autor, abril de 2015.

Finalmente, en el procedimiento de unidad obtener película biodegradable solo se elimina la fase “refrigerar extrusión”, esto se debe a que se usaría el módulo de doble tornillo en este procedimiento de unidad (ver Figura 54).

Figura 54. Modelo modificado de control procedimental de procedimiento de unidad: obtener película biodegradable.



Especificaciones de fases	
Fase	Parámetro
Medir masa de <i>pellets</i> de TPS	Representa el 75%
Medir masa de <i>pellets</i> de PLA injertado	Representa el 25%
Fundir mezcla binaria	165°C y 35 r.p.m.
Conformar	Abertura de 70 µm
Controlar calibre de tubular	[0 - 6000]cm ³ /min y 20±10 cm

PROCEDIMIENTO DE UNIDAD

OPERACIONES

FASES

Fuente: El autor, abril de 2015.

Teniendo en cuenta los modelos ISA S88.01 presentados en la ingeniería conceptual y los cambios mostrados en la presente sección, se da cumplimiento al RA1.

3.2.2. Cadena de valor

La importancia de la construcción de una cadena de valor en una empresa es mostrar las actividades que aportan valor en la organización, dividiéndolas en 2 grupos: primarias y de apoyo. Las actividades primarias se relacionan con los proceso de producción, mientras que las de apoyo tienen en cuenta la gestión, innovación, administración y control de la empresa [39], [49].

Teniendo en cuenta que el proceso PROPEBIPAY se desarrolla a nivel de laboratorio, no es posible presentar algunas actividades primarias de logística exterior, *marketing*, ventas y servicio. Esto se explica debido a que dichas actividades se enfocan directamente en los clientes, sin embargo se propone que se tenga en cuenta un estudio de mercado a futuro, ya que se pretende un escalamiento industrial en el proceso.

El desarrollo concreto de la cadena de valor que representa el proceso PROPEBIPAY se realizó previamente en la ingeniería conceptual (ver sección 2.1 y Figura 30), con lo que se da cumplimiento al RA2.

3.2.3. Variables interactuantes en el proceso

Las variables de proceso hacen referencia a las variables físicas y medibles que permiten conocer y determinar el comportamiento del proceso en el tiempo. Dentro del campo de control de proceso, dichas variables suelen clasificarse en variables controladas y manipuladas. Las primeras tienen el fin de seguir un comportamiento deseado a lo largo del proceso; mientras que las segundas influyen directamente en el comportamiento y valor de las variables controladas [50].

El listado de las variables que interactúan en el proceso PROPEBIPAY se organiza de acuerdo a sus 4 etapas de proceso. Además, se distribuyen en cada una de las operaciones de proceso, así, es posible tener una visión simplificada de las 35 variables que interfieren directamente en el proceso. Asimismo, para tener una descripción más específica, se usaron siglas que permiten detallar a que hace referencia cada variable controlada, por ejemplo, la temperatura S_A y la temperatura S_TPS son las variables controladas de temperatura en el secado de almidón de yuca y *pellets* de TPS, respectivamente (ver Tabla 14).

Tabla 14. Variables del proceso PROPEBIPAY.

Etapas de proceso	Operación de proceso	Variable controlada	Variable manipulada
Obtención de almidón modificado	Secado de almidón de yuca	Temperatura S_A Humedad A	Corriente eléctrica Tiempo de secado
	Mezclado de almidón de yuca con plastificante y aditivo	Masa A_G_AE	Masa A_G_AE
Obtención de <i>pellets</i> de TPS	Extrusión de almidón modificado	Temperatura de extrusión A1	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión A2	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión A3	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión A4	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión A5	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión A6	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión A7	Corriente eléctrica
	Velocidad de giro A	Corriente eléctrica	
Peletizado de cordón de TPS	Tamaño de gránulos TPS	Posición de cuchillas	
Secado de <i>pellets</i> de TPS	Temperatura S_TPS Humedad TPS	Corriente eléctrica Tiempo de secado	
Obtención de <i>pellets</i> de PLA injertado	Extrusión de PLA injertado	Masa PLA_AM_PB	Masa PLA_AM_PB
		Temperatura de extrusión PLAi1	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión PLAi2	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión PLAi3	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión PLAi4	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión PLAi5	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión PLAi6	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión PLAi7	Corriente eléctrica
Velocidad de giro PLAi	Corriente eléctrica		

		Temperatura de cordón PLA _i	Caudal de aire
	Peletizado de cordón de PLA injertado	Tamaño de gránulos PLA _i	Posición de cuchillas
Obtención de película biodegradable	Mezclado de unión binaria	Masa TPS_PLA _i	Masa TPS_PLA _i
	Extrusión de mezcla binaria	Temperatura de extrusión MB1	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión MB2	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión MB3	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión MB4	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión MB5	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión MB6	Corriente eléctrica
		Temperatura de extrusión MB7	Corriente eléctrica
	Velocidad de giro MB	Corriente eléctrica	
Soplado de mezcla binaria	Calibre	Caudal de aire	

Fuente: El autor, agosto de 2015.

Con la organización de las variables controladas y manipuladas que interactúan en el proceso PROPEBIPAY, se da cumplimiento al RA3.

3.2.4. Diagramas para documentación gráfica del proceso

Un proyecto de ingeniería dispone de formas estándar para representar gráficamente un proceso, en el caso de instrumentación industrial y control se usan: Diagramas de Flujo de Proceso (PFD por sus siglas en ingles), Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID por sus siglas en inglés), Diagramas de Lazo y Diagramas SAMA.

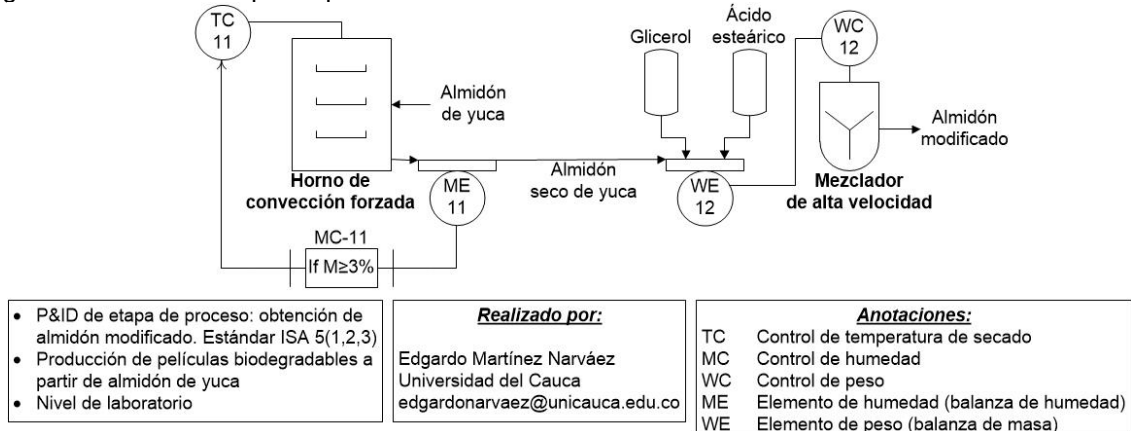
En resumen, los PFD son apropiados para representar la imagen general y completa de todo el proceso. Los Diagramas de Lazo son más específicos y se enfocan en interconexión o cableado entre instrumentos individuales. En un punto intermedio se encuentran los P&ID, ya que muestran el flujo del proceso y de datos entre instrumentos que miden y controlan. Por último, los diagramas SAMA se utilizan para documentar la estrategia de control de un sistema, sin embargo son usados comúnmente en la industria de generación energética [50].

Para el proceso PROPEBIPAY se hace utilidad de los PFD y P&ID para su representación gráfica. Además, para el diseño de dichos diagramas se usa el estándar ISA 5, específicamente las partes 1, 2 y 3 para normalización de la instrumentación de medición y control, simbologías de operaciones binarias de procesos y simbologías para microprocesadores de control compartido, respectivamente [46], [51], [52].

El PFD del proceso PROPEBIPAY fue realizado en la ingeniería conceptual, mostrando el flujo completo de los materiales a través de todo el proceso (ver sección 2.2 y Figura 32).

En cuanto a los diagramas P&ID del proceso PROPEBIPAY, se construyen de acuerdo a cada una de las 4 etapas de proceso. En ese sentido, para la obtención de almidón modificado resultan 3 esquemas de control para las variables: temperatura de secado, humedad y masa (ver Figura 55).

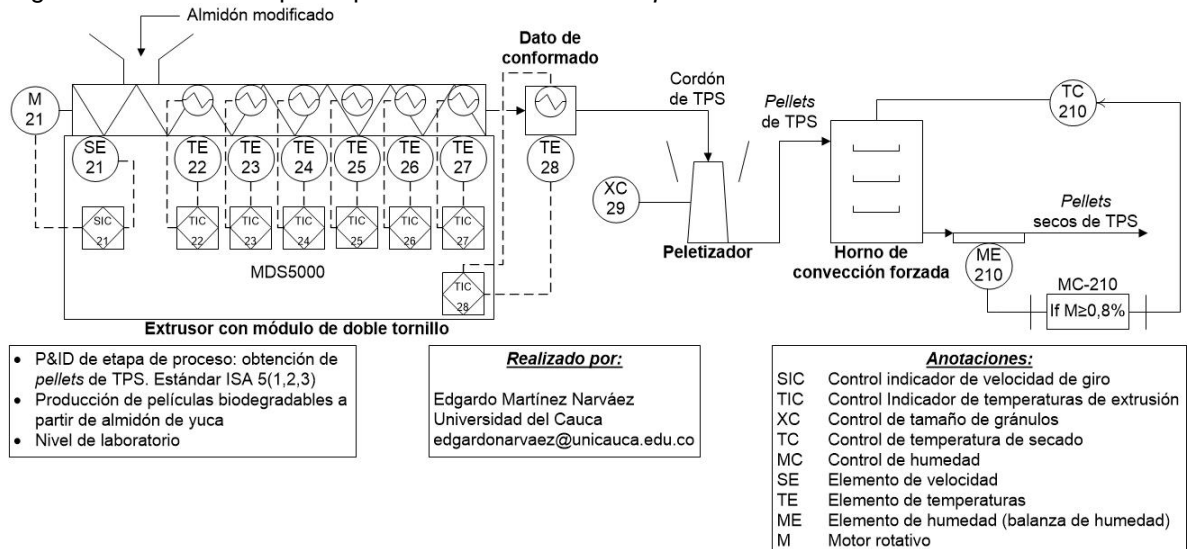
Figura 55. P&ID de etapa de proceso de obtención de almidón modificado.



Fuente: El autor, septiembre de 2015.

Respecto a la etapa de proceso de obtención de *pellets* de TPS, se asumen 8 lazos de control *feedback* al interior del máster de control del extrusor para las variables: velocidad de giro y temperaturas en extrusión de almidón modificado. De estas temperaturas, 6 se ubican a lo largo del módulo de doble tornillo y una se relaciona con el dado de conformado. Posteriormente, se suman 3 lazos de control para las variables: tamaño de gránulos, temperatura de secado y humedad (ver Figura 56).

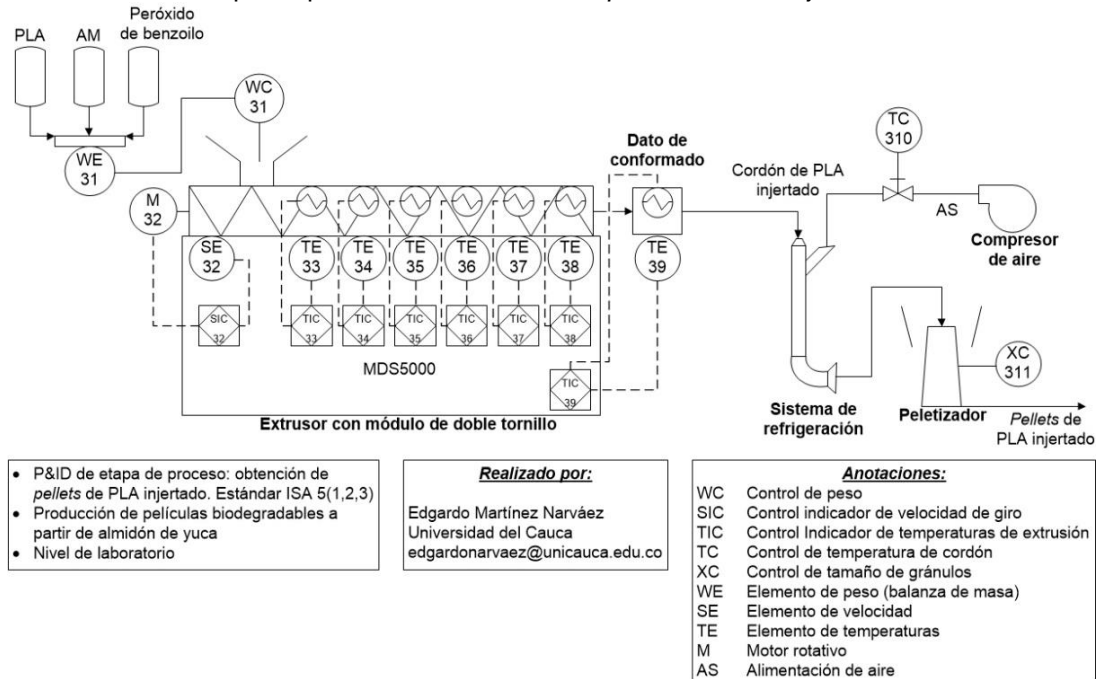
Figura 56. P&ID de etapa de proceso de obtención de *pellets* de TPS.



Fuente: El autor, septiembre de 2015.

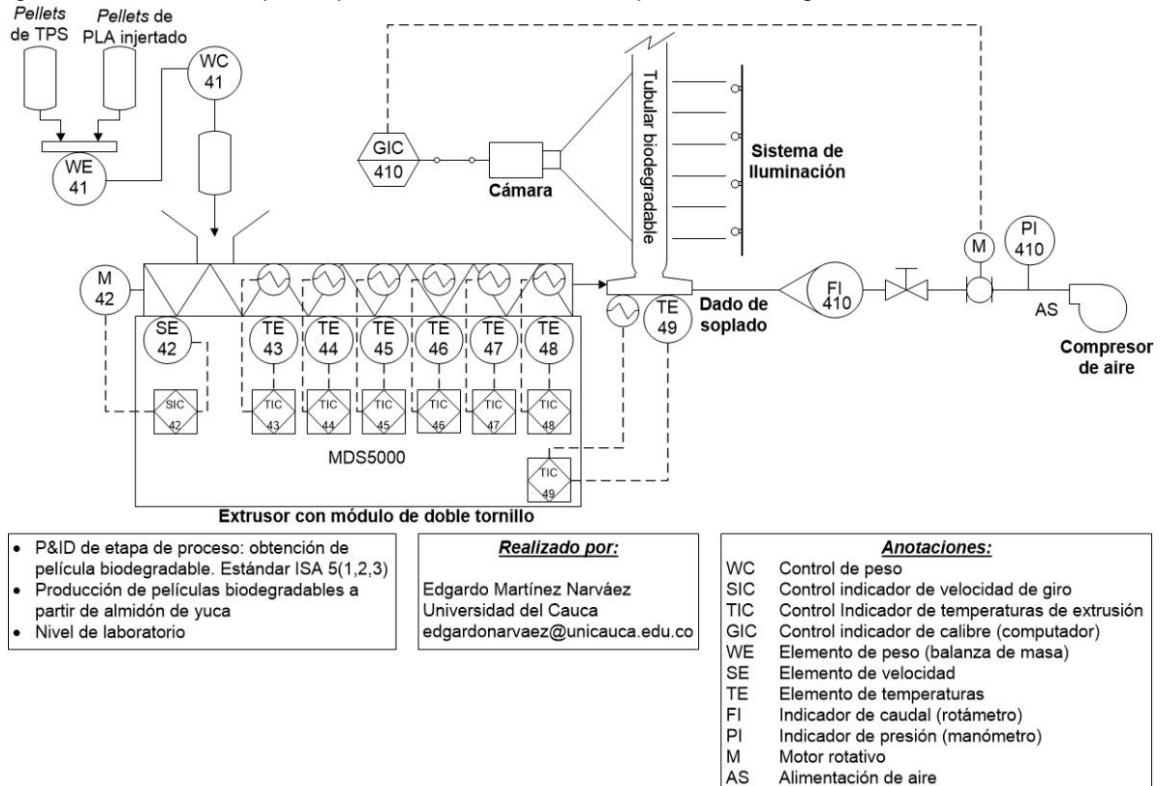
Para la etapa de proceso de obtención de *pellets* de PLA injertado, también se asumen 8 lazos de control *feedback* al interior del máster de control del extrusor para las variables: velocidad de giro y 7 temperaturas en extrusión de PLA injertado. Previamente, hay un esquema para el control de masa. Por último, al finalizar la extrusión se requieren 2 diagramas de control para las variables: temperatura de cordón y tamaño de gránulos (ver Figura 57).

Figura 57. P&ID de etapa de proceso de obtención de *pellets* de PLA injertado.



Fuente: El autor, septiembre de 2015.

Figura 58. P&ID de etapa de proceso de obtención de película biodegradable.



Fuente: El autor, septiembre de 2015.

Finalmente, en la última etapa de proceso de obtención de película biodegradable, también se asumen 8 lazos de control *feedback* al interior del máster de control del extrusor para las variables: velocidad de giro y 7 temperaturas en extrusión de mezcla binaria. Antes de esto, hay un esquema de control de masa adjunto a un recipiente de agitación manual. Una vez fundida la mezcla binaria, es necesario el control del calibre del tubular biodegradable, en ese sentido, se hace alusión a un sistema de control por visión de máquina, el cual es detallado posteriormente (ver sección 3.2.6).

Con base a los diagramas construidos anteriores y sus descripciones, se da cumplimiento al RA4.

3.2.5. Modelos de receta maestra y de control de ISA S88.01

Dentro de la terminología de automatización, una receta es una entidad que contiene el conjunto mínimo de información que representa exclusivamente requerimientos de manufactura para un producto específico [38]. En lo relativo a receta muestra y de control, permiten saber cómo hacer el procedimiento con los recursos actuales.

Respecto al contenido de la receta, por lo general se tienen 4 categorías de información: encabezado, fórmula, requerimientos de equipo y procedimiento [38]. Posteriormente se organizará dicho contenido en tablas que representarán los modelos de receta maestra y de control del proceso PROPEBIPAY, basándose en el estándar ISA 88.01 [38].

3.2.5.1. Modelo de receta maestra

La receta maestra se encuentra en el nivel de receta orientada a la célula de proceso o al subconjunto de equipos en la célula de proceso [38].

Las entradas, productos, parámetros y salidas del proceso PROPEBIPAY se organizaron de acuerdo a las operaciones del mismo. Además, se tienen en cuenta los requerimientos de equipos para la puesta en marcha del proceso.

Para un alto nivel de detalle en la asignación de nombres para operaciones y parámetros, además de representación con *tags*, se usaron siglas que caracterizan el material y/o proceso. Por ejemplo, en la operación “disminuir humedad A” se tiene el parámetro “temperatura S_A”, lo que hace referencia a la disminución de humedad del almidón de yuca y su temperatura de secado, respectivamente (ver Tabla 15).

Tabla 15. Modelo de receta maestra del proceso PROPEBIPAY.

RECETA MAESTRA	
PRODUCCIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA	
VERSIÓN 1.0	
AUTOR(ES): Edgardo Martínez Narváez	
FECHA: Popayán, 12 de Septiembre de 2015	
FÓRMULA	
Entrada de proceso	Almidón de yuca
	Plastificante glicerol
	Aditivo ácido esteárico
	Ácido poliláctico
	Reactivo anhídrido maléico

	Peróxido de benzoilo	
	Mano de obra de jóvenes investigadores	
	Alimentación eléctrica	
Producto en proceso	Almidón modificado, <i>pellets</i> de TPS, <i>pellets</i> de PLA injertado y mezcla binaria.	
Parámetro de proceso por operación	Operación	Parámetro
	Disminuir humedad A	Temperatura S_A
		Tiempo S_A
		Humedad A
	Mezclar A_G_AE	Masa A
		Masa G
		Masa AE
	Extruir A	Temperatura E_A1
		Temperatura E_A2
		Temperatura E_A3
		Temperatura E_A4
		Temperatura E_A5
		Temperatura E_A6
		Temperatura E_A7
		Velocidad Gi_A
	Peletizar cordón TPS	Posición Cu_TPS
	Disminuir humedad <i>pellets</i> TPS	Temperatura S_TPS
		Tiempo S_TPS
		Humedad TPS
	Extruir PLA _i	Masa PLA
		Masa AM
		Masa PB
		Temperatura E_PLA _i 1
		Temperatura E_PLA _i 2
		Temperatura E_PLA _i 3
		Temperatura E_PLA _i 4
		Temperatura E_PLA _i 5
		Temperatura E_PLA _i 6
		Temperatura E_PLA _i 7
		Velocidad Gi_PLA _i
		Temperatura Co_PLA _i
	Caudal Ai_PLA _i	
	Peletizar cordón PLA _i	Posición Cu_PLA _i
Mezclar MB	Masa p_TPS	
	Masa p_PLA _i	
Extruir MB	Temperatura E_MB1	
	Temperatura E_MB2	
	Temperatura E_MB3	
	Temperatura E_MB4	
	Temperatura E_MB5	
	Temperatura E_MB6	
	Temperatura E_MB7	
	Velocidad Gi_MB	
Soplar MB	Abertura dado	
	Calibre tubular	
	Caudal Ai_MB	

Salida de proceso	Película biodegradable
REQUERIMIENTO DE EQUIPO	
Horno de convección forzada	
Balanza electrónica de humedad	
Balanza electrónica de masa	
Mezclador de alta velocidad	
Extrusor	
Sistema de rodillos	
Peletizador	
Dado de soplado	
Compresor de aire	
Manómetro	
Servoválvula	
Válvula manual	
Rotámetro	
Cámara	

Fuente: El autor, septiembre de 2015.

3.2.5.2. Modelo de receta de control

La receta de control comienza como una copia de una versión específica de la receta maestra y se ve modificada de acuerdo a la programación e información operacional para la fabricación de un lote particular. Es decir, contiene información de proceso con la especificación de producto necesaria para su manufactura. En una visión más amplia, provee el nivel de detalle suficiente para el inicio y monitoreo del procedimiento de una célula de proceso [38].

Durante el procesamiento de un lote, la receta de control podría verse modificada, ya que estos cambios pueden realizarse en un periodo de tiempo basado en la programación, equipo o información del operador. Por ejemplo: modificar el procedimiento debido a un evento inesperado, definir el equipo que será realmente utilizado una vez se inicia el lote o se tiene conocimiento del mismo y agregar o ajustar parámetros basados en la calidad de las materias primas o en el análisis del lote [38].

Para el proceso PROPEBIPAY se presentan: materiales, productos procesados, parámetros y equipos; que junto a cantidades, valores y especificaciones, conforman la receta maestra del mismo. Así, se cuenta con la información específica para obtener una película biodegradable de características: longitud 3 m a 5 m y ancho 10 cm a 30 cm (ver Tabla 16).

Tabla 16. Modelo de receta de control del proceso PROPEBIPAY.

RECETA DE CONTROL			
PRODUCCIÓN DE PELÍCULAS BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA			
VERSIÓN 1.0			
AUTOR(ES): Edgardo Martínez Narváez			
FECHA: Popayán, 12 de Septiembre de 2015			
FÓRMULA			
Entrada de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Almidón de yuca	1.000	g
	Plastificante glicerol	300	g
	Aditivo ácido esteárico	10	g

	Ácido poliláctico	1.000	g
	Reactivo anhídrido maléico	20	g
	Peróxido de benzoilo	6	g
	Mano de obra de 3 jóvenes investigadores	24	h
	Alimentación eléctrica	110 – 220	VAC
Producto en proceso	Almidón modificado, <i>pellets</i> de TPS, <i>pellets</i> de PLA injertado y mezcla binaria.		
Parámetro de proceso por operación	Parámetro	Valor	Unidad
	Temperatura S_A	60	°C
	Tiempo S_A	16	h
	Humedad A	≤5	%
	Masa A_Mo	1.000	g
	Masa A	700	g
	Masa G	300	g
	Masa AE	7	g
	Temperatura E_A1	---	°C
	Temperatura E_A2	---	°C
	Temperatura E_A3	---	°C
	Temperatura E_A4	---	°C
	Temperatura E_A5	---	°C
	Temperatura E_A6	---	°C
	Temperatura E_A7	130	°C
	Velocidad Gi_A	120	min ⁻¹
	Posición Cu_TPS	---	mm
	Temperatura S_TPS	80	°C
	Tiempo S_TPS	1	h
	Humedad TPS	≤2	%
	Masa PLA	1.000	g
	Masa AM	20	g
	Masa PB	6	g
	Temperatura E_PLAi1	---	°C
	Temperatura E_PLAi2	---	°C
	Temperatura E_PLAi3	---	°C
	Temperatura E_PLAi4	---	°C
	Temperatura E_PLAi5	---	°C
	Temperatura E_PLAi6	---	°C
	Temperatura E_PLAi7	160	°C
	Velocidad Gi_PLAi	30	min ⁻¹
	Temperatura Co_PLAi	---	°C
	Caudal Ai_PLAi	---	cm ³ /min
	Posición Cu_PLAi	---	mm
	Masa MB	1.000	g
	Masa p_TPS	750	g
	Masa p_PLAi	250	g
	Temperatura E_MB1	---	°C
	Temperatura E_MB2	---	°C
	Temperatura E_MB3	---	°C
Temperatura E_MB4	---	°C	
Temperatura E_MB5	---	°C	
Temperatura E_MB6	---	°C	
Temperatura E_MB7	165	°C	

	Velocidad Gi_MB	35	min ⁻¹
	Abertura dado	70	µm
	Calibre tubular	10 – 30	cm
	Caudal Ai_MB	0 – 6.000	cm ³ /min
Salida de proceso	Película biodegradable con longitud de [3 – 5] m y ancho de [10 – 30] cm.		
REQUERIMIENTO DE EQUIPO			
Equipo	Especificación		
Horno de convección forzada	Marca memmert, serie <i>Perfect</i> , temperatura máxima 250 °C, alimentación eléctrica 220 VAC a 60 Hz, potencia 2.400 W.		
Balanza electrónica de humedad	Marca Precisa, modelo XM 60, capacidad de masa 124 g, rango de temperatura 30 °C – 230 °C, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz, potencia 450 W.		
Balanza electrónica de masa	Marca ViBRA, modelo SJ, capacidad de masa 620 g, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz o 9 VDC.		
Mezclador de alta velocidad	Marca <i>Kitchen Aid Professional</i> , modelo 600, serie 6QT, velocidades de mezclado 10, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz, potencia 575 W.		
Extrusor	Máster de control marca <i>Thermo Scientific</i> , modelo HAAKE PolyLab OS RheoDrive 4.		
	Módulo de doble tornillo marca <i>Thermo Scientific</i> , modelo HAAKE Rheomex OS PTW16, zonas de calefacción 7, diámetro de tornillo 16 mm, velocidad de giro máxima 1.100 min ⁻¹ , temperatura de operación máxima 350 °C (opcional de 400/450 °C), presión máxima 1.450 psi, toque máximo 130 N.m, enfriado por convección.		
Sistema de rodillos	Marca <i>Thermo Scientific</i> , modelo FP1 FILM POSTEX, velocidad de despegue o envoltura 0 – 12 m/min, alimentación eléctrica 220 VAC a 60 Hz, potencia 115 W.		
Peletizador	Marca INMAGRAF, modelo 2014, serial 4790001. Motor trifásico marca SIEMENS, modelo 1LA7 072-6YA60, potencia 300 W.		
Dado de soplado	Marca <i>Thermo Scientific</i> , diámetro de anillo 25 (35) mm, ancho de abertura 0 µm – 800 µm, temperatura máxima 480 °C, presión máxima 10.153 psi.		
Compresor de aire	Marca STANPROF, caudal 25.000 cm ³ /min, presión máxima 100 psi, capacidad de almacenamiento 3.000 cm ³ , alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz, potencia 150 W.		
Manómetro	Rango de medida 0 psi – 100 psi.		
Servoválvula	---		
Válvula manual	---		
Rotámetro	Alcance de medida superior a 6.000 cm ³ /min.		
Cámara	Industrial compacta, sensor CMOS, interfaz USB.		

Fuente: El autor, septiembre de 2015.

Con la construcción de los modelos de receta maestra y de control del proceso PROPEBIPAY, mostrados previamente, se da cumplimiento al RA5.

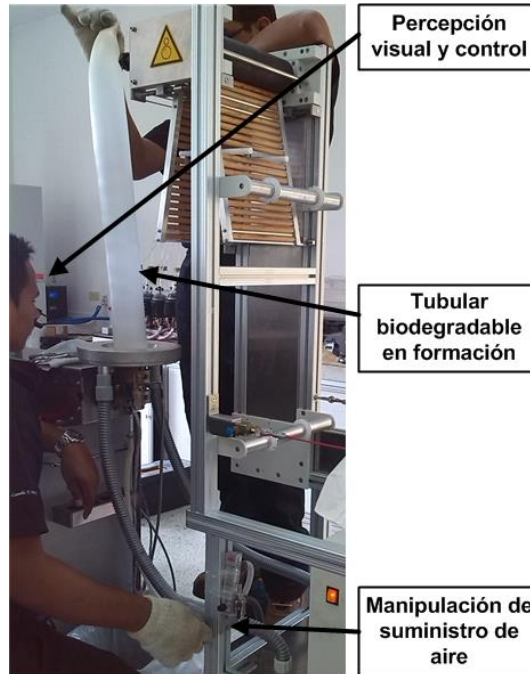
3.2.6. Control automático de operación de soplado de la película biodegradable

La superficie de la película biodegradable presenta una porosidad microscópica, sin embargo ocurre una disminución de presión al interior del tubular, ya que el aire suministrado en la operación de soplado poco a poco se escapa. Además, durante la ejecución de dicha operación, pueden presentarse rupturas en el tubular soplado,

ocasionando la rápida salida del aire en el interior. Si el aire dentro del tubular en formación se escapa notablemente, la película biodegradable pierde su forma deseada.

El control del conformado final del tubular de la película biodegradable mediante soplado se hace manualmente: el operario abre o cierra parcialmente una válvula para permitir o no el aumento de flujo de aire al tubular en formación, basándose en la apreciación visual de la forma que va tomando el tubular (ver Figura 59).

Figura 59. Control manual de operación de soplado de la película biodegradable.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

Se propone el control automático de la operación de soplado, implementado un sistema de visión de máquina. Éste también se conoce como visión artificial, un campo de la inteligencia artificial que se define como la detección, procesamiento e interpretación del mundo físico a través de imágenes [53].

En resumen, un sistema de visión de máquina moderno tiene 3 componentes principales: adquisición y digitalización de datos, análisis y procesamiento, y aplicación en el proceso. A su vez, la adquisición y digitalización de datos de imagen se relaciona con 2 sistemas: iluminación y captura de imagen. Mientras que el análisis y procesamiento de imagen cuenta con 5 etapas: preprocesamiento, segmentación, extracción de características, reconocimiento e interpretación [54].

De las formas principales de iluminación (direccional, posterior difusa, radial, de campo brillante, esférica y axial), la más indicada para implementar en el caso de estudio es la posterior difusa o *backlight*. Esta técnica de iluminación permite obtener el contraste máximo al ubicar el tubular entre la iluminación y la cámara, percibiendo la silueta del objeto como una forma negra sobre el fondo blanco [55].

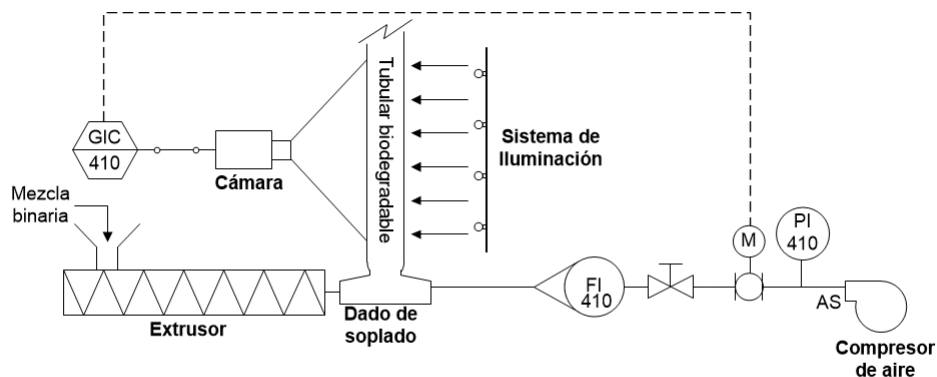
En cuanto a la captura y digitalización de la imagen, se debe tener presente el tipo de aplicación en el cual se implementará el sistema de visión. Así, la cámara a utilizar básicamente se define según el tipo de sensor. Dentro de las más indicadas, se encuentran las de Dispositivo de Carga Acoplada (CCD por sus siglas en inglés) y las de Semiconductor Complementario de Metal – Óxido (CMOS por sus siglas en inglés). Existen ventajas y desventajas entre los sensores CCD y CMOS, lo que lleva a concluir que para el caso de estudio es suficiente el uso de una cámara CMOS por economía, mejor tamaño, integración electrónica y velocidad [56], [57].

Para el análisis y procesamiento de la imagen capturada, se propone un algoritmo que realice secuencialmente las siguientes etapas: preprocesamiento que reduzca el ruido y realce los detalles de la imagen; segmentación que separe el tubular y detecte los bordes del cilindro (se sugiere el algoritmo de Canny), y extracción de características que específicamente determine la distancia entre perfiles de la película (análisis geométrico), relacionando dicha medida como el diámetro o calibre del tubular biodegradable.

Como componente final del sistema de control con visión de máquina, se realiza la aplicación directa en el proceso. La propuesta se resume en emitir órdenes del esfuerzo de control (caudal ordenado) a un actuador de acuerdo al valor del diámetro obtenido. Por ejemplo, si el calibre del tubular es menor al valor deseado, se debe suministrar más caudal de aire, en el caso contrario se disminuye el flujo, pero si el calibre es el adecuado (valor real semejante al deseado) se debe mantener constante el flujo de aire.

En conclusión, la representación del montaje del sistema propuesto se aprecia mediante el P&ID del control por visión de máquina de la operación de soplado (ver Figura 60), donde se lleva a cabo la secuencia: el sistema de iluminación contrasta la silueta del tubular biodegradable, la cámara capta su imagen y la transfiere al computador que realiza el análisis y procesamiento para determinar el calibre del tubular, enviando el esfuerzo de control a la servoválvula que permite el caudal adecuado de aire al dado de soplado.

Figura 60. P&ID del control por visión de máquina de la operación de soplado.



<ul style="list-style-type: none"> • P&ID del control por visión de maquina de la operación de soplado. Estándar ISA 5(1,2,3) • Producción de películas biodegradables a partir de almidón de yuca • Nivel de laboratorio 	<p>Realizado por: Edgardo Martínez Narváez Universidad del Cauca edgardonarvaez@unicauca.edu.co</p>	<p>Anotaciones:</p> <p>GIC Control indicador de calibre (computador) M Válvula y actuador rotativos FI Indicador de caudal (rotámetro) PI Indicador de presión (manómetro) AS Alimentación de aire</p>
--	--	---

Fuente: El autor, junio de 2015.

Con base a lo anterior, se da cumplimiento al requerimiento RA6. Además, los componentes y el software necesarios para implementar el sistema se detallan posteriormente (ver secciones 3.3.3 y 3.4.1).

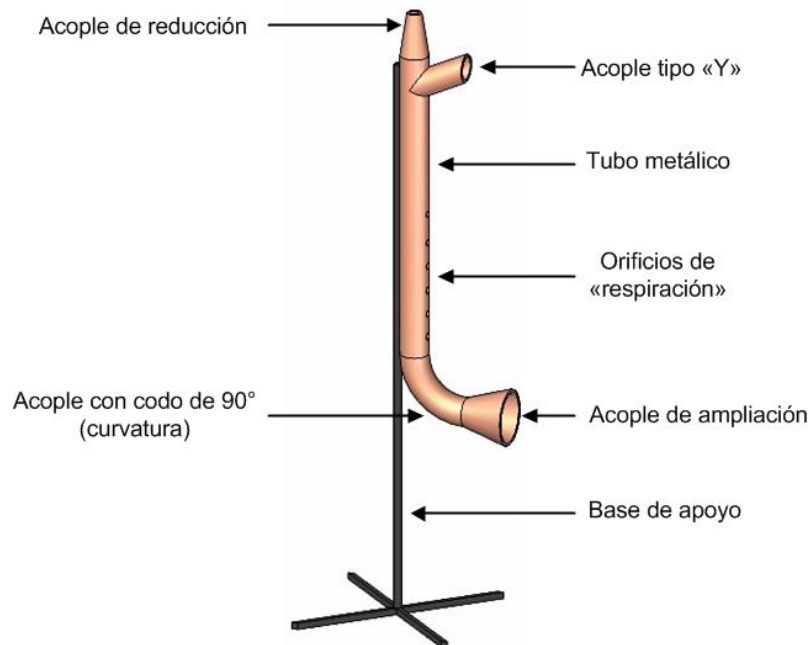
3.3. Cumplimiento de requerimientos hardware del proceso PROPEBIPAY

Se muestran las soluciones propuestas relacionadas con los requerimientos hardware (ver sección 2.5.3) que se establecieron según el diagnóstico del proceso PROPEBIPAY.

3.3.1. Tubular para refrigeración del cordón de PLA injertado

El tubular propuesto hace parte del sistema completo para la refrigeración del cordón de PLA injertado (ver Figura 49), relacionado en conjunto con el extrusor, compresor de aire y peletizador. En términos específicos, el sistema de refrigeración cuenta con 6 accesorios conformantes (ver Figura 61): tubo metálico, acople tipo “Y”, acople de reducción, acople de ampliación, acople con codo de 90° (o curvatura en el tubo) y base de apoyo.

Figura 61. Tubular y accesorios propuestos para la refrigeración del cordón de PLA injertado.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

La razón de proponer el tubular de refrigeración metálico, consiste en aprovechar la propiedad que tienen los metales para la conductividad térmica. Dentro de los metales comercialmente más comunes, los que mejor transfieren calor son el aluminio y cobre [58].

Respecto al funcionamiento, el cordón de PLA injertado ingresaría por la abertura con el acople de reducción y saldría por el orificio con el acople de ampliación. La idea de

realizar una reducción al ingreso y una ampliación a la salida, consiste en asegurar que el flujo de aire suministrado por el orificio del acople tipo “Y” circule en dirección entrada – salida, asegurando el contacto directo del aire con el cordón a refrigerar. En cuanto a los orificios de “respiración”, estarían ubicados estratégicamente después de la mitad del tubular con el fin de evacuar el aire caliente que se va alojando al interior del cilindro.

Con el tubular y los accesorios propuestos se da cumplimiento al requerimiento RH1.

3.3.2. Uso del módulo de vibración adjunto a la tolva del extrusor

En la extrusión, la acción de proceso de ingreso de materiales normalmente se hace a través de una tolva. Cuando solo se tiene en cuenta la gravedad para el descenso del material, puede originarse estancamiento en el proceso. En ese sentido, se recomiendan dispositivos de acción vibratoria que ayudan al ingreso constante del material [27].

El proceso PROPEBIPAY cuenta con una tolva de sección circular, que por su geometría permiten una compresión gradual en toda su superficie. Además, se dispone de un vibrador neumático de rodillo (marca Netter Vibration, tipo NCR 3) adjunto a la tolva para alimentación (ver Figura 63). Sin embargo, los jóvenes investigadores no utilizan el módulo de vibración ya que ayudan al ingreso del material mediante empuje (ver Figura 9 y 62).

Figura 62. Empuje del material ingresado.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

Figura 63. Tolva para alimentación y vibrador neumático de rodillo.



Fuente: El autor, mayo de 2015.

El vibrador neumático de rodillo NCR 3 permite: disminuir la fricción en materiales granulados o en polvo, facilitar el vaciado de material y prevenir arcos, puentes o aglomeración de material en tolvas. La vibración multidireccional de este dispositivo se origina por la fuerza centrífuga generada por un rodillo que gira sobre un aro a alta frecuencia. Dicho movimiento se produce por la presión del aire, por lo tanto, la vibración puede ser regulada al controlar la presión de entrada [59].

En términos prácticos, la implementación del vibrador neumático de rodillo NCR 3 se hace conectando el suministro de aire a la entrada del dispositivo (ver Figura 63). Además, para controlar la vibración deseada en la tolva, es necesario agregar una válvula manual para

regular la presión de aire. Así, el conjunto de todos los elementos para el funcionamiento del vibrador son: compresor de aire, manómetro, válvula manual y manguera.

Teniendo en cuenta la explicación previa de cómo implementar el vibrador neumático de rodillo NCR 3 y los beneficios que permite, se da cumplimiento al RH2.

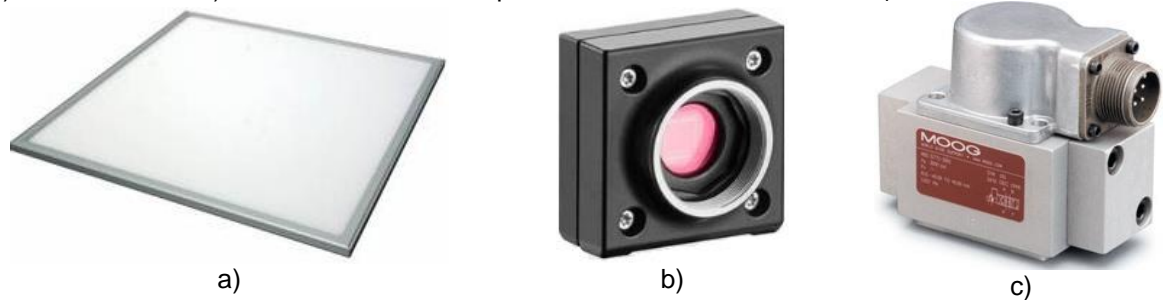
3.3.3. Dispositivos y equipos para control automático de operación de soplado de la película biodegradable

La lista requerida para la implementación del control mediante un sistema con visión de máquina consiste en 7 dispositivos y equipos: diodos emisores de luz (LED por sus siglas en inglés), cámara CMOS, computador, servoválvula, rotámetro, manómetro y compresor de aire. Además, se necesita un circuito electrónico de potencia o acople entre la señal de orden de control y la energización de la servoválvula.

De los equipos requeridos previamente, ya se tiene a disposición lo siguiente: computador, manómetro y compresor de aire. También se cuenta con un rotámetro, sin embargo este mide hasta un caudal máximo de 2500 CC/MIN, insuficiente para el que se presenta en el proceso, siendo requerido un rotámetro con mayor rango.

Las recomendaciones de los dispositivos faltantes son: iluminación *backlight* mediante un panel de LED, cámara industrial compacta CMOS con interfaz USB, y servoválvula para usos generales (ver Figura 64).

Figura 64. Dispositivos recomendados para control por visión de máquina de operación de soplado. a) Panel de LED. b) Cámara industrial compacta CMOS con interfaz USB. c) Servoválvula.



Fuente: Tomadas de [60]–[62], respectivamente, junio de 2015.

Además de la servoválvula para el control del caudal de aire, se propone una válvula manual para ajustar el caudal de trabajo nominal, es decir el valor óptimo de soplado cuando el calibre del tubular es semejante al deseado. Dicha válvula manual se ubica en serie con la servoválvula de control (ver Figura 60).

Con los equipos que se ya se cuentan y los que se propusieron previamente, se da cumplimiento al requerimiento RH3.

3.4. Cumplimiento de requerimientos software del proceso PROPEBIPAY

Se presentan la propuesta de solución respecto al requerimiento software para implementar el control de la operación de soplado (ver 2.5.4).

3.4.1. Software para programar el control por visión de máquina de operación de soplado

El software al que se hace alusión está enfocado básicamente en el análisis y procesamiento de las imágenes para la determinación del calibre del tubular biodegradable soplado.

A nivel comercial existen múltiples software [63]–[66] especializados en el procesamiento de imágenes y provistos de entornos de programación con interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés).

Para tareas industriales con alta dificultad, el software comercial es realmente necesario. Sin embargo, en la operación de soplado es posible realizar la programación de análisis con otras herramientas más ejecutables económicamente. En ese sentido se presenta OpenCV (Visión por computador de código abierto), una librería de alta calidad que permite implementar técnicas de visión de máquina para varias aplicaciones [67]. Además, OpenCV es gratis para usos comerciales y académicos ya que se libera bajo la licencia de Distribución de Software Berkeley (BSD por sus siglas en inglés), cuenta con interfaz de programación en lenguaje C++, C, Python y Java, soporta sistemas operativos Windows, Linux, Mac OS, iOS y Android, y fue diseñado para la eficiencia computacional en aplicaciones de tiempo real [68].

Con la propuesta de OpenCV se da cumplimiento al requerimiento RS1.

4. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE PROCESOS PRODUCTIVOS

En la literatura [69], [70], el concepto “escalamiento” básicamente es aumentar o disminuir desde una escala a otra durante la concepción de un nuevo producto, procedimiento o tecnología. También se relaciona con el “escalado”, que además de ser sinónimo, es una traducción del inglés *scale-up* o *scale-down*, que según el caso, hace referencia a escalamiento ascendente o descendente. En general el escalamiento está compuesto por 6 etapas: concepción, laboratorio, banco, planta piloto, planta semi-industrial o de demostración y planta industrial (en estas últimas 2 etapas se incluye la comercialización).

Para el presente documento por escalamiento industrial se hará referencia al escalado ascendente (*scale-up*), proceso en el que se alcanza la producción industrial y comercial, teniendo en cuenta logros científicos de investigaciones a nivel de laboratorio o a una escala más pequeña.

La importancia de plantear el escalamiento industrial en un proceso determinado se resume en lograr la comercialización final del producto generado. Sin embargo, al no realizarse un procedimiento de escalamiento organizado y dirigido correctamente al proceso en cuestión, surgen tiempos extensos de puesta en marcha y costos elevados. Respecto a lo anterior, es de gran importancia que se estudie detalladamente el proceso a escalar para conocer las etapas que deben afrontarse con una planificación adecuada, utilizando el menor tiempo posible y los recursos mínimos [71].

En el desarrollo temático de este capítulo se presenta el estado del arte respecto a escalamiento industrial realizado en diversos procesos aplicados. Finalmente se plantea un procedimiento estructurado y ordenado para aplicar escalamiento industrial de procesos productivos, además se hacen algunas orientaciones de dicho procedimiento al proceso PROPEBIPAY.

4.1. Escalamientos aplicados alrededor del mundo en diversos procesos

Alrededor del mundo se han realizado varios trabajos sobre escalamiento industrial a procesos aplicados [72]–[79]. Dicha información muestra la diversidad tanto de los procesos como de la manera en la que se escalan.

4.1.1. Condiciones de operación de extrusores de tornillo simple para mezclas de harina de trigo. Parte 2: montaje, arranque y operación de una planta industrial [72]

El trabajo sobre: Condiciones de Operación de Extrusores de Tornillo Simple para Mezclas de Harina de Trigo. Parte 2: Montaje, Arranque y Operación de una Planta Industrial, se realizó en México, en el año 2007.

Mediante la extrusión térmica se obtienen variedad de productos, por ejemplo alimenticios con características y textura adecuada para el consumo humano. En este caso, las botanas (aperitivo) extruidas a base de harina de trigo presentan gran interés por ser una fuente nutritiva de proteínas e hidratos de carbono.

Después de realizar estudios a nivel de laboratorio, donde se obtienen los datos principales de procesamiento (velocidad de giro del tornillo, humedad, tipo de harina y cantidad de almidón de maíz), se realiza el escalamiento a nivel industrial dividido en 3 etapas: selección, montaje y arranque; para procesar 350 kg/h.

Previo a la selección enfocada a equipos, se evalúa la aceptación del producto por los consumidores, estableciéndose un cuestionario sobre el nivel de agrado dirigido a universitarios de ambos sexos (entre 18 y 23 años). Así, se conocen los atributos sensoriales más importantes del producto.

La selección parte de 2 estudios fundamentales: equipos necesarios en la planta y conocimiento del mercado para saber la cantidad de producto a ofrecer y por lo tanto la capacidad de los equipos. Teniendo en consideración los recursos económicos para la puesta en marcha del proyecto, se establecen ventajas y desventajas de los equipos en cuestión, según diferentes fabricantes. Además, la selección no se limita a los equipos, sino que tiene presente la distribución óptima del espacio físico disponible y el personal necesario para operar la planta, haciendo uso de la participación de expertos en diferentes áreas (trabajo interdisciplinario).

El montaje parte de verificar el correcto funcionamiento de los equipos. Se deben considerar: trayectorias de tuberías, cableado eléctrico, instalación estratégica para mantenimiento y limpieza, instrumentación necesaria de los equipos y reglas de seguridad.

Finalmente, el arranque parte de una revisión previa del correcto funcionamiento de la planta, incluyendo aspectos de: calibración, seguridad y disponibilidad de materiales e insumos. De acuerdo a lo anterior, se pone en marcha el proceso siguiendo la formulación y procedimiento establecidos con anterioridad.

4.1.2. Propuesta del diseño para el escalamiento a planta industrial, partiendo de una planta piloto, para el precocido y beneficiado de arroz [73]

La Propuesta del Diseño para el Escalamiento a Planta Industrial, Partiendo de una Planta Piloto, para el Precocido y Beneficiado de Arroz, se realizó en El Salvador, en el año 2008.

A nivel mundial, el arroz es el segundo cereal de mayor demanda después del trigo. En El Salvador hay gran consumo y para el 2008 la producción cubría el 40 % de la demanda, el resto se importaba. Así, el aumento del precio y demanda han ocasionado la necesidad de una producción mayor por los agricultores.

Inicialmente se presenta un estudio detallado y descriptivo del cultivo y procesamiento del arroz, incluyendo sus variedades y clases de cultivos, contextualizando con datos reales la situación de la producción mundial y local, y organizando la información de cómo se lleva a cabo su producción industrial con la explicación de etapas y equipos interactuantes. Además, previo a la propuesta de escalamiento a planta industrial, se muestra la teoría para determinar: densidades, grado de flujo y humedad; lo que se tendrá en cuenta posteriormente, en especial para determinar las características de los equipos a utilizar.

En resumen, el procedimiento para la propuesta de escalamiento del proceso de precocido y beneficiado de arroz se realiza en 3 pasos: desarrollo experimental del proceso a nivel de planta piloto, análisis de esos resultados y diseño de la planta propuesta.

El desarrollo experimental realizado en planta piloto permite determinar las propiedades principales del producto: densidad³, grado de flujo y humedad. Además, se establecen curvas de secado y pruebas de calidad relacionadas con el rendimiento operativo en planta piloto (ejemplo: de 143 g de arroz pulido se obtuvo 87 % de arroz entero y 13 % de arroz quebrado).

El análisis de los resultados experimentales en planta piloto organiza y aterriza la información con datos reales aplicados al proceso, con los cuales se determinará la capacidad de producción para cada etapa cuando se plantee el diseño a escala industrial.

Finalmente, el diseño de la planta industrial muestra el cálculo de volúmenes de producción⁴, balances de materia y la propuesta formal de la planta con diagramas de flujo de proceso, de equipos y planos de distribución física. Además, se realiza un estudio de aprovechamiento de los residuos generados, resaltando cantidades y posibles disposiciones finales. En términos prácticos, los volúmenes de producción muestran la magnitud de fabricación de la planta (17.706 toneladas anuales de arroz granza) y la capacidad que deben tener los equipos (6,1 m³ de arroz, funcionando 14 horas al día), mientras que los balances de materia determinan la cantidad aproximada de materiales que entran y salen en cada operación del proceso.

4.1.3. Proceso de escalamiento de pastilla ibuprofeno [74]

El Proceso de Escalamiento de Pastilla Ibuprofeno se realizó en India, en el año 2011.

El ibuprofeno es una droga no esteroide antiinflamatoria generalmente usada como analgésico.

El escalamiento en este proceso se relaciona con el incremento del volumen de producción de salida al aumentar la velocidad de producción. Así, el escalamiento realizado se enfoca con un estudio completo de mercado, comprobando la viabilidad de la comercialización de la pastilla, mediante el aumento progresivo de los volúmenes de producción. En ese sentido, para la industria farmacéutica se siguen 3 pasos principales de escalamiento: lotes de prueba, exhibición y validación. Una vez finalizado el lote de validación, se producen las pastillas de ibuprofeno a gran escala.

En el lote de prueba se manejan pequeñas cantidades que se obtienen después de los estudios en la división de Investigación y Desarrollo (I+D). Además, en este punto se comprueba la estabilidad y disolución de las pastillas.

³ Se considera de interés la manera sencilla como se halla la densidad del arroz: se deposita el producto en un recipiente de volumen conocido y se mide su masa; luego se usa el concepto de densidad igual a masa entre volumen.

⁴ Para hallar los volúmenes de producción se tiene en cuenta la densidad del producto y la producción que se pretende alcanzar, relacionándolas mediante el concepto de volumen igual a masa entre densidad.

En el lote de exhibición principalmente se pretende la aprobación del mercado de los países a los cuales se exporta el producto, por lo tanto, se caracteriza por tener una duración larga de 9 a 12 meses.

Finalmente, en el lote de validación se comienza la exportación de las pastillas después de haber obtenido la aprobación de los países. Además, se tecnifica y compila la información recolectada, lo que permite contar con documentos de seguimiento para el departamento de producción.

4.1.4. Desarrollo tecnológico para elaborar vino blanco común en Misiones, con evaluación económica a escala industrial [75]

El Desarrollo Tecnológico para Elaborar Vino Blanco Común en Misiones, con Evaluación Económica a Escala Industrial, como es mencionado, se realizó en la provincia de Misiones, Argentina, en el año 2012.

Gracias al desarrollo del proyecto Profruta en la provincia de Misiones, se ha diversificado e incrementado la producción del cultivo de vid. Por ejemplo, la cosecha de finales del 2010 e inicio del 2011 generaron cerca de 800 toneladas de uvas, comercializando como fruta fresca el 85 % y dirigiendo el resto a la elaboración de vino común para autoconsumo familiar. En ese sentido, gracias a que los entes reguladores argentinos permiten la elaboración y comercialización dentro del país de vinos comunes, se origina una oportunidad para la diversificación y desarrollo productivo.

Este caso de estudio es interesante ya que muestra una secuencia organizada y completa de la manera en que se llega a la propuesta de escalamiento industrial. A pesar de tener escasa información tecnológica respecto a la metodología científica de elaboración de vino blanco común, se parte de un análisis profundo del estado del arte sobre vinificación, obteniendo acciones metodológicas aplicadas inductiva y deductivamente en la conformación de las 3 escalas: laboratorio, planta piloto y nivel industrial.

Desde laboratorio a nivel industrial, el escalamiento del proceso consiste en 8 etapas distribuidas en las 3 escalas. En laboratorio: elaboración de vino blanco seco común, evaluación de los parámetros de seguimiento, obtención del modelo matemático del proceso y validación del vino para consumo humano. En planta piloto: elaboración de vino mediante un procedimiento tecnológico establecido y evaluación de los rendimientos para cada operación. Por último, a nivel industrial: dimensionamiento de los equipos para el procedimiento establecido y evaluación económica del desarrollo tecnológico realizado.

En la escala de laboratorio se utilizan muestras de 5 kg de uvas en 2 variedades: Niágara Rosada (NR) e Isabella Tinto (IT). En cuanto a los datos, se hace una cronología organizada que permite obtener información completa de densidad, potencial de hidrógeno (pH), sólidos solubles totales, masa, volumen, temperatura, entre otros. Mediante el modelo matemático obtenido se representan adecuadamente los resultados reales del proceso.

En la escala de planta piloto, gracias a la información de laboratorio sobre parámetros y materiales específicos a utilizar, se parte del criterio matemático de semejanza⁵ aplicado a similitudes: mecánicas, geométricas, térmicas y de concentración; para el diseño de equipos y proceso, permitiendo los ensayos de vinificación en esta escala. Se establece un tamaño de muestra de 200 kg de uvas (factor de cambio de escala de 40), con lo que se sigue el procedimiento tecnológico propuesto y se obtiene el rendimiento general y para cada operación.

Finalmente, en la escala industrial se dimensiona el procedimiento evaluado en la planta piloto, partiendo de un factor de escala ajustado a una unidad productiva real. Así, la producción que se pretende cumplir es de 8.000 kg/h, lo que origina un factor de escala de 40 con el que se estima el tamaño de la planta y equipamiento industrial. Por último, se realiza el estudio económico respecto a la inversión de capital y costos de producción.

4.1.5. Diseño de una planta para la extracción del aceite esencial de palo santo (*Bursera graveolens*) mediante destilación por arrastre de vapor [76]

El Diseño de una Planta para la Extracción del Aceite Esencial de Palo Santo (*Bursera Graveolens*) Mediante Destilación por Arrastre de Vapor, se realizó en Ecuador, en el año 2014.

El palo santo es un árbol aromático con posibilidad de extracción de su aceite, donde la importancia se enfoca en las propiedades de los componentes químicos del aceite: antiinflamatorio, antiartrítico y antineoplasmático. Además, existe la posibilidad de realizar investigaciones que conlleven a nuevos compuestos químicos farmacológicos derivados de este aceite, originándose la oportunidad de crear nuevas empresas de procesos industriales para el desarrollo de los países, específicamente Ecuador.

De varios métodos para extracción de aceites esenciales (con grasa caliente, solventes derivados del petróleo y fluidos supercríticos), el utilizado en este caso de estudio es la destilación por arrastre de vapor de agua ya que permite controlar la temperatura y cantidad de vapor para no generar recalentamiento del aceite, conservando sus características químicas, además no requiere equipos con tecnología de punta y sus costos son bajos.

El diseño de la planta (industrial) parte de estudios experimentales realizados en laboratorio en una planta semi-piloto, donde se evalúa la influencia de la materia prima respecto al rendimiento del proceso. Posteriormente, se realiza el dimensionamiento de los equipos mediante el cálculo de los volúmenes de producción para cada uno. Una vez se cuenta con los datos reales de proceso, se plantea la distribución de la planta escalada, haciendo uso de diagramas y planos. Por último, se hace un análisis económico según la cantidad de producto obtenido por día, costo de producción y el precio de venta resultante.

A nivel experimental de planta semi-piloto se procesan 15 kg de materia prima (madera) y se determina el rendimiento del proceso al utilizar dos presentaciones (2,77 % para

⁵ Permite obtener un factor (k) de cambio de escala que es igual a la magnitud a gran escala (m') entre la de menor escala (m).

astillas y 3,49 % para virutas). Es de gran importancia tener presente y organizar la información obtenida en esta escala, ya que de esta parte el dimensionamiento y diseño de la planta industrial.

Concerniente al diseño de los equipos, se dimensionan teniendo en cuenta: cantidad de materia que se trataría diariamente a gran escala (270 kg), construcción del balance de masa para cada etapa según los flujos del sistema continuo durante la extracción, cálculo experimental y relación de las densidades aparentes de los materiales e insumos en cada etapa, y aplicación de factores de seguridad según sea el caso (ejemplo: el volumen de producción que debe soportar el tanque extractor es 2,7 m³, pero agregando el factor de seguridad del 10 %, serían 3 m³).

Respecto a la distribución de los equipos de la planta diseñada, se realiza: diagrama de flujo de proceso, diagrama de bloques y plano con la vista superior. En este punto se tiene la esquematización de la planta industrial, agrupando toda la información hallada previamente.

Finalmente, se determina la inversión económica que debería hacerse según un análisis que relaciona el valor de venta del producto con la cantidad de aceite obtenido y los costos de materiales, equipos y producción; resultando la viabilidad económica del proceso.

4.1.6. Diseño de equipos de planta de demostración y escalamiento desde planta piloto de un proceso de lixiviación y extracción de solventes [77]

El Diseño de Equipos de Planta de Demostración y Escalamiento desde Planta Piloto de un Proceso de Lixiviación y Extracción de Solventes, se realizó en España, en el año 2015.

Generalmente el germanio (Ge) se utiliza para la fabricación de semiconductores, sin embargo, hay usos innovadores en aplicaciones industriales tecnológicas que han ocasionado el aumento de su precio, haciéndolo llamativo.

Una manera alternativa de obtener Ge es mediante combustión y gasificación de las cenizas volantes (CV) del carbón, con la que se obtiene hasta 10 veces más Ge que en el carbón original. En este caso de estudio se extrae Ge de las CV de carbón mediante lixiviación (extracción de materia soluble por disolvente líquido) y separación por extracción de solventes.

A partir de los estudios y resultados experimentales obtenidos en laboratorio y planta piloto, se diseñan los equipos para la puesta en marcha de una planta de demostración o planta semi-industrial. Se parte de un flujo de proceso de 5 kg/h de CV de carbón en la planta piloto, a 200 kg/h en la planta semi-industrial.

La producción real de CV de la empresa española ELCOGAS IGCC *Power Plant* es de 2.000 kg/h, parámetro referencia para determinar el flujo de proceso en escala semi-industrial. Para llegar al valor de escalamiento de 200 kg/h de CV de carbón, se sigue la recomendación de algunos autores [80] de mantener un factor conservador de escalamiento del 10 % para la puesta en marcha de procesos nuevos.

El diseño de los equipos y del escalamiento a planta semi-industrial parte de realizar, de forma sencilla, el balance de masa con los datos obtenidos en la planta piloto. Después de analizar este punto, resulta que se tiene en cuenta el aumento de la planta respecto a los flujos de proceso para el balance de masa, es decir, al pasar de una capacidad de 5 kg/h de CV de carbón a 200 kg/h, se halla un factor de aumento de 40 veces la producción. Respecto a este análisis, y algunos porcentajes específicos para ciertos materiales, se realiza el balance de masa con el que se aproximan los valores de los nuevos flujos de proceso para la escala semi-industrial. Así, se ajustan y dimensionan los equipos que se utilizarán, además, se tienen en cuenta elementos extra para un día de operación en caso de falla. Finalmente, se hace una estimación de costos, teniendo presente la metodología de Lang que consisten en 2 pasos: estimación de costos de los equipos principales y corrección de dicha estimación mediante el factor de Lang.

4.1.7. Escalamiento mediante modelos matemáticos

El enfoque de escalamiento mostrado en los casos de estudios previos se relaciona con el ajuste de la planta respecto al aumento de producción, con orientación industrial. Sin embargo, también existen trabajos sobre escalamiento con argumentación teórica, esto es, mediante modelos matemáticos y procedimientos analíticos.

Muestra de lo anterior, en México a finales del 2005 se realizó el Escalamiento del Proceso de Secado de Bagazo de Caña [78], en el cual se modela la planta piloto con ecuaciones diferenciales de los balances de materia, energía y momento; generando información por simulaciones a escala industrial con datos originados de la literatura y utilizándola para evaluar la relación con las variables de proceso mostradas en el modelo matemático. Básicamente, los parámetros principales para el proceso a nivel industrial se van obteniendo por las simulaciones del modelo del proceso, que a su vez se va modificando (“puliendo”) según esos resultados, hasta lograr el modelo a escala industrial.

Por otro lado, en la Universidad Nacional de Colombia aproximadamente desde el 2009 se han publicado tesis de maestría, doctorado y artículos sobre escalamiento de procesos mediante modelos fenomenológicos [79], [81], [82]. Se presentan las formas tradicionales de escalamiento de procesos (análisis adimensional, semejanza geométrica, relaciones empíricas provenientes de un grupo de datos y modelos construidos con dichas relaciones empíricas), considerando que la representación fiel del proceso por modelos matemáticos es una alternativa exacta de escalamiento para experimentación y análisis dimensional. En términos generales, el método propuesto se basa en el Modelo Semifísico de Base Fenomenológica del proceso (modelos matemáticos basados en parte por principios físicos y químicos) y se relaciona con teoría de control para determinar el Régimen de Operación (RO) del proceso, de tal forma que partiendo el Punto de Operación (PO) deseado, la nueva escala de la planta pueda situarse alrededor de dicho PO, pero conservando el RO.

4.2. Planteamiento del procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos

Gracias al estado del arte sobre escalamiento industrial en diversos procesos, se generaron aportes y falencias principales (ver Tabla 17), aumentando el conocimiento para fundamentar el procedimiento de escalamiento a proponer.

Tabla 17. Análisis del estado del arte sobre escalamiento industrial de procesos.

Aportes	Estudio de mercado respecto a la aceptación del producto.
	Estudio económico para determinar la inversión y rentabilidad que se lograría en el proceso.
	Unidad productiva real como referencia para establecer el volumen de producción a cumplir.
	Principio de semejanza con el que se establece el factor de aumento (k) del escalamiento.
	Determinación experimental de densidad.
	Rendimiento operativo.
	Esquematización mediante diagramas y planos. Se tiene en cuenta la disposición del espacio físico con el que se debe contar.
	Factor de seguridad para los volúmenes de producción con los que se dimensionan los equipos.
	Factor conservador de seguridad para el volumen de producción a cumplir.
	Disposición final de los residuos generados.
	Tener presente: mantenimiento y limpieza de equipos, reglas de seguridad y recurso humano.
	Necesidad de trabajo interdisciplinario.
	Evaluación de varios fabricantes para determinar los equipos más adecuados.
Falencias	La información que muestra los procesos industriales usados como referencia, es descriptiva, textual y extensa.
	La información de los procesos a escala menor carece de esquematización.
	Mediante modelos matemático se tiene fundamento teórico que genera un escalamiento bastante aproximado. Sin embargo, modelar matemáticamente un proceso podría ser altamente complicado, tedioso y en algunos casos, improbable.
	Generalmente, el escalamiento industrial se ajusta a la particularidad y tipo de proceso. En ese sentido, no hay consenso sobre un procedimiento estándar recomendado para tomarlo como referencia, independientemente del tipo de proceso.

Fuente: El autor, octubre de 2015.

Teniendo en cuenta lo anterior, específicamente los inconvenientes principales que se presentan, se plantea un Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos organizado en 6 pasos:

1. Estudio del proceso a escala menor.
2. Estudio del proceso a escala mínimamente aumentada.
3. Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento.
4. Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente.
5. Determinación de la planta física en la escala industrial.
6. Organización del escalamiento industrial logrado.

4.2.1. Estudio del proceso a escala menor

Por lo general los proyectos aplicados se originan por la concepción inicial de una idea, y su desarrollo comienza en una escala menor tomada como punto de partida. Dicha escala suele ser a nivel de laboratorio. Así, para el estudio del proceso en esta escala se siguen algunos ítems de manera ordenada.

4.2.1.1. Esquematización y documentación

A lo largo del procesamiento en laboratorio se establecen 2 periodos: desarrollo aplicado de la investigación sobre la idea planteada y obtención de resultados finales (generación del producto deseado).

En el primer periodo, se hace la esquematización con diagramas de flujo que segmenten todo el proceso general en etapas. Así, se muestra el proceso dividido en etapas conformantes, además, se incluyen los materiales que ingresan y resultan en cada una.

- ✓ Para PROPEBIPAY se construyó el diagrama de flujo de proceso por etapas (ver Figura 31).

En el segundo periodo, cuando ya se ha obtenido el producto final deseado, se realiza otra esquematización más específica con diagramas de flujo respecto a operaciones conformantes de cada una de las etapas. Para la organización formal y documentada del proceso, se usa el estándar ISA 88.01 [38], con la cual se logra dividir adecuadamente el proceso en: acciones de ejecución, planta física y procesos resultantes.

- ✓ Para PROPEBIPAY se construyó el diagrama de flujo de proceso por operaciones (ver Figura 32).
- ✓ Se modeló el proceso PROPEBIPAY en términos de ISA S88.01, detallando sus 3 modelos: proceso, físico y control procedimental (ver sección 2.3).

Por otro lado, durante cada prueba y ejecución, es indispensable que haya una colección ordenada de datos mediante el uso de formatos unificados en consenso por el grupo de investigadores conformantes del proceso.

- ✓ Por ejemplo, para PROPEBIPAY se desarrolló un formato de seguimiento de parámetros relacionados con las variables principales en cada procedimiento de unidad o etapa (ver Tabla 13).

4.2.1.2. Cálculo de densidades aparentes

Es importante conocer el valor de las densidades de los materiales que ingresan a cada operación del proceso, ya que estos valores se utilizan para hallar los volúmenes de producción requeridos para la escala industrial a la que se pretende llegar.

Mediante la relación de densidad, masa y volumen (ver Ecuación 1), se pueden hallar las densidades aparentes de manera experimental y sencilla.

$$1) \quad \rho = \frac{m}{v}$$

Donde, la masa (m) se mide usando una balanza y el volumen (v) se halla teniendo en cuenta un recipiente con volumen definido. Por ejemplo, se deposita almidón de yuca en un recipiente de 1.000 cm³ (1 L) hasta alcanzar dicha medida, luego, se mide la masa del almidón depositado y se relaciona con el volumen mediante la ecuación (1).

Se tiene en cuenta que hay consideraciones extras para aumentar la precisión en el cálculo de densidades aparentes, por lo cual la experiencia y conocimiento de los investigadores se hace fundamental en este punto.

4.2.1.3. Estudio de mercado, unidad productiva

En resumen, la importancia del estudio de mercado se enfoca en la determinación de la unidad productiva real. En ese sentido, se establece cuantitativamente la población a la que irá dirigido el producto fabricado, es decir la demanda a satisfacer.

Por ejemplo, para PROPEBIPAY se tendría en cuenta la necesidad de bolsas de almácigos para sembrado de plantas de café en el departamento del Cauca, Colombia. En este punto, se indagaría sobre la cantidad de plantas que se siembran anualmente, por ende, aproximando el número requerido de bolsas para almácigos. Dicha información sería la unidad productiva real que se tomaría como referencia.

4.2.1.4. Primer estudio de factibilidad

Finalmente, es importante conocer si hasta el momento es posible y viable escalar el proceso para comercialización. La factibilidad en este punto es orientada según la evaluación y análisis crítico de los resultados logrados, lo cual se realiza por parte de los integrantes directos del proyecto, quienes conocen a profundidad el proceso.

Es de notar que la factibilidad es preliminar en esta escala, por lo tanto, la idea no consiste en establecer un estudio detallado y complejo, sino evaluar de forma subjetiva, pero argumentada, los logros y dificultades (“pros y contras”) durante la ejecución de todo el proceso en laboratorio.

4.2.2. Estudio del proceso a escala mínimamente aumentada

En ocasiones es necesario proyectar o aumentar la producción inicial del producto, llegando a lo que se conoce normalmente como escala de planta piloto. En la literatura se recomienda un aumento de escala de 1:3 – 1:5 [69], pero la determinación de este valor dependerá del juicio y experiencia que han conseguido los investigadores del proceso en cuestión, considerando la capacidad real de incremento con la que se cuenta hasta el momento.

Sin embargo, cuando la escala a nivel de laboratorio es apta y permite la determinación de los ítems que se describirán a continuación, no es necesario plantear el aumento mínimo de escala.

4.2.2.1. Estudio de variables principales de proceso

Primero, se establecen y organizan las variables que interactúan directamente en cada operación del proceso.

- ✓ Para PROPEBIPAY se establecieron las variables principales, haciendo uso del conocimiento en temas de control para organizarlas en variables controladas y manipuladas, según cada operación conformante del proceso (ver Tabla 14).

Segundo, se analizan y relacionan dichas variables para conocer su comportamiento ante el pequeño cambio de escala. Por ejemplo, cómo se afectaría la temperatura en el secado de almidón de yuca, cuando se pasa de calentar 1 kg a 5 kg de almidón.

4.2.2.2. Rendimiento obtenido

En contexto, el rendimiento muestra la información sobre lo que resulta en el proceso respecto a lo ingresado, esto en términos de cantidades porcentuales. Por ejemplo, mediante el rendimiento se puede conocer la relación porcentual de la cantidad de película biodegradable obtenida, respecto a la cuantía de almidón de yuca y ácido poliláctico ingresado como materia prima.

Además, es de interés realizar el rendimiento específico, es decir, el que involucra las relaciones de cantidades respecto a cada una de las operaciones conformantes de todo el proceso, lo que permite obtener información concreta según cada subproceso.

4.2.2.3. Consumo energético y de materiales

En este punto, se requiere conocer el consumo de energía que se necesitó para la puesta en marcha de la planta piloto (o del laboratorio, según se haya determinado). Este gasto energético considera 3 grupos usados generalmente en procesos productivos: energía eléctrica, insumo para combustión (normalmente gas) y tomas de aire.

Respecto al consumo de materiales, se organiza toda la información sobre la materia prima que se necesitó en el proceso, incluyendo aditivos o materiales “secundarios”. Una ayuda a tener en cuenta son los modelos de receta maestra y de control que propone el estándar ISA 88.01 [38], con lo cual se organiza la información sobre cómo hacer el procedimiento del proceso con los recursos actuales.

- ✓ Para PROPEBIPAY se elaboraron los modelos de receta maestra y de control (ver Tabla 15 y 16, donde además de los materiales, se especifican los equipos, lo que es información extra en este ítem).

Además, en el establecimiento del consumo de materiales, también se incluyen los servicios públicos de agua, alcantarillado, iluminación y demás.

4.2.2.4. Estudio del manejo de residuos

Se debe establecer el estudio en el que se considere la disposición final de los residuos generados.

En este punto hay un enfoque investigativo, en el que se determinen las diferentes opciones para ahondar este tema. Por lo tanto, se hará necesario disponer un área encargada del estudio de residuos, dada la importancia y complejidad que podría tener este ítem.

4.2.2.5. Segundo estudio de factibilidad

Con la información de información de los 2 últimos ítems y la experiencia adquirida hasta este punto, se realiza un segundo estudio de factibilidad. En otras palabras, aparte de la evaluación y análisis de los integrantes del proyecto, se debe incluir la información objetiva y cuantificada que se ha logrado del rendimiento y consumo energético y de materiales.

Además, se formula un estudio estadístico a pequeña escala, donde se hará necesario segmentar la población de acuerdo a la cantidad de muestras del producto que se pueda entregar. Finalmente, mediante encuestas, se determinaría el grado de satisfacción y aceptación del producto obtenido.

Evaluando las conclusiones que se obtienen en este estudio de factibilidad, se decide sobre la continuidad del escalamiento industrial. Sin embargo, no se deben tomar acciones trascendentales (cancelar el proyecto) cuando se obtengan resultados negativos, sin antes haber considerado opciones correctivas.

4.2.3. Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento

Antes de ahondar en los ítems a seguir, se debe considerar el apoyo interdisciplinario en este paso (aunque lo ideal es que sea de inicio a fin). Por ejemplo, en ocasiones los investigadores omiten o catalogan de baja importancia alguna información del proceso, la cual podría ser de valor para los diseñadores de la planta industrial.

En este paso se desarrolla el cálculo de los parámetros aproximados que se esperarían en la escala industrial propuesta.

4.2.3.1. Cálculo de volúmenes de producción

Los volúmenes de producción se refieren a la cantidad volumétrica de material que se debe producir para cumplir con la unidad productiva a la que se desea llegar.

Simplificando el volumen de la ecuación (1), se obtiene la relación de volumen, masa y densidad (ver Ecuación 2).

$$2) \quad v = \frac{m}{\rho}$$

Donde, la masa (m) resultó del estudio de mercado, es decir, la unidad productiva real, y la densidad aparente (ρ) se calculó en el estudio a escala menor.

Al usar el estándar ISA 88.01 previamente, se cuenta con la ventaja de tener segmentada la información de la planta física. Además, las operaciones, que a su vez conforman todo el proceso, se relacionan directamente con los módulos de equipo (ver Tabla 5). Teniendo esto en cuenta, se determinan los volúmenes de producción de acuerdo a las operaciones, ya que de esta manera se obtendrían los parámetros para dimensionar la planta de acuerdo a los módulos de equipos.

Además, al obtener los volúmenes de producción respecto a cada operación, y a su vez a cada módulo de equipo, se considera un factor de seguridad del 10% para dichos volúmenes. Por ejemplo, el volumen de producción que debe cumplir un tanque de almacenamiento es de 1 m³, pero agregando el factor de seguridad, el volumen de producción sería 1.1 m³.

4.2.3.2. Cálculo de factor de escalamiento

Otro parámetro que ayuda con la aproximación de valores en la nueva escala es el factor de escalamiento. Este representa la magnitud en la que se aumenta la escala, de acuerdo a la relación entre producción actual y deseada (ver Ecuación 3).

$$3) \quad k = \frac{m'}{m}$$

Donde, m' es la unidad productiva real y m lo cantidad que se logró producir a escala menor (laboratorio o planta piloto). Por ejemplo, si se pretende cumplir una producción mensual de 1.000 bolsas biodegradables para almacigos, y la fabricación a pequeña escala fue de 100 bolsas mensuales, el factor de escalamiento representaría un incremento de 10 veces.

El factor de escalamiento es importante debido a que podría usarse para aproximar cuantificadamente algunos valores de manera sencilla, por ejemplo: nuevos flujos de proceso, balances de materiales y algunos costos de producción.

4.2.3.3. Modificación cuantificada de variables principales de proceso

Después de haber realizado el estudio adecuado sobre las variables principales de proceso, se cuantifican según el factor de escalamiento. Por ejemplo, al conocer cómo se afecta la temperatura en el secado de almidón de yuca, se calcularía aproximadamente su valor según la magnitud de la nueva escala que se pretende cumplir.

En esta iteración de nuevo se considera muy importante el conocimiento de los investigadores sobre el proceso, quienes deberán ser los encargados primordiales de la cuantificación aproximada de las variables principales en la nueva escala.

4.2.4. Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente

En este paso se pretende coleccionar información de procesos que actualmente ya se ejecutan.

Es evidente que los procesos ya puestos en marcha deben relacionarse con el proceso en cuestión (el que se pretende escalar industrialmente). Sin embargo, hay la posibilidad que el proceso en cuestión no se relacione exactamente con alguno ya existente. En este caso, teniendo en cuenta el gran desarrollo de procesos productivos alrededor del mundo, al menos podría encontrarse un proceso actual que se relacione en parte. Por ejemplo, para PROPEBIPAY, en Colombia no hay un proceso funcionando industrialmente que tenga una relación exacta, sin embargo, producción de películas plásticas sintéticas se relaciona en parte.

Se aclara que previo a la ejecución de los siguientes ítems, se deben actualizar los modelos de ISA S88.01 que ya se han realizado del proceso en cuestión.

4.2.4.1. Organización de la información del proceso que ya opera industrialmente

Después de coleccionar y documentar toda la información sobre el proceso que ya funciona industrialmente, se construyen los 3 modelos de ISA S88.01. Idealmente se pretendería realizar los 3 modelos, sin embargo esto se limita a la accesibilidad que se tenga de la información, por lo que al menos la elaboración de uno de los modelos aún sería importante. Esto se explica en el siguiente ítem.

4.2.4.2. Comparación de modelos ISA S88.01 del proceso en cuestión y del que ya opera industrialmente

Se pretende relacionar los modelos construidos del proceso ya existente industrialmente, con los modelos obtenidos del proceso en cuestión, haciendo un análisis cruzado entre ellos. Con esta relación comparativa podrían resultar opciones a considerar en el nuevo proceso, las cuales solo se presentarían en la escala industrial y que en el laboratorio o en el piloto se desconocen totalmente. Sin embargo, se tiene en cuenta que una modificación en este punto puede ser compleja. Por lo tanto, la aprobación o no de aplicar las nuevas opciones, dependerá del análisis realizado por los investigadores y diseñadores del proceso en construcción, teniendo en cuenta la posibilidad de aumentar la eficiencia.

No obstante, se aclara que la receta del proceso (información que representa los requerimientos de fabricación para un producto específico) no debe alterarse cuando ya se han obtenido buenos resultados en el producto logrado. En ese sentido, el análisis comparativo debe hacerse cuidadosamente.

Al concluir este ítem, deben actualizarse los modelos ISA S88.01 que representan el proceso en cuestión.

4.2.5. Determinación de la planta física en la escala industrial

Para este paso es de gran importancia toda la información que se ha conseguido, específicamente los parámetros de escalamiento.

Se pretende la escogencia adecuada de los equipos que se requerirán en la nueva escala. Además, se tiene en cuenta la determinación del espacio físico necesario para la disposición de la planta.

4.2.5.1. Escogencia de equipos

Determinar los equipos adecuados para el proceso sería complejo de no contar con parámetros que permiten una segmentación específica y orientada a las necesidades propias del proceso. De acuerdo a las características aproximadas que se esperan en la escala industrial como: volúmenes de producción, flujos de proceso, balances de materiales y valores de variables principales de proceso; se comienza con la búsqueda de los equipos necesarios.

En lo posible, se evalúan al menos 3 fabricantes para cada opción de equipo, donde la escogencia del más adecuado se apoya en las opiniones interdisciplinarias de los

integrantes del proyecto. Por ejemplo, los diseñadores de la planta industrial deben tener presente el alto conocimiento de los investigadores sobre el proceso.

La información de los equipos que se han determinado se debe organizar en tablas con información real y concreta de cada uno, por ejemplo: capacidad, requerimiento de alimentación y costo.

4.2.5.2. Distribución de la planta

Según el dimensionamiento real de los equipos al que se llegó, se debe tener en cuenta la disposición física que se requiere para montar la planta. También hay que considerar el espacio provisto para: servicios personales (baños), almacenamiento, mantenimiento – limpieza y administración – control del proceso.

En ese sentido, se construyen planos en los que se especifique la distribución del espacio para la planta, según los aspectos nombrados previamente y los que, a consideración de los integrantes del proyecto, se deban agregar.

4.2.6. Organización del escalamiento industrial logrado

En este último paso se aterriza toda la información que se logró respecto al escalamiento industrial del proceso productivo.

4.2.6.1. Aspectos empresariales

En primera instancia, se construye la cadena de valor donde se representen las actividades principales y de apoyo que conforman el proceso en su nueva escala. El interés de la cadena de valor se orienta a la satisfacción de las necesidades del cliente y el cumplimiento de los objetivos organizacionales, por lo tanto está abierta a su actualización constante.

Segundo, se establece la misión y visión de la empresa, donde se muestre la ocupación e importancia de la organización y las metas que se desean conseguir a futuro. Como es visto, la cadena de valor, misión y visión tienen gran relación en cuanto a importancia y finalidad.

Por último, en cuanto a demás aspectos empresariales, se tiene presente que la puesta en marcha de la planta a nivel industrial conlleva a trámites administrativos empresariales (registro de la empresa y del producto, compra de materiales en las nuevas cantidades, entre otros), lo que debe tomarse en consideración por parte de los integrantes del proyecto encargados de esta área. Este estudio administrativo se tiene en cuenta, pero esta por fuera de la propuesta de escalamiento industrial a un nivel detallado.

4.2.6.2. Esquematación representativa de la escala industrial

Se realizan los diagramas de flujo por operaciones respecto a la escala industrial lograda, incluyendo datos de balance de materiales.

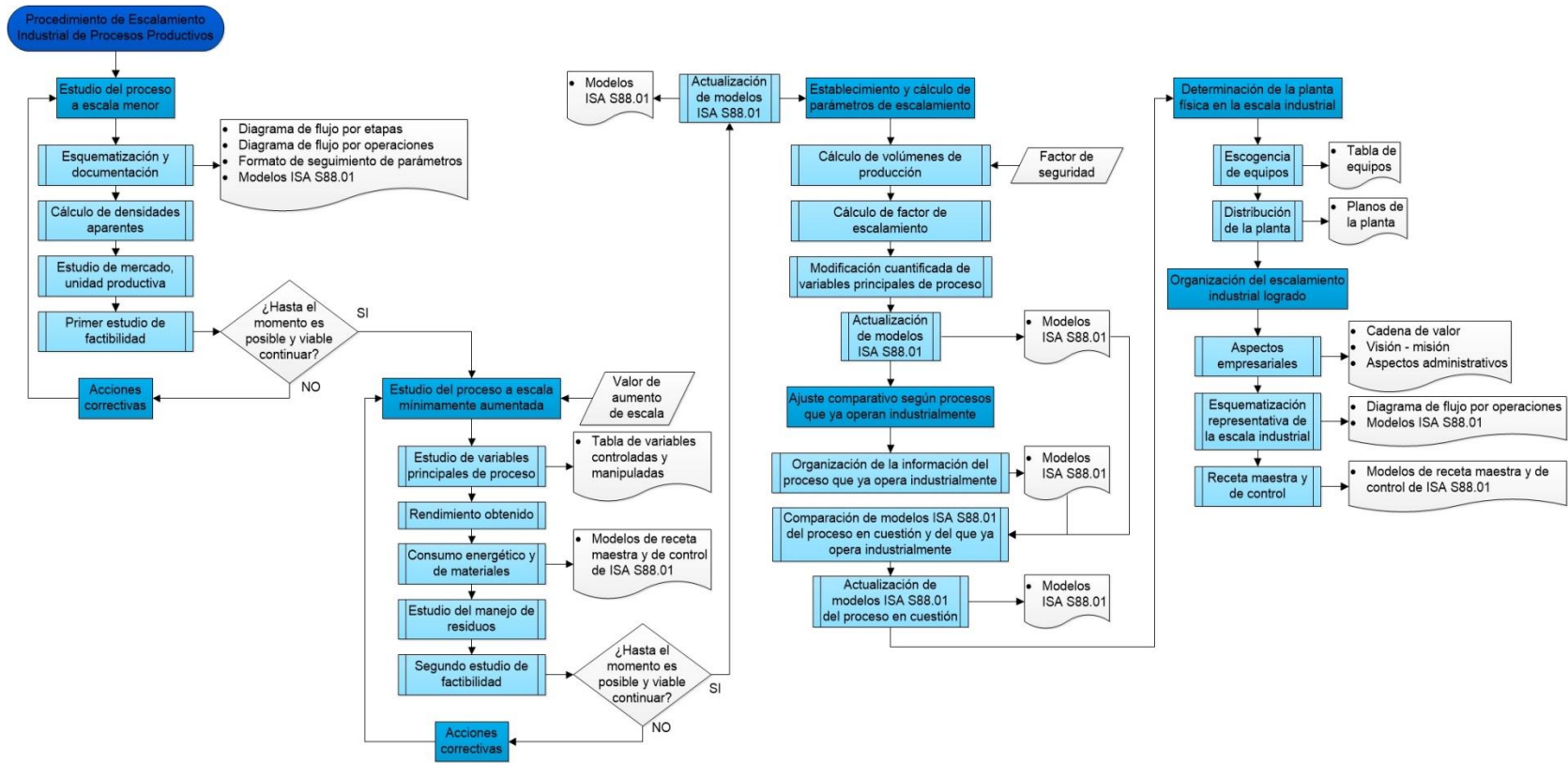
Por otro lado, se debe hacer la actualización final de los modelos ISA S88.01. Sin embargo, estos siempre van a estar sujetos a futuras actualizaciones conforme crece la organización. Una vez más, se recalca la importancia en los modelos ISA S88.01, ya que proporcionan una visión completa del proceso, que entre otras cosas, será útil para los nuevos integrantes que irán sumándose a la empresa.

4.2.6.3. Receta maestra y de control

De igual manera, en este ítem se actualizan y/o construyen los modelos de receta maestra y de control, donde se mostrará la información detallada de materiales, cantidades, parámetros y equipos en la nueva escala. Se aclara que en este punto no se ha puesto en marcha la escala industrial, por lo que estos modelos de receta no se relacionarán en torno a un producto ya obtenido, sino que pretenden organizar y mostrar toda la información que se obtuvo para la escala industrial.

Finalmente, se reúne toda la información respecto al planteamiento del procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos, esquematizándola en un diagrama de proceso que concreta cada uno de los procesos, subproceso, decisiones, datos y documentos que conforman el procedimiento propuesto (ver Figura 65).

Figura 65. Diagrama de proceso del procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos.



Fuente: El autor, noviembre de 2015.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Mediante la descripción conceptual de los temas de interés: contaminación ambiental causada por los residuos plásticos, investigaciones sobre materiales biodegradables alrededor del mundo y extrusión de películas para producción de plásticos; se contextualizó el caso de estudio PROPEBIPAY. Además, la descripción textual en términos del proceso y la planta física dispuestos en el laboratorio, mostró el conocimiento adquirido sobre PROPEBIPAY.

Partiendo del conocimiento suficiente de PROPEBIPAY, la ingeniería conceptual permitió la descripción técnica del proceso. A su vez, mediante un diagnóstico realizado se establecieron los requerimientos generales, de automatización, hardware y software; propios del proceso.

Respecto a los requerimientos establecidos para PROPEBIPAY, la ingeniería básica permitió dar cumplimiento y soluciones a los requerimientos previstos.

Finalmente, después de conocer, organizar y proponer mejoras técnicas al proceso PROPEBIPAY a nivel de laboratorio, se planteó un procedimiento de escalamiento industrial. Así, gracias al conocimiento en automatización industrial de procesos y la realización de un estado del arte sobre escalamientos ascendentes en diversos procesos alrededor del mundo, se realizó el procedimiento de escalamiento industrial. Este se organizó en 6 pasos principales, se centró alrededor del estándar ISA 88.01 e integró lo que normalmente se realiza respecto a escalamiento industrial, unificando organizadamente las múltiples maneras de escalar industrialmente un proceso.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda realizar la documentación detallada y reproducible, por ejemplo, guías en las que se involucren: modelos ISA S88.01, metodología para llevar a cabo el proceso y formato de seguimiento de parámetros. Esto para asegurar la herencia de la información para futuros integrantes del proceso.

Realizar el trabajo en el que se desarrolle el control automático mediante visión de máquina de la operación de soplado de la película biodegradable.

Usar la comunicación opcional TCP/IP entre el computador y el máster de control del extrusor *Thermo Scientific* HAAKE PolyLab OS. Esto como alternativa de solución a los inconvenientes al usar el módulo con conexión vía USB.

Seguir el procedimiento de escalamiento industrial como guía para ejecutar acciones ordenadas que faciliten el cumplimiento de la comercialización final del producto que se ofrecería en PROPEBIPAY.

Aplicar el estándar ISA 95 para la gerencia del proceso a escala industrial, integrando operaciones de manufactura, planeación de negocios y logística.

6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] M. De Wulf, "Pirámides de Población del Mundo Desde 1950 a 2100. Mundo 2000," 2000. [Online]. Available: <http://populationpyramid.net/es/mundo/2000/>. [Accessed: 17-Feb-2015].
- [2] M. De Wulf, "Pirámides de Población del Mundo Desde 1950 a 2100. Mundo 2015," 2015. [Online]. Available: <http://populationpyramid.net/es/mundo/2015/>. [Accessed: 17-Feb-2015].
- [3] "ONU: 'La Población Mundial Alcanzará los 9.600 Millones en 40 Años' | RT," 2013.
- [4] O. Aguilera Almaguer, X. F. Arias Reyes, and O. Pérez, "Impacto Global del Desarrollo Tecnológico en el Medio Ambiente." [Online]. Available: <http://www.econlink.com.ar/desarrollo-tecnologico-medio-ambiente>. [Accessed: 12-Nov-2014].
- [5] M. L. Ortiz Hernández, "El Impacto de los Plásticos en el Ambiente," 2013. [Online]. Available: <http://www.jornada.unam.mx/2013/05/27/eco-f.html>. [Accessed: 02-Feb-2015].
- [6] A. I. Roca Fernández, "Problemática, Clasificación y Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos." [Online]. Available: http://www.infoagro.com/documentos/problemativa__clasificacion_y_gestion_residuos_solidos_urbanos.asp. [Accessed: 18-Feb-2015].
- [7] "Los Residuos Sólidos Urbanos a Nivel Mundial se Duplicarán Antes de 2025 | Finanzas Carbono," 2012. [Online]. Available: http://finanzascarbono.org/noticias_externas/los-residuos-solidos-urbanos-a-nivel-mundial-se-duplicaran-antes-de-2025/. [Accessed: 18-Feb-2015].
- [8] "Suelos y Residuos - Composición de los RSU," *Ambientum.com - Enciclopedia Medioambiental*. .
- [9] M. Solórsano Flóres, "Mundo de Plástico," 2013. [Online]. Available: <http://www.jornada.unam.mx/2013/05/27/eco-g.html>. [Accessed: 02-Feb-2015].
- [10] R. Álvarez Silvera, Y. Chávez Salcedo, L. Guzmán Roca, and E. Montes Hurtado, "Análisis de la Contaminación Generada por las Botellas de Plástico en Barranquilla y Creación de Botellas de Papel como Producto Innovador," *Academia Libre*, vol. 10, no. 10. 05-Dec-2012.
- [11] Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, "Caracterización de los Residuos Sólidos de Establecimientos Comerciales, Pequeños Productores, Generados en la Ciudad de Bogotá D.C. - 2011." Bogotá D.C., p. 48, 2011.
- [12] D. Segura, R. Noguez, and G. Espín, "Contaminación Ambiental y Bacterias Productoras de Plásticos Biodegradables," 2007.
- [13] A. Téllez Maldonado, "La Complejidad de la Problemática Ambiental de los Residuos Plásticos: una Aproximación al Análisis Narrativo de Política Pública en Bogotá," Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [14] BASF The Chemical Company, "Plásticos Biodegradables." [Online]. Available: http://www.basf.be/ecp1/Soluciones_spain/Plasticos_Biodegradables. [Accessed:

20-Nov-2014].

- [15] FKUR® Plastics, “Página de Inicio | FKUR® Plastics - Made by Nature!” [Online]. Available: <http://www.fkur.com/startseite.html?L=3>. [Accessed: 21-Nov-2014].
- [16] Novamont, “Company Profile.” Novara - Italy.
- [17] J. Meneses, C. M. Corrales, and M. Valencia, “Síntesis y Caracterización de un Polímero Biodegradable a Partir del Almidón de Yuca,” *Rev. EIA*, pp. 57–67, 2007.
- [18] J. Durán, M. A. Morales, and R. Yusti, “Formulación para la Obtención de un Polímero Biodegradable a Partir de Almidón de Yuca, Variedad MBRA 383,” *Rev. Científica Guillermo Ockham*, vol. 3, no. 2, pp. 127–133, 2005.
- [19] J. R. Gómez Cardozo, “Producción y Caracterización de Polihidroxicanoatos, Sintetizados por Microorganismos Nativos a Partir de Residuos Grasos,” Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, 2013.
- [20] nova-Institut GmbH, “Market Study and Database on Bio-based Polymers in the World - Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends Towards 2020.” p. 11, 2013.
- [21] F. Aeschelmann and M. Carus, “Bio-based Building Blocks and Polymers in the World - Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends toward 2020.” Michael Carus, nova Institute, Chemiapark Knapsack, Germany, p. 23, 2015.
- [22] European Bioplastics, “Frequently Asked Questions on Bioplastics.” Berlín, p. 20, 2015.
- [23] C. Marca, “Biopolímeros. Procesabilidad y Caso de Estudio.” AIMPLAS, Instituto Tecnológico del Plástico, p. 70, 2011.
- [24] I. Vroman and L. Tighzert, “Biodegradable Polymers,” *Materials (Basel)*, vol. 2, no. Biodegradability of Materials, pp. 307–344, 2009.
- [25] BASF The Chemical Company, “Ecoflex | Biodegradable Polymers | BASF PlasticsPortal.” [Online]. Available: http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~es_ES/portal/show/content/products/biodegradable_plastics/ecoflex. [Accessed: 20-Nov-2014].
- [26] FKUR® Plastics, “Bio-Flex® | FKUR® Plastics - Made by Nature!” [Online]. Available: <http://www.fkur.com/produkte/bio-flex.html?L=3>. [Accessed: 21-Nov-2014].
- [27] M. Beltrán Rico and A. Marcilla Gomis, “Extrusión,” in *Tecnología de Polímeros*, 1st ed., Alicante: Universidad de Alicante, 2012, pp. 102–167.
- [28] Thermo Fisher Scientific, “Thermo Scientific Measuring Mixer and Extruder System: HAAKE PolyLab OS Open System.” Thermo Scientific, p. 28.
- [29] Grupo de Investigación CYTBIA, “Manual Sobre Elaboración de Películas Flexibles Biodegradables.” .
- [30] Esther, “Amilosa y Amilopectina | Chocolatisimo.” [Online]. Available: <http://www.chocolatisimo.es/amilosa-y-amilopectina/>. [Accessed: 13-Mar-2015].

- [31] Á. Méndez, “Glicerol | La Guía de Química.” [Online]. Available: <http://quimica.laguia2000.com/compuestos-quimicos/glicerol>. [Accessed: 23-Feb-2015].
- [32] Editores de la Enciclopedia Británica, “Stearic Acid | Encyclopedia Britannica,” *Encyclopedia Britannica*. .
- [33] “Peróxido de Benzoilo | yasalud,” 2010. [Online]. Available: <http://yasalud.com/peroxido-de-benzoilo/>. [Accessed: 26-Feb-2015].
- [34] H. S. Villada, H. A. Acosta, and R. J. Velasco, “Investigación de Almidones Termoplásticos, Precursores de Productos Biodegradables,” *Inf. Tecnológica*, vol. 19, no. 2, pp. 3–14, 2008.
- [35] L. Serna, A. Rodríguez, and F. Albán, “Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones,” *Ing. y Compet.*, vol. 5, no. 1, pp. 16–26, Apr. 2003.
- [36] Mariano, “Policaprolactona (PCL) | Tecnología de los Plásticos,” 2012. [Online]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/11/policaprolactona-pcl.html>. [Accessed: 20-Mar-2015].
- [37] M. Dayton, “Diferencia entre Polar y no Polar | eHow en Español.” [Online]. Available: http://www.ehowenespanol.com/diferencia-polar-polar-info_360896/. [Accessed: 05-Mar-2015].
- [38] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-88.01-1995, Batch Control, Part 1: Models and Terminology*. North Carolina: Instrument Society of America, 1995.
- [39] Arturo K, “La Cadena de Valor de Porter | Crece Negocios,” 2014. [Online]. Available: <http://www.crecenegocios.com/la-cadena-de-valor-de-porter/>. [Accessed: 25-Mar-2015].
- [40] International Electrotechnical Commission, *IEC 60848, Preparation of Function Charts for Control Systems*, 1.0 ed. 1988.
- [41] Universidad Nacional Abierta y a Distancia - Colombia, “Lección 16.3.1 – Gráficos Secuenciales (Graphe de Comande Etape Transition ‘GRAFCET’ – Secuential Function Chart ‘SFC’).” [Online]. Available: http://datateca.unad.edu.co/contenidos/2150512/ContenidoLinea/leccin_1631__grficos_secuenciales_graphe_de_comande_etape_transition_grafcet__secuential_function_chart_sfc.html. [Accessed: 23-Apr-2015].
- [42] J. Frohm, V. Lindstrom, J. Stahre, and M. Winroth, “Levels of Automation in Manufacturing,” 2008.
- [43] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-95.00.01-2000, Enterprise-Control System Integration, Part 1: Models and Terminology*. North Carolina: Instrument Society of America, 2000.
- [44] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-95.00.03-2005, Enterprise-Control System Integration, Part 3: Activity Models of Manufacturing Operations Management*. North Carolina: Instrument Society of America, 2005.
- [45] E. Nieto, “Automatización y Control Industrial: Pirámide CIM Manufactura Integrada por Computador.” 2014.

- [46] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992), Instrumentation Symbols and Identification*. North Carolina: Instrument Society of America, 1992.
- [47] M. N. Riaz, "Extrusora de un Solo o Doble Tornillo: ¿Cuáles son las Opciones? | AquaFeed Latinoamérica," 2014. [Online]. Available: <http://aquafeed.co/extrusora-de-un-solo-o-doble-tornillo-%c2%bfcuales-son-las-opciones/>. [Accessed: 21-May-2015].
- [48] "Enfriamiento de Máquinas y de Procesos," 1997. [Online]. Available: <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/5113-Enfriamiento-de-maquinas-y-de-procesos.html>. [Accessed: 22-May-2015].
- [49] J. Garralda Ruíz, "La Cadena de Valor." IE Business Publishing, Madrid, 2013.
- [50] J. F. Flórez Marulanda, "Capítulo I," in *Instrumentación Industrial: Generalidades y Últimas Tendencias*, 2012.
- [51] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-5.2-1976 (R1992), Binary Logic Diagrams for Process Operations*. North Carolina: Instrument Society of America, 1992.
- [52] Instrument Society of America, *ISA-5.3-1983, Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems*. North Carolina: Instrument Society of America, 1982.
- [53] Ministerio de Educacion del Gobierno de España, "Aplicación Práctica de la Visión Artificial en el Control de Procesos Industriales," *Fondo Social Europeo*, 2012.
- [54] JasVisio, "Componentes de un Sistema de Visión Artificial | JasVisio," 2009. [Online]. Available: <http://jasvisio.com/mvElements-es.html>. [Accessed: 27-May-2015].
- [55] INFAIMON, "Iluminación por Contraste (Backlight) | Enciclopedia de la Visión | INFAIMON," 2015. [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/es/iluminacion-por-contraste-backlight>. [Accessed: 27-May-2015].
- [56] D. Liarte, "Sensores con Tecnología CCD vs CMOS," 2009.
- [57] INFAIMON, "CCD Vs CMOS | Enciclopedia de la Visión | INFAIMON," 2015. [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/es/ccd-vs-cmos>. [Accessed: 27-May-2015].
- [58] L. L. Cortés, S. García Duarte, E. Méndez Lángo, and E. González Durán, "Conductividad Térmica de Materiales," Querétaro, 2010.
- [59] Netter Vibration, "Catálogo General de Productos Netter Vibration." Mainz - Kastel, Alemania, pp. 21 – 22.
- [60] BuyLEDStrip.com, "Panel de LED 30x30 18W 4000K Blanco | BuyLEDStrip.com," 2015. [Online]. Available: <http://www.buyledstrip.com/es/panel-de-led-30x30-18w-4000k-blanco.html>. [Accessed: 02-Jun-2015].
- [61] INFAIMON, "uEye 1240ML | Sistemas de Visión Artificial para Industria | INFAIMON," 2015. [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/es/ueye-1240ml>. [Accessed: 02-Jun-2015].
- [62] Moog, "Servovalves and Proportional Valves | Direct-Operated Servo Valves for

- Analog Signals G771, G772, G773, 771, 772, and 773 Series | Moog.” [Online]. Available: <http://www.moog.com/products/servovalves-servo-proportional-valves/industrial/flow-control/analog-without-integrated-electronics/direct-operated-servo-valves-for-analog-signals-g771-g772-g773-771-772-773-series/>. [Accessed: 06-Oct-2015].
- [63] INFAIMON, “Sapera Vision Software | Sistemas de Visión Artificial para Industria | INFAIMON,” 2015. [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/es/sapera-vision-software>. [Accessed: 04-Jun-2015].
- [64] INFAIMON, “HALCON 12 | Sistemas de visión Artificial para Industria | INFAIMON,” 2015. [Online]. Available: <http://www.infaimon.com/es/halcon-12>. [Accessed: 04-Jun-2015].
- [65] Alava Ingenieros, “Librerías MIL (Matrox Imaging Library),” 2015. [Online]. Available: <http://www.alava-ing.es/ingenieros/productos/vision-artificial/software-de-analisis/librerias-mil-matrox-imaging-library/>. [Accessed: 04-Jun-2015].
- [66] AIS Vision Systems, “Software para Visión Artificial | Impact Software Suite | AIS Vision Systems.” [Online]. Available: <http://www.aisvision.com/es/productos/camaras-de-vision-artificial/software-para-vision-artificial/>. [Accessed: 04-Jun-2015].
- [67] K. Dawson-howe, *A Practical Introduction to Computer Vision with OpenCV*. 2014.
- [68] Itseez, “OpenCV (Open Source Computer Vision) | OpenCV,” 2015. [Online]. Available: <http://opencv.org/>. [Accessed: 04-Jun-2015].
- [69] S. Viña Brito, E. Concepción Batiz, and R. Montero Martínez, “La Ingenierización y la Ingeniería Concurrente en los Proyectos de la Industria Farmacéutica y la Biotecnología.” pp. 117–125, 1994.
- [70] R. González Castellanos, *Principios Básicos de Escalado*. Universidad de Matanzas, 2000.
- [71] R. González Castellanos, M. Lavín, and L. Curiel Lorenzo, “Organización y Ejecución de la Investigación,” in *Metodología de la Investigación Científica para las Ciencias Técnicas*, Universidad de Matanzas, 2003, p. 57.
- [72] R. M. E. Arias García, G. Pérez Palacios, and C. Durán, “Condiciones de Operación de Extrusores de Tornillo Simple para Mezclas de Harina de Trigo. Parte 2: Montaje, Arranque y Operación de una Planta Industrial,” *Tecnol. Ciencia, Educ.*, vol. 22, no. 2, pp. 67–77, 2007.
- [73] G. A. Magaña Cortéz, “Propuesta del Diseño para el Escalamiento a Planta Industrial, Partiendo de una Planta Piloto, para el Precocido y Beneficiado de Arroz,” Universidad de el Salvador, 2008.
- [74] S. Tiwari, S. Saxena, and R. Kumar, “Process Scale-up of Ibrufen Tablet,” *J. Pharm. Sci. Res.*, vol. 3, no. 10, pp. 1525–1529, 2011.
- [75] J. E. Miño Valdés, “Desarrollo Tecnológico para Elaborar Vino Blanco Común en Misiones, con Evaluación Económica a Escala Industrial,” *Visión Futur.*, vol. 17, pp. 171–191, 2013.

- [76] G. A. Mora Moscoso, "Diseño de una Planta para la Extracción del Aceite Esencial de Palo Santo (*Bursera Graveolens*) Mediante Destilación por Arrastre de Vapor," Escuela Politécnica Nacional, 2014.
- [77] F. Arroyo, C. Fernández Pereira, and P. Bermejo, "Demonstration Plant Equipment Design and Scale-up from Pilot Plant of a Leaching and Solvent Extraction Process," *Minerals*, vol. 5, pp. 298–313, 2015.
- [78] P. A. Quintana Hernandez, L. E. Poot Aguilar, G. M. Martínez González, and A. J. Castro Montoya, "Escalamiento del Proceso de Secado de Bagazo de Caña," *Rev. Mex. Ing. Química*, vol. 5, no. 1, pp. 57–66, 2006.
- [79] A. A. Ruiz Colorado and H. Álvarez, "Escalamiento de Procesos Químicos y Bioquímicos Basado en un Modelo Fenomenológico," *Inf. Tecnológica*, vol. 22, no. 6, pp. 33–52, 2011.
- [80] R. P. Palluzi, "Pilot Plants," *Ullman's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. 2005.
- [81] G. M. Monsalve Bravo, "An Approximation to the Scale-up of Batch Processes Using Phenomenological-Based Models," Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [82] A. A. Ruiz Colorado, "Factores de Escala para la Producción Biotecnológica de Etanol Carburante," Universidad Nacional de Colombia, 2009.