

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



Universidad
del Cauca

**Robinson Ordoñez Muñoz
Bernardo David Lara Guevara**

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control
Línea de Investigación en Automatización
Popayán, enero de 2017

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



Universidad
del Cauca

**Robinson Ordoñez Muñoz
Bernardo David Lara Guevara**

Monografía presentada como requisito para optar al 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
Línea de Investigación en Automatización
Popayán, enero de 2017

Nota de aceptación: _____

Firma del jurado

Firma del jurado

Popayán, enero de 2017

Agradecimientos

A nuestras familias,
Compañeros y amigos,
Al ingeniero Juan Fernando Flórez,
A los ingenieros de la FACA,
Al grupo de investigación CYTBIA,
Al laboratorio de Reología y Empaques,
A la Universidad del Cauca

Tabla de Contenido

	Pág.
Tabla de Contenido	iii
Lista de Figuras	vi
Listado de Tablas	viii
Resumen	x
Introducción	xi
Objetivos	xii
Objetivo General:	xii
Objetivos Específicos:	xii
Capítulo 1	1
1 Generalidades	1
1.1 Los Plásticos	1
1.1.1 Clasificación de los polímeros	1
1.1.2 Degradación de los polímeros	2
1.1.3 Plásticos espumados	3
1.2 Contaminación por Plásticos	3
1.3 Plásticos Biodegradables	4
1.4 Investigaciones sobre Materiales Biodegradables para Extrusión de Espumados	4
1.5 Proceso de Extrusión de Espumados	5
1.5.1 Extrusión convencional	6
1.5.2 Extrusión de espumas	6
1.6 Metodologías de Escalamiento	7
1.7 Plantas Piloto	9
1.7.1 Costo de las plantas piloto	9
1.7.2 Principales tipos de plantas piloto existentes	10
1.8 Descripción del PROESBIPAY a nivel de laboratorio	10
1.8.1 Etapa de modificación de la humedad de almidón	10
1.8.2 Etapa de acondicionamiento de la mezcla	11
1.8.3 Etapa de obtención del espumado biodegradable	12
1.8.4 Etapa de acondicionamiento de las espumas	12
1.9 Descripción de la Planta del PROESBIPAY	13
1.9.1 Unidad de modificación de la humedad de almidón	13
1.9.2 Unidad de acondicionamiento de la mezcla	13
1.9.3 Unidad de obtención del espumado biodegradable	14
1.9.4 Unidad de acondicionamiento de las espumas	15
Capítulo 2	16
2 Identificación de Aspectos Técnicos y Funcionales de PROESBIPAY	16
2.1 Cadena de Valor de PROESBIPAY	16
2.2 Diagrama de Flujo de PROESBIPAY a Nivel de Laboratorio	17
2.3 Modelos ISA-S88.01 de PROESBIPAY Laboratorio	19
2.3.1 Modelo de proceso	19

2.3.2	Modelo físico	20
2.3.3	Modelo de control procedimental	21
2.3.4	Relación entre los modelos ISA-S88.01	23
2.4	Diagnóstico de PROESBIPAY a Nivel de Laboratorio	23
2.4.1	Requerimientos de PROESBIPAY a nivel de laboratorio	24
Capítulo 3	.....	25
3	Modelo de Escalamiento de PROESBIPAY a Nivel de Planta Piloto.....	25
3.1	Estudio del Proceso a Escala Menor.....	26
3.1.1	Esquematización y documentación.....	26
3.1.2	Cálculo de densidades aparentes.....	28
3.1.3	Estudio de la unidad productiva	28
3.1.4	Primer estudio de factibilidad	30
3.2	Caracterización del Proceso a Escala Menor.....	31
3.2.1	Rendimiento obtenido.....	31
3.2.2	Consumo energético y de materiales.....	32
3.2.3	Estudio del manejo de residuos	37
3.2.4	Segundo estudio de factibilidad	42
3.3	Establecimiento y Cálculo de Parámetros de Escalamiento.....	44
3.3.1	Estudio de variables principales del proceso.....	44
3.3.2	Escalamiento de la producción	50
3.3.3	Modificación cuantificada de variables principales de proceso	55
3.4	Ajuste Comparativo según Procesos que Ya Operan Industrialmente	57
3.4.1	Organización de la Información del Proceso que ya Opera Industrialmente	58
3.4.2	Comparación de modelos ISA 88.01 del proceso en cuestión y del que ya opera industrialmente	58
3.5	Determinación de la Planta Física en la Nueva Escala	60
3.5.1	Escogencia de equipos.....	60
3.5.2	Distribución de la planta	62
3.6	Organización del Escalamiento Industrial Logrado.....	63
3.6.1	Aspectos empresariales	63
3.6.2	Esquematización representativa de la escala industrial.....	63
3.6.3	Receta maestra y de control.....	63
Capítulo 4	.....	64
4	Definición de la Automatización del Proceso a Nivel de Planta Piloto	64
4.1	Solución de Requerimientos Generales	64
4.1.1	Sistema de alimentación para ingreso continuo de material.....	64
4.1.2	Sistema de corte del cordón espumado	66
4.1.3	Sistema para enfriamiento.....	68
4.1.4	Sistema de embalaje para espumado biodegradable	69
4.2	Solución a los Requerimientos de Automatización	70
4.2.1	Cadena de valor para PROESBIPAY a nivel de planta piloto	70
4.2.2	Diagrama de flujo de procesos.....	71

4.2.3	Modelo de proceso	72
4.2.4	Modelo físico	73
4.2.5	Modelo de control de procedimiento	74
4.3	Diagramas de Tuberías e Instrumentación P&ID	75
4.3.1	Definiciones.....	75
4.3.2	Receta maestra.....	83
4.3.3	Receta de control.....	85
Capítulo 5	.....	87
5	Simulación de PROESBIPAY en SuperPro	87
5.1	Requerimientos para Simulación	87
5.2	Simulación de la Planta en SuperPro	87
5.2.1	Validación de modelos matemáticos en SuperPro.....	89
5.2.2	Implementación de la planta piloto en SuperPro Designer	95
5.3	Análisis de resultados.....	102
5.3.1	Diagrama de Gantt.....	102
5.3.2	Demanda de operarios	104
5.3.3	Consumo de materiales.....	105
5.3.4	Consumo energético.....	107
Capítulo 6	.....	109
6	Conclusiones y Recomendaciones.....	109
6.1	Conclusiones	109
6.2	Recomendaciones	110
Bibliografía	.....	111

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Extrusor: Zonas, Etapas y Componentes	6
Figura 2. Métodos de Extrusión de Espumados	7
Figura 3. Materia Prima, Almacenamiento y Manipulación	10
Figura 4. Acondicionamiento de la Mezcla.....	11
Figura 5. Obtención del Espumado Biodegradable	12
Figura 6. Equipos para Modificación de la Humedad de Almidón	13
Figura 7. Equipos para Acondicionamiento de la Mezcla.....	14
Figura 8. Equipos para Obtención del Espumado Biodegradable	15
Figura 9. Cámara Climática	15
Figura 10. Cadena de Valor de PROESBIPAY	16
Figura 11. Diagrama de flujo de proceso por etapas de PROESBIPAY.....	18
Figura 12. Diagrama de flujo de proceso en operaciones de PROESBIPAY	18
Figura 13. Rutas de recolección interna de residuos	40
Figura 14. Instalación del horno de convección forzada	43
Figura 15. Curvas operativas de un extrusor	49
Figura 16. Configuración geométrica del número de cuchillas	50
Figura 17. Primera aproximación del PFD de PROESBIPAY planta piloto	50
Figura 18. Silo flexible en lona para pellets	54
Figura 19. Segunda aproximación del PFD de PROESBIPAY planta piloto	54
Figura 20. Punto de operación del extrusor de PROESBIPAY planta piloto	56
Figura 21. Plano de la planta física para PROESBIPAY piloto	63
Figura 22. Alimentador volumétrico de tornillo simple	66
Figura 23. Sistema de corte.....	68
Figura 24. Transportador neumático	68
Figura 25. Máquina de embolsado y sellado	69
Figura 26. Cadena de valor para PROESBIPAY planta piloto	71
Figura 27. PFD por operaciones de PROESBIPAY planta piloto.....	72
Figura 28. Diagrama P&ID de horno de convección forzada	77
Figura 29. P&ID Mezcladora de Alta Velocidad	78
Figura 30. P&ID Extrusor de tornillo simple	79
Figura 31. P&ID Cuchilla de Corte	80
Figura 32. P&ID Transportador neumático	81
Figura 33. P&ID Máquina Embolsadora.....	82
Figura 34. P&ID general de PROESBIPAY a nivel de planta piloto.....	83
Figura 35. Operación de secado de bandejas de SuperPro Designer	89
Figura 36. Resultados de la simulación del secado de bandejas en SuperPro	90
Figura 37. Operación de calefacción de SuperPro	91
Figura 38. Ingreso de datos a la operación de calefacción de SuperPro	92
Figura 39. Resultados de la simulación de calefacción del almidón.....	92
Figura 40. Simulación de la operación de extrusión	94
Figura 41. Configuración del extrusor en SuperPro	95

Figura 42. Configuración común de las acciones de proceso en SuperPro	96
Figura 43. Configuración de la operación de secado en SuperPro	97
Figura 44. Configuración de la operación de mezclado	97
Figura 45. Ajuste de la operación de mezclado en SuperPro	98
Figura 46. Ajuste del tiempo de la operación de extruido	99
Figura 47. Configuración del transportador neumático.....	99
Figura 48. Configuración del silo en SuperPro	100
Figura 49. Configuración de la operación de empacado en SuperPro	101
Figura 50. Configuración de etapas de proceso en SuperPro	101
Figura 51. Simulación de PROESBIPAY planta piloto en SuperPro.....	102
Figura 52. Diagrama de Gantt por operaciones de la planta piloto en SuperPro.	103
Figura 53. Diagrama de Gantt por acciones de la planta piloto en SuperPro	104
Figura 54. Demanda de operarios de la planta piloto en SuperPro	104
Figura 55. Ajuste del tiempo de operación por año de la planta piloto	105
Figura 56. Costo de mano de obra para la planta piloto	105
Figura 57. Reporte de datos generales de PROESBIPAY planta piloto.....	106
Figura 58. Reporte de consumo de materiales de la planta piloto	106
Figura 59. Reporte de costo de materiales de la planta piloto	106
Figura 60. Reporte de consumo energético de la planta piloto.....	107
Figura 61. Reporte de costos de operación del proceso completo.....	108

Listado de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los termoplásticos según su arreglo molecular.....	2
Tabla 2. Entradas y salidas de las etapas de PROESBIPAY	17
Tabla 3. Modelo de proceso de PROESBIPAY laboratorio.....	19
Tabla 4. Modelo físico de PROESBIPAY laboratorio	21
Tabla 5. Modelo de control procedimental de PROESBIPAY laboratorio.....	22
Tabla 6. Convenciones para relacionar los ítems de los modelos ISA-S88.01	23
Tabla 7. Propuesta de escalamiento industrial de procesos productivos PEIPP ...	25
Tabla 8. PEIPP modificado	26
Tabla 9. Documento unificado de seguimiento para PROESBIPAY.....	27
Tabla 10. Densidad aparente de los materiales interactuantes en el proceso	28
Tabla 11. Logros y dificultades de PROESBIPAY	30
Tabla 12. Rendimiento de PROESBIPAY en laboratorio	31
Tabla 13. Consumo eléctrico de PROESBIPAY	33
Tabla 14. Receta maestra de PROESBIPAY.....	34
Tabla 15. Receta de control de PROESBIPAY.....	35
Tabla 16. Cantidad de materiales al mes para PROESBIPAY laboratorio	36
Tabla 17. Metodología para el manejo integral de residuos.....	37
Tabla 18. Tipo y cantidad de residuos generados	39
Tabla 19. Recipientes para recolección de residuos	40
Tabla 20. Modos de operación de PROESBIPAY planta piloto	51
Tabla 21. Distribución de tiempos de operación de PROESBIPAY planta piloto ...	52
Tabla 22. Distribución de tiempos de la operación de secado.....	52
Tabla 23. Distribución de tiempos de la operación de mezclado para un lote	53
Tabla 24. Unidad productiva por operaciones de PROESBIPAY planta piloto	55
Tabla 25. Requerimientos para el secador en la planta piloto	56
Tabla 26. Requerimientos para el extrusor de PROESBIPAY planta piloto	56
Tabla 27. Requerimientos para la cortadora de PROESBIPAY planta piloto.....	57
Tabla 28. Empresas relacionadas con producción de espumas.....	57
Tabla 29. Modelo de Proceso para expandidos de maíz JuanShis	59
Tabla 30. Equipos principales seleccionados para PROESBIPAY planta piloto....	60
Tabla 31. Equipos secundarios de PROESBIPAY tipo piloto	61
Tabla 32. Distribución de planta física para PROESBIPAY piloto	62
Tabla 33. Características del Alimentador Volumétrico modelo S60	65
Tabla 34. Componentes del sistema de corte.....	67
Tabla 35. Características del transportador neumático	69
Tabla 36. Características del sistema de embalaje	70
Tabla 37. Modelo de proceso de PROESBIPAY planta piloto	73
Tabla 38. MF de PROESBIPAY a nivel de planta piloto	73
Tabla 39. Modelo de control de procedimiento de PROESBIPAY a nivel piloto	74
Tabla 40. Descripción conceptual de Horno de Convección Forzada	76
Tabla 41. Descripción conceptual de Mezcladora de Alta Velocidad	77

Tabla 42. Conceptualización de Extrusor de Tornillo Simple	78
Tabla 43. Conceptualización de Cuchilla De Corte	80
Tabla 44. Conceptualización del transportador neumático	81
Tabla 45. Conceptualización de la Maquina Embolsadora	82
Tabla 46. Convenciones usadas para representar las variables del proceso	84
Tabla 47. Receta maestra de PROESBIPAY a nivel de planta piloto.....	84
Tabla 48. Receta de control de PROESBIPAY piloto	85
Tabla 49. Relación entre SuperPro y el modelo de proceso ISA-S88.01	88
Tabla 50. Comparación de datos de los Modelos matemáticos & Simulados en SuperPro realizados al balance de masa de la unidad secado	91
Tabla 51. Comparación de datos de los Modelos matemáticos & Simulados en SuperPro realizados al balance de energía de la unidad secado	93
Tabla 52. Potencia instalada de los equipos de PROESBIPAY planta piloto.....	107

Resumen

En el presente trabajo de grado se realizó un modelo de escalamiento a nivel de planta piloto, complementando el procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos (PEIPP), para el proceso de “extrusión de espumados biodegradables” que se desarrolla en el Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca. Como primera medida, se identificó aspectos técnicos y funcionales del proceso, se modeló mediante ISA-S88.01 y se diagnosticó el proceso a nivel de laboratorio; posteriormente, se desarrolló un escalamiento del proceso a nivel de planta piloto con la aplicación de un procedimiento sistematizado desarrollado en la Universidad del Cauca (PEIPP), al cual, en el transcurso de su aplicación se le introdujeron mejoras. Finalmente, se desarrollaron algunas propuestas de automatización para la planta piloto y se realizó una simulación detallada de la línea de proceso.

Introducción

Desde el año 2010 se están generando más de 1300 millones de toneladas de residuos sólidos en el mundo; se calcula que el 10% de esta cantidad se clasifica como plásticos que pueden permanecer inalterables en el ambiente por periodos de 100 a 500 años. La acumulación de los plásticos en el medio ambiente produce efectos adversos como los numerosos tipos de polución que afectan negativamente a los terrenos, cursos de agua, océanos y la vida silvestre; esta problemática nos lleva a cuestionar: ¿se está haciendo lo suficiente para mitigar esta problemática?, la respuesta no es inmediata, tal vez no se ha hecho lo suficiente pero, hay una conciencia acerca de la importancia del cuidado medioambiental. En este orden de ideas, actualmente el grupo de investigación CYTBIA de la Universidad del Cauca está llevando a cabo investigaciones para obtener productos y materiales eco-amigables que puedan contribuir en la reducción de los impactos negativos a nuestro entorno; este proceso se adelanta bajo el marco del proyecto de regalías “Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables”, y uno de sus avances o paquetes tecnológicos es el “espumado biodegradable” que busca posicionarse en el mercado como alternativa verde. Teniendo en cuenta que, afortunadamente se están empezando a destinar recursos representativos para este tipo de investigaciones, es necesario proyectar u orientar la producción hacia la “gran escala” o “comercialización” y para ello, uno de los pasos fundamentales es el modelado e implementación de los procesos de producción a nivel de planta piloto, experimentación que entrega aproximaciones muy cercanas a lo que sería un comportamiento del proceso a nivel de escala industrial. Conociendo que las investigaciones iniciales se desarrollan a nivel de laboratorio, deben aplicarse métodos de “escalamiento industrial” para consolidar bases fuertes que permitan la implementación a gran escala; estas metodologías de escalamiento pueden apoyarse de estándares internacionales para estructurar de mejor forma las distintas aplicaciones a que haya lugar. Finalmente, cabe resaltar que las herramientas de simulación software para apoyar procesos de investigación y desarrollo, son cada vez más robustas y accesibles a los diferentes usuarios, hecho que genera la posibilidad de realizar estudios cada vez mejor estructurados y bien fundamentados.

Objetivos

Objetivo General:

- Realizar un modelo de escalamiento industrial a nivel de planta piloto, complementando el procedimiento PEIPP, para la extrusión de espumados biodegradables que se realiza en el Laboratorio de Reología y Empaques de la FACA, en el marco del proyecto de regalías “Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables”.

Objetivos Específicos:

- Identificar los aspectos técnicos y funcionales del proceso de extrusión de espumados biodegradables a nivel de laboratorio.
- Complementar el Procedimiento de Escalamiento Industrial de procesos Productivos (PEIPP), mediante su aplicación al proceso de extrusión de espumados a nivel de planta piloto.
- Especificar las características de automatización del proceso a nivel de planta piloto que debería tener el proceso de extrusión de espumados biodegradables.
- Realizar una validación por medio de simulación del proceso, a nivel de planta piloto, de la extrusión de espumados biodegradables mediante una herramienta computacional.

Capítulo 1

1 Generalidades

En este capítulo se presenta un acercamiento a la problemática mundial generada por materiales de tipo plástico. Así mismo, se señalan alternativas relacionadas con investigaciones sobre materiales biodegradables y procesos para extrusión de espumados. Finalmente, se describe el Proceso de Extrusión de Espumados Biodegradables a Partir de Almidón de Yuca (PROESBIPAY) que se encuentra implementado a nivel de laboratorio, en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca; dichas descripciones son desarrolladas a nivel de proceso (etapas de proceso) y nivel de planta (unidades de producción).

1.1 Los Plásticos

Los plásticos son materiales poliméricos orgánicos (compuestos por moléculas orgánicas gigantes) que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado. Las moléculas pueden ser de origen natural, por ejemplo la celulosa, la cera y el caucho natural (hule), o sintéticas, como el polietileno y el nylon. Los materiales empleados en su fabricación son resinas en forma de bolitas, polvo o en disolución. Con estos materiales se fabrican los plásticos terminados [1]. Ahora bien, se entiende como plástico, cualquier material de un extenso y variado grupo que contiene como elemento esencial una sustancia orgánica de gran peso molecular, siendo sólida en su estado final; ha tenido o puede haber tenido en alguna etapa de su manufactura (fundido, cilindrado, prensado, estirado, moldeado, etc.) diferentes formas de fluidificación, mediante la aplicación, junta o separada, de presión o calor [2].

1.1.1 Clasificación de los polímeros

Teniendo en cuenta que los polímeros más apropiados para llevar a cabo procesos de extrusión y soplado (tema tratado en este trabajo de grado) son los “Termoplásticos” [1,3], a continuación se consigna la clasificación de polímeros según su estructura y comportamiento al calor: Elastómeros, termoestables y termoplásticos.

Elastómeros: Los elastómeros son compuestos químicos cuyas moléculas consisten en varios miles de monómeros, que están unidos formando grandes cadenas, las cuales son altamente flexibles, desordenadas y entrelazadas. Entre los polímeros que son elastómeros se encuentran el poli isopreno o caucho natural, el polibutadieno, el poliisobutileno y los poliuretanos.

Termoestables: Los polímeros termoestables, son aquellos que solamente son blandos o "plásticos" al calentarlos por primera vez. Después de enfriados no pueden recuperarse para transformaciones posteriores. Es un material compacto y duro, su fusión no es posible (la temperatura los afecta muy poco), insoluble para la mayoría de los solventes, encuentran aplicación en entornos de mucho calor, pues no se ablandan y se carbonizan a altas temperaturas.

Termoplásticos: Las resinas termoplásticas son fácilmente conformables al aplicárseles temperatura y presión, entre los métodos más usados para su manufactura se encuentran la inyección, extrusión, soplado y termo formado. En general, los termoplásticos se pueden clasificar con referencia a su arreglo molecular (ver *Tabla 1*), lo cual influye en su proceso de fusión, solidificación, y puede determinar las propiedades físicas y mecánicas.

Tabla 1. Clasificación de los termoplásticos según su arreglo molecular

Estructura	Formación	Características	Ejemplo
Amorfa	Las moléculas no presentan ningún tipo de orden: están dispuestas aleatoriamente	<ul style="list-style-type: none"> • Son normalmente transparentes. • La fusión se realiza en un intervalo de temperatura, no existe un punto de fusión preciso. • A medida que la temperatura aumenta, el material pasa de estado sólido a pastoso y finalmente a un fluido muy viscoso. • En el tiempo de fusión pueden ser manufacturados por inyección, extrusión, soplado, etc. • Sin carga tienen una contracción en el moldeo de 0.3% a 0.9%, con carga este valor es menor. 	PVC, PS, SAN, ABS, PMMA, PC
Cristalina	Al enfriarse, sus cadenas tienden a enlazarse muy ordenadamente produciendo un empaquetamiento muy ordenado, que se denomina Cristal	<ul style="list-style-type: none"> • Son opacos. • Poseen un punto característico de fusión. • El intervalo útil de transformación está limitado a pocos ° C: un poco abajo del punto de fusión, aún está sólido y no se puede moldear; y al superar mucho la temperatura de fusión, puede ocurrir el fenómeno de degradación térmica. • Tienen contracción elevada en el moldeo. Tal que para un polímero no reforzado varía de 1 al 5%. 	PE, PP, POM, PA, PET

Fuente: Modificada de [3], mayo de 2016.

1.1.2 Degradación de los polímeros

Los polímeros tienen grandes limitaciones: se funden o descomponen a temperaturas superiores a 200°C, se disuelven o se hinchan en los fluidos orgánicos calientes, aunque algunas de estas desventajas son superadas por los polímeros basados en silicio. La degradación de los polímeros se refiere al cambio en las propiedades físicas causadas por las reacciones que escinden los enlaces. De acuerdo con el modo de iniciación, puede ser degradación térmica, mecánica, química, fotoquímica, química radiante y biológica. Entre los muchos agentes que pueden causar degradación de los polímeros están aquellos con naturaleza física,

como las cargas, el calor y la luz, y aquellos que se caracterizan por sus efectos químicos, como la oxidación y la hidrólisis [4].

1.1.3 Plásticos espumados

Los plásticos espumados son por lo general termoplásticos con una estructura celular que contienen grandes proporciones de celdillas finas llenas de gas. Estas celdillas pueden ser cerradas o abiertas. Las propiedades físicas de los materiales resultantes serán intermedias entre las del sólido y las del gas. En los plásticos espumados se consiguen importantes reducciones de la densidad, conductividad térmica, propiedades dieléctricas y disipación de energía acústica y mecánica [5]. Las propiedades características de los polímeros espumados incluyen: baja densidad, alta resistencia por unidad de peso, buen aislamiento térmico y buena calidad de absorción de energía.

La elasticidad del polímero base determina la correspondiente propiedad de la espuma. Las espumas de polímero se pueden clasificar como: **Elastómeras** en las cuales la matriz de polímero es hule, susceptible de una gran deformación elástica; **Flexibles** en las que la matriz es un polímero altamente plastificado como el PVC suave y **Rígidas** en las cuales el polímero es un termoplástico rígido como el Poliestireno o un plástico termofijo como un fenólico [6].

1.2 Contaminación por Plásticos

Los desperdicios plásticos representan una gran amenaza para los ecosistemas marinos y causan daños que podrían aproximarse a 13.000 millones de dólares cada año. El costo de capital natural por el uso de plásticos en la industria del consumo, calculado como el impacto negativo de la contaminación en el ecosistema marino o la contaminación del aire causada por la quema de plásticos, asciende a 75.000 millones de dólares anuales [7]. En 2010, las ciudades de todo el mundo generaron más de 1.300 millones de toneladas de residuos sólidos, de esta cantidad un 10% era plástico que puede permanecer inalterable por un periodo de entre 100 y 500 años. Para 2025 se calcula que el volumen de los residuos casi se doblará hasta unas 2.200 millones de toneladas al año [8]. La preocupación ambiental por los residuos plásticos (RP) es creciente y gira en torno a cuatro elementos fundamentales [9]: 1) Degradación lenta de los plásticos. 2) Producción progresiva de diferentes productos plásticos. 3) Generación de residuos en considerable crecimiento. 4) Su principal materia prima es no renovable (petróleo); y algunos de los químicos utilizados para su producción son tóxicos.

Existe una variedad de más de 3000 diferentes productos plásticos en el mercado. Entre estos, es posible solamente recuperar los más comunes, bajo la condición de

que se puedan separar completamente según los diferentes materiales. Un reciclaje completo del plástico no es posible. Siempre se obtiene un producto de menor calidad que el producto original (downcycling). Por lo tanto, no se puede repetir muchas veces el reciclaje del plástico [10].

1.3 Plásticos Biodegradables

Los plásticos biodegradables son plásticos que los microorganismos (bacterias u hongos) pueden descomponer en agua, dióxido de carbono (CO_2) y biomasa. Es importante subrayar que los plásticos biodegradables no están fabricados necesariamente con biomateriales (plantas). Muchos plásticos biodegradables están fabricados a partir del petróleo igual que los plásticos convencionales[11].

Los plásticos biodegradables pueden producirse a partir del almidón, un polímero natural fabricado por plantas. Los cereales y los tubérculos tienen mucho almidón que puede ser convertido en plástico. En este sentido, se ha logrado un material biodegradable fabricado con el almidón de papa que podría reemplazar al polietileno empleado, por ejemplo, en agricultura para cubrir los suelos y así evitar la aparición de malezas y reducir la cantidad de agua de riego. La ventaja es que este material derivado del almidón es biodegradable, y por lo tanto no tiene que retirarse del campo. Otra opción es extraer el almidón del maíz o de la papa y luego transformarlo en una molécula pequeña, el ácido láctico, por acción de microorganismos. El ácido láctico después es tratado químicamente para formar polímeros, los cuales se unen entre sí para dar lugar al plástico llamado PLA (ácido poliláctico). El PLA sirve para producir macetas enterrables, pañales desechables, hilos para sutura y cápsulas de medicamentos [12]. Algunos enfoques [4], para sintetizar polímeros que se biodegraden con rapidez y cuya fabricación sea sencilla son: a) Hidrólisis como mecanismo para la biodegradación por enzimas, por tal razón, se investigan polímeros con grupos hidrolizables; b) Desarrollos con algunos polímeros alifáticos (poliésteres y poliamidas) ya que han mostrado alguna característica de biodegradabilidad; c) Incorporar secciones vulnerables en la cadena principal de los polímeros.

1.4 Investigaciones sobre Materiales Biodegradables para Extrusión de Espumados

Los polímeros de origen agrícola y microbiano especialmente los polisacáridos como la amilosa y amilopectina del almidón; y el ácido poliláctico (PLA), han sido los más utilizados conjuntamente para la producción de películas biodegradables y espumas como las de relleno suelto que amortiguan y protegen contra golpes y vibraciones elementos frágiles durante su transporte. También existe un material

conocido como almidón termoplástico (TPS) obtenido a partir de la extrusión del almidón nativo con un plastificante, que se utiliza para la producción de espumas y películas biodegradables [13,15,16]. Estos avances se han obtenido a nivel mundial por investigaciones como las que se mencionan a continuación:

En Polonia en el año 2012, la Universidad de Ciencias de la Vida en Lublin comenzó una investigación sobre alternativas comercialmente aceptables de productos biodegradables a base de almidón de patata, maíz y trigo, capaces de sustituir al Poliestireno expandido (EPS); siendo las espumas de TPS de maíz sus productos con mejores características [17]. Así mismo, en México y Costa Rica se han realizado estudios sobre la melaza de caña de azúcar como una alternativa para sustituir parcialmente el poli-etilenglicol utilizado en la obtención de espumas de poliuretano con el objetivo de volverlas altamente biodegradables [18]. También, se presentaron avances en la obtención de plásticos biodegradables elaborados a partir del almidón de yuca como los desarrollados en la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo en Perú, la Universidad de San Buenaventura en Cali y la Universidad del Cauca en Popayán [14-16]; sin embargo, solo están orientados a la producción de películas biodegradables, siendo un campo inexplorado la temática sobre espumados biodegradables.

Por otra parte, los importantes logros alcanzados por el grupo de investigación CYTBIA dirigido por el Ingeniero Héctor Samuel Villada desde el año 2010 en el Laboratorio de Reología y Empaques de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad del Cauca; incluyen el PROESBIPAY orientado a la obtención del espumados biodegradables que se desarrolla desde el año 2014 aproximadamente, y se lleva a cabo en el mencionado laboratorio. La investigación está dentro del proyecto de regalías "Investigación Y Desarrollo De Empaques Biodegradables" que es dirigido por el grupo de investigación CYTBIA (Ciencia Y Tecnología de Biomoléculas de Interés Agroindustrial). Los desarrollos están direccionados hacia una producción industrial, teniendo en cuenta que son financiados por el Gobierno Nacional, entidad que espera impactos positivos y visibles en un periodo corto de tiempo (máximo 3 años).

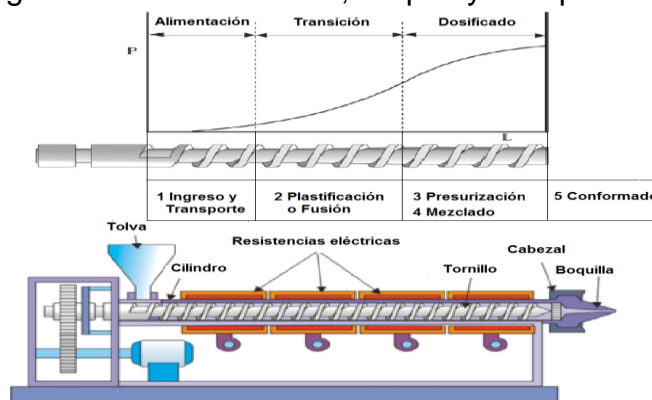
1.5 Proceso de Extrusión de Espumados

El proceso de extrusión de espumados, se realiza de manera similar a la mayoría de procesos de extrusión existentes, utilizando un extrusor de tornillo simple o uno de doble husillo. Sin embargo, este proceso se caracteriza por el aditamento de un agente espumante en el polímero. Al respecto conviene mencionar que es de gran importancia tener conocimiento del proceso de extrusión convencional para poder entender con mayor claridad el proceso de extrusión de espumados.

1.5.1 Extrusión convencional

La extrusión hace referencia a cualquier proceso de transformación en el que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un cuerpo de sección transversal constante. Generalmente, el proceso de extrusión manifiesta 5 etapas (ingreso/transporte, fusión, presurización, mezclado y conformado) que son ejecutadas en los componentes del equipo Extrusor. Sin embargo, todos los extrusores se dividen en tres zonas denominadas: de alimentación, transición y dosificación, en las cuales aumenta respectivamente la presión y disminuye la profundidad del canal del tornillo (ver *Figura 1*) [19].

Figura 1. Extrusor: Zonas, Etapas y Componentes



Fuente: Modificada de [19], junio de 2016

La zona de alimentación está más cercana a la tolva, la profundidad del canal del tornillo es máxima y su objetivo es compactar el material en una forma sólida espesa y transportarlo hacia la siguiente zona. La zona de transición, es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye de un modo más o menos gradual y el material se funde a medida que va compactándose. La zona de dosificado se ubica cerca de la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. Además, se encarga de presurizar y homogenizar la masa fundida para forzarla a atravesar la boquilla de conformado [19].

1.5.2 Extrusión de espumas

Las espumas plásticas se obtienen mediante la incorporación de gas en un polímero fundido bajo presión en la zona de “dosificado” del extrusor de tornillo simple. Al momento que la masa fundida sale por la boquilla del extrusor, se elimina la presión y las burbujas de gas se expanden provocando la formación controlada de pequeños orificios en la estructura del polímero. Cabe aclarar que el gas utilizado para este proceso puede ser ingresado directamente o por medio de agentes de expansión química según los métodos que se describen a continuación.

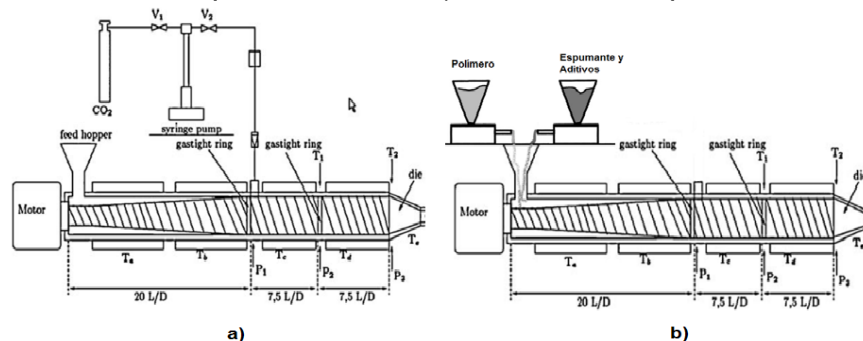
Método de expansión física

Las espumas se obtienen a partir de la incorporación de agentes de soplado físicos, que corresponden a gases o líquidos solubles en el polímero fundido, como el CO_2 y agua, ya que estos se agregan directamente en la masa fundida mediante su inyección en el puerto de ventilación localizado aproximadamente a 2/3 de la distancia entre la tolva y la boquilla de conformado (ver *Figura 2a*) [20].

Método de expansión química

Este método implementa agentes espumantes químicos como la azodicarbonamida y el ácido cítrico, que al calentarlos a una temperatura específica se descomponen generando gas. Por lo tanto, en el proceso de extrusión de espumados mediante expansión química, el agente espumante se mezcla con el polímero base previamente a la extrusión; luego, al extruir, cuando la mezcla está fundida y alcanza la temperatura de descomposición del espumante, se produce el gas que forma las burbujas que se expanden en la estructura del polímero al salir por la boquilla del extrusor (ver *Figura 2b*) [20].

Figura 2. Métodos de Extrusión de Espumados
a) Método de Expansión física b) Método de Expansión Química



Fuente: Modificada de [21], junio de 2016

Además del agente espumante utilizado en estos dos métodos, en el proceso de extrusión de espumas también se agregan agentes nucleantes que proporcionan sitios para el crecimiento de las burbujas, lo que permite una distribución homogénea de estas. Después de la inyección del gas o justo antes de la etapa de conformado, las temperaturas de fusión del polímero deben ser más bajas para aumentar su viscosidad y tener una expansión de burbujas más controlada.

1.6 Metodologías de Escalamiento

La necesidad de las organizaciones para comercializar nuevos productos con las características obtenidas de las investigaciones en laboratorio en el menor tiempo con el fin de aumentar su nivel competitivo, ha llevado a la aparición de

metodologías, técnicas y procedimientos que facilitan y agilizan la transición de una escala de investigación (laboratorio) en la que se desarrolla un nuevo producto con valor comercial, hacia la escala industrial (producción masiva) para su comercialización [22]. Entre las metodologías de escalamiento industrial más aceptadas se encuentra el Principio de Semejanza, la Modelación Matemática y los métodos Empíricos [23 -28].

El Principio de Semejanza se centraliza en las relaciones entre sistemas físicos de tamaños diferentes. Considerando que los sistemas se caracterizan por tres cualidades independientes: *tamaño, forma y composición*, este principio está ligado al concepto de forma que además de incluir proporciones geométricas de sus elementos, también incluye patrones de flujo de fluidos, gradientes de temperatura, entre otros, dependiendo de las configuraciones internas del sistema (geométricas, cinemáticas, térmicas, químicas, etc.) [26]. Este método organiza las magnitudes intrínsecas del sistema a manera de razones que toman la forma de grupos adimensionales; por lo tanto, la semejanza es determinada por la igualdad del valor en dichos grupos en el prototipo (sistema físico) y en el modelo. En ciertas circunstancias, el principio de semejanza se apoya del Análisis Dimensional para determinar los grupos adimensionales que representan el sistema, como es el caso cuando se desconocen las ecuaciones diferenciales del sistema pero si se conocen todas sus variables [28]. Esta técnica se utiliza para expresar el comportamiento de un sistema a través de un número mínimo de variables independientes agrupadas en relaciones de magnitudes iguales formando correlaciones adimensionales que constituyen la ecuación de estado del sistema [25, 26].

El método basado en la Modelación Matemática o también conocido como Modelo Semi-físico de Base Fenomenológica (MSBF), está relacionado con la teoría de control para definir el régimen de operación del proceso, haciendo uso de índices de estado impactable (IEI) obtenidos tras trabajar con la matriz de Hankel del modelo del proceso, de tal manera que partiendo del punto de operación deseado, la nueva escala pueda situarse alrededor de dicho punto sin afectar el régimen de operación. Este método presenta una solución más exacta en cuanto al escalamiento de procesos; sin embargo, requiere de un gran conocimiento de principios fisicoquímicos para la elaboración de las ecuaciones que dependen de la complejidad del proceso a escalar. Cabe resaltar que la matriz de Hankel representa el comportamiento dinámico del proceso previamente linealizado, lo que implica un esfuerzo adicional en el desarrollo del escalamiento por modelos fenomenológicos [23, 27].

En cuanto a los métodos basados en la experiencia o empíricos, sugeridos también por el procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos (PEIPP) para analizar el comportamiento de las variables características del sistema en este punto, se obtienen relaciones matemáticas a partir de registros históricos de los

datos de pruebas experimentales en el proceso existente (escala de laboratorio) que mediante la semejanza y el análisis dimensional produzcan correlaciones empíricas que permitan escalar el proceso. Sin embargo, esta metodología está limitada a tener en cuenta sólo algunas variables o parámetros durante las pruebas, además, la confiabilidad de la nueva escala será proporcional al número de datos procesados para su cálculo. Puesto que el método empírico se fundamenta en los datos obtenidos de un sistema con unas condiciones restringidas de operación o comportamiento propio, no es posible generalizarlo para diferentes procesos, implicando realizar pruebas para cada proceso individualmente [23].

1.7 Plantas Piloto

Las implementaciones a nivel de planta piloto son importantes por cuanto permiten evaluar la factibilidad de un proceso tecnológico, obtener información para el diseño de una planta comercial, visualizar costos, obtener conocimiento y dominio (Know-how) del proceso, ganar experiencia en la operación, obtener datos sobre tratamiento de residuales, entrenar personal, evaluar nuevos equipos tecnológicos, entre otros [26]. Una planta piloto es una instalación experimental en una escala intermedia entre laboratorio y plantas comerciales o industriales, conformada por una secuencia de equipos, instrumentos, accesorios y líneas, dispuestos en forma lógica para reproducir un determinado proceso. Generalmente se destinan a la investigación sobre la producción, con el fin de obtener mejoras sobre el propio producto o incluso para la obtención de nuevos productos [29].

1.7.1 Costo de las plantas piloto

En términos generales, las plantas piloto son costosas. El costo de estas depende de la escala de operación, la cantidad de instrumentación, el tipo de planta, entre otros factores; y si aún el costo fuese solo un 10% de la planta completa (nivel industrial), el mismo representa una cantidad considerable de dinero. Sin embargo, estos costos no son desproporcionados si se considera lo que puede ocurrir si una instalación industrial se construye a partir de la suposición de que el proceso desarrollado a nivel de laboratorio va a funcionar de acuerdo a lo esperado en la escala industrial y presenta, en la práctica, serios problemas durante la puesta en marcha, los que además de prolongar considerablemente ese periodo, provoca que se tenga que paralizar la misma para rediseñar la planta, cambiar equipos, perder la inversión de tiempo en poner un producto en el mercado, y realizar por ende, una gran cantidad de gastos. Si bien el diseño y la operación correcta de una planta piloto no pueden garantizar al 100% por si sola una puesta en marcha adecuada de una planta completa, con ello se gana un gran trabajo en el sentido de incrementar la probabilidad de que esto ocurra [26].

1.7.2 Principales tipos de plantas piloto existentes

Existen dos tipos fundamentales de plantas piloto, las llamadas plantas piloto “multipropósito” y las de tipo “específico o unipropósito”.

Plantas piloto multipropósito: Este tipo se caracteriza por una instalación o edificio, con el nombre genérico de “planta piloto”, lleno de equipos de proceso pequeños (tanques, reactores, columnas, intercambiadores de calor, centrifugas, secadores, bombas, etc.) disponibles todos para unirse en la configuración deseada para los trabajos específicos.

Plantas piloto unipropósito: En una planta piloto específica o “unipropósito”, los equipos se instalan y se interconectan con tuberías para realizar el trabajo específico requerido por el proyecto, de manera muy similar a como estaría montada la planta a escala comercial.

1.8 Descripción del PROESBIPAY a nivel de laboratorio

De acuerdo a la información recogida mediante visitas presenciales y la suministrada por el encargado directo del proceso de Extrusión de Espumados Biodegradables, el Ingeniero Agroindustrial Pedro Albán, se logró identificar que PROESBIPAY está constituido por 4 etapas: modificación de la humedad del almidón, acondicionamiento de la mezcla, obtención del espumado biodegradable y acondicionamiento de las espumas. A continuación se presenta la descripción de cada una de estas etapas.

1.8.1 Etapa de modificación de la humedad de almidón

El almidón usado como materia prima está clasificado como “no alimenticio”. Este es el mismo almidón de yuca que se utiliza en el proceso de Extrusión de Películas Biodegradables (ver *Figura 3a*) [16], trabajo que se desarrolla paralelamente a la extrusión de espumados biodegradables.

Figura 3. Materia Prima, Almacenamiento y Manipulación

a) Almidón de yuca b) Almidón en bandejas



a)



b)

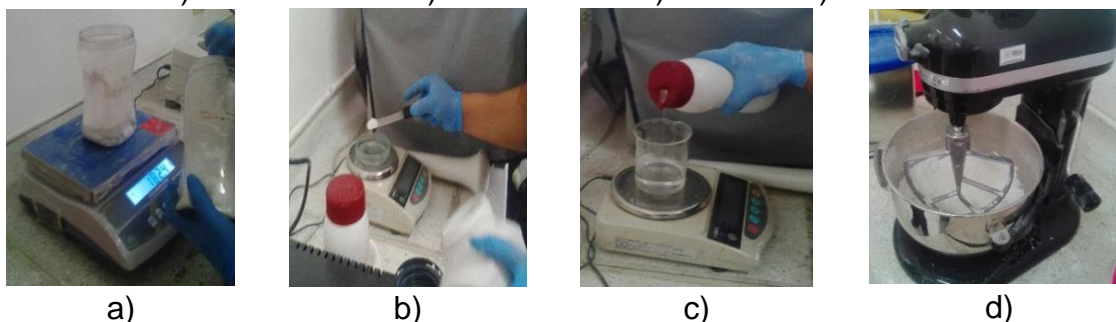
Fuente: Propia, mayo de 2016

Para modificar la humedad del almidón, en primer lugar, se pesa en una “balanza digital de masa” la cantidad de almidón a procesar; luego este se coloca en bandejas metálicas de acero inoxidable de 33.5x43.5x1.9 cm, de manera que la distribución sea uniforme con un grosor de la capa de material aproximado a la profundidad de la bandeja (ver *Figura 3b*). En segundo lugar, se ingresan las bandejas a un “horno de convección forzada” por un periodo aproximado de 20 horas a una temperatura de 80°C. El secado finaliza cuando a través de una “balanza de humedad” se determina que el porcentaje de humedad es menor o igual al 1%, en este punto la materia prima está caracterizada como “almidón seco”. Para terminar, el almidón seco es almacenado en recipientes herméticos para evitar que absorba humedad, este manejo permite que se mantenga en condiciones para el siguiente procesamiento.

1.8.2 Etapa de acondicionamiento de la mezcla

Para llevar a cabo el acondicionamiento de la mezcla se usa el almidón seco, ácido cítrico (agente espumante) y glicerol (99.5% de pureza) que funciona como agente plastificante; los pasos a seguir son los siguientes: Primero, se pesan las cantidades de almidón, espumante y plastificante (el agente espumante se maneja en una relación de 0.5% con respecto al almidón seco pesado, y el agente plastificante en una relación 30:70 con respecto al almidón seco, lo que significa que el porcentaje de almidón es 70% y el de glicerol 30%), para llevar a cabo el procedimiento se usa el equipo de la *Figura 6a*. En segundo lugar, se agrega el almidón seco al recipiente de la mezcladora, se adiciona el Ácido Cítrico pesado y se mezclan por un periodo de 30 segundos; luego, se adiciona el Glicerol y se mezclan nuevamente durante 5 minutos (ver *Figura 4*). Por último, la mixtura obtenida que se denominará de aquí en adelante “Compuesto 1”, se almacena en recipientes herméticos debido a las propiedades higroscópicas de los componentes; el periodo de almacenamiento es de 24 horas aproximadamente, hasta que se realice su posterior procesamiento.

Figura 4. Acondicionamiento de la Mezcla
a) Almidón seco b) Ácido cítrico c) Glicerol. d) Mezclado



Fuente: Propia, mayo de 2016

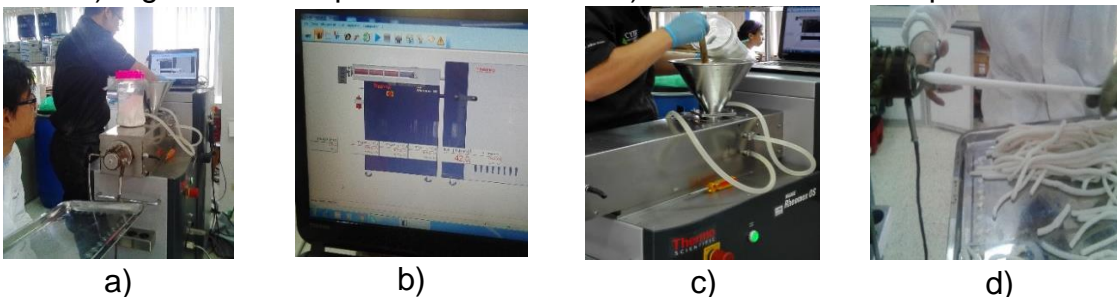
1.8.3 Etapa de obtención del espumado biodegradable

Después del periodo de almacenamiento, nuevamente se ubica el “compuesto 1” en el recipiente de la mezcladora para adicionarle “talco mineral” con una relación de 0.2% con respecto al almidón seco utilizado. Este talco actúa como agente nucleante proporcionando una densidad de núcleos homogéneamente distribuidos que facilita la formación de burbujas al interior del material. Esta operación se realiza justo antes de la extrusión, pues el talco podría reaccionar con los componentes del “compuesto 1” si fuese sometido a un periodo de almacenamiento, generando efectos no deseados en el proceso. El material resultante se llamará de aquí en adelante “compuesto 2” y está listo para ingresar al extrusor.

El primer paso para llevar a cabo el proceso de extrusión, es iniciar el precalentamiento del extrusor de tal manera que se alcance una temperatura de 120°C, 155°C, 170°C y 160°C en las resistencias de alimentación, fusión, compresión y conformado respectivamente. Después, transcurrido unos 10 minutos aproximadamente, cuando se alcanza los valores deseados de temperatura, se ingresa el “compuesto 2” por la tolva de alimentación (operación manual en la que el operario busca generar una presión constante empujando el material con un trozo de madera). Como resultado de la extrusión se obtiene un flujo de salida (cordón espumado) de 28,07g cada 30 segundos aproximadamente (dato que se obtuvo por inspección directa sobre el proceso en caliente), esto equivale a una producción de 3.368 kg/h. El cordón es cortado manualmente en trozos de longitud proporcional al largo de la bandeja metálica de recepción (ver *Figura 5*); cuando la bandeja completa su capacidad, los trozos son cubiertos con “papel kraft” y se dejan a temperatura ambiente por 24 horas.

Figura 5. Obtención del Espumado Biodegradable

- a) Precalentamiento del extrusor b) Configuración de parámetros
c) Ingreso de compuesto 2 a la tolva d) Corte del cordón espumado



Fuente: Propia, mayo de 2016

1.8.4 Etapa de acondicionamiento de las espumas

El último paso es ingresar las bandejas con el material espumado a la Cámara Climática (ver *Figura 9*) que se encuentra a una temperatura de 23 ± 2 °C y una

humedad relativa de $50\pm 5\%$; el proceso de estabilización del producto en esta cámara tiene una duración de 8 días. Transcurrido este tiempo, se pasan a realizar las pruebas pertinentes para la caracterización del producto; aquí se llevan a cabo dos pruebas físicas: densidad del material e índice de expansión y dos pruebas mecánicas: Índice de amortiguamiento (Spring Index) y compresibilidad.

1.9 Descripción de la Planta del PROESBIPAY

Con la descripción del PROESBIPAY que se desarrolló en la sección anterior se determina que la célula de la planta está compuesta de 4 unidades de producción: modificación de la humedad del almidón, acondicionamiento de la mezcla, obtención del espumado biodegradable y acondicionamiento de las espumas. En cada una de estas unidades se desarrolla un procesamiento que permite obtener un producto final con las características esperadas.

1.9.1 Unidad de modificación de la humedad de almidón

Como se mencionó en la descripción del proceso, el objetivo de esta unidad es reducir el porcentaje de humedad del almidón al 1% o inferior. En la ejecución de este procedimiento intervienen 3 elementos: una balanza digital de masa marca KERN GAB, un horno de convección forzada marca MEMMERT-SERIE PERFECT y una balanza digital de humedad marca PRECISA modelo XM 60 (ver *Figura 6*); estos equipos constituyen el aporte principal del proceso de secado del almidón de yuca.

Figura 6. Equipos para Modificación de la Humedad de Almidón

a) Balanza de Masa b) Horno de Convección Forzada c) Balanza de Humedad



a)



b)



c)

Fuente: Propia, mayo de 2016

1.9.2 Unidad de acondicionamiento de la mezcla

El objetivo de esta unidad es obtener la mezcla (almidón + plastificante + espumante) clasificada como “compuesto 1”. En la ejecución de este procedimiento intervienen 4 elementos: balanza digital de masa marca VIBRA, modelo SJ; mezclador de alta velocidad marca KITCHEN AID PROFESSIONAL, modelo 600, serie 6QT de 575 W de EE.UU; cronómetro digital para toma de tiempos y un

recipiente hermético donde se almacena el “compuesto 1” (ver *Figura 7*); estos equipos constituyen el aporte principal del proceso de mezclado.

Figura 7. Equipos para Acondicionamiento de la Mezcla

a) Balanza de masa b) Mezcladora c) Cronómetro d) Recipiente hermético



a)



b)



c)



d)

Fuente: Propia, mayo de 2016

1.9.3 Unidad de obtención del espumado biodegradable

El objetivo de esta unidad es obtener el espumado biodegradable, por lo tanto, los procedimientos se ejecutan sobre 10 equipos, divididos en 3 operaciones: mezclado de “compuesto 1” con agente espumante, extrusión y cortado del cordón espumado. Primero, para el mezclado del “compuesto 1” con el agente nucleante, intervienen 3 equipos: balanza digital de masa marca VIBRA, mezclador de alta velocidad marca KITCHEN AID PROFESSIONAL y el cronómetro digital que corresponden a los mismos equipos utilizados en la etapa anterior (ver *Figura 7*). Segundo, en la extrusión, las acciones giran en torno a un equipo de extrusión marca THERMO SCIENTIFIC fabricado en Alemania, modelo HAAKE RHEOMEX OS; conformado por un master de control, una tolva de sección circular y un módulo de tornillo simple con un tornillo de relación 5 a 1, esto indica la diferencia de compresión entre los filetes de la zona de alimentación, y los filetes de la zona de dosificado (ver *Figura 8*); cuenta con 4 zonas de calentamiento, una para cada etapa de la extrusión; también tiene un sistema de refrigeración por agua en la etapa de alimentación representado por el “Chiller” y uno por aire en las demás resistencias constituido por un compresor. Además, permite controlar la velocidad y la temperatura, medir la presión y el torque. En tercer lugar, el cortado del cordón de espuma es realizado por un operario que por medio de unas tijeras, corta el cordón en longitudes similares y organiza los tramos en una bandeja metálica para luego envolverlos en papel “kraft” y dejarlos reposar por 24 horas (ver *Figura 8f*).

Figura 8. Equipos para Obtención del Espumado Biodegradable

- a) Master de control. b) Tolva de sección circular. c) Módulo de tornillo simple.
d) Tornillo R: 5 a 1. e) Chiller. f) Compresor. g) Tijeras y Bandeja metálica.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



g)

Fuente: Propia, mayo de 2016

1.9.4 Unidad de acondicionamiento de las espumas

En esta última unidad se lleva a cabo la estabilización de los cordones de espumado biodegradable obtenidos previamente; por lo tanto, las actividades son ejecutadas sobre 2 elementos que corresponden a una cámara climática marca BINDER, rotulada como LR-MM-PE-RE-37 (ver *Figura 9*) y bandejas metálicas, las mismas que se utilizan en el proceso de secado de la primera unidad. Esta cámara climática se encarga de proporcionar las condiciones ambientales más adecuadas para que los cordones espumados lleguen a un estado en el que sus propiedades higroscópicas se estabilicen y la absorción de humedad no sea crítica.

Figura 9. Cámara Climática



Fuente: Propia, mayo de 2016

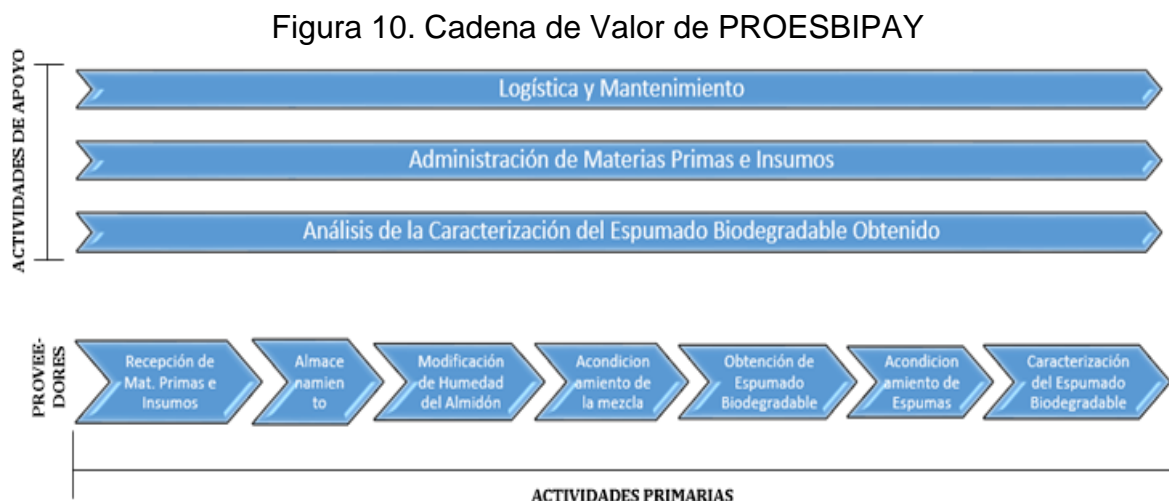
Capítulo 2

2 Identificación de Aspectos Técnicos y Funcionales de PROESBIPAY

En este capítulo se levanta la cadena de valor, los diagramas de flujo de proceso (PFD), se modela mediante ISA-S88.01 (modelo de proceso, físico y procedimental) la implementación del PROESBIPAY que existe a nivel de laboratorio y finalmente, se presenta un diagnóstico detallado en cuanto al nivel de dificultad en la realización del proceso, nivel de automatización y necesidades del proceso, lo que permite obtener un listado de requerimientos generales y de automatización.

2.1. Cadena de Valor de PROESBIPAY

La cadena de valor permite llevar a cabo un análisis para la planeación estratégica de negocios, identificación de ventajas competitivas y contribución de valor que genera cada una de las actividades principales (incluidas las interrelaciones entre las mismas) dentro de una organización empresarial [30]. La cadena de valor del PROESBIPAY posee 7 actividades primarias y 3 de apoyo (ver *Figura 10*).



Fuente: Propia, junio de 2016

La implementación del PROESBIPAY a nivel de laboratorio cuenta, en su línea principal, con el área de “recepción de materias primas e insumos” en la cual se desarrollan actividades como recepción, verificación, registro de productos, entre otras; el área subsiguiente es “almacenamiento”, que se refiere a la disposición adecuada de los materiales en bodega o estanterías; posteriormente aparecen las etapas de “modificación de la humedad del almidón”, “acondicionamiento de la

mezcla”, “obtención del espumado biodegradable” y “acondicionamiento de las espumas”, que se describieron previamente en la sección 1.8 y finalmente se realiza la correspondiente caracterización sobre el producto obtenido.

2.2. Diagrama de Flujo de PROESBIPAY a Nivel de Laboratorio

Con el PFD se levanta la representación de la secuencia que recorre el flujo de materia prima a lo largo del proceso de producción hasta obtener el producto final, que en este caso es el Espumado Biodegradable; cabe resaltar que no se hacen descripciones complejas acerca de los detalles que rodean el proceso con el fin de facilitar la comprensión del diagrama. Antes de construir el esquema, se procede a describir las entradas y salidas que se tienen en las diferentes etapas del proceso de Extrusión de Espumados Biodegradables (ver *Tabla 2*). Además, se procede a elaborar 2 diagramas PFD: uno por etapas y otro por operaciones; el primero (etapas), representa el flujo de materiales que ingresan a cada etapa y el subproducto que se obtiene a la salida de la misma; en el caso del diagrama levantado por operaciones, se detallan las transformaciones de los materiales al interactuar con la operación que corresponda.

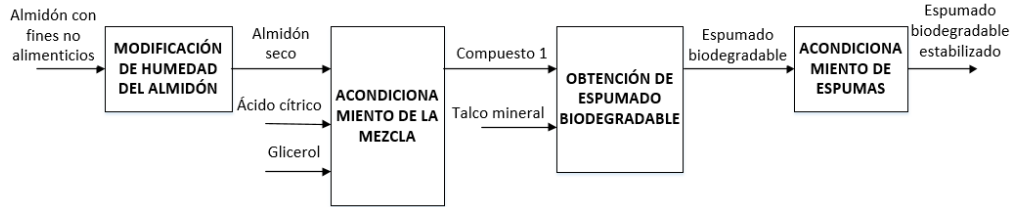
Tabla 2. Entradas y salidas de las etapas de PROESBIPAY

ENTRADA	ETAPA	SALIDA
➤ Almidón de Yuca con fines no alimenticios	Modificación de la Humedad del Almidón	➤ Almidón seco
➤ Almidón seco ➤ Glicerol ➤ Ácido Cítrico	Acondicionamiento de la Mezcla	➤ Compuesto 1
➤ Compuesto 1. ➤ Talco Mineral	Obtención del Espumado Biodegradable	➤ Cordones de Espumado Biodegradable
➤ Cordones de Espumado Biodegradable	Acondicionamiento de las Espumas	➤ Cordones de Espumado Biodegradable Estabilizados

Fuente: Propia, mayo de 2016.

En el PFD levantado por etapas del proceso de extrusión de espumados biodegradables (ver *Figura 11*), el punto de partida es la modificación de la humedad del almidón, en esta etapa la entrada necesaria es “almidón con fines no alimenticios” y la salida, producto del respectivo procesamiento, es el “almidón seco”. En la etapa de acondicionamiento de la mezcla, las entradas son: almidón seco, ácido cítrico y glicerol, como resultado del procesamiento se obtiene el “compuesto 1” que se almacena por un periodo de 24 horas aproximadamente. Seguidamente se tiene la etapa de extrusión del espumado biodegradable que tiene como entrada “compuesto 1” y talco mineral, entregando a la salida los cordones de espumado biodegradable. Finalmente, aparece la etapa de acondicionamiento de las espumas que cuenta con los cordones de espumado en la entrada y a la salida entrega cordones de espumado estabilizados.

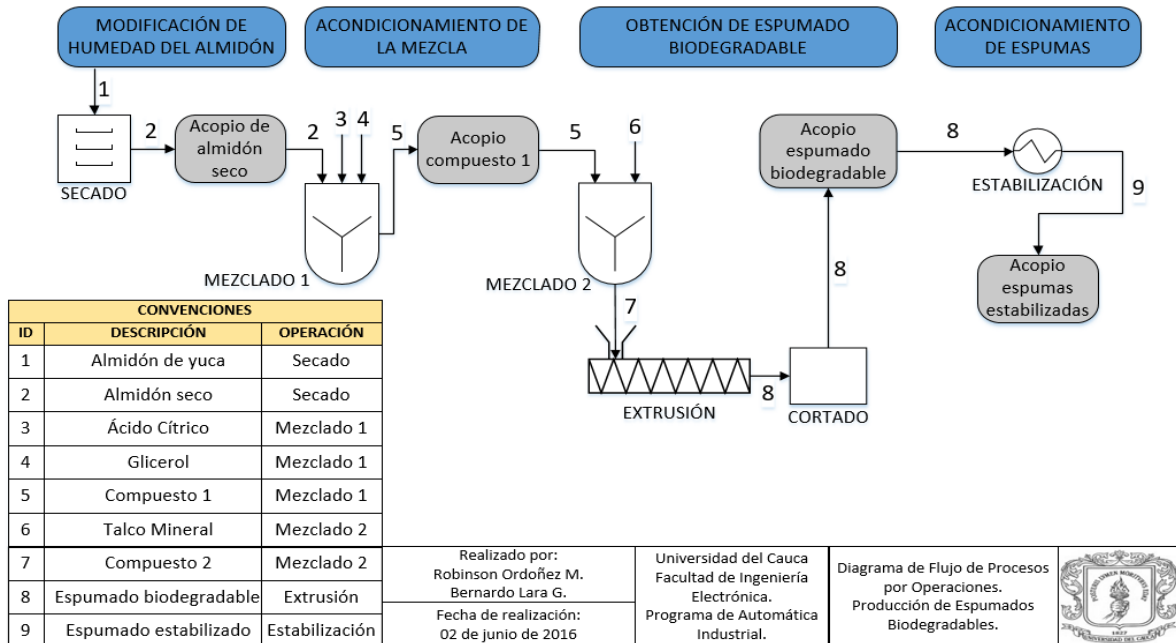
Figura 11. Diagrama de flujo de proceso por etapas de PROESBIPAY



Fuente: Propia, junio de 2016

Luego se procede a elaborar el PFD basado en operaciones, *Figura 12*, que se desarrollan en cada una de las etapas del proceso de obtención de espumados biodegradables. Se presenta un total de 4 etapas de proceso: modificación de la humedad del almidón (con una operación de secado que acondiciona el almidón a una humedad del 1% o inferior), acondicionamiento de la mezcla (cuenta con una única operación denominada “mezclado 1” que integra el almidón seco, plastificante y el agente espumante, constituyéndose el compuesto 1), obtención del espumado biodegradable (cuenta con una operación de mezclado donde se integra el compuesto 1 con el agente nucleante, una operación de extrusión donde se obtiene el cordón de espumado biodegradable y finalmente aparece una operación de cortado en la que se segmenta el espumado previamente obtenido), finalmente aparece la etapa de acondicionamiento de las espumas (se usa la cámara climática para la estabilización de las espumas y posteriormente se almacena los espumados obtenidos).

Figura 12. Diagrama de flujo de proceso en operaciones de PROESBIPAY



Fuente: Propia, junio de 2016

2.3 Modelos ISA-S88.01 de PROESBIPAY Laboratorio

Este apartado del estándar ISA hace referencia a procesos tipo Batch y de la misma manera a su modelado y terminología [31]. Una correcta implementación de los modelos (Modelo de Proceso, Modelo Físico, Modelo de Control de Procedimiento) contribuye al enfoque principal del estándar que es separar detalladamente el proceso y la planta. El Modelo Físico permite describir los activos físicos (indicación del “dónde” se ejecuta el procesamiento y planta) de la empresa, involucrados en la fabricación y que generalmente se organizan de manera jerárquica; el Modelo de Control de Procedimiento (indicación del “cómo” se realiza el proceso) permite dirigir acciones orientadas a equipos para llevar a cabo una tarea orientada al proceso, la definición del proceso en sí mismo es proporcionada por el Modelo de Proceso (indicación del “qué” se obtiene como resultado del procesamiento).

2.3.1 Modelo de proceso

A través de este modelo se visualiza ordenadamente cualquier proceso productivo de tipo empresarial. La descripción que entrega el modelo está fundamentada en la aplicación de 4 niveles estructurales: “proceso” (secuencia de actividades químicas, físicas o biológicas para la transformación de materiales y energía); “etapas de proceso” (parte del proceso que opera independientemente de otras y que por lo general ejecutan una secuencia programada de cambios físicos o químicos en el material procesado); “operaciones de proceso” (principales actividades que se desarrollan en las etapas de proceso); “acciones de proceso” (actividades de procesamiento menor que se combinan para formar las operaciones de proceso). En el PROESBIPAY se identifican 4 etapas, 6 operaciones y 23 acciones de proceso (ver *Tabla 3*).

Tabla 3. Modelo de proceso de PROESBIPAY laboratorio

Proceso	Etapas	Operaciones	Acciones
Producción De Espumado Biodegradable A Partir De Almidón De Yuca	Modificación de la humedad del almidón	Secado de almidón de yuca	Pesar almidón de yuca en balanza digital de masa.
			Ingresar almidón de yuca al horno de convección forzada
			Calentar almidón de yuca en horno de convección forzada
			Almacenar “almidón seco” en recipientes herméticos.
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclado de almidón con aditivos	Pesar “almidón seco”, agente espumante y plastificante, en la balanza digital de masa
			Agregar “almidón seco”, agente espumante y plastificante, en la mezcladora de alta velocidad.
			Mezclar materiales en la mezcladora de alta velocidad.
			Almacenar compuesto 1 en recipientes herméticos
	Obtención del espumado biodegradab.	Mezclado de compuesto 1 con agente nucleante	Pesar agente nucleante en la balanza de masa
			Agregar “compuesto 1” y agente nucleante en la mezcladora de alta velocidad.
Mezclar materiales en la mezcladora de alta velocidad			

		Extruido del compuesto 2	Ensamblar y precalentar el extrusor.
			Agregar el "compuesto 2" al extrusor
			Fundir "compuesto 2" en el módulo de tornillo simple del extrusor.
		Cortado de espumado biodegradable	Cortar cordón de espumado usando una tijera metálica.
			Ordenar cordones de espumado en bandejas metálicas.
			Almacenar cordones de espumado en bandejas metálicas.
	Acondicionamiento de las espumas	Estabilizado de espumado biodegradable	Estabilizar cordones de espumado en cámara climática.
Almacenar cordones estabilizados.			

Fuente: Propia, junio de 2016

2.3.2 Modelo físico

Este modelo describe los activos físicos de una empresa que están involucrados en la producción de un lote (Batch), en términos de Empresa, Sitio, Área, Célula de Proceso, Unidades, Módulos de Equipo y Módulos de Control. Estos generalmente son organizados de forma jerárquica en el orden mencionado, de manera que las agrupaciones de nivel inferior, empezando por los módulos de control, se combinan para formar los niveles superiores hasta llegar al nivel de Empresa [31]. Los tres niveles superiores del modelo físico son definidos por consideraciones organizacionales, geográficas y de negocio; mientras que los cuatro niveles inferiores están enfocados a nivel de la planta de producción; por lo tanto, estos se detallaran a profundidad en el presente trabajo.

Antes de continuar, vale la pena recordar los conceptos propuestos por el estándar ISA-88.01 para los niveles inferiores de la jerarquía del modelo físico: **Nivel de Célula de Proceso** es una agrupación lógica de procesos que incluye todo el equipo requerido para la producción de uno o más lotes; **Nivel de Unidad** combina todos los equipos de procesamiento y control físico necesarios para realizar las actividades de procesamiento principal para presentarlos como una agrupación de equipos independiente; **Nivel de Módulo de Equipo** combina los equipos de procesamiento y control necesarios para llevar a cabo un número finito de actividades específicas de procesamiento menor. Generalmente se centra en una pieza de equipo de procesamiento y el **Nivel de Módulo de Control** es un dispositivo que tiene conexión directa al proceso y es operado como una entidad única.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriormente expuestas, se despliega el Modelo Físico (MF) de PROESBIPAY implementado en laboratorio por el grupo CYTBIA para la extrusión de espumados biodegradables de la siguiente manera: 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 la

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 el que se desarrolla el proceso; estos 3 niveles (empresa, sitio, área) no son presentados en el diagrama pero deben tenerse en cuenta. Ahora, centrándose en lo que es el PROESBIPAY, se tiene que su Célula de Proceso está conformada por 4 Unidades: Modificación de la humedad de almidón, acondicionamiento de la mezcla, obtención del espumado biodegradable y acondicionamiento de las espumas; además de 6 módulos de equipo y 26 módulos de control (ver *Tabla 4*).

Tabla 4. Modelo físico de PROESBIPAY laboratorio

Célula de Proceso	Unidad	Módulo de Equipo	Módulo De Control
Producción De Espumado Biodegradable A Partir De Almidón De Yuca.	Modificación de la humedad del almidón	Secador	Horno de convección forzada
			Balanza digital de masa
			Operario
			Balanza de humedad
			Recipiente hermético
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclador 1	Mezcladora de alta velocidad
			Balanza digital de masa
			Operario
			Cronómetro
			Recipiente hermético
	Obtención del espumado biodegradable	Mezclador 2	Mezcladora de alta velocidad
			Balanza digital de masa
			Cronómetro
			Operario
		Extrusor	Módulo de tornillo simple
			Master de control
Tolva de sección circular			
Compresor de aire			
Chiller			
Operario			
Módulo de corte	Tijera		
	Bandeja metálica		
	Operario		
Acondicionamiento de las espumas	Estabilizador	Cámara climática	
		Bandeja metálica	
		Operario	

Fuente: Propia, junio de 2016

2.3.3 Modelo de control procedimental

Este modelo permite definir secuencial y organizadamente las acciones que se deben ejecutar de manera jerárquica en un proceso determinado. Este modelo especifica las acciones que se deben ejecutar sobre los equipos en un orden cronológico, lo que permite obtener un proceso determinado. Los niveles que componen el modelo de control procedimental (MCP) son: **procedimiento**: compuesto por procedimientos de unidad organizados que constituyen el conjunto de acciones necesarias para ejecutar un Batch; **procedimiento de unidad**:

compuesto por operaciones ordenadas que se ejecutan de manera secuencial dentro de una unidad; **operaciones:** conjunto ordenado de fases que genera cambios en el estado del material; **fases:** nivel más bajo dentro del control procedimental, encargadas de ejecutar acciones orientadas al proceso. Bajo estos planteamientos, el modelo de control procedimental de PROESBIPAY cuenta con el procedimiento “producir espumados biodegradables a partir de almidón de yuca”, los procedimientos de unidad son 4 (modificación de la humedad del almidón, acondicionamiento de la mezcla, obtención del espumado y acondicionamiento de las espumas), las operaciones son 6 (disminuir humedad, mezclar almidón seco con aditivos, mezclar compuesto 1 con agente nucleante, extruir compuesto 2, cortar espumado biodegradable, estabilizar el espumado biodegradable), finalmente, el número de fases son 26 (ver *Tabla 5*)

Tabla 5. Modelo de control procedimental de PROESBIPAY laboratorio

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operaciones	Fases
Producción De Espumado Biodegradable A Partir De Almidón De Yuca	Modificación de la humedad del almidón	Disminuir humedad	Pesar almidón de yuca
			Ingresar almidón de yuca
			Calentar almidón a una temperatura de 80°C, hasta obtener una humedad del 1% o inferior.
			Almacenar “almidón seco”
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclar “almidón seco” con aditivos	Pesar “almidón seco” en una relación 70/30 con respecto a la cantidad de glicerol.
			Pesar agente espumante en una relación de 0.5% con respecto al “almidón seco”.
			Pesar plastificante en una relación 30/70 con respecto al “almidón seco”.
			Agregar “almidón seco” y agente espumante
			Mezclar por un ciclo de 30 segundos (mezclar 1).
			Agregar plastificante.
			Mezclar por un ciclo de 5 minutos (mezclar 2).
			Almacenar “compuesto 1” obtenido.
	Obtención del espumado biodegradable	Mezclar “compuesto 1” con agente nucleante	Pesar agente nucleante en una relación de 0.2% con respecto al “almidón seco”.
			Agregar “compuesto 1” y agente nucleante.
			Mezclar durante 5 minutos.
		Extruir “compuesto 2”	Precalentar la zona de alimentación, fusión, compresión y conformado, a una temperatura de 120°C, 155°C, 170°C y 160°C respectivamente.
			Agregar “compuesto 2”.
			Fundir “compuesto 2”.
		Cortar espumado biodegradable	Cortar cordón espumado a 43.5 cm.
			Ordenar espumado biodegradable obtenido.
			Almacenar espumado biodegradable obtenido.
		Acondicionamiento de las espumas	Estabilizar espumado biodegradable	Ingresar cordones de espumado a estabilización a 23±2 °C y humedad relativa de 50±5%.
	Almacenar espumado biodegradable.		

Fuente: Propia, junio de 2016

Cabe resaltar los siguientes aspectos:

- El precalentamiento que se lleva a cabo en la operación “extruir compuesto 2” tiene una duración de 10 minutos aproximadamente.
- El proceso de estabilización a nivel de laboratorio (desarrollado en la operación “estabilizar espumado biodegradable”), tiene una duración de 8 días.
- Todas las operaciones se ejecutan de manera secuencial.

2.3.4 Relación entre los modelos ISA-S88.01

Al haber desarrollado los modelos propuestos por ISA-S88.01, de control procedimental, físico y de proceso, se puede evidenciar la existencia de una relación que estos modelos guardan entre sí. Esta relación determina que las tareas presentadas en el modelo de control procedimental se ejecutan sobre las agrupaciones de equipos de procesamiento y control definidos en el modelo físico, proporcionando funcionalidad de procesamiento determinada en el modelo de proceso.

Como se observa en la sección 2.3 de este capítulo, los 3 modelos desarrollados para PROESBIPAY en laboratorio presentan un color característico para cada nivel, esto con el propósito de mantener una convención necesaria para relacionar los 3 modelos (ver Tabla 6).

Tabla 6. Convenciones para relacionar los ítems de los modelos ISA-S88.01

M de Control Procedimental	Modelo Físico	Modelo de Proceso	Color
Procedimiento	Célula del proceso	Proceso	
Procedimiento de unidad	Unidad	Etapa de proceso	
Operación	Módulo de equipo	Operación de proceso	
Fase	Módulo de control	Acción de proceso	

Fuente: Propia, junio de 2016

Para presentar la relación existente entre los 3 modelos con su convención de colores, en el Anexo A (Relación de los modelos ISA-S88.01 de PROESBIPAY laboratorio) se presenta la relación completa del modelado de PROESBIPAY a nivel de laboratorio.

2.4 Diagnóstico de PROESBIPAY a Nivel de Laboratorio

Para llevar a cabo el diagnóstico del PROESBIPAY se comprueba, en primer lugar, el nivel de dificultad por fases de acuerdo a la valoración propia de los investigadores que trabajan en el proceso; en segundo lugar, se identifica el nivel de automatización presente en la ejecución de cada una de las fases; como tercer paso, se analiza cada uno de los modelos ISA-S88.01 (proceso, físico y control

procedimental) obtenidos en la sección 2.3; finalmente, se estudia las necesidades del proceso en cuanto a documentación, automatización y mantenimiento de equipos (para ver el desarrollo de estos 4 pasos, dirigirse al Anexo B).

El desarrollo de este diagnóstico, entrega como resultado final un listado de requerimientos generales (RG) y de automatización (RA), los cuales pueden ser solucionados en la escala actual del proceso o en una nueva escala de producción.

2.4.1 Requerimientos de PROESBIPAY a nivel de laboratorio

La exploración total de PROESBIPAY, permitió identificar requerimientos generales como también de automatización, necesarios para una mejor ejecución del proceso. Estos requerimientos, a pesar de que se originan a nivel de laboratorio, son heredados a la implementación (o modelado) a nivel de planta piloto, por ello, el presente trabajo de grado dará solución a estos requerimientos en el entorno a la planta piloto (obtenido mediante escalamiento industrial).

Requerimientos Generales

- RG1. Establecer un formato estándar para la planeación de la ejecución de la producción del Batch y seguimiento de parámetros del proceso.
- RG2. Realizar la documentación formal de todo el proceso, de tal manera que se asegure la reproducción de la información y evite dependencia de investigadores en particular.
- RG3. Proponer un sistema que garantice un ingreso continuo de material a la zona de alimentación del extrusor.
- RG4. Proponer un sistema de corte del cordón espumado, a la salida del extrusor.
- RG5. Proponer un sistema para enfriamiento de cordón espumado obtenido a la salida del extrusor.
- RG6. Proponer un sistema para embalaje del espumado biodegradable.

Requerimientos de Automatización

- RA1. Diseñar la cadena de valor para PROESBIPAY.
- RA2. Realizar el diagrama PFD con base en ISA-S5.1.
- RA3. Modelar el proceso con ISA-S88.01.
- RA4. Diagramas de tuberías e instrumentación P&ID, apoyándose en el estándar ISA-5.1.
- RA5. Identificar variables de proceso (manipuladas, controladas, disturbios).
- RA6. Modelar la receta maestra y de control con base al estándar ISA-88.01.

Capítulo 3

3 Modelo de Escalamiento de PROESBIPAY a Nivel de Planta Piloto

En el presente capítulo, se expone el mejoramiento del “Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos (PEIPP)” mediante su aplicación a PROESBIPAY a nivel de planta piloto. El PEIPP (ver Anexo C), fue desarrollado como trabajo de grado en la Universidad del Cauca por el Ingeniero en Automática Industrial, Edgardo Martínez y consta de 6 fases para llevar a cabo un escalamiento industrial (ver *Tabla 7*)[16].

Tabla 7. Propuesta de escalamiento industrial de procesos productivos PEIPP

Fases	Pasos
Estudio del proceso a escala menor	<ol style="list-style-type: none">1. Esquematación y documentación.2. Cálculo de densidades aparentes.3. Estudio de mercado, unidad productiva.4. Primer estudio de factibilidad.
Estudio del proceso a escala mínimamente aumentada	<ol style="list-style-type: none">1. Estudio de variables principales del proceso.2. Rendimiento obtenido.3. Consumo energético y de materiales.4. Estudio del manejo de residuos.5. Segundo estudio de factibilidad.
Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento	<ol style="list-style-type: none">1. Cálculo de volúmenes de producción.2. Cálculo de factor de escalamiento.3. Modificación cuantificada de variables del proceso.
Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente	<ol style="list-style-type: none">1. Organización de la información del proceso que ya opera industrialmente.2. Comparación de modelos ISA-S88.01 del proceso en cuestión y el que opera industrialmente.
Determinación de la planta física en la escala industrial	<ol style="list-style-type: none">1. Escogencia de equipos.2. Distribución en planta.
Organización del escalamiento industrial logrado	<ol style="list-style-type: none">1. Aspectos empresariales.2. Esquematación representativa de la escala industrial lograda.3. Receta maestra y de control.

Fuente: Tomado de [16], julio de 2016.

Para llevar a cabo el escalamiento de PROESBIPAY a nivel de planta piloto, se plantea la modificación del PEIPP como lo representa la *Tabla 8* cuyos cambios se argumentarán en el desarrollo de cada fase.

Tabla 8. PEIPP modificado

Fases	Pasos
Estudio del proceso a escala menor	<ol style="list-style-type: none"> 1. Esquematización y documentación. 2. Calculo de densidades aparentes. 3. Estudio de la unidad productiva. 4. Primer estudio de factibilidad.
Caracterización del proceso a escala menor	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rendimiento obtenido. 2. Consumo energético y de materiales. 3. Estudio del manejo de residuos. 4. Segundo estudio de factibilidad.
Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estudio de variables principales del proceso. 2. Escalamiento de la producción. 3. Modificación cuantificada de variables del proceso.
Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente	<ol style="list-style-type: none"> 1. Organización de la información del proceso que ya opera industrialmente. 2. Comparación de modelos ISA-S88.01 del proceso en cuestión y el que opera industrialmente.
Determinación de la planta física en la escala industrial	<ol style="list-style-type: none"> 1. Escogencia de equipos. 2. Distribución en planta.
Organización del escalamiento industrial logrado	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aspectos empresariales. 2. Esquematización representativa de la escala industrial lograda. 3. Receta maestra y de control.

Fuente: Modificado de [16], julio de 2016.

3.1 Estudio del Proceso a Escala Menor

Como el autor de PEIPP lo plantea, en el caso de PROESBIPAY la “escala menor” corresponde a la implementación a nivel de laboratorio que se tiene actualmente en las instalaciones de la FACA.

3.1.1 Esquematización y documentación

En esta sección se recomienda hacer una esquematización con diagramas de flujo que segmenten todo el proceso general en etapas y además, incluir los materiales que ingresan y resultan en cada una. Teniendo en cuenta estos planteamientos, para PROESBIPAY ya se implementó la esquematización mediante diagrama de flujo de proceso (ver *Figura 11*, sección 2.2) y se consignaron los materiales que ingresan y salen en cada etapa (ver *Tabla 2*, sección 2.2).

PEIPP también recomienda una esquematización más específica, con diagramas de flujo respecto a operaciones conformantes de cada una de las etapas; además, para la organización formal y documentada del proceso, recomienda usar el estándar ISA-88.01. Para PROESBIPAY se levantó el diagrama de flujo basado en operaciones (ver

Figura 12, sección 2.2) y se implementó el modelo de proceso, físico y de control procedimental, propuestos por el estándar ISA-88.01 (ver sección 2.3); con esto, el ítem queda totalmente cubierto y desarrollado.

Se recomienda además, recolectar organizadamente todos los datos provenientes de las diferentes pruebas y ejecuciones del proceso, utilizando formatos unificados por consenso dentro de los grupos de investigación. Para PROESBIPAY, esta recomendación se asocia con el “Requerimiento General 1” (RG1 de la sección 2.4.1), por lo tanto, se procede a desarrollar el formato unificado (ver *Tabla 9*), que además de satisfacer la recomendación de PEIPP, soluciona el RG1 mencionado.

Tabla 9. Documento unificado de seguimiento para PROESBIPAY

PRODUCCIÓN DE ESPUMADOS BIODEGRADABLES A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA				
Nombre del encargado:			Lote número:	
			Fecha:	
Hora inicio:		Hora finalización:		
Procedimiento de Unidad	Fase	Parámetro		Observación
Modificación de la humedad del almidón	Pesar almidón	Cantidad (g)		
	Ingresar almidón			
	Calentar	Temperatura (°C)		
		Tiempo de secado (h)		
		Humedad (%)		
Almacenar almidón	Cantidad (g)			
Acondicionamiento de la mezcla	Pesar almidón	Cantidad (g)		
	Pesar agente espumante	Cantidad (g)		
	Pesar plastificante	Cantidad (g)		
	Agregar almidón y agente espumante			
	Mezclar 1	Tiempo (min)		
	Agregar plastificante	Cantidad (g)		
	Mezclar 2	Tiempo (min)		
	Almacenar “compuesto 1”	Cantidad (g)		
Obtención del espumado biodegradable	Pesar agente nucleante	Cantidad (g)		
	Agregar “compuesto 1” y nucleante			
	Mezclar	Tiempo (min)		
	Precalentar	Temperatura R1 (°C)		
		Temperatura R2 (°C)		
		Temperatura R3 (°C)		
		Temperatura R4 (°C)		
	Agregar “compuesto 2”	Cantidad (g)		
	Fundir			
	Cortar cordón espumado	Longitud (cm)		
	Ordenar			
Almacenar	Cantidad (g)			
Acondicionamiento de las espumas	Ingresar cordones	Temperatura (°C)		
		Humedad relativa (%)		
	Almacenar	Cantidad (g)		

Grado de satisfacción (producto final obtenido):	Alto	Medio	Bajo
Recomendaciones:			

Fuente: Propia, julio de 2016.

El formato unificado se asocia directamente con los “procedimientos de unidad” y las “fases” del Modelo De Control Procedimental (ver sección 2.3), teniendo en cuenta que dicho modelo entrega de manera secuencial y organizada, las acciones que deben ejecutarse en un proceso determinado.

3.1.2 Cálculo de densidades aparentes

La densidad aparente de un material o un cuerpo es la relación entre su volumen y su peso, incluyendo huecos, espacios y poros que contenga. Es de vital importancia calcular, a nivel de escala menor (laboratorio), la densidad aparente de los materiales que ingresan a cada operación, pues servirán de insumo para calcular volúmenes de producción, capacidades algunos contenedores como tolvas, etc. Para estos cálculos se recomienda utilizar la ecuación (1).

$$\rho_A = \frac{m}{V_A} \quad (1)$$

ρ_A	: Densidad aparente	V_A	: Volumen aparente del material
m	: Masa del material		

De acuerdo a la *Tabla 2* de entradas y salidas de las etapas de PROESBIPAY, se calculó la densidad para cada material mediante pruebas directas en el laboratorio, los resultados se listan en la *Tabla 10*.

Tabla 10. Densidad aparente de los materiales interactuantes en el proceso

Material	Masa (kg)	Volumen (m3)	Densidad (kg/m3)
Almidón de yuca	0.3833	0.0008	479.125
Almidón de yuca seco	0.01982	0.00004	495,5
Glicerol	0.0239	0.00002	1150
Ácido cítrico	0.00871	0.00001	871
Compuesto 1	0.01844	0.00004	461
Talco mineral	0.00521	0.00001	521
Compuesto 2	0.0179	0.00004	447.5
Espumado biodegradable	0.01197	0.000085	140.8
Espumado estabilizado	0.0128	0.000085	150.59

Fuente: Propia, agosto de 2016

3.1.3 Estudio de la unidad productiva

Este estudio busca determinar cuál es la “unidad productiva real”, basándose en la demanda de mercado a satisfacer. Entre otros aspectos, se establece cuantitativamente la población a la que irá dirigido el producto, que para PROESBIPAY serán “espumas biodegradables de relleno suelto”. Este planteamiento, hace parte de un enfoque (PEIPP) en el que se tiene como “punto de llegada” del escalamiento, la producción industrial a gran escala, por ello se habla de conceptos como “demanda de mercado” y “población a la que se destina el producto”. Sin embargo, para el presente trabajo de grado, el punto de llegada es un escalamiento a nivel de planta piloto; en este orden de ideas, la Unidad Productiva Real que se calculará para llevar a cabo el escalamiento de PROESBIPAY, atañe a una cantidad “estándar” que se maneja para este nivel de producción, para ello, se hará un breve estudio de las cantidades de material que se procesan, de manera general, a nivel de plantas piloto.

Consideraciones generales para producciones a nivel de planta piloto

El escalamiento completo, para lograr una exitosa puesta en marcha y operación económica de un proceso a escala comercial, generalmente se realiza con base a las etapas (escalas) de concepción, laboratorio, banco, planta piloto, producción industrial y comercialización [22]. Para definir los límites entre una escala y otra existen muchos criterios, entre ellos, se han utilizado las relaciones entre las dimensiones lineales de los equipos (factores de escala geométricos), a partir de consideraciones de criterios de semejanza. Es posible tomar como valor aproximado, que los factores de escala geométricos puedan estar en el rango de 5 a 15. No obstante, en la práctica no es raro hallar factores tan bajos como 3 o tan altos como 100 [26].

Sobre la misma temática, PEIPP propone que, para proyectar o aumentar la producción inicial de un producto a nivel de planta piloto, el aumento en la escala puede ser obtenido con relaciones de 1:3 – 1:5 además, deja claro que la determinación de la relación de aumento en un proceso, puede ser determinada por investigadores involucrados directamente en dicho procesamiento, según su juicio y experiencia [16]. Otro planteamiento, sugiere que un buen criterio de definición de los límites entre las distintas escalas, es el de los objetivos que se persiguen con cada una de ellas y los resultados que se esperan [26]. Esta concepción se refiere a la determinación de la escala de aumento, según la particularidad del proceso y el conocimiento que manejan las personas involucradas en el mismo.

Teniendo en cuenta los planteamientos expuestos para producciones a nivel de planta piloto, la “unidad productiva” para el escalamiento de PROESBIPAY se calcula con la relación de aumento de producción 1:5, factor que fue aceptado por los investigadores del proceso.

Unidad Productiva

A nivel de laboratorio se procesan 28,07g cada 30 segundos aproximadamente, la producción equivalente es 3,3685 kg/h (ver sección 1.8.3). Esta tasa de producción fue medida directamente de la operación principal de todo el proceso, la extrusión, puesto que debe obedecer los parámetros de operación obtenidos en la investigación, así las demás operaciones se ajustan a su flujo de producción. Aplicando la relación de aumento, 1:5, de producción establecida, la unidad productiva a nivel de planta piloto será: **16.84 kg/h**

3.1.4 Primer estudio de factibilidad

En este punto, teniendo en cuenta una evaluación y análisis crítico de los resultados logrados, se debe determinar si es posible y viable escalar el proceso. El análisis es realizado por los encargados directos del proyecto (PROESBIPAY), quienes conocen a profundidad el proceso, pero teniendo en cuenta que la factibilidad en este punto es preliminar y se puede evaluar de forma subjetiva-argumentada; se recomienda establecer los logros y dificultades (“pros y contras”) durante la ejecución de todo el proceso a nivel de laboratorio. En este sentido, con la intervención de los encargados directos de PROESBIPAY, se establecen los “pro y contras” del proceso (ver *Tabla 11*).

Tabla 11. Logros y dificultades de PROESBIPAY

Logros	Dificultades
<ul style="list-style-type: none">• Se ha logrado obtener un espumado biodegradable como tal, a partir de almidón de yuca.• Cada una de las operaciones de procesamiento se llevan a cabo sin mayor dificultad o limitación, por lo tanto, no hay aspectos que pudiesen colocar en riesgo una producción a mayor escala.• La infraestructura y equipamiento que se ha logrado consolidar a nivel de laboratorio, permite desarrollar las diferentes labores investigativas a buen ritmo y de manera adecuada.• Por observación de los investigadores del proyecto, se visualiza la pronta obtención de espumados tipo “relleno suelto” para embalaje que tendrían la posibilidad de llegar a los diferentes mercados.	<ul style="list-style-type: none">• Estandarización de almidón húmedo (materia prima que se consignó en apartados anteriores como “almidón con fines no alimenticio” y cuya dificultad se presenta cuando se cambia la referencia de esta materia prima al cambiar de proveedor).• Definición exacta o estandarización de los valores de humedad (es muy tedioso el establecimiento de los parámetros deseados de humedad).• Limpieza del extrusor (es dispendioso limpiar el equipo después del procesamiento, la limpieza tarda más tiempo que la extrusión misma).• Determinación de reactivos (existe una gran variedad de estos componentes y la elección de uno en especial ha presentado gran dificultad).• Densidad ideal del espumado obtenido (la densidad aceptable debe estar alrededor de 80 kg/m³ y la que se obtiene actualmente es de aproximadamente 400 kg/m³)

Fuente: Propia, julio de 2016

Teniendo en cuenta el análisis anterior, se concluye que el escalamiento de PROESBIPAY a nivel de planta piloto es factible por cuanto los logros ya obtenidos a nivel de laboratorio, son evidentemente claros y la opinión del personal de investigación con respecto a la proyección comercial del producto es positiva.

3.2 Caracterización del Proceso a Escala Menor

El planteamiento del PEIPP de desarrollar el estudio del proceso frente a un pequeño aumento en la escala productiva, limita el escalamiento a la disponibilidad de los equipos y recursos del laboratorio para llevar a cabo pruebas experimentales que permitan recolectar la información requerida para esta fase, especialmente para el estudio de las variables principales del proceso. Sin embargo, puede ser de suma importancia conocer los rendimientos, consumos y generación de residuos del proceso en laboratorio, para identificar puntos críticos que no se deben heredar en la nueva escala: operaciones con grandes pérdidas de material, etc. Teniendo en cuenta, que la primera fase del PEIPP sugiere un estudio del proceso en la escala menor, en cierta medida orientado hacia el producto, para esta fase se propone un estudio en la misma escala orientado al proceso que permita identificar posibles mejoras para la planta piloto.

3.2.1 Rendimiento obtenido

En este caso se calculará, en primer lugar, el rendimiento general (en términos porcentuales) de PROESBIPAY como lo recomienda PEIPP; posteriormente, se calcularán los rendimientos específicos, es decir, las relaciones de cantidades que entran y salen respecto a cada operación del proceso.

Rendimiento General: Concretamente, se calculará la relación porcentual correspondiente a la cantidad de espumado biodegradable que se obtiene al procesar cierta cantidad de materias primas (ver *Tabla 12*).

Rendimiento Específico: En este caso se calculan los rendimientos porcentuales basados en cada una de las operaciones del proceso es decir, cantidades que ingresan a la operación y que salen de la misma (ver *Tabla 12*).

Tabla 12. Rendimiento de PROESBIPAY en laboratorio

RENDIMIENTO GENERAL				
Materia Prima	Cantidad por Lote (g)	Cantidad Total (g)	Producto Obtenido (g)	Rendimiento (%)
Almidón seco	490	703.43	314.12	*44
Glicerol	210			
Ácido Cítrico	2.45			
Talco Mineral	0.98			

RENDIMIENTO ESPECIFICO				
OPERACIÓN DE MODIFICACIÓN DE LA HUMEDAD DEL ALMIDÓN				
Almidón de yuca	580	580	522	90
OPERACIÓN DE ACONDICIONAMIENTO DE LA MEZCLA				
Almidón seco	406.05	577.87	581.94	**100.7
Glicerol	171.42			
Ácido cítrico	0.4			
OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN DE ESPUMADO BIODEGRADABLE				
Compuesto 2	582.75	582.75	585.64	**100.5
OPERACIÓN DE CORTADO DEL ESPUMADO BIODEGRADABLE				
Espumado biodegradable	585.64	585.64	314.33	53.7
OPERACIÓN DE ESTABILIZACIÓN DE ESPUMAS				
Espumado biodegradable	11.97	11.97	13.04	**108.9

Fuente: Propia, julio de 2016

* El bajo rendimiento de PROESBIPAY laboratorio se debe principalmente, a la ejecución totalmente manual del cortado; el operario, a su juicio, decide la aceptación o rechazo del espumado extruido; factores como su destreza, ubicación o estado de ánimo se involucran directamente en la generación de desperdicios (por inspección directa, en un lote de 703.43g se generó 389.1g de residuos).

** En cuanto a los rendimientos que superan el 100% se deben a las características higroscópicas de los materiales utilizados en el procesamiento.

3.2.2 Consumo energético y de materiales

En esta sección, el PEIPP propone calcular el consumo de energía necesario para la puesta en marcha del proceso, considerando 3 grupos usados generalmente en procesos productivos: energía eléctrica, insumo para combustión (generalmente gas) y toma de aire. Bajo estas consideraciones, para el presente trabajo de grado se calculará, en primer lugar, el consumo eléctrico de los equipos a nivel de laboratorio (implementación real existente) y en segundo lugar, se hará una aproximación de consumo eléctrico a nivel de planta piloto utilizando el factor de escala calculado. Cabe aclarar que los parámetros necesarios para calcular el mencionado consumo, son proporcionados por la Compañía Energética de Occidente (operador principal en el departamento del Cauca), teniendo en cuenta que para el proveedor energético de “Coconuco” (encargado del suministro a la FACA) a pesar de la gestión realizada, no fue posible conseguir la información necesaria.

Energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica que tiene un artefacto o equipo eléctrico (kWh), se determina multiplicando la potencia de dicho artefacto (kW) por la cantidad de horas que esta encendido; además, debe considerarse el tipo de instalaciones para las que se está calculando el consumo; estas instalaciones pueden ser, según la

Compañía Energética de Occidente (departamento del Cauca, Colombia), de tipo “residenciales” (Fu=0,3), tipo “comerciales y oficiales” (Fu=0,5) o de tipo “industriales” (Fu=0,6); además, la mencionada entidad propone asumir, para el cálculo de cargas, un Factor de Potencia (FP) igual a 0,9 y en el caso de cargas o derivaciones trifásicas, se debe tener en cuenta un factor multiplicativo de $\sqrt{3}$ (1,732) [32].

Para estimar un consumo mensual, se puede usar la ecuación (2), teniendo en cuenta que, en el caso de cargas o derivaciones trifásicas, la ecuación debe multiplicarse por $\sqrt{3}$:

$$kWh = \frac{V * I * \text{horas} * \text{días} * Fu * FP}{1000} \quad (2)$$

Con:

<i>kWh</i> : Kilo watts hora	<i>Días</i> : Días para los que se calcula el consumo
<i>V</i> : Voltaje	<i>Fu</i> : Factor de Utilización
<i>I</i> : Corriente	<i>FP</i> : Factor de Potencia
<i>Horas</i> : Horas de consumo diario	

En la *Tabla 13*, se presenta el consumo de energía eléctrica de PROESBIPAY laboratorio, calculado por cada equipo que interviene en el proceso.

Tabla 13. Consumo eléctrico de PROESBIPAY

Equipo	Voltaje (V)	Corriente (A)	Horas/mes ¹	Fu ²	FP	Consumo mensual (kWh)
Horno de convección forzada	220	10.91	80	0.5	0.9	150
Módulo de extrusión	240	22.91	8.33	0.5	0.9	35
Mezcladora	110	5.23	1	0.5	0.9	0.448
Cámara climática	240	7.08	768	0.5	0.9	1020
Chiller	120	12.5	8.33	0.5	0.9	9.7
Balanza de masa	120	5	10.32	0.5	0.9	2.7
Balanza de humedad	120	3.75	4	0.5	0.9	0.81
Compresor de aire	120	6.25	8.33	0.5	0.9	4.8
Total Consumo						1223.45

Fuente: Propia, agosto de 2016.

Referenciando la *Tabla 13*, el consumo mensual total es 1223.46 kWh. Ahora bien, el valor de la unidad (valor por kWh en el mes de agosto de 2016) del proveedor de energía (Compañía Energética de Occidente) es \$539.0372 por lo tanto, el costo mensual del consumo energético de PROESBIPAY a nivel de laboratorio es:

¹ Las “horas por mes” son equivalentes a las horas de consumo diario multiplicadas por el número de días de consumo (Horas x días), términos que aparecen en la ecuación (2).

² El Factor de Utilización (Fu) se aplica teniendo en cuenta que la FACA (lugar en el que opera el proceso) es una zona “No Residencial” y se clasifica como “Oficial”.

$$\text{Costo mensual (COP)} = 1223.46 * 539.0372 = \$659,490.45$$

Insumo para combustión y tomas de aire

Para PROESBIPAY no aplican los ítems de insumo para combustión y toma de aire, pues en el proceso no son requeridos.

Consumo de materiales

Además del consumo eléctrico, PEIPP propone hallar el consumo de materiales con ayuda de la receta maestra y receta de control del estándar ISA-88.01. Se debe organizar toda la información sobre materias primas, incluyendo aditivos o materiales secundarios. Teniendo en cuenta la recomendación de PEIPP, se procede a construir la receta maestra de PROESBIPAY a nivel de laboratorio (ver *Tabla 14*).

De manera general y desde el punto de vista de la automatización industrial, la receta maestra permite que la comunicación, entre los sistemas de información que generan y administran los datos de producción de la empresa, se haga de manera eficiente [33]. Esta receta es una entidad en la cual se consigna, la agrupación mínima de información que representa los requerimientos para las operaciones de transformación de materia prima en producto terminado [31].

La receta maestra está compuesta por 5 categorías de información: encabezado, requerimientos de equipo, procedimiento, información adicional y finalmente, una “fórmula” que a su vez está compuesta por entradas, parámetros y salidas [31].

Tabla 14. Receta maestra de PROESBIPAY

RECETA MAESTRA		
PRODUCCIÓN DE ESPUMADO BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA		
AUTOR (ES): Robinson Ordoñez M, Bernardo Lara G.		FECHA: 18 de julio de 2016
FÓRMULA		
Entrada de proceso	Almidón de yuca	
	Glicerol	
	Ácido cítrico	
	Talco mineral	
	Mano de obra	
	Alimentación eléctrica	
Producto en proceso	Almidón seco, compuesto 1, compuesto 2	
Parámetros de proceso por operación	Operación	Parámetro
	Secado de almidón de yuca	Temperatura SA
		Humedad A
		Tiempo SA
	Mezclado de almidón con aditivos	Masa A_G_AC
Mezclado de “compuesto 1” con agente nucleante	Masa AN	
Extruido del compuesto 2	Temperatura de extrusión R1	

		Temperatura de extrusión R2
		Temperatura de extrusión R3
		Temperatura de extrusión R4
		Velocidad de giro T
	Cortado de espumado biodegradable	
	Estabilizado de espumado biodegradable	Temperatura EB
Humedad EB		
Salida del proceso	Espumado biodegradable	
REQUERIMIENTO DE EQUIPOS		
Horno de convección forzada		
Balanza electrónica de masa		
Balanza electrónica de humedad		
Mezclador de alta velocidad		
Extrusor		
Dado de soplado		
Compresor de aire		
Cronómetro		
Cámara climática		
Recomendaciones:		

Fuente: Propia, julio de 2016

Elaborada la receta maestra, se construye la correspondiente receta de control de PROESBIPAY (ver *Tabla 15*).

La aplicación de una programación operacional e información específica (para obtener un lote de producto) sobre la receta maestra, origina lo que se conoce particularmente como receta de control, entregando un alto nivel de detalle para arrancar y monitorear el procedimiento de una célula de proceso [31].

En un sentido más amplio, la generación de una receta de control se lleva a cabo durante el tiempo de ejecución, a través de una orden que responde a una combinación dinámica de una descripción de procedimiento con una lista de materiales, además de una lista con los ingredientes y las cantidades [33].

Tabla 15. Receta de control de PROESBIPAY

RECETA DE CONTROL			
PRODUCCIÓN DE ESPUMADO BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA			
AUTOR (ES): Robinson Ordoñez M, Bernardo Lara G.			FECHA: 18 de julio de 2016
FÓRMULA			
Entrada de proceso	MATERIAL	CANTIDAD	UNIDAD
	Almidón de yuca	313.42	g
	Glicerol	134.33	g
	Ácido cítrico	1.57	g
	Talco mineral	0.68	g
	Mano de obra (2 personas)	24	h
	Alimentación eléctrica	110-220	VAC
Producto en proceso	Almidón seco, compuesto 1, compuesto 2		

	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Parámetros de proceso por operación	Temperatura SA	80	°C
	Humedad A	≤1	%
	Tiempo SA	20	h
	Masa A_G_AC	449.32	g
	Masa AN	0.68	g
	Temperatura de extrusión R1	120	°C
	Temperatura de extrusión R2	155	°C
	Temperatura de extrusión R3	170	°C
	Temperatura de extrusión R4	160	°C
	Velocidad de giro T	240	rpm
	Temperatura EB	23±2	°C
	Humedad EB	50±5	%
Salida del proceso	Cordones de espumado biodegradable: diámetro: 0.9mm y longitud: 43.5cm		
REQUERIMIENTO DE EQUIPOS			
Equipo	Especificación		
Horno de convección forzada	Marca memmert, serie Perfect, temperatura máxima 250 °C, alimentación eléctrica 220 VAC a 60 Hz, potencia 2400W.		
Balanza electrónica de masa	Marca Precisa, modelo XM 60, capacidad de masa 124g, rango de temperatura 30°C-230°C, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz.		
Balanza electrónica de humedad	Marca ViBRA, modelo SJ, capacidad de masa 620g, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz o 9 VDC		
Mezclador de alta velocidad	Marca Kitchen Aid Professional, modelo 600, serie 6QT, velocidades de mezclado 10, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz, potencia 575 W.		
Extrusor	Master de control: Thermo Scientific, modelo HAAKE Polylab OS RheoDrive 4.		
	Módulo de tornillo simple marca Thermo Scientific, modelo HAAKE Rheomex OS, zonas de calefacción 4, diámetro de tornillo 19 mm, velocidad máxima: 200 rpm, temperatura de operación máxima 360 °C.		
Compresor de aire	Marca Power, caudal 190 L/min, presión 8 bar, capacidad de almacenamiento 25 L, alimentación eléctrica 120 VAC a 60 Hz, 750W.		
Cronómetro	Marca CASIO, modelo HS-70W, tipo digital, múltiples funciones.		
Cámara climática	marca BINDER, 1700W, 240V		

Fuente: Propia, julio de 2016.

Por inspección directa se conoce que en PROESBIPAY, a nivel de laboratorio, se están procesando aproximadamente 19.2 kg al mes. Con esta información, se procede a estimar un cálculo de la cantidad de materias primas y aditivos que se utilizan mensualmente (ver *Tabla 16*).

Tabla 16. Cantidad de materiales al mes para PROESBIPAY laboratorio

Material y/o aditivo	Cantidad mensual necesaria (kg)	Proveedor
Almidón de yuca húmedo	19.2	CODIPSA (Paraguay) Almidones de Sucre
Glicerol	5.76	DISAN S.A
Ácido Cítrico	0.096	MERK
Talco Mineral	0.038	QUIMPO S.A

Fuente: Propia, agosto de 2016

Estimación del consumo eléctrico a nivel de planta piloto

Teniendo en cuenta que el PEIPP propone el uso opcional del Factor de Escalamiento (ver sección 3.3.2 del Anexo C) para aproximar cuantificadamente algunos valores (flujos de proceso, costos de producción, entre otros) de manera sencilla en una escala nueva de producción, se usa este factor para aproximar el consumo eléctrico de equipos en el nivel de planta piloto. Parámetros:

- Factor de escala = 5
- Consumo a nivel de laboratorio = 1223,45 kW/h
- Costo unitario del kW/h = \$539,0372

Costo mensual del consumo eléctrico de equipos, para PROESBIPAY a nivel de planta piloto:

$$\text{Costo mensual (COP)} = 1223,46 * 539,0372 * 5 = \$3.297.452,25$$

3.2.3 Estudio del manejo de residuos

Teniendo en cuenta la literatura relacionada con el manejo integral de residuos [34-37], se propone una metodología unificada que se ajusta a la particularidad (laboratorio y/o planta piloto) de los procesos que se están tratando en el presente trabajo de grado. Esta metodología propone la ejecución de 3 pasos (ver *Tabla 17*).

Tabla 17. Metodología para el manejo integral de residuos

Paso	Componentes	
1. Clasificación según el tipo de residuos generados	No peligros	Aprovechables, No aprovechables y Orgánicos biodegradables
	Peligrosos	
	Especiales	
	Descripción de la organización	
2. Diagnóstico ambiental	Prevención y minimización	
	Generación de residuos	
	Separación en la fuente	
	Almacenamiento	
	Recolección y transporte	
	Aprovechamiento	
	Tratamiento	
	Disposición final	
3. Estrategias para el manejo adecuado de residuos	Prevención, minimización y separación en la fuente	
	Recolección	
	Almacenamiento	
	Aprovechamiento, tratamiento y/o disposición final	

Fuente: Propia, agosto de 2016

Para desarrollar los dos primeros pasos (clasificación de residuos, diagnóstico ambiental) de la metodología que se propone, se hace necesario aplicarla a un proceso (organización) existente o real. En este orden de ideas, se aplicaran los pasos 1 y 2 a PROESBIPAY a nivel de laboratorio, y los resultados obtenidos serán la base o punto de partida para formular las estrategias para manejo de residuos (paso 3) en PROESBIPAY a nivel de planta piloto (teniendo en cuenta que el objetivo del presente trabajo de grado es determinar todas las características correspondientes al nivel de producción tipo piloto, incluidos los aspectos de manejo de residuos).

La aplicación de los pasos 1 y 2 a PROESBIPAY a nivel de laboratorio es desarrollada en el Anexo D, en el que también se hace una ampliación teórica de la metodología que se propone.

Estrategias para el manejo adecuado de residuos, aplicado a PROESBIPAY a nivel de planta piloto

Prevención y minimización

Uno de los objetivos de la implementación tipo piloto es la optimización del proceso, en este orden de ideas, la recomendación que se hace en este apartado (prevención y minimización en la fuente) acerca de la “optimización de procesos” para generar menos residuos, se considera cubierta. Como se mencionó en la sección 2.4.1 (Nivel de Dificultad en la Realización del Proceso, capítulo 2), los mayores índices de desperdicio (389.1 g/lote) se generan en la etapa de cortado manual, en ella, la disposición, ubicación o destreza del operario afectaba directamente la cantidad de residuos generados. Con la automatización de la etapa de cortado (instalación de cuchilla con velocidad controlable) se optimiza notablemente el proceso, minimizando la generación de residuos. La recomendación acerca de “adopción de buenas prácticas” en el manejo de residuos deberá cubrirse con la ejecución de los siguientes pasos:

- Presentación de la metodología (una vez terminado el presente estudio de manejo de residuos, se contará con una herramienta para el manejo de los mismos) y aspectos medioambientales a los integrantes del proyecto “extrusión de espumados biodegradables” en la FACA, de tal manera que la presentación sea clara y se pueda evidenciar la importancia fundamental que tiene las buenas prácticas de manejo de residuos.
- Adecuación del lugar (es) para disposición de residuos.
- Instalación de contenedores para separación de residuos.
- Recomendaciones acerca de separación de residuos.

Las recomendaciones acerca de “reutilización” de residuos, deben enfocarse hacia la explotación de las ventajas que tiene el material (residuo 100% biodegradable).

Se propone su integración a lombricultivos para generación de abonos y compostajes de alta calidad, propuesta que fue avalada por investigadores del grupo CYTBIA.

En lo que refiere a la temática de “reciclaje”, con las recomendaciones hechas en cuanto a “minimización” y “buenas prácticas para manejo de residuos” (ítems anteriores) queda cubierto en parte este aspecto. Por otro lado, se recomienda la utilización de bolsas biodegradables (proyecto que se desarrolla paralelamente a la extrusión de espumados biodegradables) para embalaje o empaque del producto final obtenido (espumas de relleno suelto).

Deben entregarse las presentes recomendaciones de manejo de residuos a los directivos del proyecto de investigación (CYTBIA) y solicitar un compromiso serio frente a la gestión de estos residuos, de tal manera que dicho compromiso se refleje en la implementación de políticas ambientales dentro de la organización.

Separación en la fuente

En la implementación de PROESBIPAY a nivel de planta piloto, se pueden identificar dos “centros generadores”, el primero de ellos ubicado en piso de planta y que será el mayor generador; el segundo centro generación se ubica en el área de oficinas en el cual, los residuos generados serán menores en comparación con la generación en planta y principalmente serán residuos de alimentos, envolturas de comestibles y papel. Para definir la cantidad de recipientes necesarios, se utilizará la clasificación que se le dio a los residuos generados en PROESBIPAY a nivel de laboratorio (ver Anexo D) y se estima la magnitud de las cantidades de residuo a nivel piloto, haciendo uso de la relación 1:5 correspondiente al aumento de escala.

Tipo de residuos generados en PROESBIPAY: La mayor generación será de tipo sólido, biodegradable y no peligroso (residuos de espumado biodegradable, restos de alimentos, tierra o polvo generados por barrido de pisos). La clasificación y el estimado de la cantidad de residuo generado (ver *Tabla 18*), se hace por inspección directa y con apoyo del Ingeniero Pedro Albán, encargado de la extrusión de espumados biodegradables.

Tabla 18. Tipo y cantidad de residuos generados

Residuo	A Nivel de Laboratorio	A Nivel de Planta Piloto
Espumado biodegradable	0.39 kg/lote	1,94 kg/lote
Restos de alimentos y otros orgánicos	0.6 kg/día	3 kg/día
envolturas y botellas	0.4 kg/día	2 kg/día
Recipientes plásticos de envasado	0.3 kg/día	1.5 kg/día
Recipientes tipo vidrio de envasado	0.8 kg/día	4 kg/día

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Teniendo en cuenta que existe una única etapa de calentamiento o puesta a punto del extrusor, momento en que se genera la mayor cantidad de residuo, y sabiendo que la automatización de la etapa de cortado reduce considerablemente la generación total de residuos, puede concluirse que dicha generación en un periodo de 8 horas ininterrumpidas, no superará la estimación que se acaba de calcular mediante el factor de escala. Teniendo en cuenta la descripción inmediatamente anterior (ver *Tabla 18*) y conociendo que existen 2 centros generadores (piso de planta y oficinas), los recipientes que se recomienda implementar son (ver *Tabla 19*):

Tabla 19. Recipientes para recolección de residuos

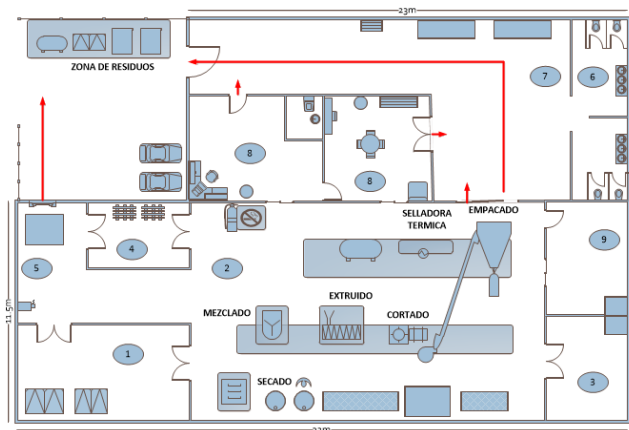
Cantidad	Tipo de material a recolectar					Color	Cap. [L]	Sitio
	Vidrio	Plástico	Papel	Biodeg.	Ordinarios			
2	x					Blanco	53-125 ³	Planta
2		x				Azul	53-125	Planta
2			x			Gris	53-125	Planta
2				x		Beish	53-125	Planta
2					x	Verde	53-125	Planta
2			x			Blanco	10	Oficina
2					x	Verde	10	Oficina

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Recolección

En primer lugar, se muestra las rutas de recolección (flechas de color rojo) interna de residuos (ver *Figura 13*). Las especificaciones correspondientes a la distribución y diseño de la planta fueron realizadas en la sección 3.5.2, del presente capítulo.

Figura 13. Rutas de recolección interna de residuos



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Horarios : 7am a 8am – 5pm a 6pm
 Frecuencia : Lunes, miércoles y viernes.

³ Indica un recipiente de 53 litros y otro de 125 litros de capacidad.

Localización, número y capacidad de los recipientes o contenedores: ver *Tabla 19*
Tipo de residuo generado : ver *Tabla 18*

Almacenamiento

Conociendo que una correcta práctica de almacenamiento de residuos debe cumplir con los requerimientos expresados en la etapa de diagnóstico (ver sección 4.1.2 del Anexo D), se procede a formular las recomendaciones pertinentes para una unidad de almacenamiento estándar:

- a) **Localización al interior de la organización y de acceso restringido:** Se propone la construcción de la unidad de almacenamiento en el área de parqueadero de la organización (PROESBIPAY planta piloto), debidamente señalizada (indicadores visuales) y con acceso controlado (instalación de cerraduras). Las dimensiones del espacio físico pueden ser aproximadamente: largo=3m, ancho=1.5m, alto=2.5m, sin divisiones internas, debidamente techada, puerta frontal instalada y con ventanales laterales instalados.
- b) **Los acabados permiten su limpieza e impiden la formación de ambientes propicios para el desarrollo de microorganismos:** Las paredes y pisos de la unidad de almacenamiento deberán estar “enchapados” con colores claros (blanco preferiblemente) y los soportes para los contenedores deberán ser de acero inoxidable. La cantidad de enchape requerido es de aproximadamente 27m² y se necesitan 7m² de baldosa para piso.
- c) **Cubierto para protección de aguas lluvias, iluminación y ventilación adecuada (rejillas o ventanas), Sistema de drenaje y piso duro e impermeable:** Se deberá hacer la respectiva instalación eléctrica, se recomienda la instalación de una lámpara de 2 tubos fluorescentes (tipo E27, 20W), la dimensión aproximada de los 2 ventanales laterales tipo rejilla puede ser de 1m largo y 0.6m ancho, se debe instalar un sifón de drenaje de 6 pulgadas; contará además con un piso primario en concreto.
- d) **Posee sistemas de control de incendios (equipo de extinción de incendios, suministro cercano de agua, etc.):** Se deberá instalar al exterior (bajo techo) de la unidad de almacenamiento un extintor multipropósito ABC con capacidad de 20 libras y se podrá acceder a un grifo de agua contiguo a la unidad, ubicado en el área de lavado.
- e) **La unidad de almacenamiento evita el acceso y proliferación de animales domésticos, roedores y otras clases de vectores:** La dimensión de los orificios (2mm de diámetro) de las rejillas de ventilación no deberá permitir el ingreso de animales o roedores y de la misma manera la puerta frontal deberá cerrar de tal modo que tampoco permita el ingreso de estos.
- f) **El sitio no causa molestias e impactos en la comunidad:** Teniendo en cuenta que la unidad de almacenamiento estará instalada al interior de la organización y garantizando que los periodos de recolección son los adecuados, no se generará molestias o impactos negativos a la comunidad.

- g) **Cuenta con recipientes o cajas de almacenamiento para realizar su adecuada presentación:** La unidad contará con 5 contenedores de 125 Litros de capacidad y las características que se pueden apreciar en la *Tabla 19*; todos con la rotulación y colores recomendados (ver sección 4.1.3 del Anexo D).
- h) **La unidad de almacenamiento es aseada, fumigada y desinfectada frecuentemente:** Se realizará un aseo general día de por medio, una desinfección cada 8 días y una fumigación 1 vez al mes.
- i) **Dispone en lo posible de una báscula o sistema de medición de pesos o volúmenes y se lleva un registro para el control de la generación de residuos:** Se recomienda instalar una báscula de piso en acero lacado de tamaño 1000 x 1000 m, y se debe instalar al exterior de la unidad un dispensador (organizador de plástico) de formatos para registro de generación de residuos.
- j) **Debe ser de uso exclusivo para residuos y estar señalizado:** La unidad será marcada de manera visible como de “almacenamiento exclusivo de residuos”, señalización de “área restringida” y adicionalmente se instalaran pendones alusivos al manejo integral de residuos.
- k) **Disponer de espacios por clase de residuo, de acuerdo a su clasificación (reciclable, peligroso, ordinario y otros):** Teniendo en cuenta que no existen residuos peligrosos, la clasificación de los espacios estará dada por la rotulación y color de cada contenedor o recipiente instalado.

Aprovechamiento, disposición final

Para PROESBIPAY planta piloto, los residuos de tipo “ordinario e inerte” y los reciclables como plástico, vidrio, cartón y similares, serán entregados directamente (previa separación) a la empresa encargada de la recolección. Los residuos biodegradables se usarán en compostaje y lombricultura para generación de abonos orgánicos, propuesta avalada por los investigadores del grupo CYTBIA.

NOTA: se aclara que además de las etapas que se acaban de desarrollar, existen otras para manejo de residuos, tales como: diseñar la estructura funcional y asignar responsabilidades, gestionar presupuesto para implementar las medidas para el manejo integral de residuos, realizar campañas de capacitación periódicas, establecer medidas para el mejoramiento continuo en relación con el manejo integral de residuos, entre otras; sin embargo, este tipo de recomendaciones están orientadas a organizaciones empresariales que cuentan con personal y áreas administrativas totalmente establecidas, hecho que imposibilita su aplicación a un nivel de producción tipo piloto como el que se está tratando en el presente trabajo de grado.

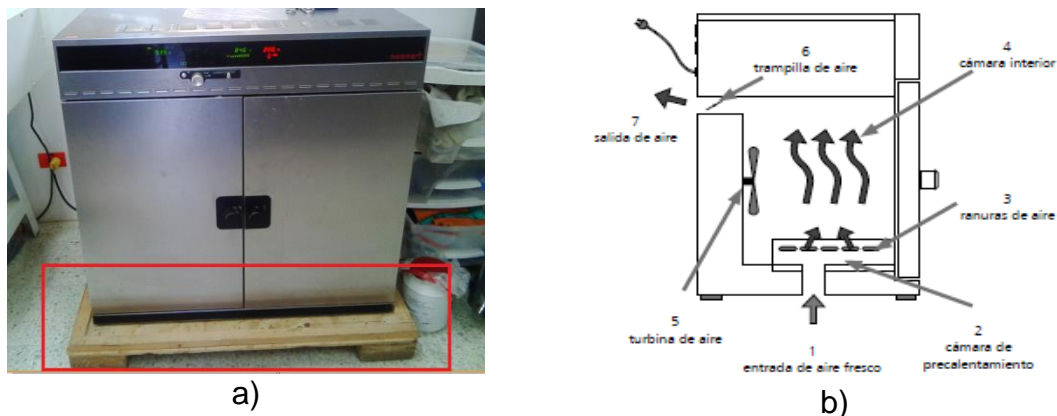
3.2.4 Segundo estudio de factibilidad

Análisis de factibilidad en el PROESBIPAY, teniendo en cuenta el “rendimiento” y el “consumo energético y de materiales”: Con base a las características de

rendimiento, se puede concluir que el bajo “rendimiento general” estimado (44%) no representa un impedimento para llevar a cabo el proceso a una escala mayor, teniendo en cuenta que las causas mayores (proceso en desarrollo y en búsqueda de parámetros ideales, afectación de los operarios en las operaciones de cortado y alimentación, carencia de estandarización en las materias primas) estarían solucionadas en el proceso a nivel de planta piloto gracias a las características de automatización planteadas. Por el contrario, como se pudo observar en los “rendimientos específicos”, los porcentajes obtenidos en cada una de las operaciones están alrededor de un 100%, hecho que permite visualizar la posibilidad y factibilidad de llevar a cabo el escalamiento.

En lo que refiere al consumo energético es importante resaltar que, a nivel de laboratorio, el horno de convección forzada está siendo subutilizado, pues trabaja durante 20 horas a la semana para secar alrededor de 7 kg de almidón de yuca, siendo su capacidad máxima de 80 kg. Además, por inspección directa se descubrió que la instalación del horno es inadecuada porque está ubicado sobre una base de madera que obstruye la entrada de aire (*Figura 14*), hecho que genera un tiempo de secado muy lento. Sin embargo, esto no es impedimento para realizar un escalamiento, pues más adelante se realiza el correspondiente estudio del equipo para que cumpla los requerimientos de operación adecuados para la planta piloto.

Figura 14. Instalación del horno de convección forzada
a). Instalación horno en laboratorio b). Partes del horno



Fuente: Propia, agosto de 2016.

Ahora bien, teniendo en cuenta que en el ámbito nacional (Colombia) existen estudios relacionados con implementaciones tipo piloto en los cuales, se puede encontrar aproximaciones de consumo energético como 27.79 kW/h por lote (valor que se puede multiplicar por el factor 312 que representa el número de lotes al mes que se procesan en PROESBIPAY tipo piloto, para obtener un total de 8670 kW/h al mes) [38], 2159.62 kW/h al mes [39], y otras estimaciones que recaen dentro del rango que establecen los valores mensuales mencionados (2159 kW/h-8670 kW/h); puede concluirse que el valor mensual estimado para el PROESBIPAY a nivel piloto

(6117.25 kW/h, ver sección 3.2.2), es aceptable, dejando claro que la dificultad de las comparaciones es alta debido a las particularidades de cada proceso.

Es importante resaltar que la factibilidad del escalamiento del PROESBIPAY, teniendo en cuenta el consumo energético de los equipos, recibió un concepto favorable por partes de los investigadores involucrados en este proceso.

La sugerencia de PEIPP en cuanto a la “aplicación de encuesta de satisfacción y aceptación” entregando muestras del producto a una población pequeña, no aplica para el desarrollo que se está llevando a cabo, debido a que el “producto final” no está idealmente definido.

3.3 Establecimiento y Cálculo de Parámetros de Escalamiento

En esta fase se pretende desarrollar todos los pasos concernientes con el escalamiento de procesos productivos de forma consecutiva, para obtener los requerimientos que deberá cumplir la planta escalada; de esta manera, se hizo necesario traer de la segunda fase, el paso “estudio de variables principales del proceso” con el objeto de poner orden y continuidad al método de escalamiento. En síntesis, para obtener los parámetros de escalamiento se propone realizar el estudio de las variables del proceso, el escalamiento de la producción y la modificación cuantificada de las variables como se desarrolla a continuación:

3.3.1 Estudio de variables principales del proceso

Para lograr el objetivo del escalamiento industrial, es necesario conocer las diferentes metodologías, técnicas y procedimientos que permitan observar el comportamiento de las variables determinantes del proceso frente al cambio en la escala de producción, ya sea para transferir los datos obtenidos de los experimentos en laboratorio hacia la escala que se pretende llegar, o para ajustar los parámetros orientados a la nueva escala que mejoren la eficiencia del proceso sin afectar el producto [25]. Idealmente se desearía que estos análisis se resolvieran mediante modelos teóricos que involucren leyes físico-químicas aplicadas sobre ecuaciones, comúnmente diferenciales, que describen a detalle cada proceso; sin embargo, esta situación no cubre a la totalidad, ya que la mayoría de ecuaciones diferenciales características, si las hay, son muy complicadas de integrar. Como alternativa, se ha recurrido a la utilización de modelos que predicen y reproducen aproximadamente el comportamiento de un proceso (prototipo), ya sea existente o no materialmente, sobre los que se utiliza la información obtenida de laboratorio para determinar factores como el tipo y la forma de la unidad que se persigue [26]-[28]. En la obtención de estos modelos, se emplean principalmente los métodos citados en la sección 1.6 “Metodologías de Escalamiento”.

Para proceder al estudio de las variables principales y el escalado de cada operación de PROESBIPAY, o cualquier proceso productivo, y de acuerdo a los métodos de escalado estudiados, de manera concluyente se recomienda como complemento para PEIPP las siguientes estrategias para cada escenario:

- 1) Cuando la disponibilidad de los recursos en laboratorio permite realizar pruebas experimentales, se puede considerar el método empírico para obtener un modelo con pequeños aumentos en la escala.
- 2) Cuando se desconocen las ecuaciones diferenciales características del sistema, pero se conocen todas las variables involucradas en ellas, existe la posibilidad de obtener criterios de semejanza a partir del análisis dimensional.
- 3) Cuando se conocen las ecuaciones diferenciales características del sistema, pero son muy complejas o imposibles de integrar, los criterios de semejanza se pueden derivar de la forma de estas ecuaciones diferenciales.
- 4) Cuando se conocen las ecuaciones diferenciales características del sistema y además se pueden integrar y resolver, no hay necesidad de aplicar criterios de semejanza ni de realizar experimentos con modelos ya que el comportamiento del sistema a cualquier escala se podrá calcular directamente [26]-[23].

Ahora bien, teniendo en cuenta que el presente trabajo de grado busca particularmente, modelar el escalamiento de PROESBIPAY a nivel de planta piloto y que en el laboratorio de Reología y Empaques donde se desarrolla, también se llevan a cabo diferentes investigaciones en paralelo concernientes al proyecto de Regalías “Investigación Y Desarrollo De Empaques Biodegradables”, se descarta el método empírico como alternativa de análisis de variables en cada operación debido a la poca disponibilidad de los equipos, por lo tanto se trabaja directamente con la escala de laboratorio y planta piloto. Con el estudio realizado en el capítulo 2 y la fase 1 y 2 del modelo, se identificaron las operaciones más relevantes para el análisis de variables, estas son: Secado y Extrusión, además, se hace necesario analizar la operación de Cortado para solucionar el requerimiento RG4.

Aplicación del estudio de variables

Para este ítem, el PEIPP recomienda establecer y organizar las variables que interactúan directamente en cada operación del proceso teniendo en cuenta conceptos de control como “variable manipulada” y “variable controlada” para luego analizar su comportamiento frente al cambio en la escala productiva [16]. Sin embargo, esta concepción puede llegar a ocasionar confusiones en el escalado ya que se tendrán variables que no se involucran directamente con el comportamiento del sistema, tal es el caso de la mayoría de variables manipuladas y algunas controladas que solo son útiles después del escalado para definir los escenarios de control del proceso en la nueva escala [25]-[26]. Con lo anterior, se pretende aclarar que para analizar el comportamiento de un proceso frente a un cambio en la escala

de producción, es necesario identificar sólo las variables que gobiernan el comportamiento del sistema o fenómeno que realiza cambios en el producto; por ejemplo, en un proceso de secado intervienen variables de transferencia de calor como la temperatura independientemente si se utilizan resistencias eléctricas o vapor para controlarla. Teniendo en cuenta lo anterior, a continuación se plantea una serie de pasos a seguir para efectuar un análisis de variables sobre las operaciones de un proceso productivo.

- 1) **Describir el funcionamiento del equipo:** Describir el funcionamiento o procedimiento que lleva a cabo el equipo para realizar la operación que le corresponde.
- 2) **Identificar el tipo de fenómeno físico-químico:** Identificar el tipo de fenómeno ya sea físico o químico que gobierna cada operación del proceso. Esto permite hacer una proyección de las variables que intervienen directamente.
- 3) **Definir un modelo:** De acuerdo al fenómeno y variables identificadas anteriormente, datos obtenidos en laboratorio, leyes físico-químicas y de balances; hacer uso de los métodos citados en la sección 1.6 para definir un modelo representativo del comportamiento de la operación.
- 4) **Analizar el comportamiento de las variables:** Observar el comportamiento de las variables u otros parámetros del proceso frente a un cambio en la escala de producción por medio de los modelos obtenidos; por ejemplo, analizar cómo se afectaría el tiempo de secado si la cantidad de materia prima aumenta y se mantienen igual los demás parámetros.

A continuación, se muestran los resultados de aplicar los pasos mencionados sobre las operaciones de PROESBIPAY, pues estas se relacionan directamente con el equipo principal o módulo de equipo. El seguimiento de estos pasos se puede ver en la sección 5.1 del Anexo E (Análisis de variables del proceso productivo PROESBIPAY).

Operación de secado de almidón de yuca

Como se explica en la sección 5.1 del Anexo E, el fenómeno que gobierna esta operación está representado por la ley del enfriamiento de Newton en la que el coeficiente de convección es modelado por una correlación adimensional en la ecuación (4), esta se obtiene a partir de criterios de semejanza sobre las ecuaciones diferenciales del sistema siguiendo la recomendación del escenario 3 mencionado al inicio de este paso. Finalmente el modelo que representa la operación de secado se muestra en la ecuación (3).

$$\eta h A_s (T_a - T_A) = \frac{m_A}{t} C p_A (T_a - T_A) + \frac{m_{ev}}{t} \Delta H_V \quad (3)$$

$$Nu = 0.664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad Re = \frac{VL}{\nu} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Donde:

η	: Eficiencia de transferencia de calor del aire al almidón	ΔH_v	: Calor de evaporación del agua
h	: Coeficiente de convección [$W/m^2\text{°C}$]	t	: Tiempo de proceso (secado)
A_s	: Área superficial de transferencia de calor [m^2]	Nu	: Número adimensional de Nusselt
T_A	: Temperatura del almidón [°C]	Re	: Número adimensional de Reynolds
T_a	: Temperatura del aire [°C]	Pr	: Número adimensional de Prandtl
m_A	: Cantidad de almidón a secar	L	: Longitud característica de la configuración geométrica
Cp_A	: Calor específico del almidón a secar	k	: Conductividad térmica del aire
m_{ev}	: Masa de agua que se desea retirar del almidón	V	: Velocidad de la corriente libre (aire)
		ν	: Viscosidad cinemática del aire
		α	: Difusividad térmica

La expresión a la izquierda de la ecuación (3) representa la tasa de calor que el aire transfiere al almidón que depende de: Porcentaje del calor que transfiere al almidón ya que las pérdidas son inherentes en cualquier equipo; área superficial A_s correspondiente al área de todas las bandejas con almidón que ingresan al horno; del gradiente de temperatura entre el aire y el almidón a procesar; y el coeficiente de convección h que depende de las propiedades físicas del aire, la velocidad con que circula sobre las bandejas, la longitud de estas en dirección del flujo de aire y de la configuración geométrica la cual hace analogía a un fluido que circula paralelo sobre una placa plana. La expresión de la derecha representa el flujo de calor necesario para lograr el secado frente a parámetros deseados que son la cantidad de almidón a secar y la duración de esta operación. De esta ecuación se deriva otro parámetro que representa la tasa de evaporación por unidad de área en el secado (ev) expresado por la ecuación (5) que es característica del proceso y de la configuración geométrica del equipo utilizado.

$$ev = \frac{m_{ev}}{A_s t} \quad (5)$$

Operación de extruido del compuesto 2

La obtención del modelo matemático del extrusor, ecuación (6) y (7), se logró analizando a profundidad la zona de dosificación y teniendo en cuenta ciertas consideraciones que se detallan en el Anexo B, ya que simplifican los cálculos para integrar las ecuaciones diferenciales del sistema.

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 (\sin \theta \cos \theta) h N}{2} - \frac{h^3 \pi D \sin^2 \theta \Delta P}{12 \eta L} \quad (6)$$

$$Q = k \frac{\Delta P}{\eta} \quad (7)$$

$$k = \frac{\pi R^4}{8L_b} \quad (8)$$

Donde:

Q	: Caudal de material extruido	N	: N° de revoluciones a las que gira el tornillo
D	: Diámetro del tornillo	ΔP	: Gradiente de presión a lo largo del tornillo
L	: Longitud del cilindro	θ	: Ángulo del filete del tornillo con la vertical
η	: Viscosidad del polímero	h	: Profundidad del canal del tornillo
R	: Radio de la boquilla	L_b	: Longitud de la boquilla

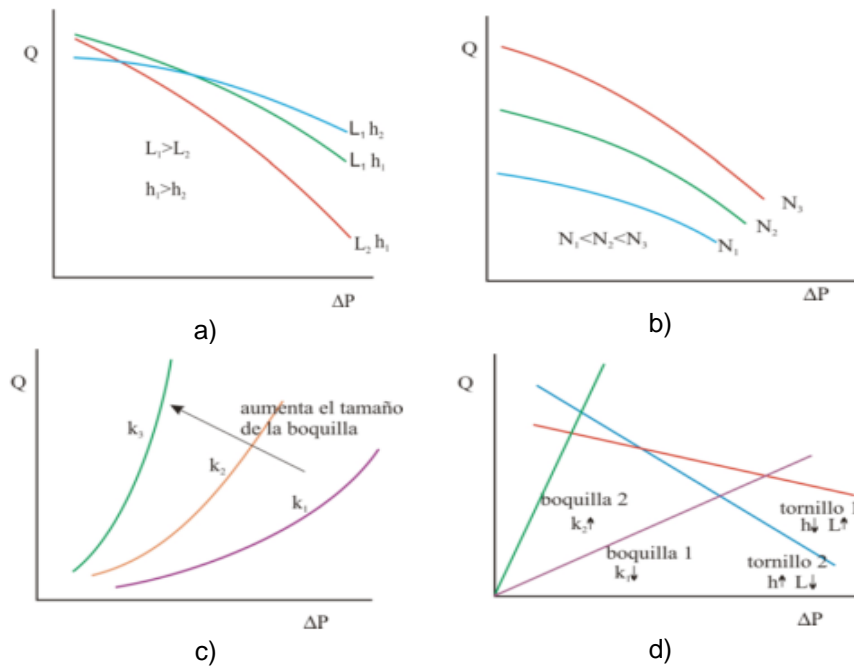
La ecuación (6) es reconocida en la literatura como la ecuación característica del tornillo o recta operativa; consta de dos términos que describen el flujo de arrastre (primer término) debido al tornillo y el flujo de presión (segundo término) que se opone debido al dado del extrusor. Esta se utiliza para la predicción del caudal de salida de un extrusor, de manera que pequeñas fluctuaciones en la presión impuesta por la boquilla o dado no afecten dicho caudal. También, la ecuación (7) se considera como recta operativa de la boquilla, donde k es una constante que depende del orificio de la boquilla; que para este caso, será una boquilla circular simple, ecuación (8). El comportamiento global del extrusor está determinado por la interacción entre el tornillo y la boquilla. De estas ecuaciones se puede notar que el sistema depende de variables que se agrupan del siguiente modo:

- Dimensiones del tornillo : D, L, h y θ
- Tipo de polímero : η
- Condiciones del proceso : N y T
- Restricción impuesta por la boquilla : ΔP

El comportamiento deseado del extrusor se representa en la disminución de la pendiente en la curva característica (ver *Figura 15*), de modo que al analizar las variables se concluye que: cuanto mayor sea el diámetro del tornillo mayor será el caudal de material que la máquina es capaz de extruir, además, un aumento de la viscosidad del polímero o longitud del tornillo o una disminución en la profundidad del canal, disminuye los efectos de la boquilla sobre el caudal y por tanto disminuye la pendiente (ver *Figura 15a*); también se puede aumentar el caudal, aumentando la velocidad de giro del tornillo; sin embargo, esto disminuye la viscosidad del polímero debido al aumento de la cizalla sobre el material, generando un aumento en la pendiente (ver *Figura 15b*). La curva característica de la boquilla toma la forma de la *Figura 15c* y al superponerla con la curva del tornillo (ver *Figura 15d*) se obtienen los puntos operativos de un extrusor determinado, representados por la intersección de las rectas.

Figura 15. Curvas operativas de un extrusor

- a). Efecto de las dimensiones del tornillo b). Efecto de la velocidad del tornillo
 c). Curva de la boquilla d). Rectas operativas conjunto boquilla-tornillo



Fuente: Tomado de [19], agosto de 2016.

Analizando la *Figura 15d*, se deduce que para la selección del extrusor será conveniente adoptar un tornillo con relación L/h elevada, ya que permitirá trabajar razonablemente bien con diferentes boquillas en un amplio margen de tamaños.

Operación de cortado de espumado biodegradable

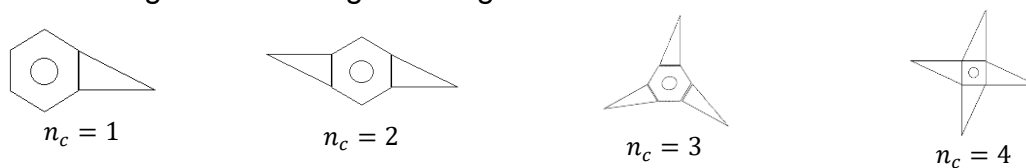
Para dar solución al requerimiento RG4 identificado en el Capítulo 2, se propone para esta operación, la implementación de unas cuchillas giratorias en la salida del extrusor. Como se detalla en el Anexo E, el parámetro que interesa en el cortado, es la velocidad de giro de la cuchilla para obtener espumas con una longitud deseada, para esto es necesario conocer el flujo volumétrico de material que sale del extrusor, el diámetro del espumado y el número de cuchillas que depende del diseño de la cortadora, ecuación (9) (ver *Figura 16*).

$$N = \frac{4Q}{\pi L_e D_e^2 n_c} \quad (9)$$

Donde:

N	: Revoluciones de cuchilla por unidad de tiempo	Q	: Flujo volumétrico del extrusor
L_e	: Longitud deseada de las espumas [m]	D_e	: Diámetro del espumado
n_c	: Numero de cuchillas		

Figura 16. Configuración geométrica del número de cuchillas



Fuente: Propia, agosto de 2016.

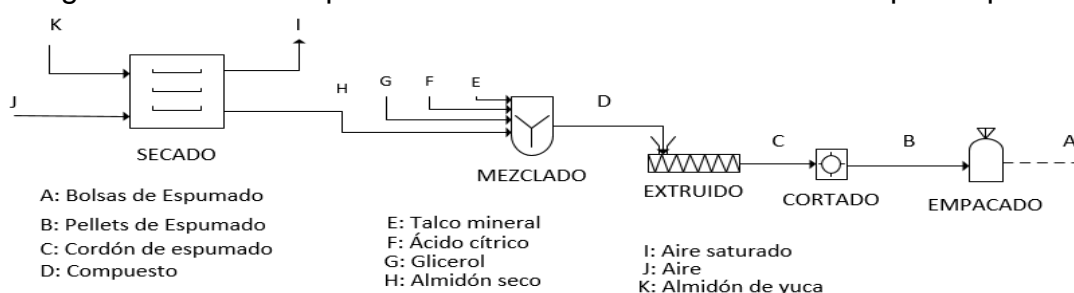
3.3.2 Escalamiento de la producción

Más que identificar los volúmenes de producción del proceso escalado, un proyecto de escalamiento también pretende determinar cómo operará la línea de producción en la nueva escala, de manera que en la implementación no se llegue a situaciones como la subutilización de equipos, embotellamientos o automatización innecesaria de operaciones que ralentizan el retorno de la inversión del proyecto. También es indispensable visualizar la intervención del recurso humano en el proceso, pues representara la nómina de la empresa. Por lo tanto, en este paso se propone: la determinación de los modos de operación de la línea, la distribución de tiempos y el cálculo de la unidad productiva para cada operación.

Determinación de los modos de operación de la línea

Considerando que la planta piloto trabajará en jornadas de 8 horas, para el análisis se toma como base una primera aproximación del PFD de PROESBIPAY planta piloto incluyendo las nuevas operaciones que surgieron a partir del estudio realizado en el capítulo 2 y en la fase 2 del PEIPP (cortado y empacado), ver *Figura 17*.

Figura 17. Primera aproximación del PFD de PROESBIPAY planta piloto



Fuente: Propia, octubre de 2016.

Principalmente se debe definir el ciclo de control de la línea de producción que está ligado a la operación más lenta, para tomarla como referencia en el ajuste de las demás operaciones. En el caso de PROESBIPAY se toma como ciclo de control el de la extrusión, pues a partir de esta se obtuvo la unidad productiva de laboratorio que se proyectó al nivel de planta piloto (16.84 kg/h).

Como lo demuestra la *Figura 17*, la operación de secado prepara la principal materia prima de todo el proceso (almidón de yuca) y al igual que en el laboratorio, se

desarrollara alrededor del equipo secador de bandejas que opera por lotes y requiere de un operario para ingresar y descargar material; sin embargo, el secado es un proceso lento y considerar reducir el tamaño de lote para ajustar su producción al ciclo de control, puede conllevar a la subutilización del equipo. Por lo tanto, se establece que la operación de secado trabaje con un lote de gran tamaño, correspondiente a la cantidad de almidón que se procesa en una jornada, es decir, que se secará la cantidad de almidón de yuca adecuada para producir la cantidad de almidón seco que se consumirá en la jornada siguiente.

La operación de mezclado debe trabajar de manera semiautomática y por los lotes; de lo contrario, involucraría la automatización completa de la operación para trabajar en modo continuo, lo que se refleja en una inversión injustificable debido a la baja unidad productiva del proceso, pues se trata de una planta piloto. A diferencia que en el laboratorio, en la planta piloto se realizara una sola operación de mezclado para obtener compuesto 2, que de aquí en adelante se denominara simplemente “Compuesto”, puesto que esta se ejecutará en la misma jornada en la que se desarrolla la extrusión. El tamaño del lote debe ser pequeño con el fin de evitar que el compuesto se exponga al ambiente por mucho tiempo, debido a las propiedades higroscópicas del almidón (absorción de humedad).

Las operaciones extruido y cortado, por su funcionamiento, operarán en modo continuo, de manera automática y cuasi paralela, pues las operaciones subsiguientes a la extrusión empiezan a trabajar a medida que sale material del extrusor. Para dar solución al requerimiento RG6, se crea la operación de empacado, cuya salida es discreta debido a que se obtiene como producto final, espumas en bolsas de diferentes presentaciones (5 a 10 kg). Debido a la baja densidad de las espumas, el volumen de las bolsas llenas será de 0.2 a 0.5 m³ aproximadamente, esto implicaría complejidad y consumo de mucho espacio para un sistema automatizado, por lo tanto se determina que el sistema de embalaje será semiautomático y por lotes. El tamaño de lote se define más adelante en la distribución de tiempos de operación.

A modo de resumen, se organiza la información en la *Tabla 20* indicando el modo de operación, el tamaño del lote y el nivel de automatización de cada operación.

Tabla 20. Modos de operación de PROESBIPAY planta piloto

Operación	Modo de operación	Tamaño del lote	Nivel de automatización
Secado	Batch	Grande	Semiautomático
Mezclado	Batch	Pequeño	Semiautomático
Extrusión	Continuo	16.84 kg/h	Automático
Cortado	Continuo	16.84 kg/h	Automático
Empacado	Batch	Por definir	Semiautomático

Fuente: Propia, octubre de 2016.

Distribución de tiempos de operación⁴

La siguiente distribución de tiempos para PROESBIPAY planta piloto se realizó teniendo como objetivo que la línea de producción pueda ser manejada por un solo operario; además, con la información obtenida del análisis de los modos de operación de la línea (ver *Tabla 20*), se logró llegar a la distribución representada por el diagrama de Gantt de la *Tabla 21*, para una jornada de 8 horas.

Tabla 21. Distribución de tiempos de operación de PROESBIPAY planta piloto

Id	Operación	Duración [h]	Inicio [h]	Fin [h]	Tiempo [h]							
					0	1	2	3	4	5	6	7
1	Secado	7.5	0.0	7.5								
2	Mezclado	6.0	1.0	7.0								
3	Extrusión	6.0	1.5	7.5								
4	Cortado	6.0	1.5	7.5								
5	Empacado	0.5	7.5	8.0								

Fuente: Propia, octubre de 2016.

De acuerdo a las especificaciones del punto anterior, la operación de secado queda configurada para producir un lote grande por jornada, correspondiente a la cantidad de almidón seco que se utilizara al día siguiente (ver *Tabla 21*). Esta operación se conforma de tres acciones de proceso secuenciales: Primero, “Cargar horno” que involucra por parte de un operario, pesar la cantidad de almidón de yuca que se desea secar, distribuirlo en bandejas metálicas cuidadosamente, ingresarlas al horno y programar los parámetros de secado; debido a su complejidad, para esta acción se estima una duración de 1 hora. Como segunda acción se tiene “Secar” que es el proceso realizado por el horno para disminuir la humedad del almidón; se asigna una duración de 6 horas considerando que en la última hora de la jornada, el operario deberá realizar otras actividades. En la tercera acción, “Descargar horno”, el operario retira las bandejas del horno y deposita el almidón seco en recipientes herméticos por su carácter higroscópico; su duración se estima de media hora, pues no implica mayor complejidad. Esta descripción queda demostrada en el diagrama de la *Tabla 22*.

Tabla 22. Distribución de tiempos de la operación de secado

Id	Acciones	Duración [h]	Inicio [h]	Fin [h]	Tiempo [h]							
					0	1	2	3	4	5	6	7
1	Secado	7.5	0.0	7.5								
1.1	Cargar horno*	1.0	0.0	1.0								
1.2	Secar	6.0	1.0	7.0								
1.3	Descargar horno*	0.5	7.0	7.5								

Fuente: Propia, octubre de 2016.

⁴ Las acciones de proceso en los diagramas de Gantt de cada operación de PROESBIPAY marcadas con * requieren de la intervención de un operario para ser llevadas a cabo.

La operación de mezclado requiere de la constante intervención de un operario, por lo tanto, se debe ejecutar durante las 6 horas, paralelo a la segunda acción de la operación de secado, puesto que en este periodo el operario estará libre (ver *Tabla 21*). Sin embargo, como se indica en la *Tabla 20*, el tamaño del lote debe ser pequeño para reducir el tiempo de permanencia del compuesto en la tolva de alimentación del extrusor; teniendo en cuenta que este tiempo debe ser igual a la duración de la operación de mezclado para evitar embotellamientos y tomando como base los tiempos de mezclado en el laboratorio, se determina que una duración de 30 minutos es adecuada para el proceso. Esta operación se compone de 6 acciones de proceso organizadas como lo muestra el diagrama de la *Tabla 23*: las acciones “agregar material” representan el pesaje e ingreso al mezclador de los materiales mencionados; la acción “mezclar” es realizada por el equipo mezclador para distribuir homogéneamente los materiales ingresados y la acción “Descargar” implica descargar el compuesto del mezclador e ingresarlo a la tolva de alimentación del extrusor. De acuerdo a lo mencionado, se identifica que en una jornada se producen 12 lotes de compuesto (ver *Tabla 21*).

Tabla 23. Distribución de tiempos de la operación de mezclado para un lote

Id	Acciones	Duración [min]	Inicio [min]	Fin [min]	Tiempo [min]						
					60	65	70	75	80	85	
2	Mezclado	30	60	90							
2.1	Agregar almidón seco*	5	60	65							
2.2	Agregar ácido cítrico*	5	65	70							
2.3	Mezclar	15	70	85							
2.4	Agregar glicerol*	5	70	75							
2.5	Agregar talco mineral*	5	75	80							
2.6	Descargar*	5	85	90							

Fuente: Propia, octubre de 2016.

A diferencia de las anteriores operaciones; el extruido y cortado al operar de modo continuo y automático, solo realizan una acción de proceso (la que les da el nombre); además, al trabajar de manera cuasi paralela, iniciarán a partir del primer lote de compuesto producido en la jornada y terminarán 30 minutos después del último lote producido (ver *Tabla 21*).

En cuanto a la operación de empaçado, inicialmente se pensó en comenzar su marcha apenas salieran espumas de la operación de cortado; sin embargo, como la tasa de producción es de 16.84 kg/h, el tiempo para obtener una bolsa de 5 kg de espumado sería de 18 minutos aproximadamente, lo cual es un periodo demasiado extenso comparado con procesos de embalaje ya implementados en los que este tiempo no supera el minuto [40]. Así pues, se determina que la operación de empaçado se realice al final de la jornada cuando la producción haya culminado, de esta manera se tendrá todo el espumado listo a la hora de empaçar (ver *Tabla 21*). Con la unidad productiva y el tiempo de operación del extrusor se identifica que en un jornada se producirán 101.04 kg de espumado biodegradable y por tanto

20.21 bolsas de 5 kg, lo cual significa que para empacar todo en 30 minutos se deberá empacar una bolsa cada 1.5 minutos aproximadamente, tiempo suficiente para desarrollar el proceso. Con este análisis también se identifica la necesidad de un depósito o silo para almacenar el espumado durante la producción.

Cálculo de la unidad productiva para cada operación

A partir de la información obtenida en los ítems anteriores (*Tabla 20 y Tabla 21*), se identificó la necesidad de incluir dos áreas de acopio: La primera con el motivo de almacenar el almidón seco producido por la operación de secado, que se utilizará en la jornada siguiente; para esto, se propone utilizar recipientes herméticos que eviten la absorción de humedad por parte del almidón. La segunda área de acopio debe servir para la recepción de los pellets de espumado que se producirán durante la jornada; para este caso, conviene utilizar un silo flexible como el de la *Figura 18* que servirá también como tolva de alimentación para el equipo de embalaje, también será necesario un sistema de transporte para elevar los pellets desde la operación de cortado hasta la entrada superior del silo.

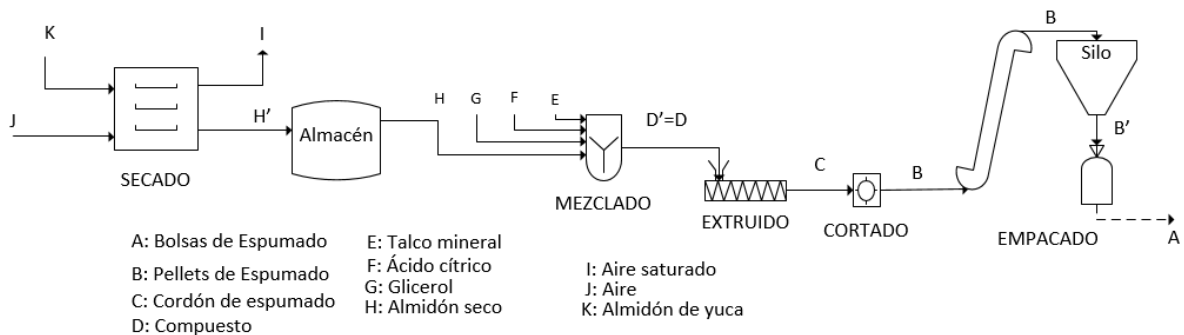
Figura 18. Silo flexible en lona para pellets



Fuente: Tomado de [41], octubre de 2016.

De acuerdo a estas consideraciones, para calcular las unidades productivas de las operaciones, se actualiza la primera aproximación del PFD de la planta piloto de PROESBIPAY al diagrama de la *Figura 19*.

Figura 19. Segunda aproximación del PFD de PROESBIPAY planta piloto



Fuente: Propia, octubre de 2016.

Siguiendo las corrientes y la nomenclatura del diagrama de la *Figura 19*, los modos de operación (*Tabla 20*) y la distribución de tiempos (*Tabla 21*), estudiados anteriormente; en la sección 5.2 del Anexo E (Unidad Productiva para Operaciones de PROESBIPAY), se desarrollaron los correspondientes cálculos para cada operación, obteniéndose la información plasmada en la *Tabla 24*, en la que se muestra los materiales que entran y salen de cada operación, los volúmenes y tiempos que ocupan estos materiales en las operaciones que trabajan por lotes y además, se incluye información acerca de las áreas de almacenamiento.

Tabla 24. Unidad productiva por operaciones de PROESBIPAY planta piloto

Operación	Entrada			Vol. [m ³]	t [min]	Salida		
	Material	Valor	Unidad			Material	Valor	Unidad
Secado	<i>K</i>	79.9	<i>kg/lote</i>	0.167	360	<i>H'</i>	70.38	<i>kg/lote</i>
Almacén ⁵	<i>H'</i>	70.38	<i>kg</i>	0.142		<i>H</i>	5.865	<i>kg</i>
Mezclado	<i>H</i>	5.865	<i>kg/lote</i>	0.0207	30	<i>D'</i>	8.42	<i>kg/lote</i>
	<i>G</i>	2.514						
	<i>F</i>	0.029						
	<i>E</i>	0.012						
Extrusión	<i>D</i>	16.84	<i>kg/h</i>	0.0207 ⁶		<i>C</i>	16.84	<i>kg/h</i>
Cortado	<i>C</i>	16.84	<i>kg/h</i>			<i>B</i>	16.84	<i>kg/h</i>
Silo ⁷	<i>B</i>	16.84	<i>kg/h</i>	4	360	<i>B'</i>	5	<i>kg</i>
Empacado	<i>B'</i>	5	<i>kg/lote</i>		1.5	<i>A</i>	1	<i>und/lote</i>

Fuente: Propia, octubre de 2016.

3.3.3 Modificación cuantificada de variables principales de proceso

A partir de la información recolectada en la sección 3.3.2 (Escalamiento de la producción), se identifican los correspondientes requerimientos de producción que deberán cumplir los equipos principales en la planta piloto de PROESBIPAY y a partir de los modelos obtenidos en la sección 3.3.1 (Estudio de variables principales del proceso), se dimensionan y calculan sus parámetros de operación. Este procedimiento de cálculo se exterioriza en la sección 5.3 del Anexo E (Modificación cuantificada de variables principales de PROESBIPAY).

Secador

Las especificaciones que deberá cumplir el equipo secador en la planta piloto se listan en la *Tabla 25*, estas corresponden especialmente para un horno de convección forzada.

⁵ El almacén no es una operación de proceso, sin embargo es un recurso necesario para la operación de secado.

⁶ Corresponde al volumen que ocupará el compuesto en la tolva de alimentación del extrusor.

⁷ El silo es un recurso necesario para la operación de empacado.

Tabla 25. Requerimientos para el secador en la planta piloto

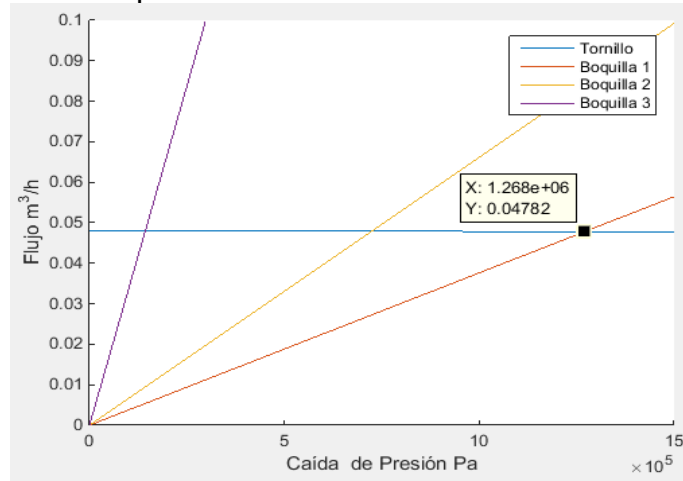
Parámetro	Valor	Unidad
Carga	79.9	kg
Área mínima total de los estantes	5.56	m ²
Número de bandejas	19	
Número de estantes mínimo	10	
Tasa de evaporación por unidad de área	0.286	kg/m ² h
Temperatura de secado	80	°C
Longitud de la bandeja	0.54	m
Espesor de las bandejas	0.03	m
Ancho de las bandejas	0.55	m
Transferencia de calor del aire	2099.989	J/s
Eficiencia de transferencia de calor	50	%
Coefficiente de convección	9.486	W/m ² °C
Velocidad de circulación del aire	3.35	m/s
Flujo volumétrico de aire	3.43	m ³ /s

Fuente: Propia, octubre de 2016.

Extrusor

En la *Tabla 26* se listan las dimensiones y parámetros de operación que debe cumplir, o al menos aproximarse el equipo extrusor para que su punto de operación sea semejante al de la *Figura 20* (apoyado en Matlab, ver Anexo digital J, “Modelo_Matematico_Extrusor”), teniendo en cuenta que los efectos del agente espumante disminuirán este caudal de extrusión en un 10.45%, aproximándolo al necesario en la planta piloto.

Figura 20. Punto de operación del extrusor de PROESBIPAY planta piloto



Fuente: Propia, octubre de 2016.

Tabla 26. Requerimientos para el extrusor de PROESBIPAY planta piloto

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro del tornillo	D	0.041	m
Profundidad del canal del tornillo	h	0.002	m
Ángulo del filete del tornillo respecto a la vertical	θ	20	°

Longitud del cilindro	L	0.9	m
Velocidad de giro del tornillo	N	150	rpm
Viscosidad del polímero fundido en la zona de dosificación	η	300	$kg/m s$
Radio del orificio de la boquilla 1 del extrusor	R	0.00293	m
Radio del orificio de la boquilla 2 del extrusor	R	0.006	m
Radio del orificio de la boquilla 3 del extrusor	R	0.009	m
Longitud del orificio de la boquilla 1 2 y 3 del extrusor	L_b	0.00923	m
Punto de operación	Q	0.0432	m^3/h

Fuente: Propia, octubre de 2016.

Cortadora

A partir del modelo matemático de la cortadora, se determinó la velocidad a la que debe girar para obtener como producto pellets de espumado de 3 cm de largo con una configuración de 2 cuchillas en el cabezal, el resultado se lista en la *Tabla 27*. Las dimensiones de determinan respecto a la altura de la boquilla del extrusor.

Tabla 27. Requerimientos para la cortadora de PROESBIPAY planta piloto

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad de giro de la cortadora	N	244.8	rpm
Número de cuchillas en el cabezal (ver <i>Figura 16</i>)	n_c	2	

Fuente: Propia, octubre de 2016.

3.4 Ajuste Comparativo según Procesos que Ya Operan Industrialmente

Llevando a cabo la respectiva investigación, se encontró que en Colombia, algunas empresas que se relacionan con la temática que se está tratando en el presente trabajo de grado (espumados biodegradables para aplicaciones en embalaje de productos) son las siguientes (ver *Tabla 28*):

Tabla 28. Empresas relacionadas con producción de espumas

CASOS NACIONALES			
Empresa	Ubicación	Producción	Descripción
Espumas del valle S.A	Cali	Industrial	Fabricación de espuma visco-elástica con características de resiliencia y absorción de los impactos, procesamiento de espumado tipo químico, bloques de espuma de gran tamaño que son usados para la fabricación de colchones.
Extrucol S.A	Bucaramanga	Industrial	Empresa pionera en la extrusión e inyección del polietileno para aplicaciones especiales, tuberías, accesorios, redes de polietileno, conducción y distribución de combustibles gaseosos, conducción de fibra óptica, cable de comunicaciones, cables de TV y alto voltaje.
Extrusiones S.A	Itagüí	Industrial	Producción de piezas en PVC rígido y flexible, poliestireno de acuerdo a especificaciones particulares. Empresa líder en el diseño, manufactura y comercialización de productos elaborados en caucho y plástico.
Olaflex	Bogotá	Industrial	Producción de espumas de baja densidad utilizada para empacar o embalar artículos delicados, toma la forma del producto (porcelanas, tarjetas electrónicas). Diseñan,

			desarrollan, fabrican y comercializan productos en poliuretano (industrial del mueble, construcción, decoración, transporte, maquinaria fija y rodante). Utilizan espumados de tipo químico y la información del proceso o planta es reservada.
CASO INTERNACIONAL			
Foamland	España	Industrial	Fabricantes de materiales para embalaje (bobinas de burbuja, bolsas, tubos, film estirable y mini film, cantoneras y perfiles, sobres) y espumas técnicas (poliuretano, polietileno, poliestireno, espumas filtrantes, cauchos, espuma PVC), pellets de polietileno de baja densidad. Es uno de los fabricantes más respetados en el ámbito de la burbuja, embalaje protector, entre otros.

Fuente: Propia, septiembre de 2016.

Como se puede apreciar (ver *Tabla 28*), la mayoría de las empresas en Colombia (se descartan las compañías internacionales por la dificultad que se presentaría, dada la necesidad de una visita técnica), que se dedican a la producción y comercialización de ciertas clases de espumas, cuentan con procesos industrializados (producciones a gran escala) que distan demasiado de una producción tipo piloto, este hecho genera la imposibilidad de hacer una comparación provechosa. Por esta razón y teniendo en cuenta las recomendaciones directas del investigador encargado de PROESBIPAY, se utilizará la empresa “Pasabocas de Maíz Juanshis”, ubicada en la ciudad de Cali, para llevar a cabo la comparación; esta empresa (Juanshis) tiene una planta de producción de tamaño intermedio (semi-industrial), que se asemeja en cuanto a operaciones, etapas y equipos, con el proceso PROESBIPAY.

3.4.1 Organización de la Información del Proceso que ya Opera Industrialmente

Se levanta la información de la empresa “Comestibles Juanshis”, incluyendo aspectos de gestión de residuos, innovación y tecnología, descripción del proceso, modelado del proceso con ISA 88 (ver Anexo F).

3.4.2 Comparación de modelos ISA 88.01 del proceso en cuestión y del que ya opera industrialmente

Teniendo en cuenta que no se han desarrollado aún los modelos correspondientes al nivel de planta piloto (actividad que se llevará a cabo en el capítulo 4), la comparación se desarrollará de la siguiente manera: en primer lugar, se tendrá muy en cuenta el Modelo de Proceso junto a las etapas, operaciones y acciones correspondientes a la producción de Expandidos de Maíz (proceso eficiente y bien posicionado) para, llegado el momento, desarrollar los modelos necesarios a nivel de planta piloto; en segundo lugar, una vez construidos los modelos para el nivel de la planta piloto, se retornará al presente ítem para hacer la comparación deseada.

Comparación

La presentación del Modelo de Proceso para la producción de expandidos de maíz (ver *Tabla 29*) y su semejante para la producción de espumados biodegradables a nivel de planta piloto (ver *Tabla 37*), permiten visualizar claramente las características propias de cada proceso, hecho que a su vez posibilita una retroalimentación entre los mismos.

Tabla 29. Modelo de Proceso para expandidos de maíz JuanShis

Proceso	Etapas	Operaciones	Acciones
Producción De Pasabocas De Maíz Expandido	Alistamiento de materia prima	Traslado de materia prima	Medir porcentaje de humedad utilizando balanza digital de humedad.
			Trasladar sacos en “carretas de carga” hacia estibas.
			Apilar sacos verticalmente sobre estibas.
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclado de harina de maíz con agua	Pesar harina de maíz en balanza de masa.
			Programar flujo de agua en tablero de control.
			Agregar harina de maíz al mezclador.
			Iniciar mezclado en el equipo.
	Obtención del expandido de maíz	Extruido de la mezcla	Precalentar equipo de extrusión.
			Agregar mezcla a través de la tolva de alimentación.
		Cortado de expandido de maíz	Fundir mezcla en el módulo de extrusión.
			Cortar cordón extruido mediante cuchilla de corte.
	Acondicionamiento de humedad del expandido de maíz	Horneado del expandido de maíz	Trasladar en banda transportadora hacia el área de horneado.
			Ingresar expandido de maíz al horno mediante cangilones.
			Hornear expandido de maíz en equipo de horneado.
	Saborización del expandido de maíz	Sazonado del expandido de maíz	Trasladar expandido de maíz hacia el área de sazonado mediante banda transportadora.
			Ingresar expandido de maíz al tambor giratorio mediante cangilones.
			Agregar aceite, saborizantes y colorantes naturales mediante flauta de aspersión.
	Empaque	Empacado individual	Trasladar expandido de maíz hacia el área de empaque mediante banda transportadora.
			Separar cantidades de empaque mediante banda tipo cangilones.
			Colocar bolsa para empaque en la empacadora.
Ingresar cantidades al equipo de empackado.			
Empacado grupal		Retirar paquetes individuales.	
		Agregar manualmente paquetes individuales en bolsa para distribución.	
		Sellar bolsa para distribución mediante equipo de sellado.	
Almcento en bodega	Almcento sobre estibas	Trasladar hacia el área de almacenaje mediante carretas de carga.	
		Ubicar bolsas para distribución sobre estibas.	
			Rotular producto mediante equipo rotulador.

Fuente: Propia, octubre de 2016

De manera general, y recordando que se tuvo en cuenta (referenciando aquellas etapas, operaciones o acciones que aportaran positivamente) el MP de Expandido

de Maíz Juanshis para desarrollar el MP de PROESBIPAY a nivel de planta piloto, puede considerarse que en el último caso (nivel piloto), las etapas propuestas junto a las correspondientes operaciones y acciones, constituyen una estructura de proceso suficiente para el buen desarrollo del mismo. Comparando etapa por etapa de un modelo a otro hasta donde el límite (debido a la naturaleza de cada proceso) de comparación lo permite, se resalta la ausencia (en el MP de PROESBIPAY a nivel piloto) de las etapas “alastamiento de materia prima y “almacenamiento en bodega” (propias del MP de Expandido de Maíz), debido a la “dimensión” de cada proceso, es decir, a nivel semi-industrial (proceso de Expandido de Maíz Juanshis) se hace necesario y practico contar con las mencionadas etapas, sin embargo, a nivel de planta piloto (proceso PROESBIPAY) no es necesaria su consideración debido a la dimensión o tamaño del modelado.

3.5 Determinación de la Planta Física en la Nueva Escala

Con la ejecución de este paso, PEIPP propone la escogencia de los equipos necesarios en la nueva escala y la determinación de la planta física necesaria para el escalamiento realizado.

3.5.1 Escogencia de equipos

Para la escogencia de los equipos principales se aplicó el método “Equipo-Puntuación”, procedimiento que fue elegido después de realizar un estudio de las metodologías utilizadas para este fin, en la sección 7.1 del Anexo G (Escogencia de equipos). Este método otorga un puntaje (0-100) como criterio de selección, basado en características de flexibilidad, costo y fabricante de los equipos cotizados. Estas cotizaciones se realizaron con base a los requerimientos de operación de cada equipo, mostrados en la sección 3.3.3 cuyo procedimiento de cálculo se expone en la sección 5.3 del Anexo E (Modificación cuantificada de variables principales de PROESBIPAY).

En la sección 7.2 del Anexo G se expone la implementación del método Equipo-Puntuación, la cual permitió facilitar la selección de los equipos para la planta piloto de PROESBIAY que se detallan en la *Tabla 30*. Las cotizaciones corresponden a los meses de octubre, noviembre de 2016.

Tabla 30. Equipos principales seleccionados para PROESBIPAY planta piloto

SECADOR				
Nombre	Modelo	Fabricante	Distribuidor	Valor sin IVA [USD]
Horno universal	UF 750 PLUS	MEMMERT	ARTILAB (Cali)	7412
ESPECIFICACIONES TECNICAS				

Cámara en acero inoxidable ASTM 304, carga máxima 160 kg, volumen interior de 749 litros, rango de temperatura de 25-260°C, circulación de aire por ventilador con regulación de velocidad por pasos (0-10), alimentación 110-115 V 60 Hz, 14 estantes, consumo energético de 4.8 kW.				
MEZCLADOR				
Nombre	Modelo	Fabricante	Distribuidor	Valor sin IVA [USD]
Batidora industrial	B20G 20LTS	SINMAG	CI Talsa	1000
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS				
Componentes en acero inoxidable, velocidad variable (197-462 rpm), alimentación 110/220 V, capacidad 20L, seguro para que el tazón de mezclado no se salga durante la operación, desplazamiento vertical de la tolva, diferentes aspas de mezclado (gancho, pala, globo) [42].				
EXTRUSOR				
Nombre	Modelo	Fabricante	Distribuidor	Valor sin IVA [USD]
Extrusor mono husillo	TM-45-25	BAUSANO	BAUSANO (Italia)	30487
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS				
Diámetro de tornillo de 45 mm, relación L/D de 25:1, velocidad media de 85 rpm, potencia de calentamiento 9.6 kW, potencia de ventiladores 18 kW, potencia total instalada de 27.6 kW.				
EMPACADORA				
Nombre	Modelo	Fabricante	Distribuidor	Valor sin IVA [USD]
Embolsadora de carga por gravedad	ECG 420	INGESIR	INGESIR (Argentina)	9634
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS				
Para bolsas de boca abierta, carga por gravedad (5 kg min - 20 kg máx), sistema sujeta bolsas neumático de mandíbulas, conducto de despresurización, pesaje directo en la bolsa a través de celdas de carga, equipo electrónico de pesaje con panel frontal, sistema de válvula mariposa que permite doble velocidad de carga, pedal de carga para inicio de llenado y selladora [43].				

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Además de los equipos principales, se presentan características de capacidad, marca y costo para los equipos secundarios necesarios en el proceso (ver *Tabla 31*).

Tabla 31. Equipos secundarios de PROESBIPAY tipo piloto

Equipo	Marca	Capacidad	Valor (USD)
Alimentador volumétrico	BATTE	50 L/h	6460
Transportador neumático	PALINI	770-2800 m ³ /h	814.39
Bascula de piso	TEK	150 kg	73.10
Balanza de masa	FENIX	15 kg	89.75
Silo flexible	T'UVENTO	3.3 – 4.4 m ³	2439
Cronómetro	CAMPEON	--	16
Recipientes herméticos	Genérico	150 L	42

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Con base en la selección de los equipos (ver *Tabla 30* y *Tabla 31*), se determina que el costo total de los mismos es de aproximadamente **USD 58467,24**. Esta estimación no contempla valores de IVA, envío, instalación y tampoco pago de impuestos.

3.5.2 Distribución de la planta

Se levanta la distribución de planta teniendo en cuenta conceptos como: eficiencia de operaciones, ubicación de áreas, célula (s) de proceso, unidades, módulos de equipos, aseguramiento de flujo continuo de trabajo y además, se planteará una distribución “por producto”, clasificación que está relacionada con procesos de flujo lineal [44]. Los diferentes materiales recorren la línea de producción a medida que sufren las respectivas modificaciones, propias de la etapa o estación.

En este orden de ideas, para la determinación del espacio físico y su respectiva distribución, se hará uso del método SLP (System Layout Planing) que define la distribución espacial de los elementos al interior de una instalación, y que se constituye en la estructura física sobre la cual se integran e interactúan todos los componentes con los flujos y movimientos de los materiales, la ubicación de las máquinas o procesos, la mano de obra y el edificio en general. Este método puede clasificarse como “cualitativo” y asume múltiples variaciones de acuerdo a factores como los volúmenes de producción, las características de los productos, la geometría del espacio y los sistemas de manejo de materiales [45].

Distribución de PROESBIPAY a nivel de planta piloto

Inicialmente, se presenta un listado de las áreas (ver *Tabla 32*) en las cuales se divide el proceso y que se consideraron necesarias para el buen desarrollo de las diferentes actividades y operaciones.

Tabla 32. Distribución de planta física para PROESBIPAY piloto

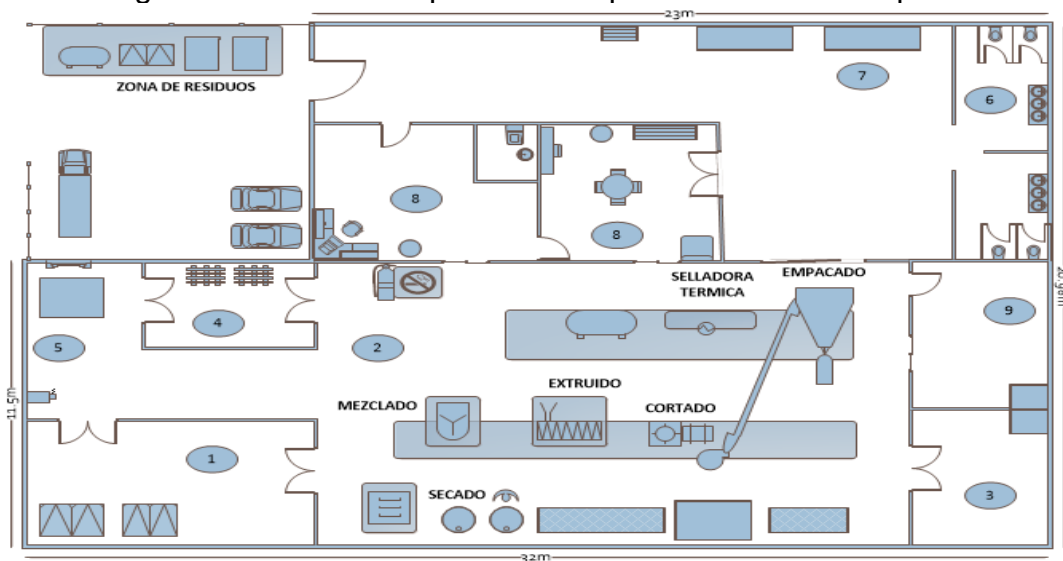
ÁREA	IDENTIFICACIÓN	TAMAÑO (m ²)
Bodega de insumos y materias primas	1	3.0m*5.5m = 16.5
Línea de proceso	2	7.5*10.0 = 75
Control de calidad	3	3.0*3.5 = 10.5
Almacén de producto terminado	4	3.0*3.5 = 10.5
Zona de recibo y despacho	5	2.5*4.5 = 11.25
Vistiére	6	3.0*5.0 = 15
Casilleros	7	0.5*1.5 = 0.75
Oficinas	8	3,5m*8,5m = 29.75
Área de mantenimiento	9	3.0*4.0 = 12
Área total		181.25

Fuente: Propia, agosto de 2016

La distribución en el plano (ver *Figura 21*) se realizó de tal manera que los recorridos en el desarrollo de las diferentes actividades sean cortos y permitan potenciar la efectividad de los equipos. Para optimizar el “aprovechamiento de espacios”, se tomó las dimensiones de la planta física que ocupa el proceso en el Laboratorio de Reología y Empaques, instalaciones donde se desarrolla actualmente PROESBIPAY y además, se obtuvo las dimensiones de cada uno de los equipos

que integran el proceso; esta información sirve como referencia para dimensionar adecuadamente las instalaciones a nivel piloto.

Figura 21. Plano de la planta física para PROESBIPAY piloto



Fuente: Propia, agosto de 2016

3.6 Organización del Escalamiento Industrial Logrado

En esta sección se registra la información obtenida para la nueva escala lograda.

3.6.1 Aspectos empresariales

Se debe construir la cadena de valor del proceso en la nueva escala, esta se desarrolla en la sección 4.2.1 del capítulo 4 (*Figura 26*). Luego se debe establecer la misión y visión de la empresa y sus trámites administrativo-empresariales; sin embargo estos ítems no aplican para escalamientos a nivel de planta piloto.

3.6.2 Esquematización representativa de la escala industrial

Conviene realizar diagramas de flujo por operaciones respecto a la nueva escala, incluyendo datos de balance de materiales obtenidos en el escalamiento y la actualización de los modelos ISA-S88.01. Estos diagramas se desarrollan en la sección 4.2.2 del capítulo 4 (*Figura 27*) y los modelos en las secciones 4.2.3 a 4.2.5.

3.6.3 Receta maestra y de control

Los modelos de la receta maestra y de control de la planta piloto de PROESBIPAY se levantan en las secciones 4.3.2 y 4.3.3, (ver Tabla 47 y Tabla 48).

Capítulo 4

4 Definición de la Automatización del Proceso a Nivel de Planta Piloto

En este capítulo se describen las diferentes propuestas que dan solución a los Requerimientos Generales y de Automatización, planteados en la sección 2.4.1 del capítulo 2. Se hace una breve descripción del origen de cada requerimiento y se consigna las diferentes especificaciones técnicas y diseños CAD necesarios para cada uno de los componentes que integran el sistema propuesto como solución. Además, se lleva a cabo el modelado (diagrama de flujo, modelos ISA-S88, diagramas P&ID, identificación de variables, receta maestra y de control) del proceso a nivel de planta piloto.

4.1 Solución de Requerimientos Generales

Teniendo en cuenta que en la sección 3.1.1, capítulo 3, se desarrolló el formato estándar de planeación y seguimiento al que hace referencia el requerimiento general número 1 (RG1), se da por cumplida la solución del mismo.

El modelado (cadena de valor, diagrama de flujo de proceso, modelo de proceso, modelo físico, modelo de control de procedimiento, diagramas P&ID, identificación de variables, receta maestra y de control) que se desarrolla en el presente capítulo, sección 4.2, constituye la documentación formal y estándar de PROESBIPAY a nivel de planta piloto (por la estandarización de los modelos ISA, se asegura la reproducción de la información en cualquier momento o de cualquier etapa del proceso). Bajo estas consideraciones, se da por solventado RG2.

4.1.1 Sistema de alimentación para ingreso continuo de material

El diagnóstico desarrollado en el capítulo 2, permitió evidenciar el problema que existe en la zona de alimentación del extrusor en la cual, un operario ejerce presión al material (utilizando un trozo de madera) buscando generar un ingreso continuo y uniforme a las zonas de extrusión del equipo, por supuesto, aunque el esfuerzo de este operario sea grande, no se garantiza una presión constante en el material y tampoco se garantiza un ingreso uniforme del mismo.

Ahora bien, teniendo en cuenta que esta problemática puede ser heredada a implementaciones en planta piloto y que la uniformidad del producto final obtenido depende de los diferentes “tratamientos” o manejos que se hagan en las

operaciones previas a su obtención, es preciso dar solución a la problemática planteada.

Para dar solución a problemáticas referentes a alimentación continua de material (granulado principalmente), existen herramientas como “tolvas de alimentación” y “cargadores de tolvas” [46], sin embargo, por la particularidad del caso (alimentación a un equipo de extrusión, densidad del compuesto utilizado 447.5 kg/m³) se propone un “alimentador volumétrico de doble tornillo”. Este equipo puede clasificarse como simple, fácil de usar e instalar y de fácil limpieza/mantenimiento, además, está disponible para materiales como pellets, polvo o líquido, en campos de farmacéutica, química, alimentaria, industrial del caucho, entre otras [47]-[48].

Especificaciones técnicas del Alimentador Volumétrico

El sistema que se sugiere (ver *Figura 22*) tiene un compartimento de alimentación, abrazadera, tolva de agitación, mixer vertical, mixer horizontal, compartimento de salida, entre otros. Las características del equipo se presentan en la *Tabla 33*.

Tabla 33. Características del Alimentador Volumétrico modelo S60

Característica	Especificación
Modelo	BAT-LF-TS-10
Tornillo	Doble
Flujo de alimentación	5-50L/H
Motor	0.2KW Servo Motor
Tolva	20L 304 Acero Stainless
Aplicación	Gránulos, pellets
Alimentación estándar	240V, 3-ph, 60 Hz (opcional)
Exactitud de alimentación	±0.5%
Mixer vertical	1
Mixer horizontal	1
Sistema De Control	
Celdas de carga	METTLER TOLEDO, 2
PLC	SIEMENS, 1
Interfaz hombre-maquina	7 INCH, 1

Fuente: Tomada de [49], septiembre de 2016

El alimentador está construido en acero inoxidable, puede trabajar en aplicaciones continuas o por lotes y posee tornillo intercambiable (según material utilizado). Su capacidad fue determinada por las especificaciones que se hicieron en la sección 3.3.2. (Cálculo de Volúmenes de Producción), correspondiente a la fijación de parámetros para la etapa de mezclado (volumen máximo por lote 17L); además, se tuvo en cuenta las características de densidad y porcentaje de humedad del material que se va a utilizar en el equipo (447.5 kg/m³ y 80% o inferior, respectivamente).

Figura 22. Alimentador volumétrico de tornillo simple



Fuente: Tomada de [48], septiembre de 2016

Con la propuesta del Alimentador Volumétrico para generar un ingreso continuo de material al equipo de extrusión, se da cumplimiento al requerimiento general número 3 (RG3).

4.1.2 Sistema de corte del cordón espumado

Identificada la problemática que se presenta en la operación de corte del espumado biodegradable (cortado que se ejecuta manualmente con una tijera metálica, a nivel de laboratorio), causa directa de la alta cantidad de residuo generado y pérdida de uniformidad en los cordones de espumado obtenidos, se hace necesario proponer un sistema de corte automático (a nivel de planta piloto) que permita minimizar los efectos negativos que se presentan.

Por inspección directa (investigación desarrollada en el capítulo 1, secciones 1.8 y 1.9) se puede concluir que la operación de corte del cordón espumado tiene un grado de complejidad bajo, existe una única salida en el cabezal de extrusión, el flujo de salida puede clasificarse como constante y el material extruido no presenta comportamientos extraños (variaciones, deformaciones) a la salida del proceso de extrusión; en este orden de ideas, es factible hacer una recomendación propia (autores del presente trabajo de grado) para ejecutar la operación de corte, buscando minimizar costos y contribuir con la viabilidad de la propuesta.

Teniendo en cuenta que se necesita obtener pequeños “pellets” (longitud 30 mm, diámetro 7.9 mm) de espumado biodegradable para la creación del producto final (espuma de relleno suelto), se propone adaptar una Cuchilla de Corte (ver Figura 23a) al eje de un motor pequeño (0.5 HP) cuya velocidad será controlada con un “variador de frecuencia” (este control permitirá obtener pellets del tamaño deseado). Además, el área de corte (después de la boquilla de extrusión y antes de la carcasa del motor de corte) deberá ser “enjaulada” o cubierta por un “contenedor” que evite la dispersión excesiva de pellets hacia los costados (caída o pérdida de material) y

que dirija el material cortado hacia un Transportador Volumétrico encargado de llevar el material a la etapa subsiguiente (ver *Figura 23b*).

El tipo de motor y número de cuchillas de corte se determinan con los planteamientos hechos en la sección 3.3.1 (Estudio de Variables Principales del Proceso - Operación de cortado), que entrega como resultado una velocidad de giro del motor de 245 rpm y un número de cuchillas de corte igual a 2. Las especificaciones técnicas de estos componentes se presentan en la *Tabla 34*.

Tabla 34. Componentes del sistema de corte

Motor	Tipo	Eléctrico, trifásico
	Velocidad	1500 rpm
	Potencia	0.37 kW (0.5 hp)
	Voltaje	220 V-440 V (60 HZ)
	Control de velocidad	Variador de frecuencia
	Diámetro eje	20 mm
Variador de frecuencia	Modelo	SINAMICS V20
	Potencia	0.37 kW, 2.3 A
	Frecuencia	47-63 HZ
	Voltaje	200-240 VAC
Cuchilla de corte	Numero de cuchillas	2
	Longitud de cada cuchilla	35mm
	Material constitutivo	Acero inoxidable (AISI 316)
Jaula recolectora	Apertura de tapa superior	Si
	Material constitutivo	Acero inoxidable (AISI 304)

Fuente: Propia, septiembre de 2016

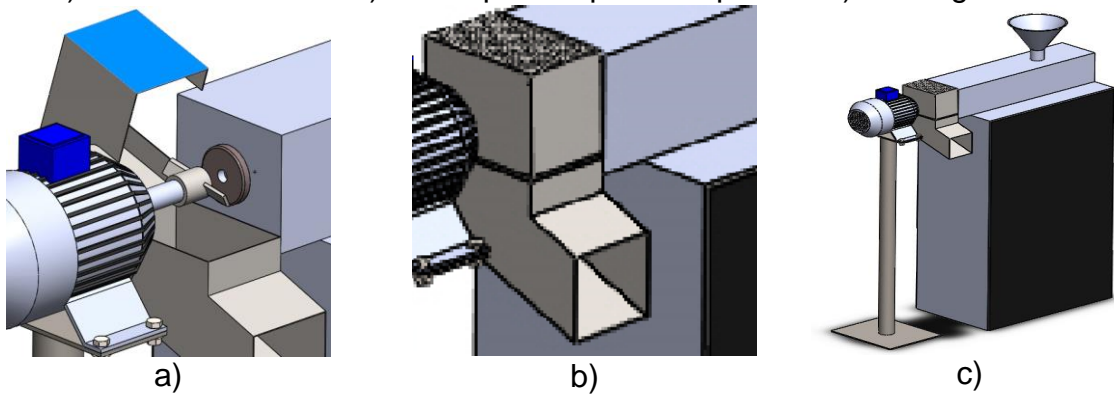
Antes de llevar a cabo el diseño del sistema, se tiene en cuenta la reglamentación legal nacional exigida para fabricación de equipos o maquinaria, INVIMA [50]. Algunos de los aspectos exigidos son los siguientes:

- La configuración de bordes y terminaciones en el equipo no deben representar un riesgo para la integridad humana.
- Se prohíbe el uso de materiales contaminantes como zinc, antimonio, plomo u otros que representen riesgo alguno para la salud.
- Los materiales usados deben ser anticorrosivos si entran en contacto con alimentos.

En la Figura 23 se demuestra el sistema de corte diseñado en un modelo CAD (ver Anexo digital O, "Modelo_CAD_Cortado").

Figura 23. Sistema de corte

a). Cuchilla de corte b). Jaula para captura de pellets c). Vista general



Fuente: Propia, septiembre de 2016

La propuesta del Sistema de Corte da cumplimiento al requerimiento general número 4 (RG4).

4.1.3 Sistema para enfriamiento

Como se mencionó en la propuesta de “corte del cordón espumado”, es importante mantener la uniformidad del producto, por ello, se hace necesario aplicar un flujo de aire que estabilice los pellets cortados. Como solución al requerimiento de enfriamiento, se propone el uso de un “Transportador Neumático” (ver *Figura 24*) que permitirá, en primer lugar, aplicar un flujo de aire a los trozos de material obtenido y, en segundo lugar, transportar el material hasta el silo recolector que está ubicado en la etapa subsiguiente (embalaje).

Figura 24. Transportador neumático



Fuente: Propia, septiembre de 2016

El dimensionamiento del equipo se establece con base al flujo de salida, a nivel de planta piloto, en la operación de extrusión (16.84 kg/h, ver *Tabla 24* de la sección 3.3.2); además, se tuvo en cuenta la altura hasta donde debe ser elevado el material (proporcional a la altura de la máquina de empaquetado y el silo de almacenamiento, 5m aproximadamente), el diámetro del tubo transportador deberá permitir el paso

fluido de los pellets obtenidos (longitud pellet 30mm, diámetro pellet 7.9mm, diámetro de tubo sugerido 150mm).

Las características principales del transportador son presentadas en la *Tabla 35*.

Tabla 35. Características del transportador neumático

Característica	Especificación
Modelo	Palinl
Suministro de aire	Ventilador centrífugo
Voltaje	220V-380V
Potencia	1.5 kW
Velocidad	2840 rpm
Longitud tubo transportador	6m
Diámetro tubo transportador	150mm

Fuente: Propia, septiembre de 2016

La propuesta del sistema de Transporte Neumático da cumplimiento al requerimiento general número 5 (RG5).

4.1.4 Sistema de embalaje para espumado biodegradable

Se propone un sistema compuesto por una máquina semiautomática de embolsado y sellado térmico (ver *Figura 25*), responsable de recepcionar el producto proveniente del silo (previa alimentación de transportador neumático) y dosificar cantidades del mismo mediante sistema electrónico; las cantidades dosificadas son depositadas en una bolsa que, una vez completado el proceso de llenado, un operario traslada hasta la selladora térmica para completar el empaclado.

Figura 25. Máquina de embolsado y sellado



Fuente: Tomada de [40], septiembre de 2016

Se hace necesaria la presencia de un operador en la máquina embolsadora, encargado de colocar la bolsa para llenado y trasladarla hacia la selladora térmica.

La máquina embolsadora es seleccionada teniendo en cuenta que, como se mencionó en la sección 3.3.2. (Cálculo de Volúmenes de Producción), la presentación inicial del producto (pellets de espumado biodegradable) corresponde a 5kg por bolsa y pueden haber variaciones hasta un máximo de 20kg por bolsa; además, la maquina debe tener una capacidad mínima de empaqueo de “1 bolsa en 1.5 minutos” (especificación argumentada en la sección 3.3.2, *Tabla 24*). Con estos criterios se define una capacidad en carga de “5 a 20 kg” y un tiempo de empaqueo por bolsa de 1.5 minutos o inferior. Las especificaciones técnicas del sistema de embalaje se presentan en la *Tabla 36*.

Tabla 36. Características del sistema de embalaje

Característica	Especificación
Tipo de carga	Por gravedad
Bolsas usadas	De boca abierta
Capacidad min	5kg
Capacidad máx	20kg
Sistema sujeta bolsas	Neumático de mandíbulas
Tipo de pesaje	Celdas de carga
Interfaz hombre-maquina	Panel frontal
Velocidades de carga	2 (lenta, rápida)
Voltaje	220V (60Hz), 2.2kVA

Fuente: Tomada de [40], septiembre de 2016

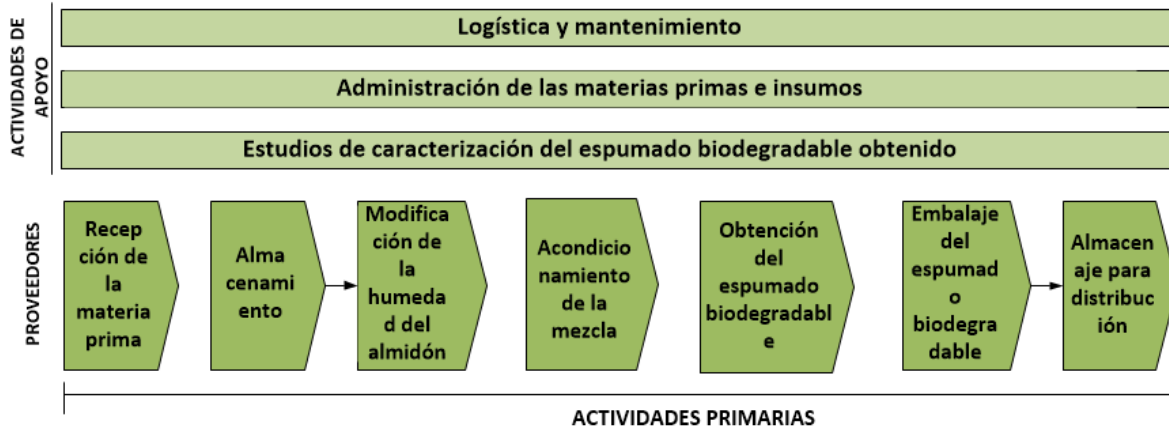
Con la propuesta del Sistema de Embalaje se da cumplimiento al requerimiento general número 6 (RG6).

4.2 Solución a los Requerimientos de Automatización

4.2.1 Cadena de valor para PROESBIPAY a nivel de planta piloto

Como se mencionó en la sección 2.1 (capítulo 2), la cadena de valor permite identificar la “generación de valor” que se tiene en cada una de las actividades principales que se desarrollan en el proceso. La ejecución de la metodología “Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos” junto a las recomendaciones generadas en el “proceso de diagnóstico”, permite levantar la cadena de valor de PROESBIPAY a nivel de planta piloto (ver *Figura 26*).

Figura 26. Cadena de valor para PROESBIPAY planta piloto



Fuente: Propia, septiembre de 2016

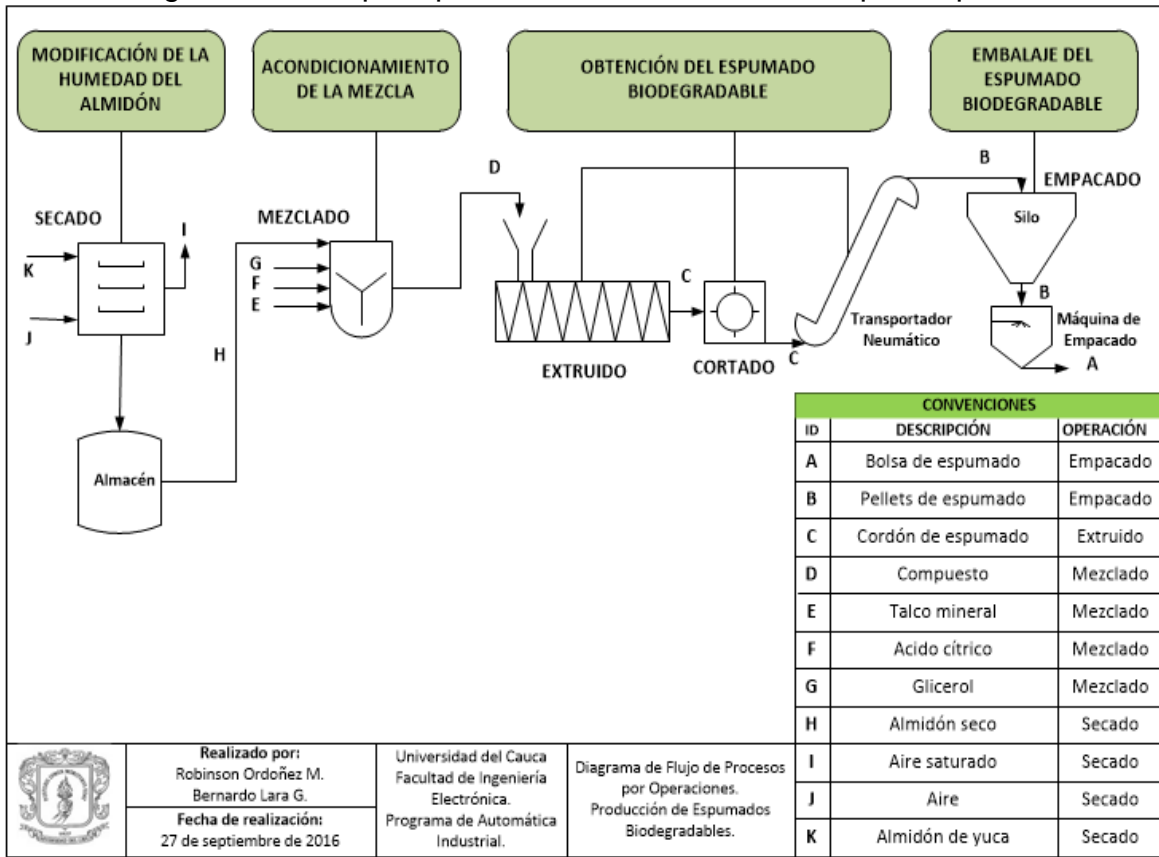
Cabe resaltar que, comparada con la cadena de valor levantada a nivel de laboratorio (ver sección 2.1 del capítulo 2), a nivel de planta piloto se añade la etapa de embalaje de espumado biodegradable y adicionalmente, la etapa de “obtención del espumado biodegradable” cuenta con una nueva operación llamada “cortado” (encargada del peletizado del material).

El desarrollo de la cadena de valor, da cumplimiento al requerimiento de automatización número 1 (RA1).

4.2.2 Diagrama de flujo de procesos

En cuanto al levantamiento del Diagrama de Flujo de Proceso (PFD), se desarrolla con base a las operaciones que presenta el proceso a nivel de planta piloto. Se cuenta con la etapa de “modificación de la humedad del almidón” que posee la operación de “secado”, etapa de “acondicionamiento de la mezcla” que cuenta con la operación de “mezclado”, etapa de “obtención del espumado biodegradable” que posee las operaciones “extruido” y “cortado” (nuevo elemento del modelado tipo piloto), etapa de “embalaje de espumado biodegradable” (elemento nuevo a nivel piloto) que cuenta con la operación de “empacado” de espumado biodegradable (ver *Figura 27*).

Figura 27. PFD por operaciones de PROESBIPAY planta piloto



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Con el levantamiento del Diagrama de Flujo de Procesos, se da cumplimiento al requerimiento de automatización número 2 (RA2).

4.2.3 Modelo de proceso

El Modelado de Proceso a nivel de planta piloto (ver *Tabla 37*), comparado con su semejante a nivel de laboratorio (ver *Tabla 3*), posee dos operaciones nuevas: “empacado” que pertenece a la etapa de “embalaje de espumado biodegradable” y la operación de “cortado” que pertenece a la etapa de “obtención del espumado biodegradable”. Además, el mezclado del almidón seco con los aditivos (plastificante, espumante y nucleante) se realizara en una sola operación ya que en la planta piloto se ejecutará toda la línea de producción en la misma jornada.

Tabla 37. Modelo de proceso de PROESBIPAY planta piloto

Proceso	Etapas	Operaciones	Acciones
Producción de Espumado Biodegradable a Partir de Almidón de Yuca	Modificación de la humedad del almidón	Secado de almidón de yuca	Cargar almidón de yuca en horno de conv. forzada
			Secar almidón de yuca en horno de conv. forzada
			Descargar almidón seco del horno y almacenarlo en recipientes herméticos
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclado de almidón con aditivos	Agregar "almidón seco", ácido cítrico, glicerol y talco mineral en la mezcladora de alta velocidad
			Mezclar componentes en la mezcladora de alta velocidad
			Descargar compuesto de la mezcladora de alta velocidad
	Obtención del espumado biodegradable	Extruido de compuesto	Agregar compuesto al alimentador volumétrico
			Extruir compuesto en el extrusor de tornillo simple.
		Cortado de espumado biodegradable	Cortar cordón de espumado biodegradable con la cuchilla de corte.
			Transportar pellets de espumado mediante transportador neumático.
	Embalaje de espumado biodegradable	Empacado de espumado biodegradable	Dosificar pellets de espumado mediante embolsadora semiautomática
			Sellar bolsa mediante selladora térmica.

Fuente: Propia, septiembre de 2016.

4.2.4 Modelo físico

Siguiendo los lineamientos planteados en la sección 2.1.2, que corresponden al desarrollo del Modelo Físico (MF) del proceso, se construye dicho modelo a nivel de planta piloto (ver *Tabla 38*).

Tabla 38. MF de PROESBIPAY a nivel de planta piloto

Célula de Proceso	Unidad	Módulo de Equipo	Módulo de Control
Producción de Espumado Biodegradable a partir de Almidón de Yuca	Modificación de la humedad del almidón	Secador	Horno de convección forzada
			Bascula de piso
			Operario
			Contenedor hermético
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclador	Mezcladora de alta velocidad
			Balanza digital de masa
			Operario
			Cronometro
	Obtención del espumado biodegradable	Extrusor	Extrusor de tornillo simple
			Dosificador volumétrico
			Chiller (enfriador)
			Cuchilla de corte
		Cortador	Motor
			Variador de frecuencia
			Transportador neumático
			Silo de almacenamiento
Embalaje de espumado biodegradable	Empacador	Embolsadora semiautomática	
		Selladora térmica	
		Operario	
		Operario	

Fuente: Propia, octubre de 2016

Desarrollado el MF a nivel de planta piloto, cabe resaltar los siguientes aspectos:

- En la unidad “obtención del espumado biodegradable”, el módulo de equipo “extrusor” cuenta con un módulo de control nuevo llamado “dosificador volumétrico” y el módulo de equipo “cortador” (perteneciente a esta misma unidad) junto a sus módulos de control “cuchilla de corte”, “motor”, “variador de frecuencia”, “transportador volumétrico”, son componentes totalmente nuevos del nivel piloto.
- La unidad “embalaje de espumado biodegradable” junto a su módulo de equipo y módulos de control, son también componentes nuevos del nivel piloto.

4.2.5 Modelo de control de procedimiento

En el modelo de procedimiento (ver *Tabla 39*), se integra el nuevo procedimiento de unidad “embalaje de espumado biodegradable” y al procedimiento de unidad “obtención del espumado biodegradable” se le agrega una nueva operación llamada “cortar espumado biodegradable”.

Tabla 39. Modelo de control de procedimiento de PROESBIPAY a nivel piloto

Procedimiento	Procedimiento de Unidad	Operaciones	Fases
Producción de Espumado Biodegradable a Partir de Almidón de Yuca	Modificación de la humedad del almidón	Disminuir humedad	Cargar almidón de yuca
			Secar almidón de yuca a una temperatura de 80°C, hasta obtener una humedad del 1% o inferior y con un flujo de aire de 3.43 m ³ /s
			Descargar “almidón seco” y almacenar
	Acondicionamiento de la mezcla	Mezclar “almidón seco” con aditivos	Agregar almidón seco en una relación 70/30 con respecto a la cantidad de glicerol
			Agregar ácido cítrico con una relación de 0.5% con respecto al almidón seco
			Mezclar componentes por un periodo de 15 minutos
			Agregar glicerol en una relación 30/70 con respecto al almidón seco, en el intervalo [1,5] minutos del periodo de mezclado
			Agregar talco mineral en una relación de 0.2% con respecto al almidón seco en el intervalo (5,10] minutos del periodo de mezclado
			Descargar compuesto
	Obtención del espumado biodegradable	*Extruir compuesto	Agregar compuesto
			Extruir compuesto a una temperatura de 120°C, 155°C, 170°C y 160°C, en las zonas de alimentación, fusión, compresión y conformado respectivamente. La velocidad de giro del tornillo en el módulo simple es de 150 rpm.
		*Cortar espumado biodegradable	Cortar cordón de espumado biodegradable
			Transportar pellets de espumado.

	Embalaje de espumado biodegradable	Empacar espumado biodegradable	Dosificar cantidad (5kg/bolsa) de pellets de espumado en bolsas de empaque
			Sellar bolsa de pellets de espumado

Fuente: Propia, septiembre de 2016

* Estas operaciones son ejecutadas de forma paralela.

Con el desarrollo del modelo de proceso, modelo físico y modelo de control de procedimiento, se da cumplimiento al requerimiento de automatización número 3 (RA3).

4.3 Diagramas de Tuberías e Instrumentación P&ID

4.3.1 Definiciones

Sistemas regulatorios: sistemas de control donde la Variable Controlada (VC) debe permanecer en un valor constante a lo largo de todo el proceso.

Sistemas Servo-controlados: sistemas de control donde la VC debe cambiar a lo largo del tiempo siguiendo una trayectoria.

Diagrama P&ID: diagramas de tubería/proceso e instrumentación, que presenta un esquema de tanques, tuberías, y máquinas en general, pero con los instrumentos superpuestos indicando lo que se mide y controla. En este se puede ver el flujo de proceso al igual que el flujo de datos entre los instrumentos que miden y controlan el proceso [51].

El desarrollo de los diagramas P&ID, está basado en cada una de las etapas (modificación de la humedad del almidón, acondicionamiento de la mezcla, obtención del espumado, peletización de espumado, refrigeración de espumado, embalaje de espumado) que posee el proceso a nivel de planta piloto. Antes de levantar los respectivos diagramas, se hace una “Descripción Conceptual” (respecto a los equipos seleccionados) que contiene a su vez, descripciones del proceso, equipo, variables manipuladas, controladas, disturbios, esquema de control y escenario de automatización.

Descripción del proceso: en este paso se describe en que consiste el proceso realizado en la planta y se mencionan las acciones de proceso más relevantes.

Descripción del equipo: descripción física del equipo donde ejecuta el proceso.

Variables controladas: se identifica y lista las variables controladas presentes en la descripción del proceso. En este caso, la variable debe seguir un comportamiento deseado a lo largo de todo el proceso.

Variables manipuladas: variables cuya manipulación influye directamente sobre el comportamiento de la variable controlada.

Variables de disturbio: generalmente, son variables externas al proceso, de carácter aleatorio y principalmente aparecen en las corrientes de proceso (flujos de materias primas, fluidos energéticos y otros); cuando cambian su valor, se presentan afectaciones en la variable controlada. Las variables de disturbio pueden ser de tipo No Existente (NE), en el cual, a pesar de identificarse como un disturbio, prácticamente no se presenta en la planta; tipo No Critico (NC), tal que, se puede presentar y propagar a lo largo del proceso sin afectaciones graves; tipo Critico (C), en el cual, cuando se presenta y propaga a lo largo del proceso, la perturbación en la variable controlada es tan grave que obliga a descartar el proceso.

Esquema de control: en este paso, de acuerdo a la clasificación de los disturbios, se escoge el esquema de control para el proceso en la planta:

- a) Control en lazo abierto: cuando las variables de disturbio se clasifican como NE.
- b) Control *Feedback*: cuando las variables de disturbio se clasifican como NC.
- c) Control *Feedforward*: cuando las variables de disturbio se clasifican como C.

Escenario de automatización: Para automatizar el control de un proceso se puede optar por instrumentación en múltiples escenarios: *Stand Alone*, uso de instrumentos especializados y simples, comunicados típicamente por una señal de 4-20 mA o directamente entre ellos; *Controlador Lógico Programable*, uso de un controlador, tanto para realizar control discreto secuencial, como control continuo; *Red Industrial*, uso de instrumentos inteligentes por medio de una red industrial de comunicación digital; *Sistemas de Control Distribuido*, uso de tecnologías avanzadas y costosas para el control de procesos continuos.

En primer lugar, se desarrolla la descripción conceptual del equipo “horno de convección forzada” (ver *Tabla 40*), relacionado con la etapa de modificación de la humedad del almidón.

Tabla 40. Descripción conceptual de Horno de Convección Forzada

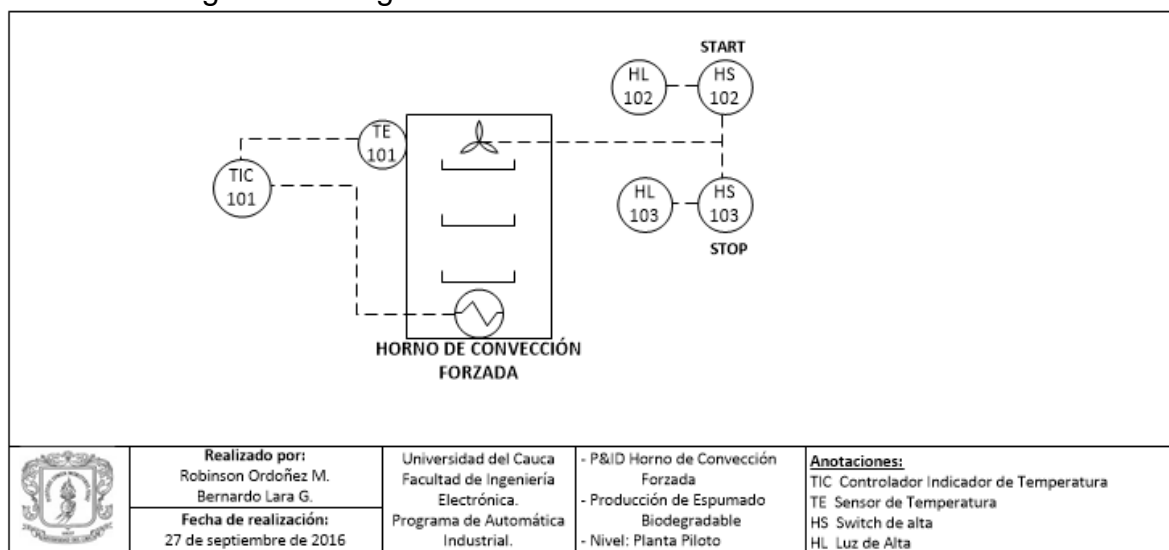
HORNO DE CONVECCIÓN FORZADA	DESCRIPCION DEL PROCESO
	Se lleva a cabo el secado del almidón tipo “no alimenticio” que ingresa con un porcentaje de humedad del 13% y que mediante la aplicación de calor en el interior del horno de convección forzada, logra reducirse a un porcentaje de humedad final de 1% aproximadamente.
	DESCRIPCION DEL EQUIPO
	Cámara en acero inoxidable ASTM 304, carga máxima 160 kg, volumen interior de 749 litros, rango de temperatura de 25-260°C, circulación de aire por ventilador con regulación de velocidad por pasos (0-10), alimentación 110-115 V 60 Hz, 14 estantes, consumo energético de 4.8 kW.
	VARIABLES MANIPULADAS
	Corriente en las resistencias eléctricas de calefacción - Corriente eléctrica en el ventilador.
	VARIABLES CONTROLADAS
	Temperatura (flujo de aire) - Flujo (regulación del flujo de aire)
	VARIABLES DE DISTURBIO
	Variaciones de tensión en la red de alimentación - Variaciones en la carga (material a secar) - Apertura de la puerta del horno - Modificación del flujo de aire que ingresa a temperatura ambiente.

	ESQUEMA DE CONTROL
	Feedback (resistencias eléctricas) – Lazo Abierto (ventilador)
	ESCENARIO DE AUTOMATIZACION
	Stand Alone

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Para el desarrollo del diagrama P&ID del horno de convección forzada, se asume un lazo de “control feedback” al interior del master de control del horno, para ejercer control sobre la variable “temperatura” de las resistencias internas y un lazo de “control abierto” para manejar el flujo de aire del ventilador que depende de los 10 pasos de velocidad que posee el mismo (ver Figura 28).

Figura 28. Diagrama P&ID de horno de convección forzada



Fuente: Propia, septiembre de 2016

En segundo lugar, se desarrolla la descripción conceptual de la mezcladora de alta velocidad (ver Tabla 41), relacionada con la etapa de acondicionamiento de la mezcla.

Tabla 41. Descripción conceptual de Mezcladora de Alta Velocidad

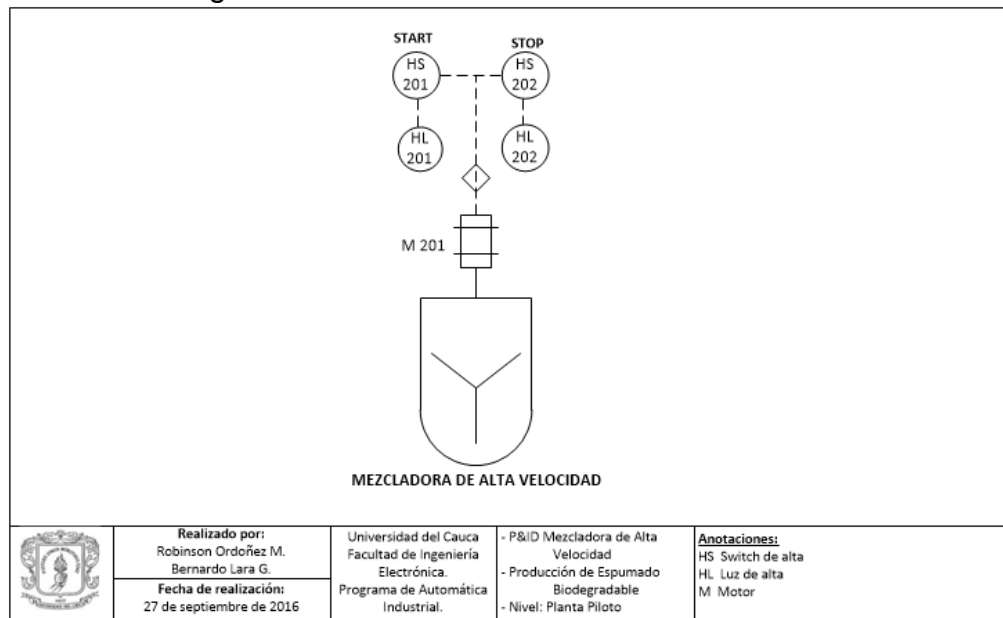
MEZCLADORA DE ALTA VELOCIDAD	DESCRIPCION DEL PROCESO
	Mezclado del almidón seco con ácido cítrico (agente espumante), glicerol (plastificante) y talco mineral (agente nucleante), con el fin de obtener el compuesto listo para extrusión. Las aspas de mezclado permiten obtener una distribución uniforme de cada uno de los componentes en el compuesto final.
	DESCRIPCION DEL EQUIPO
	Componentes en acero inoxidable, velocidad variable (197-462 rpm), alimentación 110/220 V, capacidad 20L, seguro para que el tazón de mezclado no se salga durante la operación, desplazamiento vertical de la tolva, diferentes aspas de mezclado (gancho, pala, globo).
	VARIABLES MANIPULADAS
	Corriente eléctrica del motor
	VARIABLES CONTROLADAS
Velocidad de agitación	

	VARIABLES DE DISTURBIO
	Variaciones de tensión en la red de alimentación, viscosidad y densidad de la masa tratada.
	ESQUEMA DE CONTROL
	Lazo abierto sin instrumentación.
	ESCENARIO DE AUTOMATIZACION
Stand Alone	

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Para el desarrollo del diagrama P&ID de la mezcladora de alta velocidad, se cuenta con un lazo de “control abierto” para arranque y paro del motor de la misma (ver Figura 29).

Figura 29. P&ID Mezcladora de Alta Velocidad



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Como tercera medida, se desarrolla la descripción conceptual del extrusor de tornillo simple (ver Tabla 42), la cuchilla de corte (ver Tabla 43) y el transportador volumétrico (ver Tabla 44), relacionados todos con la etapa de “obtención del espumado biodegradable”.

Tabla 42. Conceptualización de Extrusor de Tornillo Simple

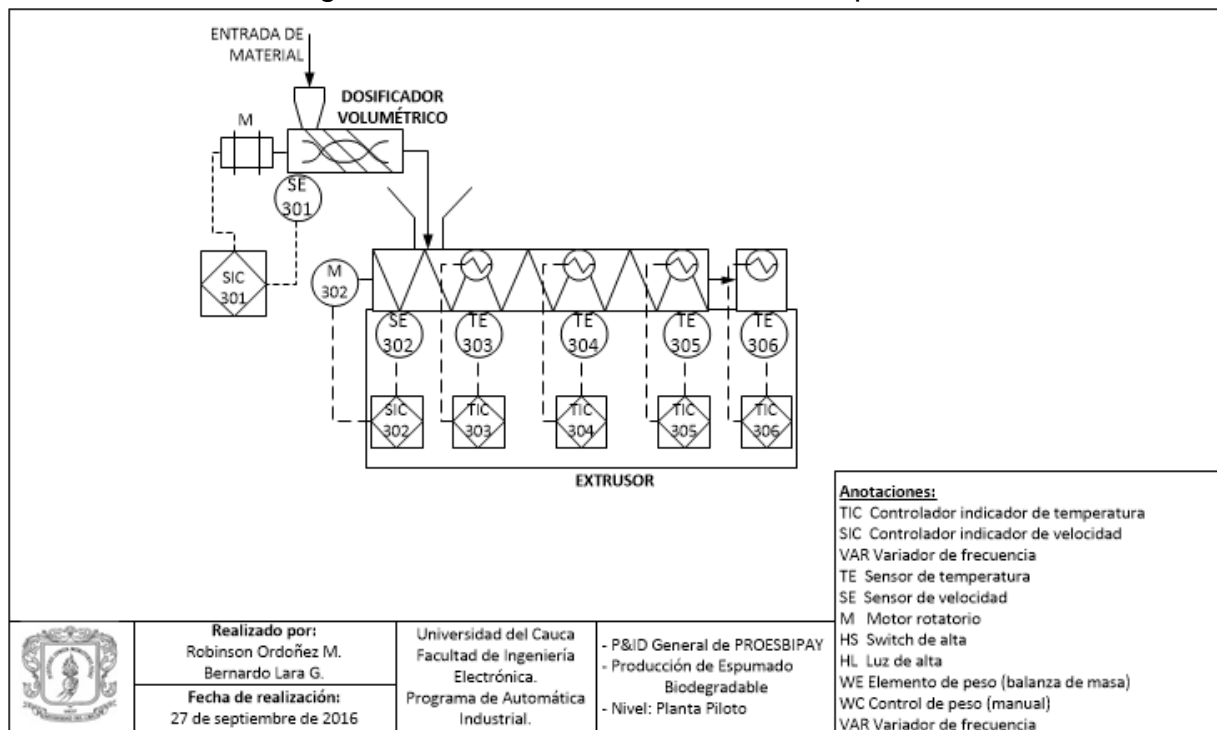
EXTRUSOR DE TORNILLO SIMPLE	DESCRIPCION DEL PROCESO
	Se inicia con el precalentamiento del extrusor de tal manera que las zonas de alimentación, fusión, compresión y conformado del equipo, alcancen la temperatura óptima. Posteriormente se configura el flujo de compuesto de entrada deseado, mediante el alimentador volumétrico del extrusor y se inicia la alimentación a la tolva del dosificador; finalmente, se obtiene un cordón extruido de espumado biodegradable a la salida del extrusor.
	DESCRIPCION DEL EQUIPO
	Diámetro de tornillo de 45 mm, relación L/D de 25:1, velocidad media de 85 rpm, potencia de calentamiento 9.6 kW, potencia de ventiladores 18 kW, potencia total instalada de 27.6 kW.

VARIABLES MANIPULADAS
Corriente (resistencias eléctricas) – Corriente (motor para giro de tornillo) – Corriente (motor del alimentador volumétrico).
VARIABLES CONTROLADAS
Temperatura (resistencias eléctricas) – Velocidad (giro de tornillo del extrusor) – Velocidad (giro de tornillo del alimentador volumétrico).
VARIABLES DE DISTURBIO
Variaciones de tensión en la red de alimentación, temperatura de entrada de la mezcla.
ESQUEMA DE CONTROL
Feedback (resistencias eléctricas) – Feedback (giro de tornillo del extrusor) – Feedback (giro de tornillo del alimentador volumétrico).
ESCENARIO DE AUTOMATIZACION
Controlador Lógico Programable.

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Para el desarrollo del diagrama P&ID del extrusor de tornillo simple se asumen, en primer lugar, 4 lazos de “control feedback” (3 de ellos ubicados en el módulo de tornillo simple del extrusor y uno más en el dado de conformado del mismo, todos asociados a la variable temperatura); en segundo lugar, se asumen dos lazos más del mismo tipo (*feedback*), uno asociado con la velocidad de giro de tornillo del extrusor y el segundo, relacionado con la velocidad de giro del tornillo del alimentador volumétrico (ver *Figura 30*).

Figura 30. P&ID Extrusor de tornillo simple



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Desarrollada la conceptualización del equipo de extrusión, se procede a realizar su similar para la cuchilla de corte.

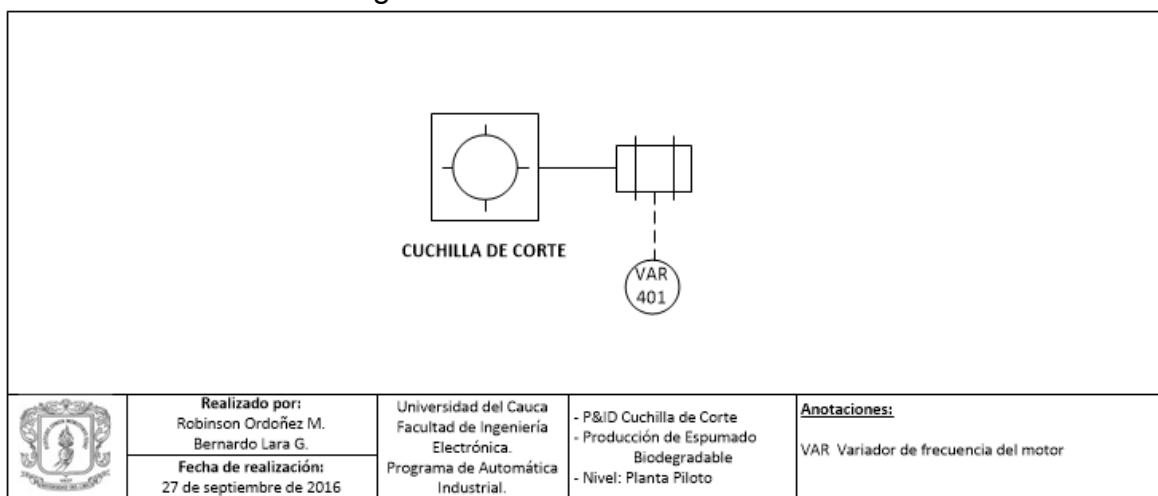
Tabla 43. Conceptualización de Cuchilla De Corte

CUCHILLA DE CORTE	DESCRIPCION DEL PROCESO
	Inicialmente, mediante un variador de frecuencia que controla la velocidad de giro del motor de la cuchilla cortadora, se configura el tamaño de los pellets de espumado biodegradable; posteriormente, se procede a cortar el cordón de espumado biodegradable proveniente del dado de conformado del extrusor, los pellets son dirigidos hacia el transportador neumático.
	DESCRIPCION DEL EQUIPO
	La cuchilla posee 2 brazos de corte de 35mm en acero inoxidable, está acoplada a un motor de 0.5 hp que es controlado por un variador de frecuencia marca SIEMENS de 0.37 kW de potencia. Adicionalmente, es sistema posee una “jaula” para captura de pellets construida en acero inoxidable.
	VARIABLES MANIPULADAS
	Corriente (motor)
	VARIABLES CONTROLADAS
	Velocidad (corte del espumado).
	VARIABLES DE DISTURBIO
	Variaciones de tensión en la red de alimentación - Densidad del material extruido.
	ESQUEMA DE CONTROL
	Lazo abierto sin instrumentación.
	ESCENARIO DE AUTOMATIZACION
Stand Alone.	

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Para levantar el diagrama P&ID correspondiente a la “cuchilla de cortado” (ver *Figura 31*), se presenta un lazo de *control abierto y de tipo regulado*, para controlar la velocidad de giro de la cuchilla que a su vez determina el tamaño de los pellets de espumado biodegradable.

Figura 31. P&ID Cuchilla de Corte



Fuente: Propia, septiembre de 2016

El último desarrollo de conceptualización para la etapa de “obtención del espumado biodegradable” se realiza para el transportador neumático (ver *Tabla 44*).

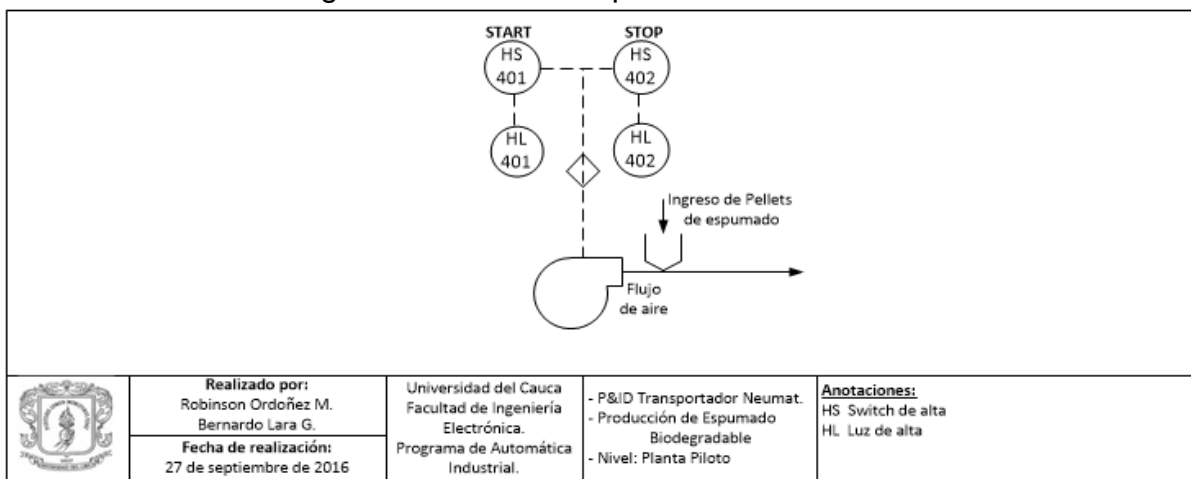
Tabla 44. Conceptualización del transportador neumático

TRANSPORTADOR NEUMÁTICO	DESCRIPCION DEL PROCESO
	En transportador neumático se encarga de recepcionar los pellets generados en la operación de cortado (cuchilla de corte) y aplicar un flujo de aire que transporta el material a través de un tubo hasta el silo de almacenamiento dispuesto en la etapa de embalado.
	DESCRIPCION DEL EQUIPO
	El equipo cuenta con un ventilador centrífugo de 1.5 kW de potencia, la longitud del tubo transportador es de 6m y el diámetro de la tubería es de 15mm.
	VARIABLES MANIPULADAS
	Corriente (ventilador centrífugo).
	VARIABLES CONTROLADAS
	Presión de succión.
	VARIABLES DE DISTURBIO
	Variaciones de tensión en la red de alimentación, variación en la carga de entrada (pellets de espumado biodegradable).
	ESQUEMA DE CONTROL
	Lazo abierto.
	ESCENARIO DE AUTOMATIZACION
Stand Alone.	

Fuente: Propia, septiembre de 2016.

En el desarrollo del diagrama P&ID correspondiente al “transportador neumático” (ver *Figura 32*), se presenta un único lazo de *control abierto* para arrancar y parar el equipo.

Figura 32. P&ID Transportador neumático



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Como cuarto paso, se desarrolla la descripción conceptual de la maquina embolsadora que integra un módulo de embolsado y un segundo módulo para sellado de bolsas (ver *Tabla 45*), relacionada con la etapa de “embalaje de espumado biodegradable”.

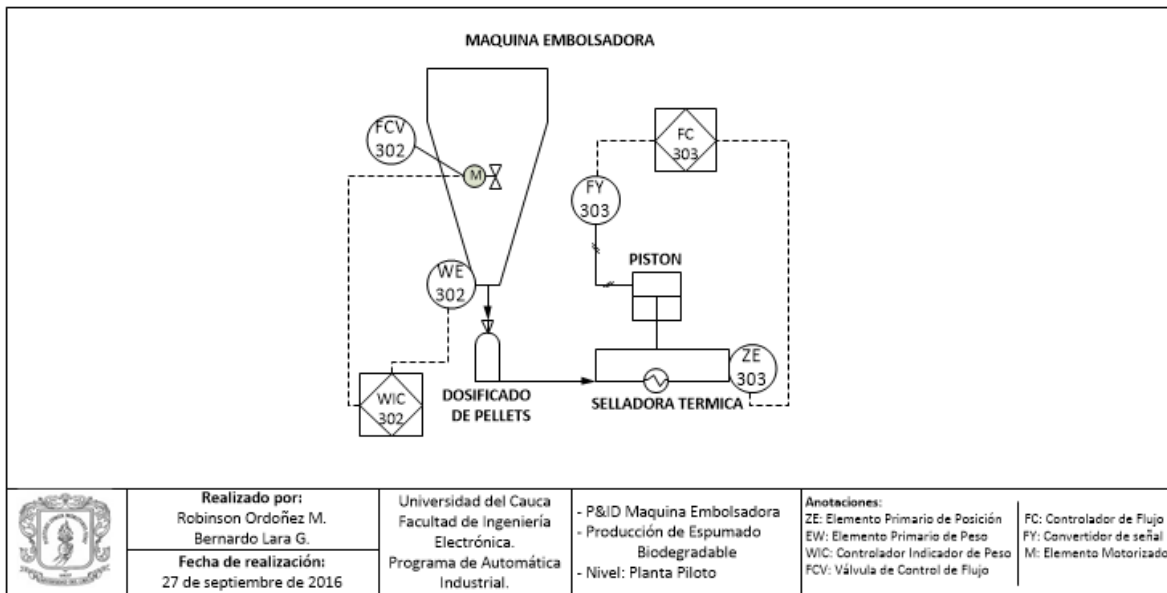
Tabla 45. Conceptualización de la Máquina Embolsadora

SELLADORA TÉRMICA	DESCRIPCION DEL PROCESO
	En esta etapa, los pellets de espumado biodegradable refrigerados son pesados y colocados en bolsas para su respectivo almacenaje. Una vez determinada la cantidad de pellets y la bolsa que corresponde, se procede a ejecutar el sellado mediante aplicación de calor y presión, utilizando el equipo de sellado.
	DESCRIPCION DEL EQUIPO
	Equipo con capacidad entre 5 y 20 kg, carga por gravedad, pesaje electrónico mediante celdas de carga, panel frontal para programación de parámetros, 2 velocidades de carga (lenta, rápida), 220V.
	VARIABLES MANIPULADAS
	Corriente (servomotor de la válvula) – Corriente (servo válvula para paso de aire).
	VARIABLES CONTROLADAS
	Porcentaje de apertura (válvula motorizada) / Flujo (aire del cilindro neumático)
	VARIABLES DE DISTURBIO
	Variaciones de tensión en la red de alimentación.
	ESQUEMA DE CONTROL
	Feedback (dosificado de material) – Feedback (accionamiento de la selladora por presencia de bolsas).
	ESCENARIO DE AUTOMATIZACION
Controlador Lógico Programable.	

Fuente: Propia, septiembre de 2016

Para desarrollar el diagrama P&ID correspondiente a la máquina embolsadora (ver *Figura 33*), se asumen 2 lazos de control feedback, uno de ellos ubicado en las celdas de carga para pesaje directo en la bolsa y el segundo, ubicado en el módulo de sellado para controlar apertura y cierre de la selladora térmica.

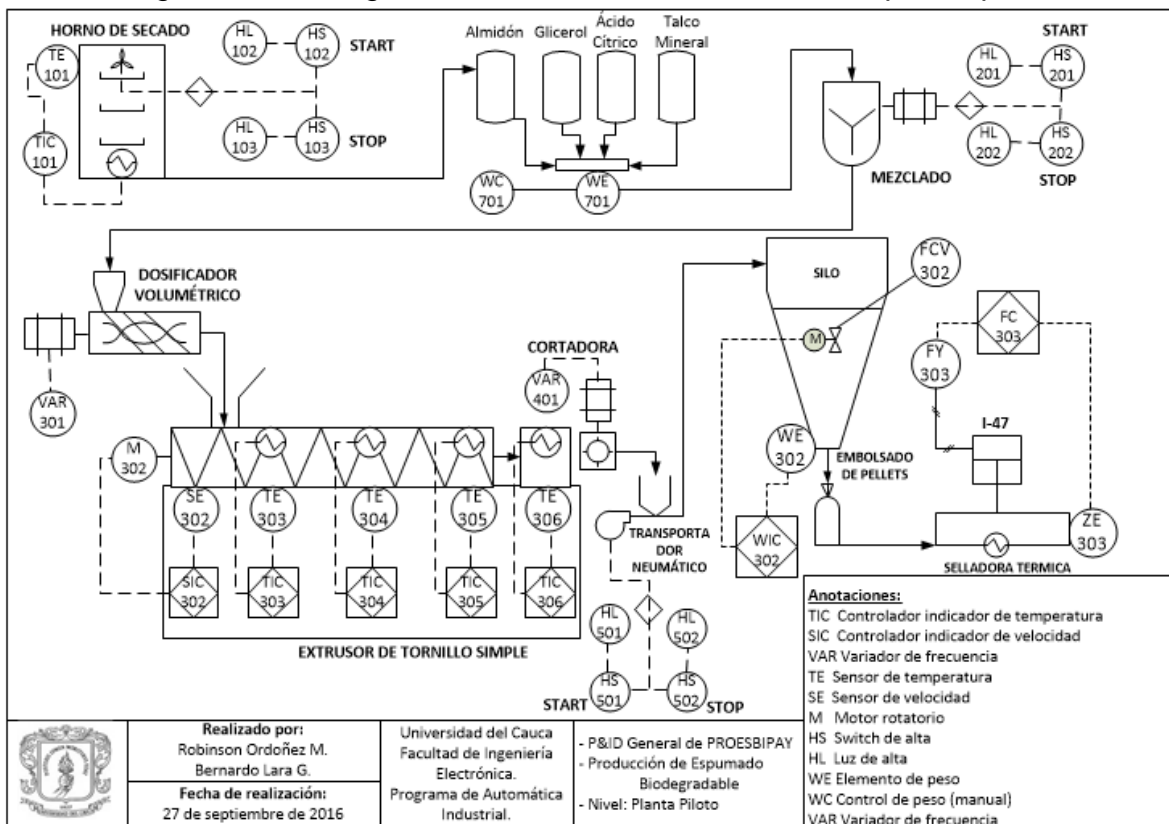
Figura 33. P&ID Máquina Embolsadora



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Como un último paso, se desarrolla el P&ID general del proceso PROESBIPAY a nivel de planta piloto (ver *Figura 34*), iniciando con la representación de la etapa de “Modificación de la Humedad del Almidón” (horno de secado), seguidamente se encuentra la representación del procedimiento de mezclado manual y la etapa de “Acondicionamiento de la Mezcla” (Mezclado), posteriormente aparece la etapa de “Obtención del Espumado Biodegradable” (extrusor de tornillo simple, cortadora) y finalmente, aparece la etapa de “Embalaje de Espumado Biodegradable” (embolsado de pellets, selladora térmica).

Figura 34. P&ID general de PROESBIPAY a nivel de planta piloto



Fuente: Propia, septiembre de 2016

Con el desarrollo de los diagramas P&ID, se da por cumplido el RA4. Además, teniendo en cuenta que se desarrolló una “descripción conceptual” que involucra la identificación de las variables (manipuladas, controladas, disturbios) en cada etapa del proceso, se da por cumplida la solución para el RA5.

4.3.2 Receta maestra

Como se mencionó en la sección 3.2.3 del capítulo 3, en la receta maestra se agrupa la información mínima necesaria para llevar a cabo la transformación de materias

primas. En este caso, se presenta la receta maestra de PROESBIPAY a nivel de planta piloto (ver *Tabla 47*).

Tabla 46. Convenciones usadas para representar las variables del proceso

CONVENCIÓN DE VARIABLES	
Temperatura SA	Temperatura de Secado del Almidón
Humedad A	Humedad del Almidón
Flujo V	Flujo de aire en el horno
Tiempo SA	Tiempo de Secado del Almidón
Masa A_G_AC_TM	Masa de Almidón, Glicerol, Ácido Cítrico, Talco Mineral
Velocidad T_DV	Velocidad del Tornillo del Dosificador Volumétrico
Temperatura de extrusión R1	Temperatura de la zona de alimentación
Temperatura de extrusión R2	Temperatura de la zona de fusión
Temperatura de extrusión R3	Temperatura de zona de compresión
Temperatura de extrusión R4	Temperatura de la zona de conformado
Velocidad T_E	Velocidad del Tornillo del Extrusor
Velocidad CC	Velocidad de giro de la Cuchilla de Corte
Peso EB	Peso del Espumado Biodegradable
Temperatura ST	Temperatura de la Selladora Térmica

Fuente: Propia, octubre de 2016

Definida la representación de cada una de las variables que intervienen en el proceso a nivel de planta piloto, se procede a desarrollar la receta maestra correspondiente.

Tabla 47. Receta maestra de PROESBIPAY a nivel de planta piloto

RECETA MAESTRA		
PRODUCCIÓN DE ESPUMADO BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA		
AUTOR (ES): Robinson Ordoñez M, Bernardo Lara G.	FECHA: 01 de octubre de 2016	
Fórmula		
Entrada de proceso	Almidón de yuca	
	Glicerol	
	Ácido cítrico	
	Talco mineral	
	Mano de obra	
	Alimentación eléctrica	
Producto en proceso	Almidón seco, compuesto	
Parámetros de proceso por operación	Operación	Parámetro
	Secado de almidón de yuca	Temperatura SA
		Humedad A
		Flujo V
		Tiempo SA
	Mezclado de almidón con aditivos	Masa A_G_AC_TM
		Velocidad T_DV
	Extruido del compuesto	Temperatura de extrusión R1
		Temperatura de extrusión R2
		Temperatura de extrusión R3
Temperatura de extrusión R4		

		Velocidad T_E
	Cortado de espumado biodegradable	Velocidad CC
	Empacado de espumado biodegradable	Peso EB
		Temperatura ST
Salida del proceso	Pellets de espumado biodegradable (bolsas)	
REQUERIMIENTO DE EQUIPOS		
Horno de convección forzada		
Balanza de masa		
Balanza electrónica de humedad		
Mezclador de alta velocidad		
Extrusor		
Cortadora		
Transportador neumático		
Silo flexible		
Empacadora		
Cronómetro		
Recomendaciones		

Fuente: Propia, julio de 2016.

4.3.3 Receta de control

Con la información recolectada en la sección 3.3.2 (Escalamiento de la producción), se obtiene la correspondiente receta de control de PROESBIPAY a nivel de planta piloto (ver *Tabla 48*).

Tabla 48. Receta de control de PROESBIPAY piloto

RECETA DE CONTROL			
PRODUCCIÓN DE ESPUMADO BIODEGRADABLE A PARTIR DE ALMIDÓN DE YUCA			
AUTOR (ES): Robinson Ordoñez M, Bernardo Lara G.			FECHA: 01 de octubre de 2016
Fórmula			
Entrada de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Almidón de yuca	79.9	kg
	Glicerol	2.514	kg
	Ácido cítrico	0.029	kg
	Talco mineral	0.012	kg
	Mano de obra (1 persona)	8	h
	Alimentación eléctrica	110-220	VAC
Producto en proceso	Almidón seco, compuesto		
Parámetros de proceso por operación	Parámetro	Valor	Unidad
	Temperatura SA	80	°C
	Humedad A	≤1	%
	Flujo V	3.43	m ³ /h
	Tiempo SA	6	h
	Masa A_G_AC_TM	8.42	kg
	Velocidad T_DV	--	rpm
	Temperatura de extrusión R1	120	°C
	Temperatura de extrusión R2	155	°C

	Temperatura de extrusión R3	170	°C
	Temperatura de extrusión R4	160	°C
	Velocidad de giro T	150	rpm
	Velocidad CC	244.8	rpm
	Peso EB	5	kg
	Temperatura ST	--	°C
Salida del proceso	Pellets de espumado biodegradable con un diámetro aproximado de 7.9 mm y una longitud de 30 mm		
REQUERIMIENTO DE EQUIPOS			
Equipo	Especificación		
Horno de convección forzada (horno universal)	Marca memmert, modelo UF 750 PLUS, Cámara en acero inoxidable ASTM 304, carga máxima 160 kg, volumen interior de 749 litros, rango de temperatura de 25-260°C, circulación de aire por ventilador con regulación de velocidad por pasos (0-10), alimentación 110-115 V 60 Hz, 14 estantes, consumo energético de 4.8 kW.		
Balanza de masa	Marca FENIX, capacidad de masa 15 kg.		
Balanza electrónica de humedad	Marca ViBRA, modelo SJ, capacidad de masa 620g, alimentación eléctrica 110 VAC a 60 Hz o 9 VDC		
Mezclador de alta velocidad	Marca SINMAG, modelo B20G-20LTS, en acero inoxidable, velocidad variable (197-462 rpm), alimentación 110/220 V, capacidad 20L, desplazamiento vertical de la tolva, diferentes aspas de mezclado (gancho, pala, globo)		
Dosificador Volumétrico	Marca BATTE, capacidad 50 L/h.		
Extrusor	Marca BAUSANO, modelo TM-45-25, diámetro de tornillo de 45 mm, relación L/D de 25:1, velocidad media de 85 rpm, potencia de calentamiento 9.6 kW, potencia de ventiladores 18 kW, potencia total instalada de 27.6 kW.		
Cuchilla cortadora	Alimentación motor: 220 V - 240 V (60 Hz), número de cuchillas en cabezal: 2, potencia: 0.37 kW.		
Transportador neumático	Marca PALINI, capacidad 770-2800 m3/h		
Silo flexible	Marca T'UVENTO, capacidad 3.3-4.4 m3.		
Empacadora	Marca INGESIR, modelo ECG 420, para bolsas de boca abierta , carga por gravedad (5kg min-20kg máx), sistema sujeta bolsas neumático de mandíbulas, conducto de despresurización, pesaje directo en la bolsa a través de celdas de carga, equipo electrónico de pesaje con panel frontal, sistema de válvula mariposa que permite doble velocidad de carga, pedal de carga para inicio de llenado y selladora		
Cronómetro	Marca CAMPEON.		

Fuente: Propia, julio de 2016

Con el desarrollo de las recetas, maestra y de control, se da cumplimiento al requerimiento de automatización número 6 (RA6).

Capítulo 5

5 Simulación de PROESBIPAY en SuperPro

En el presente capítulo se efectúa la simulación de la planta piloto de PROESBIPAY, haciendo uso de la herramienta computacional SuperPro Designer, al igual que la información, modelos, tablas y parámetros obtenidos durante la aplicación del PEIPP mejorado y los modelos ISA-S88.01. El desarrollo del capítulo se realiza en dos etapas: la primera establece los requerimientos para simulación y en la segunda se realiza el diseño de la planta en SuperPro.

5.1 Requerimientos para Simulación

En el capítulo 3 y 4 del presente trabajo, se establecieron e identificaron condiciones de operación y parámetros específicos para la puesta en marcha de la planta piloto de PROESBIPAY. Así mismo, se hizo uso de las normas ISA-88 para estructurar y discernir información relevante. Por lo tanto, para caracterizar la simulación de este proceso, es necesario establecer requerimientos agrupándolos en tres grupos: Requerimientos de proceso, referentes a materias primas, productos intermedios y demás (ver *Tabla 24*, sección 3.3.2, “Escalamiento de la producción”); Requerimientos de control, concernientes a los valores que se espera tengan las diferentes variables de proceso (ver *Tabla 25*, *Tabla 26* y *Tabla 27*, sección 3.3.3, “Modificación cuantificada de variables principales del proceso”) y Requerimientos de Equipos, relacionados con los dispositivos, unidades y demás encargados de desarrollar el proceso (ver sección 3.5.1, “Escogencia de Equipos”). Además, se incluyen como requerimientos, la información obtenida acerca de los modos de operación y distribución de tiempos de la sección 3.3.2, “Escalamiento de la producción”.

5.2 Simulación de la Planta en SuperPro

Para realizar la simulación de manera estructurada, se hará uso de los modelos del estándar ISA-88.01 de PROESBIPAY planta piloto; pero antes, es de gran importancia conocer los conceptos que maneja la herramienta computacional para poder aplicar adecuadamente los modelos ISA. Para SuperPro un “procedimiento de unidad” se define como una secuencia de acciones (llamadas operaciones) que tienen lugar dentro del mismo equipo principal; las “operaciones” a su vez, son el grano de acción más pequeño que la herramienta puede simular y la “sección” es definida como el conjunto de procedimientos de unidad que se agrupan junto a un objetivo determinado. De acuerdo a lo mencionado, se realiza un cuadro



comparativo con el motivo de facilitar el desarrollo de la simulación (ver *Tabla 49*). De aquí en adelante, se hablará en términos del estándar ISA-88.01.

Tabla 49. Relación entre SuperPro y el modelo de proceso ISA-S88.01

SuperPro Designer	ISA-S88.01 Modelo de proceso	ISA-S88.01 Modelo de control procedimental
Documento de simulación	Proceso	Procedimiento
Sección	Etapas de proceso	Procedimiento de unidad
Procedimiento de unidad	Operación de proceso	Operación
Operación unitaria	Acción de proceso	Fase

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

A continuación se describe de manera general los pasos a seguir para realizar la simulación de un proceso en la herramienta SuperPro Designer. Para tener una descripción más detallada de estos pasos, aplicados a un caso de estudio, se puede dirigir al Anexo H, “Manejo de la herramienta SuperPro Designer”.

- a) Crear y configurar un proyecto en SuperPro: iniciar un nuevo documento  y seleccionar el modo de operación (Batch vs Continuo).
- b) Registrar los materiales involucrados en el proceso, al archivo de simulación. Primero se registra los componentes puros, seleccionándolos de la base de datos (Designer) de la herramienta; dado el caso de no encontrarse, se debe crear y registrar sus propiedades (físicas, económicas, etc.). Luego se registran o crean los materiales calificados como mezclas, en este caso la herramienta calcula sus propiedades características a partir de sus componentes.
- c) Introducir las operaciones de proceso al documento (ver *Tabla 49*). Es importante verificar que la operación elegida tenga disponible las acciones que se requieren para la simulación.
- d) Dibujar las corrientes () de entrada, intermedias y de salida requeridas para cada una de las operaciones de proceso, de manera que se asemeje a un diagrama de flujo de proceso.
- e) Inicializar las corrientes de entrada: Se especifica el material(es) y la cantidad que circula por cada una de las corrientes de entrada.
- f) Agregar y configurar las acciones de cada operación de proceso: En SuperPro las acciones de proceso se denominan “operaciones unitarias” y es donde se ingresan o configuran los parámetros concernientes a los requerimientos de control, modos de operación y distribución de tiempos.
- g) Crear secciones y asignarles los procedimientos de unidad correspondientes para representar las etapas de proceso.
- h) Verificación y evaluación de la simulación: Una vez realizados correctamente los pasos anteriores, el programa ejecutara los correspondientes balances de masa y energía que determinan el estado de materiales en las corrientes intermedias y de salida; además, permite generar gráficos que representan el funcionamiento de la planta, como los tiempos de ocupación de equipos, operarios, etc.

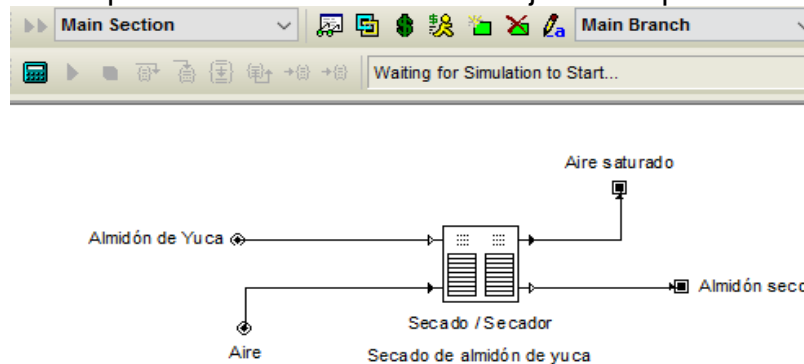
5.2.1 Validación de modelos matemáticos en SuperPro

En esta sección, se pretende demostrar por medio de la herramienta software SuperPro Designer, que la información obtenida con los modelos físico - matemáticos de los equipos principales de las operaciones más críticas de PROESBIPAY para la planta piloto, es válida y permite dimensionar la nueva escala.

Validación de los modelos matemáticos del secador

La validación de los datos obtenidos con los modelos del secador, ecuaciones (3) y (4) (ver sección 3.3.1, “Estudio de variables principales del proceso”), se divide en dos partes: primero se valida lo correspondientes a balances de masa (ver *Tabla 24*) y posteriormente se valida los balances de energía (ver *Tabla 25*). Siguiendo los pasos mencionados para realizar la simulación, se registró el almidón de yuca como una mezcla, empezando por sus componentes: 87% carbohidratos, 0.2% cenizas y 12.8% agua; el aire no fue necesario registrar, pues aparece por defecto. Luego se seleccionó la operación de secado de bandejas (Try Drying) que tiene dos entradas: una para la alimentación de materia prima (almidón de yuca) y otra para el fluido de secado (aire), y dos salidas: producto (almidón seco) y salida del fluido saturado (ver *Figura 35*). La simulación para la validación de los modelos matemáticos de la unidad de secado se encuentra en los Anexos digitales K y L (“Validación_BM_Modelos_Secador” y “Validación_BE_Modelos_Secador”).

Figura 35. Operación de secado de bandejas de SuperPro Designer



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

El funcionamiento del equipo secador se modela con la acción de proceso “secar” (Dry) disponible en la operación seleccionada. Esta acción tiene dos modos de simulación: El modo Diseño en el que a partir de la profundidad de la torta húmeda (espesor de las bandejas), se calcula el área total de las bandejas, y el modo Clasificación que realiza lo contrario. Para validar los modelos, se simuló en el modo diseño y se especificaron como parámetros independientes la profundidad de las bandejas, el tiempo de secado, el porcentaje de agua deseado en el producto final y el flujo de aire aplicado para que la herramienta retorne como parámetro

dependiente la tasa de evaporación del proceso, el área total de las bandejas y la composición en las corrientes de salida. Como resultado de la simulación se despliega la información que se muestra en la *Figura 36*.

Figura 36. Resultados de la simulación del secado de bandejas en SuperPro
a). Tasa de evaporación b). Área total de las bandejas c). Corrientes de salida

DRY-1 (Tray Drying)

Oper Cond's Utility Data Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Volatile Component Evaporation

Calculated Based on Final LOD Set by User

Component	Volatile?	Removal%
Ash	<input type="checkbox"/>	0.00
Carbohydrates	<input type="checkbox"/>	0.00
Nitrogen	<input type="checkbox"/>	0.00
Oxygen	<input type="checkbox"/>	0.00
Water	<input checked="" type="checkbox"/>	93.12

Initial LOD | 12.8000 %
Final LOD | 1.0000 %

Wet Cake Depth | 30.00 mm
Max Wet Cake Depth | 35.00 mm

Duration

Setup Time | 0.00 min

Drying Time

Set by User | 6.00 h
 Calculated Based on
Evaporation Rate | 0.286 kg/m²h

Final Solids Temp. | 55.00 °C

Gas Sweep During Drying

Inlet Stream: Aire

Flowrate specification

Relative | 9882.49 wt gas / wt evaporated
 Absolute (STD) | 3.430 m³/s

a)

Equipment Purchase Cost Adjustments Consumables Scheduling Throughput Comments

Selection

Select | Secador
 Request New
Name |

Size

Calculated (Design Mode)
 Set by User (Rating Mode)

Stagger Mode On
Use | 0 extra sets of equipment units

Description

Name | Secador
Type | Tray Dryer
Number of Units | 1

Tray Area | 5.559 m²
Max Tray Area | 80.000 m²

Dryer Type (for Costing)

Atmospheric Vacuum

b)

	Time Ref: Batch		Almidón de Yuca	Almidón seco	Aire saturado
	Type		Raw Material		
	Total Flow	kg	79.9000	70.3766	94124.8377
	Temperature	°C	25.00	55.00	55.00
	Pressure	bar	1.013	1.013	1.013
	Liq/Sol Flow	kg	79.9000	70.3766	0.0000
	Liq/Sol Vol Flow	L	166.7606	142.0314	0.0000
	Total Contents	kg	79.9000 (100.00)	70.3766 (100.00)	94124.8377 (100.00)
	Ash		0.1598 (0.20)	0.1598 (0.23)	0.0000 (0.00)
	Carbohydrates		69.5130 (87.00)	69.5130 (98.77)	0.0000 (0.00)
	Nitrogen		0.0000 (0.00)	0.0000 (0.00)	72197.5400 (76.70)
	Oxygen		0.0000 (0.00)	0.0000 (0.00)	21917.7743 (23.29)
	Water		10.2272 (12.80)	0.7038 (1.00)	9.5234 (0.01)

c)

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

A continuación se muestra un cuadro comparativo entre los datos obtenidos con los modelos (sección 3.3.3) y los entregados por la simulación presentes en la *Figura 36* (ver *Tabla 50*).

Tabla 50. Comparación de datos de los Modelos matemáticos & Simulados en SuperPro realizados al balance de masa de la unidad secado

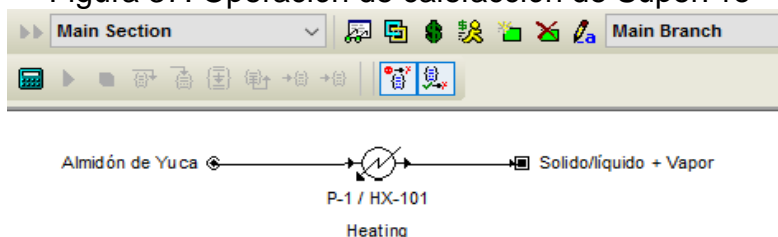
Parámetro	Modelos	In ⁸	SuperPro	Unidad
Cantidad de almidón a secar	79.9	X	79.9	kg
Tiempo de secado	6	X	6	h
Humedad de almidón seco	1	X	1	%
Espesor de las bandejas	0.03	X	0.03	m
Temperatura del producto final	55	X	55	°C
Flujo de aire	3.43	X	3.43	m ³ /s
Área ocupada por las bandejas	5.56		5.559	m ²
Tasa de evaporación	0.286		0.286	kg/m ² h
Agua retirada del almidón	9.53		9.5234	kg
Almidón seco producido	70.38		70.3766	kg

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Como se observa en la *Tabla 50*, la información entregada por la herramienta concuerda con la obtenida por los modelos en cuanto a balances de materia se refiere, con esto se concluye que los requerimientos de producción registrados en la *Tabla 24*, ver sección 3.3.2, cuyo procedimiento de cálculo se desarrolló en la sección 5.2.4 del anexo D (Unidad productiva para operaciones de PROESBIAY), son correctos.

Aprovechando que SuperPro Designer es capaz de predecir la fase de los materiales (sólido/líquido o vapor) frente a un ambiente determinado, a partir de modelos matemáticos rigurosos basados en leyes físicas; se procede a validar los requerimientos energéticos obtenidos con los modelos físico-matemáticos del secador, utilizando la operación de calefacción (Heating) de la herramienta, *Figura 37*. De esta manera, al correr la simulación con los datos energéticos de los modelos: transferencia de calor del aire, tiempo de proceso, coeficiente de convección del sistema, eficiencia de transferencia de calor y el área de transferencia de calor (de las bandejas); se verifica si la cantidad de agua en fase gaseosa de la corriente de salida corresponde a la cantidad de agua que se desea retirar del almidón.

Figura 37. Operación de calefacción de SuperPro

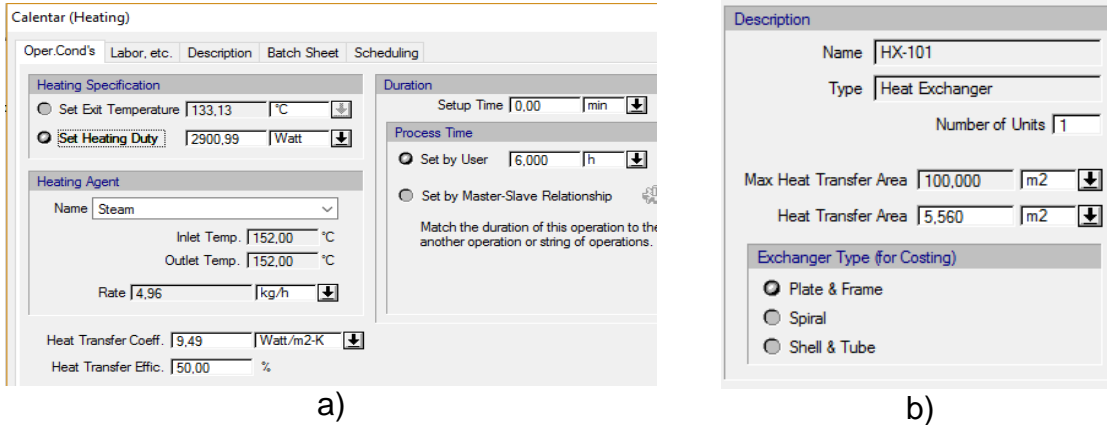


Fuente: Propia, noviembre de 2016.

⁸ La X indica los datos ingresados al software o parámetros independientes. Los datos sin la X son los que entrega el software como resultado o parámetros dependientes.

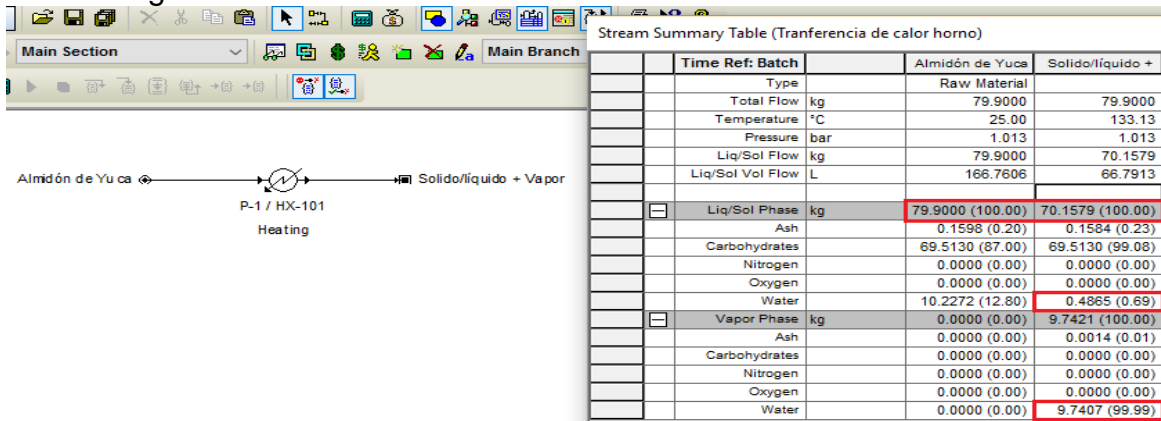
Los datos se ingresan en la ventana de configuración de la acción “calentar” (Heat) de la operación, como se muestra en la *Figura 38*. Al correr la simulación se despliegan los resultados mostrados en la *Figura 39*.

Figura 38. Ingreso de datos a la operación de calefacción de SuperPro
a). Configuración de la acción calentar b). Área del almidón en las bandejas



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Figura 39. Resultados de la simulación de calefacción del almidón



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Para comprender los resultados en la *Figura 39*, se tiene en cuenta que los materiales en fase líquido/sólido corresponden a la composición del almidón seco producido; por lo tanto, los materiales en fase de vapor representan a los que se retiran del almidón de yuca, en este caso, agua y una mínima cantidad de ceniza. A continuación, se muestra la *Tabla 51* en la que se puede comparar la información obtenida por los modelos y la entregada por la simulación.

Tabla 51. Comparación de datos de los Modelos matemáticos & Simulados en SuperPro realizados al balance de energía de la unidad secado

Parámetro	Modelos	In ⁹	SuperPro	Unidad
Cantidad de almidón a secar	79.9	X	79.9	kg
Transferencia de calor del aire	2900.989	X	2099.989	J/s
Coeficiente de transf de calor del sistema	9.486	X	9.486	W/m ² °C
Eficiencia de transferencia de calor	50	X	50	%
Tiempo del proceso	6	X	6	h
Área de transferencia de calor	5.56	X	5.56	m ²
Cantidad de agua evaporada	9.53		9.7407	kg
Humedad del almidón seco	1		0.69	%
Almidón seco producido	70.38		70.1579	kg

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Como lo demuestra la *Tabla 51*, en la simulación el porcentaje de agua en el almidón seco es 0.69%, lo que significa que los parámetros energéticos obtenidos a partir de los modelos superan las necesidades de calefacción del almidón de yuca para reducir su humedad al 1%; sin embargo son confiables, pues para el proceso se requiere que el almidón seco tenga una humedad igual o menor a ese valor; además, es posible reducir el tiempo de proceso para aumentar su humedad al 1%.

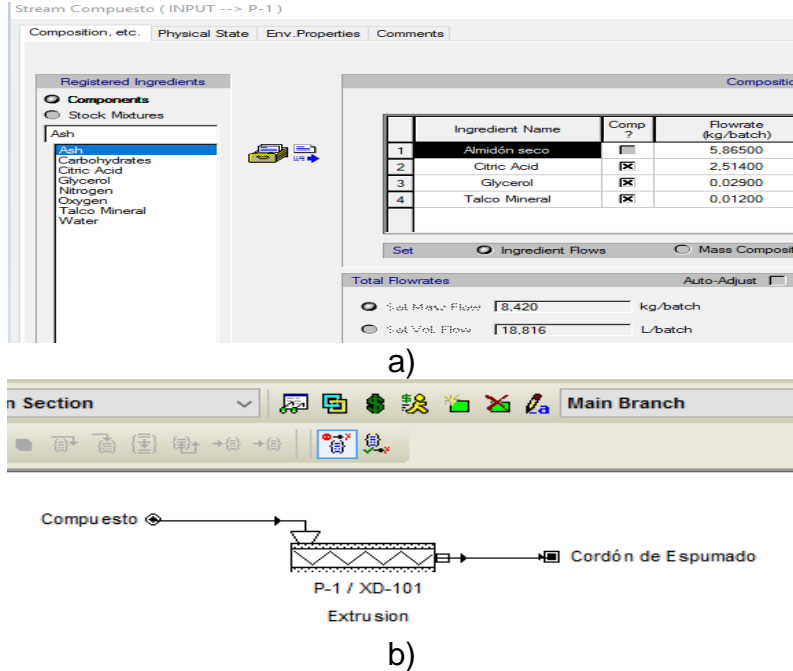
Validación de los modelos matemáticos del Extrusor

Para validar los datos obtenidos a partir de los modelos del extrusor, se realiza la simulación de la operación de extrusión de SuperPro en el modo diseño, de manera que a partir de datos como el flujo de alimentación, velocidad angular del tornillo, profundidad de los filetes, temperatura de salida del polímero y el tiempo del proceso en caso de operar en modo Batch, la herramienta calcule el diámetro del tornillo que cumpla estas condiciones; así, el diámetro del tornillo calculado por la herramienta deberá ser igual o cercano al obtenido con los modelos para considerarlos válidos. La simulación realizada para la validación de los modelos matemáticos de la unidad de extrusión se encuentra en el Anexo digital M (“Validación_Modelos_Extrusor”)

Teniendo en cuenta que la operación anterior a la extrusión opera por lotes, para realizar la simulación se selecciona el modo Batch, de manera que el flujo de alimentación del extrusor corresponda a un lote de compuesto (8.42 kg) y el tiempo de proceso será igual al tiempo del lote de la operación anterior (30 min); así, se cumple que la unidad productiva del extrusor sea de 16.84 kg/h. Antes de iniciar la simulación se registran los materiales que pertenecen al “compuesto” (almidón seco, glicerol, ácido cítrico y talco mineral), se selecciona la operación de extrusión, se inicializa la corriente de entrada, *Figura 40*, y se ingresan los datos del extrusor en la interfaz de configuración de la acción de proceso “extruir”, *Figura 41*.

⁹ La X indica los datos ingresados al software. Los datos sin la X son los que entrega el software como resultado.

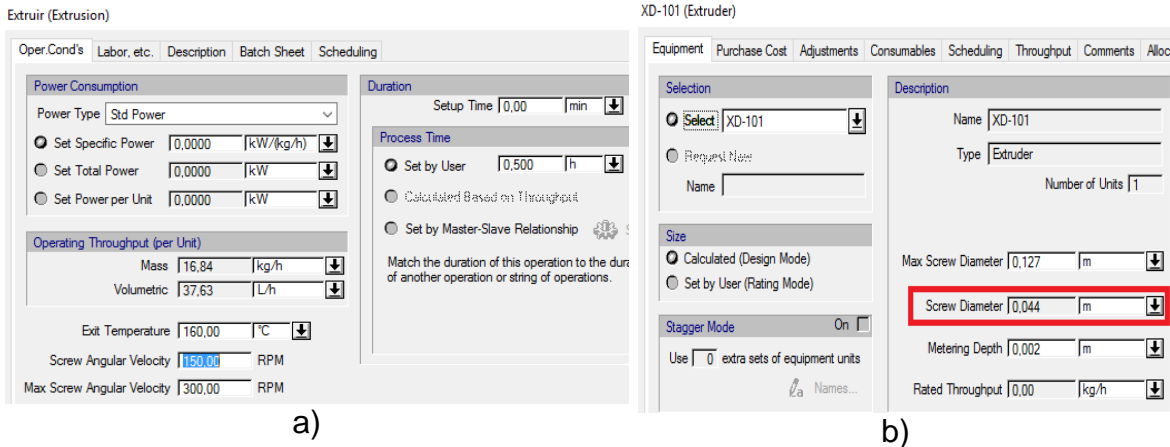
Figura 40. Simulación de la operación de extrusión
a). Inicialización de la corriente de entrada b). Operación de extrusión



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Como se demuestra en la *Figura 41b*, recuadro rojo, al correr la simulación en la herramienta, se tiene que el diámetro de tornillo, para cumplir las condiciones de operación ingresadas, debe ser de 44 mm, lo cual es un valor cercano al diámetro calculado a partir de los modelos (41 mm, ver sección 5.3.2 del Anexo E, “Dimensionamiento de PROESBIPAY planta piloto”). Se presume que esta pequeña diferencia se debe a que los modelos matemáticos de SuperPro para la extrusión, solo modelan el flujo de arrastre del tornillo y no tienen en cuenta los efectos de la presión impuesta por una boquilla a la salida del extrusor (conceptos referenciados en la sección 3.3,1, “Estudio de variables principales del proceso”) y mucho menos los efectos que puede generar el agente espumante al descomponerse en la zona de dosificación, pues se presume que al formar gas en esta zona, aumentaría la presión que se opone al flujo de arrastre. Sin embargo, esta diferencia no supera el 10% por lo que se concluye que los datos obtenidos con los modelos, son confiables.

Figura 41. Configuración del extrusor en SuperPro
a). Condiciones de operación b). Dimensiones del equipo extrusor



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Validación de los modelos matemáticos de la cortadora

SuperPro no cuenta con una operación de proceso que permita modelar el funcionamiento de la cortadora, por lo tanto, para la simulación de la planta piloto se decide modelarla de una manera genérica a partir de la operación de trituración (Shredding), que se ajusta al flujo de la corriente de entrada (16.84 kg/h).

5.2.2 Implementación de la planta piloto en SuperPro Designer

Realizada la validación de los modelos matemáticos para los equipos más críticos de PROESBIPAY, se procede a ingresar y configurar todas las etapas de proceso de la planta piloto. Aquí se desarrollan dos puntos importantes para cada acción de proceso: Se especifica la intervención del operario mediante la pestaña “Labor” (ver Figura 42a) y se establece la dependencia a otras acciones de proceso ya sean de la misma operación o no, mediante la pestaña “Scheduling” en la interfaz de configuración (ver Figura 42b); esto se realiza tomando como base el modelo de control procedimental o la distribución de tiempos obtenida en la sección 3.3.2 (Escalamiento de la producción).

Figura 42. Configuración común de las acciones de proceso en SuperPro
a). Intervención del operario b). Dependencia a otras acciones

Cargar Almidón de Yuca (Charge)

Oper.Cond's Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Labor

	Labor	Amount	Units	Service
1	Operator	1,00	labor-hrs/hr	Cargar Homo

a)

Secar (Tray Drying)

Oper.Cond's Utility Data Labor, etc. Description Batch Sheet Scheduling

Timing

Schedule Start Finish of This Operation

Time Shift 0,00 h

Reference

Relative to the Beginning of the Batch

Relative to Previous Operation in this Procedure

Cargar Almidón de Yuca

Start End

Relative to Another Operation in this Procedure

(none)

Start End

Relative to Another Operation in Another Procedure

Procedure (none)

Operation (none)

Start End

Scheduling Dependency Link Starts with End of Ref. Op.

Ref. Op.

FTS

Duration

Setup Time 0,00 min

Process Time 360,00 min

Turnaround Time 0,00 min

Number of Cycles 1

Absolute Start Time 1,00 h

Absolute End Time 7,00 h

Sync. with Master...

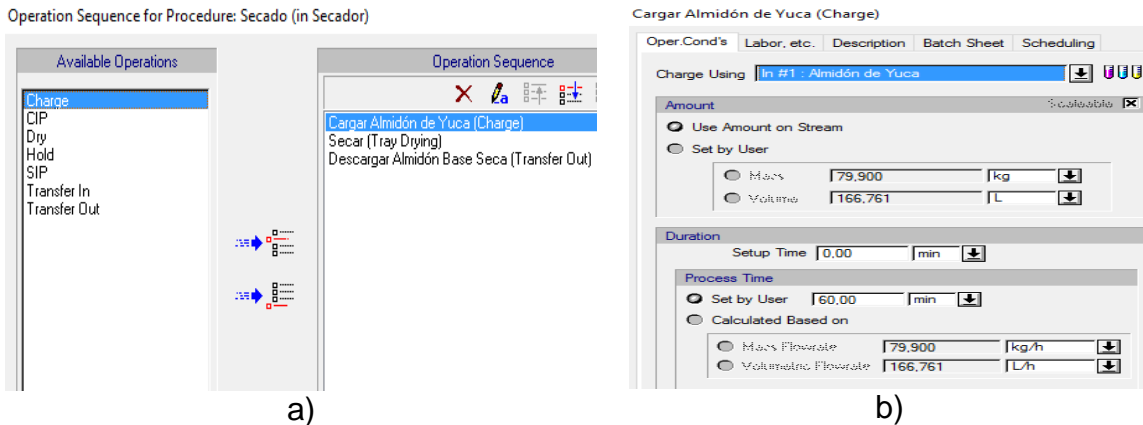
b)

Fuente, Propia, noviembre de 2016.

Operación de secado

Antes de comenzar, se completa la operación de secado, incluyendo las acciones de carga y descarga del horno, para esto, se activan las acciones “Charge” y “Transfer out” en la secuencia que se indica en la *Figura 43a*, estas se configuran seleccionando la corriente que se utiliza para ingresar o retirar material y la duración de la acción, *Figura 43*; en este caso, se indica la intervención de un operario para cada acción, excepto para “secar” y se configura su dependencia de manera que su ejecución sea secuencial.

Figura 43. Configuración de la operación de secado en SuperPro
a). Activación de las acciones de proceso b). Configuración de las acciones



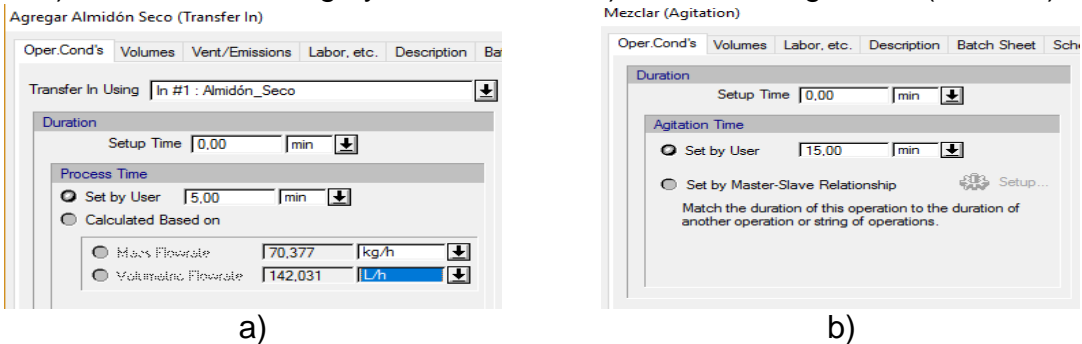
Fuente: Propia, noviembre de 2016.

También se incluye el tambor de almacenamiento en el que se almacenará el almidón seco después del secado. Para su configuración se especifica la densidad aparente del almidón seco y el volumen ocupado por este (ver *Tabla 24*).

Operación de mezclado

Para modelar esta operación, se selecciona la que está relacionada a un tanque de mezcla, a esta se conectan las corrientes de entrada correspondientes al almidón seco, ácido cítrico, glicerol y talco mineral que se inicializan con los valores obtenidos en la sección 3.3.2. Luego se insertan las acciones de carga, agitación y transferencia para representar el ingreso de material, el mezclado y la descarga del compuesto, *Figura 44*; para estas acciones se especifica la corriente inicializada con el material correspondiente, la duración, la intervención del operario y por ultimo su dependencia de manera que su ejecución sea acorde a la distribución de tiempos realizada en el capítulo 3, *Tabla 23*. El dimensionamiento del equipo se realiza en el modo de diseño para calcular el volumen del recipiente, por lo que es necesario cambiar las densidades de cada material por su densidad aparente.

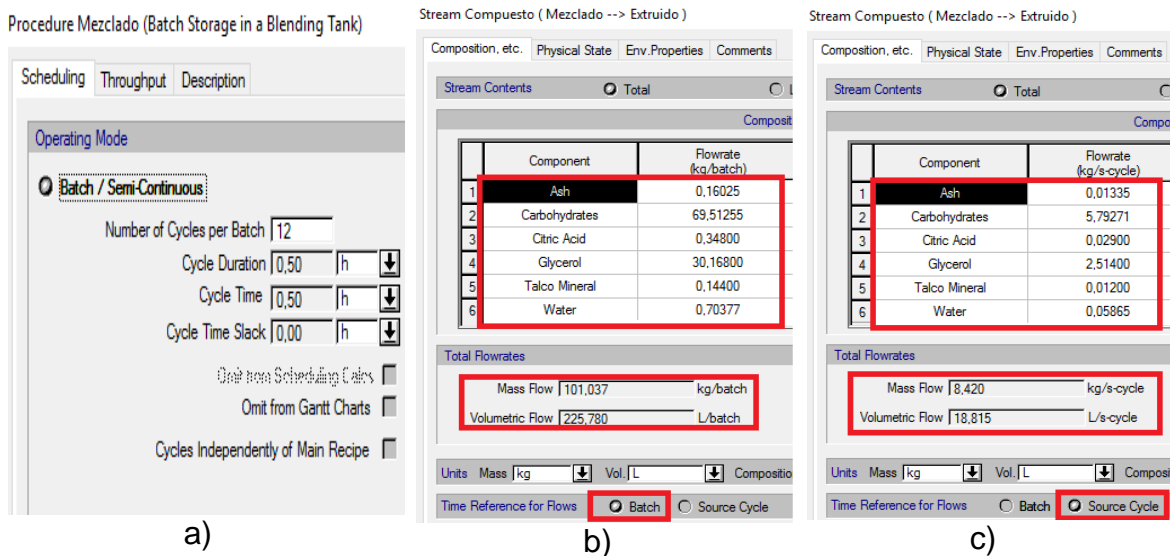
Figura 44. Configuración de la operación de mezclado
a). Acciones de Carga y transferencia b). Acción de agitación (mezclar)



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Debido a que SuperPro toma como referencia el tiempo del lote de la operación más lenta, la cual corresponde a la operación de secado, para esta simulación se instaura que un Batch represente la producción de una jornada de 8 horas. Por lo tanto, para modelar la operación de mezclado se inicializan las corrientes de entrada con la cantidad de material que se utiliza en toda la jornada y se configura la operación de manera que se realicen 12 ciclos en un Batch, que representan la cantidad de lotes de mezclado que se producen en la jornada, *Figura 45*.

Figura 45. Ajuste de la operación de mezclado en SuperPro
a). Ciclos por Batch b). Producción por Batch (jornada) c). Producción por ciclo



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Como se demuestra efectivamente en la simulación (*Figura 45*), la producción de la operación de mezclado en un Batch corresponde a la producción que se calculó en el capítulo 3 para una jornada de 8 horas (101.04 kg), igualmente, la producción por ciclo es igual a un lote de compuesto (8.42 kg), además, su composición es igual a la que se calculó previamente (*Tabla 24*).

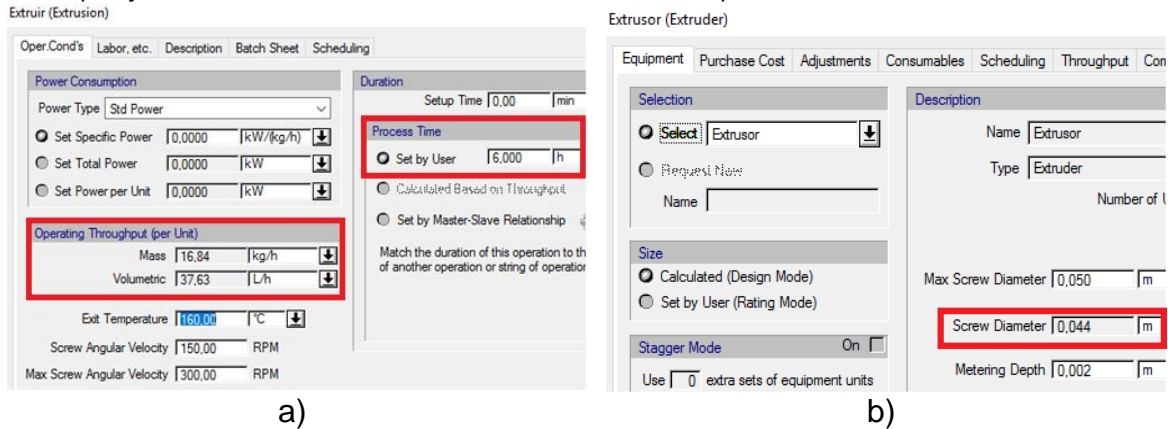
Operación de extruido

Teniendo en cuenta que para la simulación se considera a un Batch como la producción en una jornada de 8 horas, se ajusta la duración de la acción “extruir” a 6 horas como se estableció en la *Tabla 21* de la sección 3.3.2, puesto que en la simulación, la operación asumirá como entrada los 101.04 kg de compuesto que salen de la operación de mezclado (*Figura 45b*); de esta manera se modela el funcionamiento continuo del extrusor durante la jornada con unidad productiva de 16.84 kg/h, además, no se afectan los parámetros de diseño obtenidos anteriormente (*Figura 46*). La dependencia de esta acción se configura de manera

que inicie a partir del primer lote de compuesto producido en el mezclado; en la simulación un lote de mezclado equivale a un ciclo (*Figura 45c*).

Figura 46. Ajuste del tiempo de la operación de extruido

a). Ajuste de la duración de la acción extruir b) Dimensiones del extrusor



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

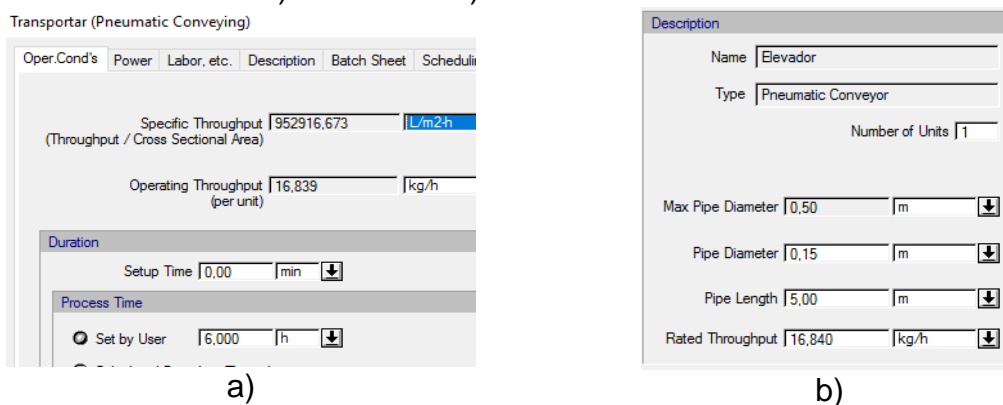
Operación de cortado

Para modelar el cortado a partir de la operación de trituración (Shredding) de la herramienta, simplemente se ajusta la duración de la acción “cortar” a 6 horas y se configura su dependencia de forma paralela a la extrusión.

También es necesario modelar el transportador neumático que alimenta al silo para tener la posibilidad de estimar el consumo energético de todos los equipos en la planta piloto. Para su configuración se especifican el diámetro y la altura de la tubería que se establecieron en la sección 4.1.3 (sistema de enfriamiento); además, se define el flujo de trabajo que debe ser igual a la producción de la extrusión (16.84 kg). Este equipo depende de la operación de cortado por lo tanto su duración se ajusta a 6 horas y se inicia de forma paralela.

Figura 47. Configuración del transportador neumático

a). Duración b). Parámetros de diseño



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Operación de empaclado

Para modelar esta operación, se ingresa un silo para almacenamiento de sólidos y se configura de manera que inicie junto con el transporte neumático pues ese será el momento que empieza a recibir material; la duración se ajusta a 6.5 horas para representar que se almacenan los pellets de espumado hasta finalizar la jornada. También se ajusta la densidad de las corrientes de entrada y salida a la densidad aparente (27.37 kg/m^3 , calculada en la sección 5.2.1 del Anexo E) para que la herramienta calcule adecuadamente el volumen del equipo.

Figura 48. Configuración del silo en SuperPro

a). Volumen admisible en silo b). Volumen del silo c). Duración de la acción

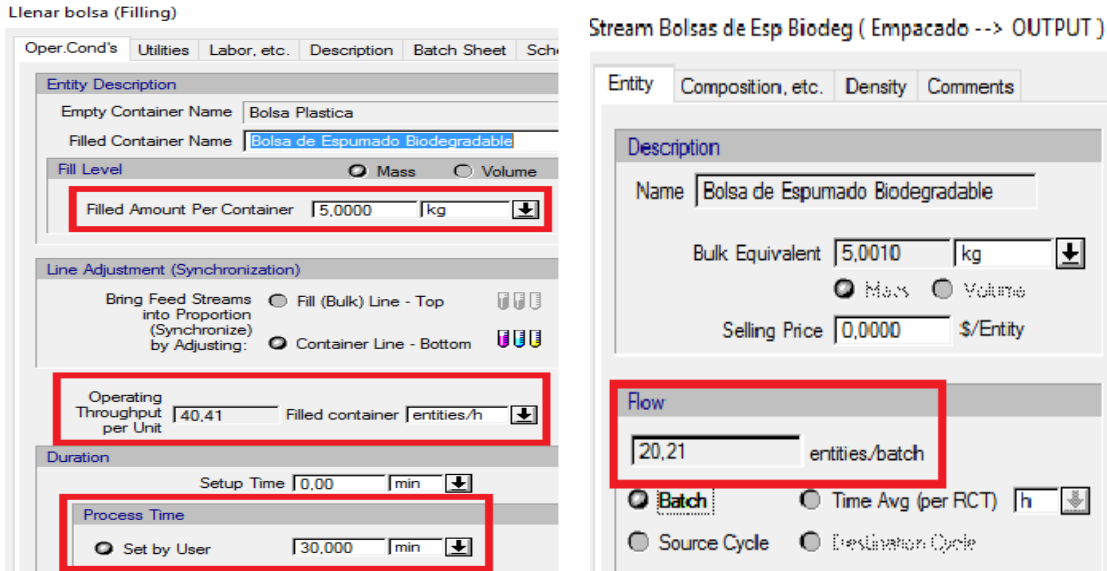
The figure consists of three screenshots of the SuperPro software interface for configuring a silo operation. Screenshot (a) shows the 'Almacener (Batch Solids Storage)' window with the 'Volumes' tab selected. It displays 'Working / Vessel Volume' settings: Max Allowable (90.00%), Min Allowable (0.00%), Initial (90.00%), and Final (90.00%). Below, 'Working Volume' is set to Initial (3877.11 L) and Final (3877.11 L). The 'Bulk Density' is 27.370 kg/m³. Screenshot (b) shows the 'Description' window for 'Silo Flexible'. It lists 'Type' as 'Silo/Bin' and 'Number of Units' as 1. 'Max Volume' is 30000000.00 L, 'Volume' is 4307.90 L, and 'Max Allowable Working/Vessel Volume' is 90.00%. 'Height / Diameter' is 0.500, 'Height' is 1.111 m, and 'Diameter' is 2.222 m. Screenshot (c) shows the 'Almacener (Batch Solids Storage)' window with the 'Duration' tab selected. 'Thermal Mode' is set to 'Set Final Temp.' at 25.00 °C. 'Duration' settings show 'Setup Time' as 0.00 min and 'Process Time' as 6.50 h.

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Ahora, se agrega el equipo empacador representado por la operación "Filling" de la herramienta, el cual cuenta con dos entradas: una para corrientes a granel que se conecta con el flujo de pellets de espumado provenientes del silo y la otra para corrientes discretas, específicamente contenedores, que se inicializa con la materia prima "bolsa plástica". Como salida tiene una corriente discreta que representará las bolsas llenas con los pellets de espumado biodegradable en presentaciones de 5 kg. Para su configuración se especifica el nombre del contenedor lleno, esto es, bolsas de espumado biodegradable, mientras que el contenedor vacío corresponde a la entrada discreta que son las bolsas plásticas. También se especifica la necesidad de un operario y la cantidad de material que se llena en cada contenedor, para este caso son 5 kg de pellets de espumado y la duración se ajusta a 30 minutos al final de la jornada como se estipuló en la distribución de tiempos del capítulo 3 (sección 3.3.2) (Figura 49).

Figura 49. Configuración de la operación de empaqueo en SuperPro

a). Acción de proceso llenar bolsa b). Corriente de salida



a)

b)

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Al correr la simulación se puede evidenciar en la *Figura 49b* que en la jornada (Batch) se producirán 20.21 bolsas de espumado biodegradable en presentaciones de 5 kg; además, la herramienta estima que la tasa de producción de la operación de empaqueo es de 40.41 *bolsas/h* (ver *Figura 49a*) que equivale a empaocar una bolsa cada 1.48 *min*, tiempo que se estimó en la sección 3.3.2 (Distribución de tiempos).



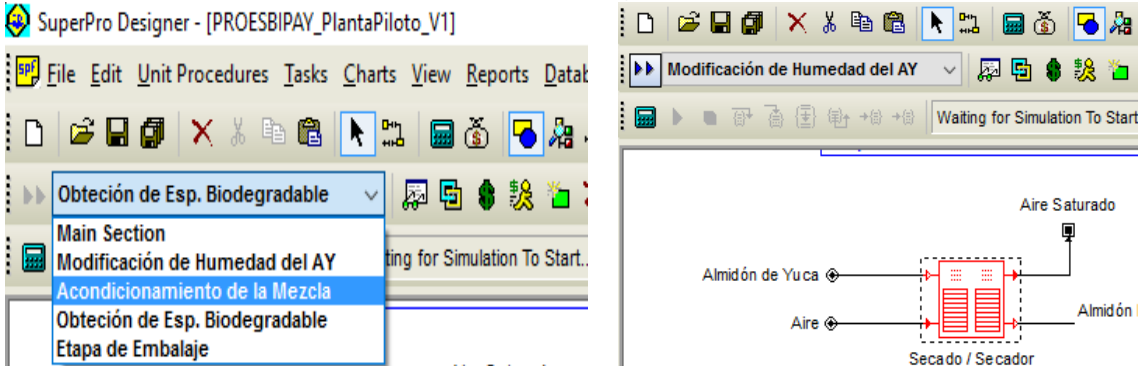
Por último, se crean las etapas de proceso dando clic en el icono  y se agregan a cada una las operaciones como se acordó en el modelo de proceso, capítulo 4, seleccionando la operación y cliqueando en el botón .

Figura 50. Configuración de etapas de proceso en SuperPro

a). Creación de etapas de proceso b). Asignación de operaciones a las etapas



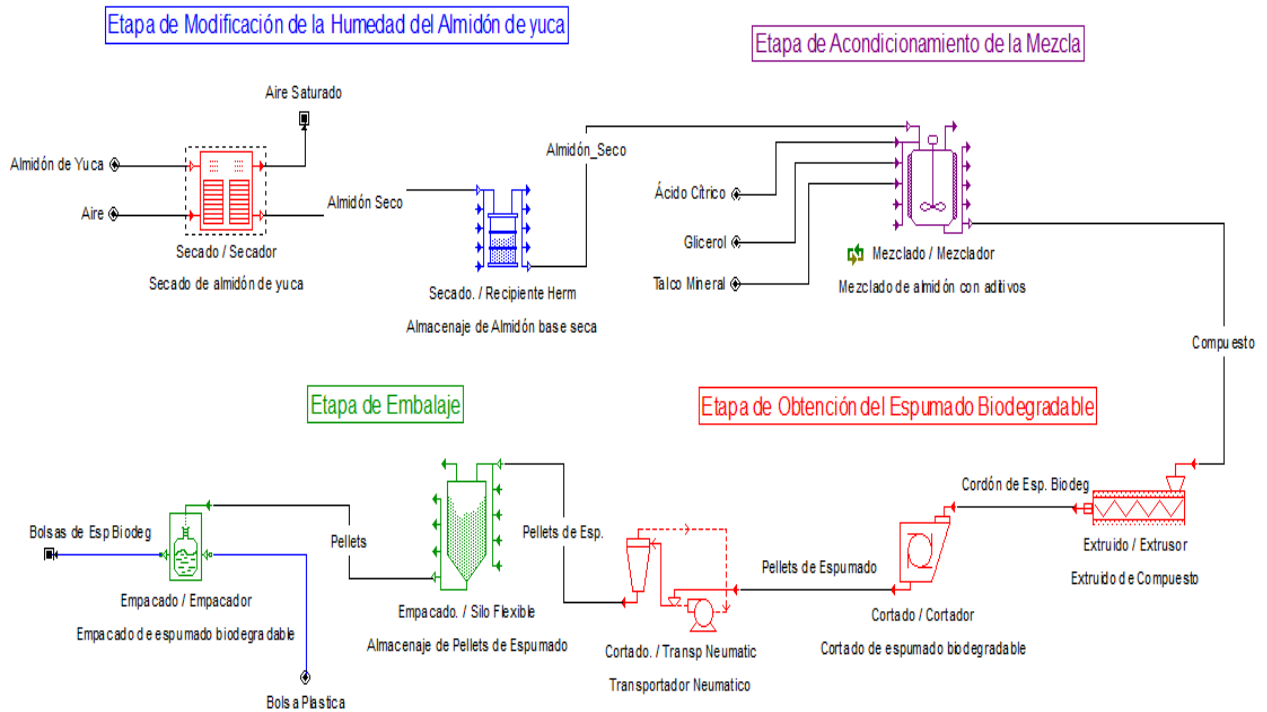
a)

b)

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Al finalizar el diseño y configuración de todas las etapas y operaciones de PROESBIPAY planta piloto en la herramienta SuperPro Designer con sus respectivas corrientes etiquetadas, la planta deberá lucir similar a la *Figura 51*. La simulación completa de la planta piloto se puede encontrar en el archivo digital del Anexo N (PROESBIPAY_PlantaPiloto).

Figura 51. Simulación de PROESBIPAY planta piloto en SuperPro



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

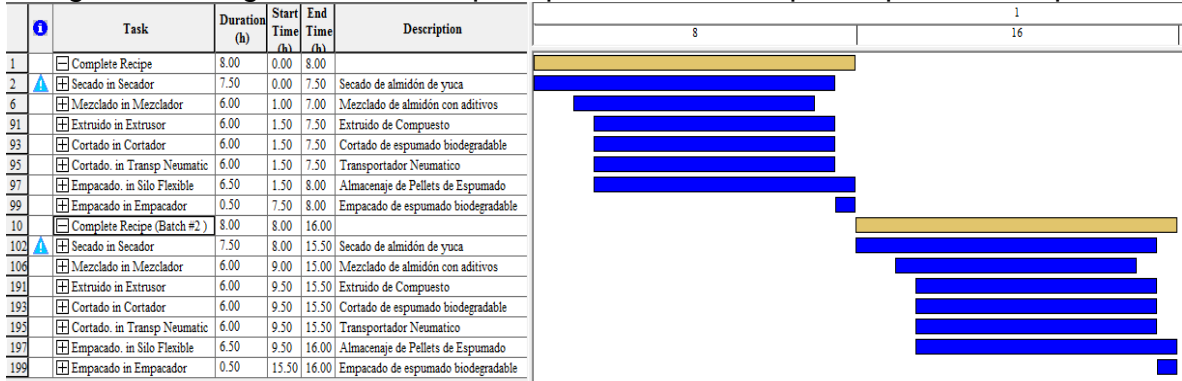
5.3 Análisis de resultados

En esta sección se analiza la información que entrega la herramienta al simular la planta piloto de PROESBIPAY con los parámetros obtenidos en el proceso de escalamiento, capítulos 3 y 4.

5.3.1 Diagrama de Gantt

SuperPro tiene la opción de presentar una vista general de la programación completa para uno o varios lotes mediante un diagrama de Gantt. En este caso, se utiliza para verificar que la distribución de tiempos de operación de la planta piloto se ajustó adecuadamente. Es importante recordar que la simulación se realizó con la premisa de que un lote representa la producción de una jornada de 8 horas. Por lo tanto, en la *Figura 52* se presenta el diagrama de Gantt de dos jornadas.

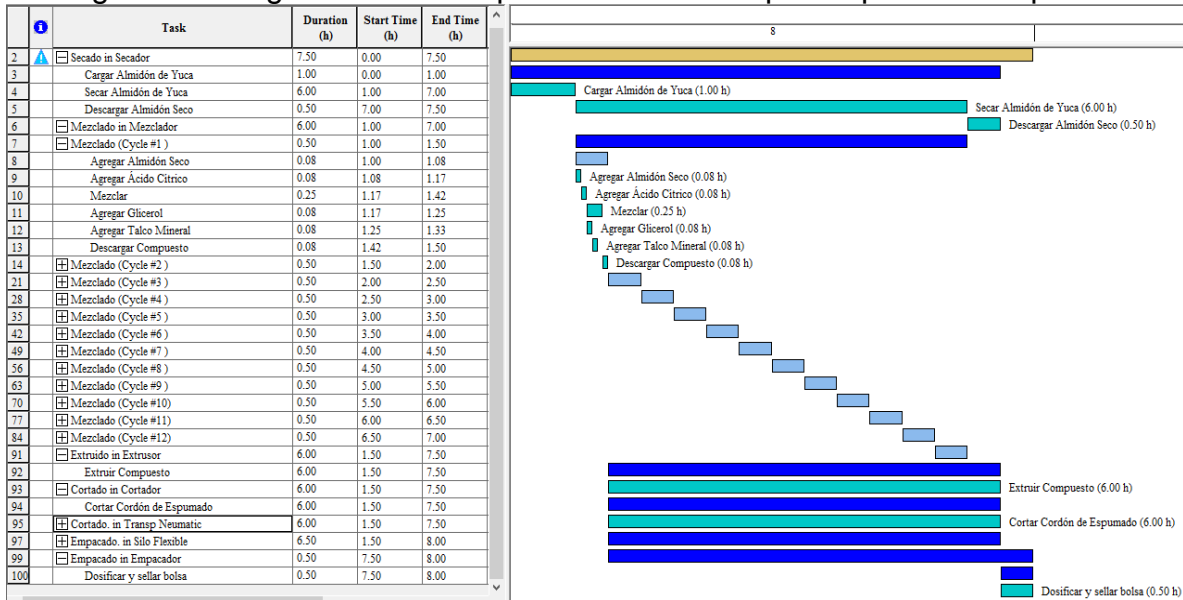
Figura 52. Diagrama de Gantt por operaciones de la planta piloto en SuperPro



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Efectivamente se demuestra que la distribución de tiempos para cada operación en la simulación corresponde a los tiempos planteados en la *Tabla 21*, sección 3.3.2 (Escalamiento de la producción). Además, en la *Figura 53* también se demuestra efectivamente la distribución adecuada de las acciones de cada operación, especialmente las acciones del secado y mezclado (ver *Tabla 22* y *Tabla 23*, sección 3.3.2); así mismo, se comprueba que en la jornada se realizan 12 lotes de mezclado y apenas se tenga el primer lote, se empezará a extruir, cortar y almacenar para al final de la jornada, dosificar los pellets de espumado en bolsas y sellarlas. Como se mencionó en la sección 5.2.2, fue necesario modelar el transportador neumático con el fin de obtener una estimación del consumo energético con todos los equipos de la planta y el silo para calcular el volumen que este debe tener; sin embargo, como SuperPro tiene asignado un equipo para cada operación de proceso, los toma como operaciones individuales, por lo tanto se etiquetaron con el nombre de la operación a la que pertenecen para evitar confusiones.

Figura 53. Diagrama de Gantt por acciones de la planta piloto en SuperPro

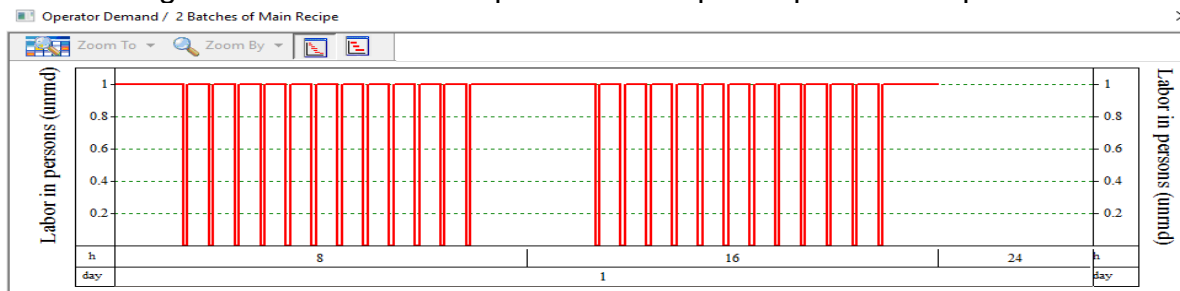


Fuente: Propia, noviembre de 2016.

5.3.2 Demanda de operarios

Como se especificó en la sección 3.3.2 (Distribución de tiempos de operación), la distribución de tiempos se determinó con la premisa de que la línea de producción pueda ser maniobrada por un solo operario, con esto se identificaron las acciones que lo requieren y se ordenaron como se muestra en la *Figura 53*. Al generar el grafico que representa la demanda de operarios durante el proceso, se comprueba que la distribución de tiempos de operación obtenida en el escalamiento, permite que la planta piloto de PROESBIPAY pueda ser manejada por un solo operario, ver *Figura 54*. Cabe aclarar que la simulación se ajustó para ejecutar las jornadas (Batch) de forma continua, es decir, que para el programa en un día (24 horas) se desarrollan 3 jornadas (8 horas c/u), esto se realizó con el motivo de obviar el tiempo en el que la planta no está operando; por lo tanto, en esta grafica se muestra la labor para dos jornadas de trabajo. Las pequeñas secciones en las que no se requiere un operario corresponden al tiempo previo a la descarga de compuesto en el mezclado.

Figura 54. Demanda de operarios de la planta piloto en SuperPro



Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Teniendo en cuenta que en el programa se está obviando el tiempo en el que la planta no opera, se sigue la siguiente consideración: en un día la producción dura 8 horas, suponiendo que la planta trabaja 6 días de la semana, el mes consta de 4 semanas y un año de 12 meses, el tiempo de operación al año será de 2304 horas en 288 jornadas. Estos datos se ingresan al programa para generar reportes que permitan estimar los costos de operación de la planta piloto, *Figura 55*.

Figura 55. Ajuste del tiempo de operación por año de la planta piloto

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Asumiendo que el costo de la mano de obra es de 5186.224 *COP/h* (calculado a partir salario integral para el mes de diciembre del 2016), al generar el reporte de evaluación económica se obtiene que el costo anual de la mano de obra será de 10,455,420 *COP*, ver *Figura 56*.

Figura 56. Costo de mano de obra para la planta piloto

Labor Type	Unit Cost (\$/h)	Annual Amount (h)	Annual Cost (\$)	%
Operator	5,186.22	2,016	10,455,420	100.00
TOTAL		2,016	10,455,420	100.00

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

5.3.3 Consumo de materiales

Al generar el reporte de materiales y corrientes, se observa que en una jornada se producen 20.21 bolsas de espumado biodegradable y al año se producen 5819.71 bolsas, *Figura 57*. En la *Figura 59* se muestra el consumo de materias primas por jornada (Batch), año y por bolsa de espumado biodegradable producida.

Figura 57. Reporte de datos generales de PROESBIPAY planta piloto

Annual Operating Time	2,304.00h
Unit Production Ref. Rate	5,819.71MP Entities
Batch Size	20.21MP Entities
Recipe Batch Time	8.00h
Recipe Cycle Time	8.00h
Number of Batches per Year	288.00

MP = Flow of Discrete Entity 'Bolsa de Espumado Biodegradable' in Stream 'Bolsas de Esp Biodeg'

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Figura 58. Reporte de consumo de materiales de la planta piloto

Material	kg/yr	kg/batch	kg/MP Entity
Almidón de Yuca	23,011	79.900	3.954
Air	27,105,211	94,115.314	4,657.488
Citric Acid	100	0.348	0.017
Glycerol	8,688	30.168	1.493
Talco Mineral	41	0.144	0.007
Bolsa Plastica	6	0.020	0.001
TOTAL	27,137,058	94,225.894	4,662.960

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

Con la ayuda del investigador encargado del proceso en laboratorio, ingeniero Pedro Albán, se recolectó la siguiente información sobre el precio de las materias primas, los cuales se ingresaron al registro de cada material al iniciar la simulación.

Almidón de yuca	: 2500 COP/kg
Glicerol	: 3100 COP/kg
Ácido cítrico	: 50000 COP/kg
Talco mineral	: 6000 COP/kg
Bolsa plástica	: 100 COP/und

El reporte de evaluación económica demuestra que al año la planta piloto demanda 90,303,993 COP en materias primas de la cual el 63.7% corresponde la compra de almidón de yuca, el 29.83% al glicerol, mientras que lo demás materiales no superan el 10%, ver Figura 59.

Figura 59. Reporte de costo de materiales de la planta piloto

Bulk Material	Unit Cost (\$)	Annual Amount		Annual Cost (\$)	%
Almidón de Yuca	2,500.000	23,011	kg	57,528,000	63.70
Air	0.000	27,105,211	kg	0	0.00
Citric Acid	50,000.000	100	kg	5,011,200	5.55
Glycerol	3,100.000	8,688	kg	26,933,990	29.83
Talco Mineral	6,000.000	41	kg	248,832	0.28
Discrete Material	Unit Cost (\$/Entity)	Annual Amount (Entities)		Annual Cost(\$)	%
Bolsa Plastica	100.000	5,820		581,971	0.64
TOTAL				90,303,993	100.00

Fuente: Propia, noviembre de 2016.

5.3.4 Consumo energético

La herramienta también incluye en los reportes de evaluación económica, el consumo energético de los equipos involucrados en el proceso, para esto es necesario proporcionar el valor de la potencia instalada de cada equipo en la simulación, este proceso se realiza durante la configuración de las acciones de proceso de cada operación. Para la simulación de la planta piloto de PROESBIPAY se ingresó la potencia de los equipos que se seleccionaron en la sección 3.5.1 (Escogencia de equipos), estos datos se listan en la *Tabla 52*.

Tabla 52. Potencia instalada de los equipos de PROESBIPAY planta piloto

Equipo	Marca	Potencia [kW]
Secador	MEMMERT	4.8
Mezclador	SINMAG	0.75
Extrusor	BAUSANO	27.6
Cortador	Diseño propio	0.74
Transportador neumático	PALINI	1.2
Empacador	INGESIR	2.2

Fuente: Propia, diciembre de 2016.

Proporcionándole a la herramienta los datos de la *Tabla 52* y el precio del kilovatio (539.0372 *COP/kW*), se obtiene el reporte de consumo energético de la *Figura 60*, en el que se demuestra que en un año de operación, la planta habrá consumido aproximadamente 75,380 *kWh* que se representan en *COP* 40,632,840. Es de suma importancia saber que SuperPro suma un factor de seguridad de 25% sobre el consumo energético real, por lo tanto, los datos obtenidos se ajustan a los posibles disturbios que se presentan en una implementación real.

Figura 60. Reporte de consumo energético de la planta piloto

Utility	Unit Cost (\$)	Annual Amount	Ref. Units	Annual Cost (\$)	%
Std Power	539.037	75,380	kW-h	40,632,840	100.00

Fuente: Propia, diciembre de 2016.

Por último, en los reportes de evaluación económica, se consigue una estimación del coste de operación de la planta piloto de PROESBIPAY para una jornada (Batch), un año y por cada bolsa de espumado biodegradable producida, con base al consumo de materias primas, intervención de la mano de obra y el consumo energético de los equipos de la planta. En la *Figura 61* se puede identificar que el 63.87% de los costos de operación de la planta piloto se dirigen a la demanda de materias primas, mientras que el 7.39% está dirigido a la mano de obra y el 28.74% al consumo de energía eléctrica de los equipos. También se puede identificar el costo de producción de una unidad de producto, esto es, el precio de fabricación de una bolsa de espumado biodegradable que esta alrededor de *COP* 24,295.428, este se

puede considerar como el precio base para la comercialización del producto. El costo de producción de la planta piloto en una jornada será de COP 490,945 y el costo de operación anual fluctuará en COP 141,392,252.

Figura 61. Reporte de costos de operación del proceso completo

SUMMARY PER COST ITEM (Entire Process)				
Cost Item	\$/MP Entity	\$/batch	\$/year	%
Raw Materials	15,516.933	313,556	90,303,993	63.87
Facility	0.000	0	0	0.00
Labor	1,796.555	36,304	10,455,420	7.39
Consumables	0.000	0	0	0.00
Utilities	6,981.940	141,086	40,632,840	28.74
Waste Trtmt/Disp	0.000	0	0	0.00
Transportation	0.000	0	0	0.00
Miscellaneous	0.000	0	0	0.00
TOTAL	24,295.428	490,945	141,392,252	100.00

Fuente: Propia, diciembre de 2016.

Capítulo 6

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

La metodología de escalamiento que se logró consolidar (PEIPP mejorado) en el presente trabajo de grado da solución a falencias como: enfoques individualizados a equipos de proceso, introducción de equipos sin estudio y modelado previo, ausencia de simulación para validación, entre otras; teniendo en cuenta que la metodología que se propone, no solo permite proyectar diferentes capacidades de producción en una nueva escala sino, reajustar parámetros o variables de acuerdo al comportamiento global del proceso, optimizar la ejecución de operaciones de proceso y dimensionar de manera adecuada la utilización de la mano de obra.

El estudio detallado del proceso en su escala inicial permitió en primer lugar, apropiarse de conceptos y características específicas del mismo, que constituyen una herramienta demasiado importante por cuanto clarifica o direcciona cualquier análisis o propuesta de mejora hacia una nueva escala de producción; en segundo lugar, posibilitó un modelado estándar del proceso que permite reproducción de la información recolectada e independencia del personal que labora en las instalaciones. Además, la metodología de diagnóstico (implementada ya en trabajos anteriores) aplicada al proceso en su escala inicial, permitió obtener un listado de requerimientos, tanto generales como de automatización, que ayudan a formular soluciones “a la medida” de acuerdo a la particularidad de cada proceso.

El “procedimiento de escalamiento industrial de procesos productivos” (PEIPP), en su forma inicial u original, presentó falencias en 4 de las 6 fases formuladas para llevar a cabo un escalamiento industrial; sin embargo, el presente trabajo de grado logró solventar esta problemática con la propuesta de métodos específicos para llevar a cabo los estudios relacionados con variables principales del proceso, manejo de residuos, modificación cuantificada de variables y selección de equipos

La visión global de un proceso aplicada en la presente metodología de escalamiento, permitió definir de manera óptima los modos de operación (continuo, Batch) en las diferentes etapas del proceso, de tal manera que no se presente subutilización de equipos, afectaciones indirectas a las materias primas o subproductos del proceso, ineficiencia por parte de operarios, automatizaciones o instalación de instrumentación innecesaria, entre otros.

La aplicación de la metodología equipo-puntuación permitió identificar con facilidad los equipos más convenientes para la planta piloto de PROESBIPAY; sin embargo, cuando la diferencia de precios entre las cotizaciones es muy alta, es recomendable realizar un análisis más detallado para seleccionar el equipo cuyas funcionalidades cubran los requerimientos de la planta.

El modelado a nivel de planta piloto, comparado con su semejante a nivel de laboratorio, permitió obtener aproximaciones más claras acerca del comportamiento que tendría el proceso a escalas comerciales; es decir, los datos obtenidos en cuanto a modificación de variables, parámetros de escalamiento, rendimiento general y específico, características de automatización entre otros, posibilitaron una visualización aproximada del comportamiento del sistema a nivel industrial o comercial.

El software de simulación SuperPro Designer es una herramienta de alta importancia teniendo en cuenta que permitió, en primer lugar, validar los modelos obtenidos para los equipos principales del proceso, hecho que brinda seguridad al desarrollador; en segundo lugar, se pudo constatar que es una herramienta robusta por cuanto ofrece al usuario la posibilidad de configurar o crear parámetros a nivel de propiedades físicas de materiales, permite experimentación en modo diseño (dimensionamiento de equipos basado en parámetros de operación) y modo clasificación (parámetros de operación basados en dimensionamiento de equipos), organización formal y estructurada de la línea de producción basada en los modelos ISA 88, permite recrear el comportamiento detallado del conjunto de equipos en estado estacionario, entrega reportes completos acerca de consumos energéticos, utilización de mano de obra, corrientes de proceso, tiempos de ejecución del proceso, utilización de equipos, emisiones, balance de costos, entre muchos otros datos de gran importancia.

6.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta que a la fecha (noviembre de 2016), el proceso de extrusión de espumado biodegradable no ha llegado a una especificación definitiva de producto final o terminado, se recomienda que una vez definidos estos aspectos, se haga la actualización de modelos que corresponda para poder usar eficientemente el modelado obtenido.

Se recomienda desarrollar, preferiblemente de forma paralela, estudios o registros de información suficientes para llevar a cabo procesos de escalamientos futuros, antes de abandonar los trabajos en el nivel de laboratorio.

Como un último aspecto, se recomienda que antes de pasar a una experimentación práctica sobre los equipos, se realice un estudio previo mediante simulación o procedimientos teóricos que permitan obtener aproximaciones antes de pasar a la ejecución.

Bibliografía

- [1] E. de I. Industriales, “Fabricación de Envases Plásticos Destinados a la Industria Alimenticia”. Valladolid, España, pp. 1–152, 2014.
- [2] S. Mawn, “ASTM International - Standards Worldwide”, 2012. .
- [3] Laboratorio de producción Facultad de ingeniería Industrial, “Plásticos-protocolo - Curso de procesos de manufactura”, *Esc. Colomb. Ing.*, p. 29, 2007.
- [4] B. P. Bustamante, “La degradación de los plásticos”, *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 30, n° 94, pp. 67–86, 2012.
- [5] M. Beltrán y A. Marcilla, “Tipos de plasticos, aditivación y mezclado”, en *Tecnología de polímeros*, Alicante, España, 2011, pp. 75–76.
- [6] M. P. Groover, *Fundamentos de la manufactura moderna*. 2007.
- [7] C. de N. de la ONU, “El PNUMA alerta de los perjuicios de los plásticos para los ecosistemas marinos”, 2014. .
- [8] B. M. Org, “Una bolsa de plástico para asfixiar al planeta”, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2014/12/08/bolsa-de-plastico-asfixiar-planeta>. [Accedido: 06-may-2016].
- [9] A. T. 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.
- [10] E. a. Espinoza, “Modelo de gestion de residuos plasticos”, *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Barranquilla, pp. 1–42, 2009.
- [11] F. E. ORG, “Plásticos biodegradables_ ¿son mejores para el medioambiente_”, 2015. .
- [12] C. A. para la T. y el D. de la Biotecnología, “ArgenBio_plasticoBiodegradable”, 2014. .
- [13] H. Villada, H. A. Acosta, y R. J. Velasco, “Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables”, *Temas Agrar.*, vol. 12, n° 4, pp. 5–13, 2007.
- [14] J. Durán, M. A. Morales, y 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, n° 2, pp. 127–133, 2005.
- [15] P. P. Angeles Chero, “Diseño de un proceso industrial para obtener plastico biodegradable (TPS) a partor de almidon de Yuca manihot sculenta.”, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque, Peru, 2015.
- [16] E. Martínez Narváez, “Propuesta de Escalamiento Industrial del Proceso de Extrusión para Películas Biodegradables bajo el marco del proyecto ‘Investigación y Desarrollo de Empaques Biodegradables’”, Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Cauca-Popayán, 2015.
- [17] M. Mitrus y L. Moscicki, “Extrusion-cooking of starch protective loose-fill foams”, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 92, n° 4, pp. 778–783, abr. 2014.
- [18] I. Biodegradables, J. Vega-baudrit, K. Delgado-montero, M. S. Ballestero, A. Aguilar, S. B. Ramírez, R. Correo, C. De Innovación, a C. Omega, y F. I. Delta, “Empleo de melaza de caña de azucar para la obtención y

- caracterización de poliuretanos potencialmente biodegradables”, *Rev. Iberoam.*, vol. 9, nº 4, pp. 408–421, 2008.
- [19] M. Beltrán Rico y A. Marcilla Gomis, “Extrusión”, en *Tecnología de Polímeros*, 1ª ed., U. de Alicante, Ed. Alicante: Universidad de Alicante, Servicio de Publicaciones, 2012, pp. 102–167.
- [20] M. Niaounakis y M. Niaounakis, “Foaming and Foamed Products”, en *Biopolymers: Processing and Products*, 2015, pp. 327–359.
- [21] M. Sauceau, J. Fages, A. Common, C. Nikitine, y E. Rodier, “New challenges in polymer foaming: A review of extrusion processes assisted by supercritical carbon dioxide”, *Progress in Polymer Science (Oxford)*, vol. 36, nº 6, pp. 749–766, 2011.
- [22] S. V. Brito, E. C. Batiz, y R. M. Martínez, “La ingenierización y la ingeniería concurrente en los proyectos de la industria farmacéutica y la biotecnología”, *Produção*, vol. 4, nº 2, pp. 117–125, 1994.
- [23] A. A. Ruiz Colorado, “Factores de escala para la producción biotecnológica de etanol carburante”, Tesis de Doctorado, Universidad Nacional, Facultad de Minas, Colombia, 2009.
- [24] A. Palomino, C. Bocanegra, y J. E. López, “Criterios globales de escalamiento y costos preliminares para obtener biodiésel a partir de aceite de higuera en una planta piloto”, *El Hombre y la Máquina*, nº 41, pp. 19–27, 2013.
- [25] A. Anaya Durand y H. Pedroza Flores, “Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina”, *Tecnol. Ciencia, Educ.*, vol. 23, nº 1, pp. 31–39, 2008.
- [26] R. A. González Castellanos, *Principios básicos de escalado*. Ciudad de Matanzas: Editorial Universitaria del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba, 2000.
- [27] Á. A. Ruiz y H. Álvarez, “Escalamiento de procesos químicos y bioquímicos basado en un modelo fenomenológico”, *Inf. Tecnol.*, vol. 22, nº 6, pp. 33–52, 2011.
- [28] J. Rosabal, *Teoría de los modelos en Ingeniería de procesos*. Santiago de Cuba: Editorial Oriente, 1988.
- [29] U. P. de Cartagena, “Desarrollo de una Planta Piloto de Procesos Químicos.” Cartagena, Colombia, p. 8, 2009.
- [30] G. Alonso, “Marketing de Servicios: Reinterpretando la Cadena de Valor”, *Palermo Bus. Rev.*, vol. 2, pp. 83–96, 2008.
- [31] A. N. Standard, *ANSI/ISA-88.01 Batch Control Part 1: Models and Terminology*, vol. 1, nº October. 1995.
- [32] C. E. de Occidente, “Contrato de Condiciones Uniformes Para la Prestación del Servicio Público Domiliario de Energía Eléctrica”. Popayan, Cauca, pp. 1–55, 2001.
- [33] E. A. Chacón R., I. V. Rondón M., K. R. Quintero G., y O. A. Rojas A., “Aplicación del Estándar ISA88 en el Modelado del Proceso de Producción de Azúcar en un Central Azucarero”, *Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. pp. 1–10, 2009.
- [34] E. S. de A. P. ESAP, “Plan De Gestion Integral De Residuos Sólidos”. Popayán, Cauca, pp. 1–14, 2015.
- [35] J. D. Gallo Riaño, “Guía Para el Adecuado Manejo de los Residuos Sólidos y

- Peligrosos”, *Revista*. Envigado, Antioquia, p. 32, 2011.
- [36] C. Contreras, “Manejo Integral De Aspectos Ambientales- Residuos Sólidos”, *Pontificia Universidad Javeriana*. Bogotá, Colombia, p. 37, 2006.
- [37] Area Metropolitana Del Valle De Aburrá, “Manual Para el Manejo Integral de Residuos Sólidos en el Valle de Aburrá”, *Manual Para El Manejo Integral De Residuos En El Valle De Aburrá*. pp. 1–47, 2004.
- [38] T. M. V. Amaya, “Diseño de una Planta Piloto para el Procesamiento de Frutas”, Thesis de Pregrado, Universidad Central del Ecuador, 2014.
- [39] L. M. R. Velásquez y M. J. N. Zambrano, “Diseño de una Planta Piloto Para la Producción de Bixina”, Trabajo de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2006.
- [40] INGESIR, “Maquinas embasadoras”, 2016. .
- [41] ABS, “Overview - A.B.S. - Flexible Silos für Pellets und Schüttgut”, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.abs-silos.de/en/wood-pellet-silos/products/overview-hp.html>. [Accedido: 22-oct-2016].
- [42] “CI Talsa”, 2016. .
- [43] “INGESIR Envasadoras”, 2016. .
- [44] C. Airle, S. Belalcazar, y U. D. E. L. Cauca, “Diseño de un proceso de obtencion de alimento para peces a nivel industrial en el marco del proyecto de regalías ID VRI 3883 SGR”, Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, 2015.
- [45] C. Mej, “Modelo para la definición del layout de una celda de manufactura a través de optimización”, Thesis de Maestria, Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [46] I. Novatec, “Tolva de Alimentación”, 2016. .
- [47] Melpump, “Alimentador Volumétrico de Tornillo”, 2016. .
- [48] ELH, “Alimentadores Volumetricos”, 2016. .
- [49] L. P. Machinery, “Alimentador Volumétrico Monotornillo”, 2016. .
- [50] R. De Colombia, “Decreto 3075 de 1997”, 3075, n° Ley 09 de 1979. p. 58, 1997.
- [51] ANSI-ISA, *ISA-95.00.01 Enterprise-Control System Integration Part 1: Models and Terminology*, n° July. 2000.