

**Diseño de un proceso de obtención de aceite de pescado a nivel industrial en el
marco del proyecto de regalías ID VRI 3883 – SGR**



Lenin Córdoba Eraso

Sergio Guillermo Melo Campaña

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, abril de 2017

Diseño de un proceso de obtención de aceite de pescado a nivel industrial en el marco del proyecto de regalías ID VRI 3883 – SGR



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

Lenin Córdoba Eraso

Sergio Guillermo Melo Campaña

Director: Mg. Juan Fernando Flórez Marulanda

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, abril de 2017

DEDICATORIA

Lenin Córdoba Eraso

A Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente,

A mis padres, mamá (María Eraso), papá (Alberto Córdoba C), por la fortuna más grande el tenerlos conmigo y el tesoro más valioso todos y cada uno de los valores que me inculcaron, por brindarme ese apoyo incondicional y la fortaleza para seguir adelante.

A mi hermana Kathy Córdoba E., gracias por servir de guía, por acompañarme siempre y más te agradezco por ser mi amiga.

A todos mis amigos por compartir los buenos y malos momentos, especialmente a Claudia Camargo A, quien siempre estuvo ahí para darme una mano de ayuda, A Carmenza y Jorge por haberme acogido en su familia.

A mi amigo y compañero de tesis, por el compromiso y empeño puesto para sacar adelante este proyecto.

Sergio Guillermo Melo Campaña

A Dios por ser mi fortaleza y mi guía en cada paso de mi vida.

A mis padres y hermanas por creer en mí y darme todo su apoyo durante mi carrera, por difundir en mí la lucha y el deseo de superación, especialmente a mi padre a quien admiro profundamente y ha sido quien me apoya en los momentos de duda, desesperación y felicidad.

A mis abuelos, tíos y primos (paternos y maternos) quienes con su voz de aliento aumentaban la fe y la confianza en mí mismo ante los momentos de debilidad.

A mi tía Aura Alicia Melo Portilla y a su esposo Servio Tulio Caicedo, por su apoyo y comprensión en cada momento

A mi amigo y compañero de tesis, que con sus conocimientos brindó aportes útiles y valiosos para el desarrollo de este proyecto; quien con su actitud de lucha y perseverancia me enseñó a luchar por lo que se quiere.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros y profundos agradecimientos a:

Al grupo de investigación ASUBAGROIN por su colaboración durante todo este proceso, en especial a los Ingenieros José Luis Hoyos Concha y Rocío Bonilla, por su disposición a ayudar en momentos de duda y aportarnos sus conocimientos.

Al Laboratorio de Biotecnología y Reología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias por abrirnos sus puertas para realizar pruebas que eran necesarias para el desarrollo total de este trabajo de grado.

A las integrantes del Centro de Escritura de la Universidad del Cauca, por su constante colaboración en cuestiones de redacción y estructura del documento.

A nuestros compañeros y amigos de programa que siempre estuvieron dispuestos a ayudar y a colaborar, especialmente a nuestros amigos Bernardo Lara y Robinson Ordoñez.

A la profesora Claudia Marcela Camargo Antolínez quien con su mano amiga nos dio la fortaleza y seguridad para continuar siempre firmes en el desarrollo de este proyecto.

A nuestro tutor y mentor Juan Fernando Flórez Marulanda, quien siempre estuvo dispuesto a ayudarnos, corregirnos y brindarnos todo su conocimiento en este proyecto.

“La dicha de la vida consiste en tener siempre algo que hacer, alguien a quien amar y alguna cosa que esperar”. Thomas Chalmers

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES	1
1.1. Industria Pesquera	1
1.1.1. Tipos de acuicultura	2
1.1.2. Piscicultura	2
1.1.3. Acuicultura en Colombia	3
1.1.4. Piscicultura en Colombia	3
1.1.5. Piscicultura en el Cauca	4
1.2. Aceite de pescado	4
1.2.1. Extracción de aceite de pescado	5
1.2.2. Ensilaje de pescado	8
1.2.3. Refinación del aceite crudo	10
1.3. Plantas para la obtención de aceite de pescado	12
1.4. Simulación del POAP	12
1.5. Descripción del POAP y los equipos utilizados en el Laboratorio de Biotecnología de la FCA de la Universidad del Cauca	13
1.5.1. Descripción del POAP – LAB	13
1.5.2. Descripción de los equipos utilizados	18
2. INGENIERÍA CONCEPTUAL	22
2.1. Cadena de valor del POAP – LAB	22
2.2. Diagrama de flujo del POAP – LAB	23
2.3. Modelos ISA - S88.01 del proceso y la planta del POAP – LAB	28
2.4. Diagnóstico del POAP	28
2.4.1. Nivel de dificultad en la realización del proceso	29
2.4.2. Nivel de automatización	35
2.4.3. Análisis de los modelos ISA - S88.01	38
2.4.4. Aspectos de ámbito general relacionados con las necesidades del proceso	41
2.5. Requerimientos del POAP	44
2.5.1. Requerimientos generales	44
2.5.2. Requerimientos de automatización	44
2.5.3. Requerimientos hardware	45

3.	ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE PROCESOS PRODUCTIVOS	46
3.1.	Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos (PEIPP) ...	46
3.1.1.	Estudio del proceso a escala menor	47
3.1.2.	Estudio del proceso a escala mínimamente aumentada	52
3.1.3.	Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento	62
3.1.4.	Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente	64
3.1.5.	Determinación de la planta física en la escala industrial	64
3.1.6.	Organización del escalamiento industrial logrado	69
4.	INGENIERÍA BÁSICA	70
4.1.	Cumplimiento de requerimientos generales del POAP – EI	70
4.1.1.	Formato de seguimiento de parámetros y documentación formal	70
4.1.2.	Formato de registro de producción y no conformidades	70
4.1.3.	Documento formal y detallado del POAP – EI	71
4.2.	Cumplimiento de requerimientos de automatización del proceso POAP – EI	71
4.2.1.	Cadena de valor	71
4.2.2.	Diagramas para documentación gráfica del proceso	72
4.2.3.	Organización del proceso mediante modelos ISA - S88.01	81
4.2.4.	Modelos de receta maestra y de control de ISA - S88.01	81
4.3.	Cumplimiento de requerimientos hardware del POAP – EI	82
5.	SIMULACIÓN DEL POAP – EI	83
5.1.	Simulación del POAP – EI	83
5.1.1.	Requerimientos para simulación	83
5.1.2.	Simulación de la planta en SuperPro Designer	83
5.2.	Validación del POAP – EI en SuperPro Designer	84
5.2.1.	Implementación de la planta piloto en SuperPro Designer	84
5.3.	Análisis de resultados	87
5.3.1.	Capacidad de producción	87
5.3.2.	Mano de obra	89
5.3.3.	Costo de potencia	90
5.3.4.	Diagramas de Gantt	91
5.3.5.	Costo materiales e insumos	94
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95
6.1.	Conclusiones	95
6.2.	Recomendaciones	96
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: PFD por etapas del POAP por el método de procesamiento en húmedo.	7
Figura 2: PFD por operaciones del ensilaje químico para la obtención de aceite crudo de pescado.	9
Figura 3: PFD por operaciones del ensilaje biológico para la obtención de aceite crudo de pescado.	10
Figura 4: post proceso de obtención del aceite crudo de pescado.	11
Figura 5: faenado de trucha arcoíris en edad de engorde.	14
Figura 6: muestra de vísceras de trucha arcoíris.	14
Figura 7: preparación del ensilado.	14
Figura 8: ensilado almacenado en el cuarto a 15 °C.	14
Figura 9: extracción del aceite crudo.	15
Figura 10: tanque plástico.	19
Figura 11: báscula de piso DYP 6012.	19
Figura 12: máscara antigás.	19
Figura 13: balanza de mesa KERN GAB-N.	19
Figura 14: probeta glassco.	19
Figura 15: espátula.	19
Figura 16: aire acondicionado.	19
Figura 17: cucharón de aluminio.	19
Figura 18: cubeta plástica.	19
Figura 19: centrífuga Z306.	20
Figura 20: frascos de vidrio Erlenmeyer.	20
Figura 21: rotaevaporador LABOROTA,	20
Figura 22: centrífuga refrigerada Z326-K.	20
Figura 23: montaje de destilación.	21
Figura 24: montaje de desodorización.	21
Figura 25: cadena de valor del POAP – LAB.	22
Figura 26: diagrama de flujo por operaciones del POAP – LAB.	25
Figura 27: diagrama de flujo del POAP – LAB, representación por operaciones y por acciones.	26
Figura 28: nivel de dificultad de las fases del POAP – LAB según esfuerzo físico.	34
Figura 29: nivel de dificultad de las fases del POAP – LAB según conocimiento.	34
Figura 30: nivel de dificultad de las fases del POAP – LAB según riesgo.	35
Figura 31: nivel de automatización mediante la relación entre la capacidad de: material, personal y equipos.	36
Figura 32: porcentaje del nivel de automatización general del POAP – LAB respecto a sus fases.	37
Figura 33: niveles de automatización para cada una de las operaciones del POAP – LAB. a) Operaciones del procedimiento de unidad: extraer aceite crudo. b) Operaciones del procedimiento de unidad: refinar el aceite crudo.	38
Figura 34: toma general del lote 3.	64
Figura 35: cadena de valor del POAP – El.	72

Figura 36: diagrama de flujo POAP – EI.	73
Figura 37: plano distribución de planta, tubería y cableado.	75
Figura 38: diagramas P&ID de los 3 equipos de la etapa de extracción de aceite crudo, POAP – EI, a) motobomba y cisterna, b) tanque de almacenamiento y c) separador centrífugo.....	77
Figura 39: diagramas P&ID de los 3 equipos de la etapa de refinación del aceite crudo, POAP – EI, a) motobomba, b) reactor y c) separador centrífugo.	78
Figura 40: diagrama P&ID del POAP – EI.....	79
Figura 41: diagrama mando y potencia de las motobombas POAP – EI.	80
Figura 42: ingreso de las materias primas a SuperPro Designer.	84
Figura 43: ingreso de las mezclas de material a SuperPro Designer.	85
Figura 44: configuración costos de materia prima en SuperPro Designer.....	85
Figura 45: ingreso del costo de potencia en SuperPro Designer.....	86
Figura 46: ingreso costo mano de obra en SuperPro Designer.....	86
Figura 47: esquema de simulación completo del POAP – EI en SuperPro Designer.	87
Figura 48: cantidad de aceite crudo de pescado obtenido en simulación con SuperPro Designer.	88
Figura 49: cantidad de aceite desgomado obtenido en simulación SuperPro Designer. ..	88
Figura 50: producción de aceite neutro en simulación con SuperPro Designer.....	88
Figura 51: producción de aceite decolorado en simulación con SuperPro Designer.	88
Figura 52: producción de aceite refinado para consumo humano obtenida en simulación con SuperPro Designer.....	89
Figura 53: valor por hora mano de obra obtenido en simulación con SuperPro Designer.	89
Figura 54: diagrama de demanda de mano de obra. a) operador, b) supervisor.	90
Figura 55: consumo de potencia del POAP – EI.	90
Figura 56: estimación de tiempos del POAP – EI en simulación con SuperPro Designer.	91
Figura 57: Gantt para la operación de preparado del ensilado del POAP – EI.	92
Figura 58: Gantt para la operación de extracción de aceite del ensilado del POAP – EI..	92
Figura 59: Gantt para la operación de desgomado del POAP – EI.	92
Figura 60: Gantt para la operación de neutralizado del POAP – EI.....	93
Figura 61: Gantt para la operación de decolorado del POAP – EI.	93
Figura 62: Gantt para la operación de desodorizado del POAP – EI.....	93
Figura 63: costo de insumos de proceso obtenidos en simulación con SuperPro Designer.	94

LISTADO DE TABLAS

Pág.

Tabla 1: pruebas para la caracterización fisicoquímicas del aceite refinado.	18
Tabla 2: listado de materias primas interactuantes en cada etapa del POAP – LAB.	23
Tabla 3: convenciones para la descripción del proceso.	27
Tabla 4: convenciones de los materiales e insumos que ingresan y salen a través de las operaciones.	27
Tabla 5: respuestas de dificultad en realización de las fases del POAP – LAB.	29
Tabla 6: nivel de dificultad promedio por criterio en la realización de las fases del POAP – LAB.	30
Tabla 7: nivel de dificultad promedio en la realización de las fases del POAP – LAB.	32
Tabla 8: nivel de automatización de las fases del POAP.	36
Tabla 9: respuestas sobre documentación del POAP.	41
Tabla 10: respuestas sobre necesidad de automatización en algunas fases de POAP. ..	42
Tabla 11: respuestas sobre mantenimiento de equipos del POAP.	43
Tabla 12: formato de seguimiento de parámetros del POAP – LAB.	47
Tabla 13: densidades de los insumos presentes en cada operación del POAP – LAB. ...	50
Tabla 14: variables interactuantes del POAP - EM.	53
Tabla 15: rendimiento obtenido de todos los insumos que interactúan en el POAP – EM.	54
Tabla 16: consumo energético de los equipos involucrado en el POAP – EM.	56
Tabla 17: modelo de receta maestra del POAP - EM.	57
Tabla 18: modelo de receta de control del POAP – EM.	59
Tabla 19: equipos principales del POAP – El.	65
Tabla 20: formato de producción y no conformidades del POAP – El.	71
Tabla 21: descripción conceptual por etapas del POAP – El.	74
Tabla 22: resumen de equipos e instrumentación necesaria para el escenario de automatización.	80
Tabla 23: relación entre SuperPro Designer y los modelos de proceso y procedimental del estándar ISA - 88.01.	84
Tabla 24: distribución de tiempos del POAP – El.	91

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han venido presentando diferentes alternativas para suplir la demanda del pescado y atenuar la captura excesiva, una de estas es la piscicultura donde cada vez más países se están apropiando de este tipo de cultivo debido a los beneficios que trae, tales como la protección de especies en vías de extinción por sobrepesca, equilibrio del medio ambiente, entre otras [1]. Sin embargo, el incremento en el uso de la piscicultura ha permitido el aumento en la cantidad de subproductos, los cuales no son aprovechados como el eviscerado¹, huesos, escamas, cabeza, aletas y cola de pescado. Por otro lado, en el departamento del Cauca específicamente en el municipio de Silvia, no se dispone de un plan de manejo para estos subproductos (10 toneladas/mes), por ende estos son arrojados al entorno como desechos generando proliferación de insectos, bacterias, hongos y malos olores, lo que se convierte en un foco potencial de enfermedades para los habitantes de la zonas (más de 300 familias de las comunidades indígenas y campesinas), en otras ocasiones estos son enterrados provocando lixiviados que aumentan el índice de contaminación del suelo y de las aguas subterráneas [2].

Para hacer frente a esta problemática, el grupo de investigación Aprovechamiento de Subproductos Agroindustriales, ASUBAGROIN de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA) de la Universidad del Cauca, ejecuta el proyecto de regalías ID VRI 3883 “Evaluación de un procedimiento para la refinación de aceite crudo extraído de ensilaje químico de los subproductos de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) provenientes del municipio de Silvia-Cauca”, en el cual se desarrolla una investigación con el fin de obtener aceite de pescado para consumo humano, enfocado a la industria alimentaria y farmacéutica, por el método de ensilaje químico mediante el aprovechamiento de los eviscerados de la trucha arcoíris, obtenidos por la asociación piscícola APROPESCA (Asociación productora y comercializadora de productos acuícolas y agrícolas de Silvia) localizada en el municipio de Silvia.

ASUBAGROIN ha logrado obtener aceite de pescado a nivel de laboratorio. Sin embargo, en este trabajo “*Diseño de un proceso de obtención de aceite de pescado a nivel industrial en el marco del proyecto de regalías ID VRI 3883 – SGR*” se hace una propuesta del diseño de la planta piloto de obtención de aceite de pescado. Para lograrlo, se realiza la descripción del proceso y los equipos a nivel de laboratorio, haciendo el diagrama de flujo y modelado de acuerdo con el estándar ISA - 88.01, se elaboran el diagnóstico y requerimientos para el proceso a nivel de laboratorio. Con esta información se realiza el diseño y modelado del proceso de obtención de aceite de pescado (POAP) a nivel industrial realizando el diagrama de flujo, los tres modelos propuestos por el estándar ISA - 88.01, diagramas P&ID y de lazo de control. Finalmente, se realiza una propuesta de equipos para el funcionamiento de la planta a escala mayor.

¹ Visceras de un animal muerto.

1. GENERALIDADES

En este capítulo se realiza una breve introducción de la industria pesquera profundizando en la piscicultura, abordando POAP y los insumos (materias primas) necesarios para la realización de este. Más adelante, se hace una descripción genérica del proceso de ensilaje de pescado y la refinación del aceite crudo, realizado en el Laboratorio de Biotecnología en la FCA de la Universidad del Cauca, así como la descripción de los equipos utilizados y por último se abordan los tres frentes de enfoque de este trabajo (proceso de extracción de aceite de pescado a nivel industrial, modelado de plantas piloto, validación de planta piloto).

1.1. Industria Pesquera

Siglos atrás, el hombre ha utilizado la pesca como recurso para satisfacer sus necesidades alimentarias, la cual ha ido creciendo a medida que se van creando nuevos instrumentos de captura más sofisticados y vehículos de transporte con mayor capacidad, lo que ha llevado a considerar a la pesca como una actividad productiva a gran escala. La producción pesquera mundial ha aumentado de forma constante en las últimas décadas, este notable aumento es debido al crecimiento demográfico, aumento de los ingresos y urbanización, además de la introducción de nuevas tecnologías a la actividad pesquera [3].

Los recursos naturales tienden a agotarse, por lo que es necesaria la búsqueda de nuevas alternativas que permitan un mejoramiento u optimización de la explotación de estos. Una de las alternativas que surge en pro del cuidado del medio ambiente sin afectar la industria pesquera y que se ha venido creciendo en las últimas décadas es la acuicultura [4]. Esta es una biotécnica que permite convertir ríos, lagunas y áreas costeras en cultivos de recursos acuáticos, aumentando la disponibilidad y fácil acceso a las fuentes de alimento.

La acuicultura, es la actividad que permite obtener producción por medio del cultivo de organismos acuáticos. En un sentido más amplio es la obtención, crecimiento y comercialización de organismos de aguas dulces, salobres o saladas útiles para el consumo. Estas prácticas se inician a partir de distintas fases del ciclo biológico dependiendo del tipo de cultivo. En los cultivos acuícolas, el desarrollo de las especies se lleva a cabo en ambientes naturales poco modificados o en extensiones acuáticas simplemente acotadas, en donde la producción natural y la calidad de las aguas determina su éxito [4].

De acuerdo a lo anterior, cada vez son más los países que hacen uso de estas técnicas de cultivo. Esto debido a los beneficios que aporta tales como: la protección de especies en vías de extinción, control de sobrepesca, entre otros. Además, estas prácticas generan una buena fuente de empleo y soportan la economía de los países ya que suplen la mayor demanda en la producción acuícola.

1.1.1. Tipos de acuicultura

Las actividades de cultivo acuático presentan varias clasificaciones las cuales, dependen del medio en que se desarrolla (acuicultura marina, continental y de aguas salobres), manejo y cuidado (acuicultura extensiva, semi-intensiva, intensiva, completa o integral, incompleta o parcial), el ciclo de vida de la especie (de ciclo completo, de ciclo incompleto), nivel de producción (comercial, subsistencia) y número de especies (monocultivo, policultivo, cultivo asociado) [5].

Abordando la acuicultura según el medio en que se desarrolla, específicamente en la continental, hay diferentes posibilidades de agrupar y definir los diversos tipos de producción acuícola de los cuales se identifican 4 métodos o sistemas de producción intensivos y que son aptos para la acuicultura [6]:

- Estanques de tierra (sin flujo de agua)
- Sistemas en circuito abierto (de flujo constante)
- Sistemas de recirculación SAR (en circuito cerrado)
- Crianza en jaulas.

1.1.2. Piscicultura

Dentro de la acuicultura, existe un tipo de cultivo denominado piscicultura, enfocada específicamente a la producción y cría controlada de peces en cuerpos de agua (estanques, lagunas, lagos, embalses, etc.), con la finalidad de lograr excelentes resultados productivos, económicos, nutricionales y reproductivos [7]. En la piscicultura como en todo proceso, existen los denominados eslabones de proceso que cumplen con funciones específicas, con el fin de obtener productos o subproductos finales. En las actividades de piscicultura se han identificado cinco eslabones: insumos, laboratorios de producción de alevinos, fincas de cultivos, plantas de proceso y comercializadores. A continuación, se abordarán de manera más específica los eslabones de insumos y plantas de proceso que son de interés para el desarrollo del presente trabajo.

Insumos para la piscicultura

En las actividades de Piscicultura se requiere de diversos insumos los cuales están contenidos en tres grandes grupos [8]:

- I. **Desinfectantes y fertilizantes:** estos se deben utilizar cada vez que se va a dar comienzo a un nuevo ciclo de producción, donde siguiendo las buenas prácticas de manufactura, se debe realizar un desinfectado de los tanques de cultivo con productos como la Cal. También, se deben utilizar productos fertilizantes inorgánicos u orgánicos como: Potasio, Fósforo y Nitrógeno, para la producción adecuada de micro-algas y fitoplancton.
- II. **Alimento:** dado que esta actividad es el cultivo de especies acuáticas en ambiente controlado (cautiverio), es necesario llevar una dieta nutricional según las características fisiológicas de cada especie de manera artificial.

- III. **Empaques y hielo:** estos son insumos que se utilizan en el proceso de comercialización, algunos de los acuicultores a baja escala (pequeña y mediana industria) utilizan bolsas plásticas y sacos de polipropileno para empacar sus productos (pescado entero, eviscerado y descamado). Algunas industrias utilizan el hielo para conservar frescos los productos e incluso hay plantas de procesamiento que cuentan con cuartos fríos.

1.1.3. Acuicultura en Colombia

Colombia es un país tropical con temperaturas estables, posee todos los pisos térmicos y una vasta red fluvial que recorre todo el país. Tiene una superficie continental de 1.441,748 km² y posee costas sobre el océano Pacífico (1300 km) y el océano Atlántico (1600 km). Cuenta con una gran cantidad de cuencas hidrográficas que lo han posicionado en un lugar destacado en recursos hídricos a nivel mundial. Posee una gran diversidad de peces del planeta y una alta biodiversidad de organismos hidrobiológicos, al igual que aguas dulces, salobres y marinas, y terrenos aptos que le otorgan un potencial para el desarrollo de la acuicultura. La acuicultura marina y continental, presentan un crecimiento entre los años de 1985 hasta el 2002 de 7,603 %, mostrándose como una actividad económica promisorio y altamente contribuyente hacia el futuro de la producción total nacional pesquera y de la seguridad alimentaria [9].

La acuicultura en Colombia nace en la década de los cuarenta, crecimiento que se dio a paso lento debido a la falta de infraestructura y desarrollo tecnológico, a partir de la década de los sesenta gracias a incentivos otorgados por organismos internacionales se da la creación del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, lo que llevó al fortalecimiento de esta actividad. A partir de 1990 con la divulgación de la Ley 13, su Decreto Reglamentario 2256 de 1991 y la Ley 101 de 1993, se inicia un nuevo enfoque con miras al desarrollo de la pesca. El Departamento Nacional de Planeación al concluir la época de los noventa hace realidad el objetivo de generación de divisas que, a la par con la seguridad alimentaria, se plantea como el horizonte para la acuicultura en los diferentes planes de desarrollo, en la época de los noventa había más de cincuenta granjas comerciales que producían tilapia localizadas en los departamentos de: Huila, Tolima, Caldas, Meta, Atlántico y Valle; lo que llevó a la consolidación de paquetes tecnológicos, costos y comercialización internacional de la tilapia [10].

1.1.4. Piscicultura en Colombia

La actividad piscícola tuvo un crecimiento acelerado entre la década de los ochenta y la primera década del siglo XXI, este se ha desarrollado de una forma desordenada, descoordinada y sin una planificación adecuada, razón por la cual los acuicultores han tenido problemas de orden técnico, económico y ambiental [1].

La piscicultura en Colombia, se inició con la introducción de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), con el fin de repoblar las lagunas de aguas frías de la región Andina con una especie de mayor valor económico que las nativas. Posteriormente, a finales de la década de los setenta se introdujo la tilapia (*Oreochromis sp*), y a principios de la década de los ochenta se iniciaron trabajos con algunas especies nativas,

principalmente con la cachama blanca (*Piaractus brachypomus*) y negra (*Colossoma macropomum*), con el objetivo de fomentar actividades encaminadas a diversificar las fuentes de ingreso de los pequeños productores campesinos [1].

La acuicultura colombiana, se encuentra representada por la producción de tilapia, cachama y trucha, lo cual ha tenido un desarrollo importante durante los últimos años (crecimiento promedio anual de 13 %), donde los principales focos de la actividad piscícola se encuentran en los departamentos: Huila (44,46 %), Meta (14,07 %), Antioquia (5,97 %), Tolima (4,87 %), Cundinamarca (3,08 %) y Boyacá (2,22 %); esto llevando a una producción a nivel nacional de 103.198 toneladas para el año 2015 [11].

Relación con el sector: en Colombia algunas de las políticas económicas definidas por el gobierno central, están dirigidas a apoyar al sector agrícola, aportando ayudas económicas, asesorías y capacitaciones que incentivan diferentes proyectos a pequeña escala, favoreciendo el crecimiento de la economía del país y generando empleo en el sector. En el año 2007 con la expedición de la Ley 1152 de 2007 y su Decreto Reglamentario 4904 del mismo año, el Instituto Colombiano de Agricultura (ICA) asumió las funciones de administrar los recursos pesqueros del país, así como la investigación y ordenación de la pesca y la acuicultura en Colombia, con esta ley los cultivadores acuícolas se ven beneficiados y se promueve el crecimiento de la misma [12].

1.1.5. Piscicultura en el Cauca

A finales de los años setenta en el departamento del Cauca se empezaron a explotar los recursos hídricos montando centros piscícolas. Desde entonces, se ha notado un gran potencial de producción piscícola gracias a la riqueza hídrica con que se cuenta, aunque los aportes no son tan representativos en la producción nacional. Se han llevado a cabo cultivos que permiten abastecer las diferentes regiones del departamento; la actividad piscícola se desarrolla en lagos artificiales, ríos o en embalses, como es el caso de la Salvajina (Morales - Cauca), en donde se cultivan peces en módulos flotantes (jaulas) a pequeña escala. Hoy, solo en Silvia (Departamento del Cauca), hay 160 unidades productivas de trucha. Sin embargo, las plantas de proceso están dejando desechos, por lo anterior se hace prioritario atender de forma preventiva el manejo de estos [13].

Tendencia: la actividad piscícola en el departamento del Cauca está en auge, por cuanto es una actividad agropecuaria con altos ingresos, en el que trabaja el núcleo familiar. El sector piscícola en el municipio de Silvia genera el 13 % de los empleos actuales [12].

1.2. Aceite de pescado

Actualmente, el aceite de pescado es un producto a nivel industrial de alto valor nutricional por su contenido de ácidos grasos omega-3 de cadena larga, dentro de los cuales se encuentran: Eicosapentaenoico (EPA), Docosapentaenoico (DPA) y Docosaheptaenoico (DHA) [14]. Hoy en día este producto cuenta con una alta demanda en el mercado, debido a que el EPA y el DHA presentan propiedades profilácticas y terapéuticas [15].

Inicialmente el aceite de pescado era derivado de la fabricación de harina de pescado, un valioso producto de amplia utilización en la industria para la nutrición animal [16]. La harina de pescado siempre fue de interés comercial dado su alto contenido proteico; sin embargo, el aceite de pescado fue un desecho de las primeras etapas en la obtención de esta y en algunas ocasiones, se utilizaba como combustible en las calderas de generación de vapor de las plantas de harina [17].

Desde los años sesenta, la industria comienza a utilizar dos tipos de aceite de pescado (hidrogenado y no hidrogenado), ya que presentaban amplias aplicaciones industriales, bajo precio y bondades tecnológicas (secante, reactividad química entre otros) [18]. Además, las propiedades nutritivas de los aceites se empezaron a considerar como elementos indispensables en el régimen de alimentación de hombres y animales, ya que sirve como complemento para la dieta con un alto contenido energético, debido a que estos contienen vitaminas solubles A, D y E. Los aceites de pescado tienen múltiples aplicaciones, se utilizan principalmente en la industria de la margarina, grasas de pastelería y aceites comestibles; así mismo, dada la diversidad de sus propiedades los aceites de pescado resultan útiles para elaborar barnices y aceites secantes. Actualmente, se emplean sus ácidos grasos de tipo omega en farmacia, medicina y con fines de investigación científica [19].

El aceite de pescado presenta una composición química compleja que depende de diversos factores, en primer lugar, la estructura de ácidos grasos, los cuales varían considerablemente dependiendo de la especie de pescado y en cierta medida de la composición del alimento y, en segundo lugar, suele depender de la época del año. Todo ello influye en las propiedades tanto para aplicaciones comestibles como en las técnicas para su elaboración. Otra de las características de los aceites de pescado es que estos se prestan a una fácil oxidación y se alteran hasta llegar a un estado de rancidez durante la extracción y el almacenamiento; la oxidación se acelera debido al calor, a la luz y a la presencia de catalizadores; por otro lado esta se contrarresta con la administración de antioxidantes o almacenando el aceite en lugares oscuros [20].

1.2.1. Extracción de aceite de pescado

En la literatura [21] - [30], se encuentran diversos estudios enfocados en el desempeño de los métodos de extracción de aceite de pescado, empleados en diferentes partes del mundo. Por tal motivo, es importante presentar una comparación de los resultados de estas investigaciones y el aporte que hacen a la industria pesquera.

En relación a la estabilidad oxidativa y la medición del índice de calidad de ácidos grasos libres del aceite y a fin de dar como resultado la mejora de la calidad en términos de sabor, color, olor, vida útil y valor de mercado, los cuales son adecuados para aplicaciones en la industria farmacéutica y alimentaria [21]. Por otro lado, las demandas en estas tecnologías de procesamiento para extraer y purificar el aceite de pescado son capaces de: proporcionar altos rendimientos, reducen al mínimo la pérdida de nutrientes y proporcionan un aceite de alta calidad. Sin embargo, para la industria sigue siendo un reto la estabilización de los aceites de pescado nutracéuticos [22].

Algunos de los métodos para la extracción bajo condiciones de calidad son: en primer lugar, la extracción por fluidos supercríticos (SFE, por sus siglas en inglés, *Supercritical Fluid Extraction*) del cual se han desarrollado diversos estudios tanto de aplicabilidad, como se aprecia en el estudio realizado en 2013, el cual utiliza este método para obtener una concentración de ácidos grasos, con el fin de determinar las necesidades alimentarias, además de servir como una fuente en la dieta humana [23]. Por otro lado, el estudio del 2012 presenta que las variables de presión, temperatura, caudal, tiempo de remojo son términos lineales, y el sistema es muy sensible a cambios mínimos de estas [24], de igual manera en 2008 se concluye que la humedad afecta negativamente en el rendimiento del proceso [23]. En contraste, el estudio del 2012 determinó que los términos cuadráticos del caudal y tiempo de remojo son muy significativos en el proceso y la reducción de partículas no parece tener una gran influencia en el rendimiento de extracción [24], cabe resaltar que el tipo de subproducto y su pre-tratamiento es importante para la calidad en el proceso de extracción del aceite. Aunque esto sugiere que el éxito del método SFE, sea sumamente dependiente de la calidad y la frescura de la materia prima [25]. En el 2012 se demostró que este proceso de extracción es importante para obtener la mejor calidad de aceite con respecto a la oxidación de lípidos, el contenido de los contaminantes y las propiedades sensoriales. Además, no sólo puede afectar el rendimiento sino también la calidad de la proteína o harina de pescado obtenido [25], más adelante en el 2013 un estudio determina bajo pruebas preliminares que es recomendable realizarse una prueba microbiológica a las materias primas, ya que estas están destinadas al consumo humano y deben estar bajas en la carga microbiana evaluando las coliformes fecales totales y las unidades formadoras de colonias; además, para la extracción por SFE se deben considerar las variables de proceso de temperatura y presión para realizar la extracción y obtener un buen rendimiento [26]. No obstante, en 2010 se presenta un estudio en el cual se recomienda que para la extracción por fluidos supercríticos, los métodos de remojo son los más eficientes, ya que no implican agentes orgánicos ni arrastre de solventes [27]. Finalmente, a pesar de que implica mayores costos de inversión, el método SFE presenta algunas ventajas sobre otros procesos de extracción, tales como: extracción en frío, reducción húmeda o extracción enzimática [25].

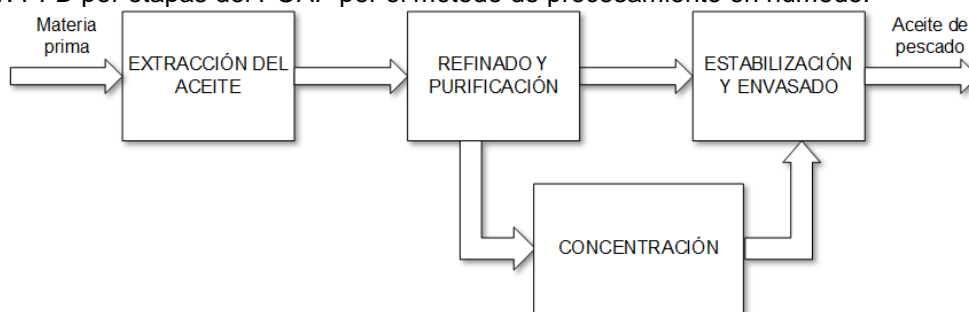
En segundo lugar, se tiene el método por temperatura, donde se resalta que el contenido de humedad de los peces es un reflejo de su contenido de aceite, demostrándose en el 2010 que el rendimiento en el proceso es mayor con un contenido alto de humedad, ya que de esta manera se produce gran cantidad de aceite [28]. Por otra parte, en el 2013 se indica que el tiempo de almacenamiento, la congelación/descongelación de la muestra y el tiempo de extracción, causan un efecto negativo en la calidad oxidativa del aceite [25]. Así mismo, los resultados obtenidos en la investigación del 2014, mostraron que los factores de tratamiento afectan a la temperatura, obteniendo diferencias significativas que logran afectar el porcentaje de rendimiento, mientras que la relación en la diferencia de tiempo del disolvente y la extracción no presentan un porcentaje significativo de afectación.

En tercer lugar, se tienen los procesos de extracción por hidrólisis² diferenciada, en 2015 un estudio demostró resultados satisfactorios de este método, como el escenario principal para la obtención de los ésteres de ácidos grasos después de varios análisis fisicoquímicos [29], y los métodos estudiados en 2009 (Bligh y Dyer, reducción por vía húmeda y acetona), en los cuales se compara su eficiencia respecto a calidad, índice de peróxidos y rendimiento de proceso, arrojando como resultado que el método de Bligh y Dyer presenta mejor rendimiento [30].

El aceite de pescado se produce tradicionalmente mediante el método de procesamiento en húmedo, este consta de 4 etapas: extracción del aceite, refinado y purificación, concentración y finalmente estabilización y envasado. A continuación (ver Figura 1), se muestra el diagrama de flujo (PFD, por sus siglas en inglés) para la obtención de aceite por este método [31]:

- **Extracción del aceite:** en esta se hace uso de una cocción que permite la extracción del aceite desde los tejidos de una manera más fácil. Posteriormente, se suelen emplear operaciones físicas como prensado y centrifugación.
- **Refinado y purificación:** el objetivo de estas operaciones es permitir la eliminación de componentes no deseados o contaminantes para mejorar la calidad organoléptica del aceite. Entre estas fases de proceso se tiene desgomado, desodorización, winterización, absorción y destilación.
- **Concentración:** esta es una operación que se presenta de manera opcional la cual tiene como objetivo generar un producto de mayor calidad. Generalmente, se realiza por destilación a vacío y previamente, los ácidos grasos son transformados en ésteres etílicos, para así poder trabajar con temperaturas menos extremas.
- **Estabilización y envasado:** dado que los ácidos grasos EPA y DHA se oxidan fácilmente, se deben adoptar medidas que logren evitar el desarrollo oxidativo, como es: adición de antioxidantes, envasado mediante una atmósfera protectora, encapsulamiento en cubiertas que lo aislen del oxígeno, entre otras.

Figura 1: PFD por etapas del POAP por el método de procesamiento en húmedo.



Fuente: elaboración propia, mayo de 2016.

² Es una reacción química entre una molécula de agua y otra molécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar parte de otra especie química.

Se debe tener en cuenta que el aceite destinado al consumo humano tiene que ser procesado después de las operaciones de refinado y purificación, una vez concluidos todas las operaciones del proceso para eliminar las impurezas y componentes no deseados restantes [32].

1.2.2. Ensilaje de pescado

Dado el desarrollo artesanal e industrial pesquero, se ha venido presentando un aumento en la producción de residuos de pescado, los cuales están alrededor de los 29 millones de toneladas a nivel mundial [33], generando desperdicio de productos ricos en ácidos proteicos de alta calidad, para lo cual se hace uso de técnicas de tratamiento obteniendo diversos productos: harina de pescado, aceite de pescado, ensilado y fertilizantes, aprovechando así los residuos de la industria pesquera.

El aceite recuperado por ensilaje de pescado, es una de las alternativas de extracción que más contribuye a la producción de este, debido a que el proceso para la obtención de aceite del ensilado es práctico, sencillo y económico, no requiere de procedimientos, equipos sofisticados y/o costosos, como sucede en el caso de la elaboración de harina de pescado. Además, es una alternativa de bajo costo comparada con las técnicas convencionales de extracción de aceite en la industria acuícola [34]. El ensilado de pescado es un producto líquido pastoso derivado del pescado o de los residuos de este que se obtiene por agregación de sustancias [35]. Por otro lado, el ensilado de pescado generalmente se realiza haciendo uso de los residuos de pescado los cuales se conservan utilizando dos tipos de ácidos (orgánicos e inorgánicos) o mediante un método denominado fermentación láctica³. A pesar de que este método se desarrolló hace tiempo no ha sido posible a nivel comercial, dado los costos elevados de logística y sustitución. Por otra parte, este proceso desarrolla una hidrólisis en las proteínas necesarias para la producción de péptidos⁴ y aminoácidos⁵, ya que al agregar estos ácidos no se pierde el valor nutricional [36].

Existen actualmente dos tipos de ensilaje de pescado en la industria, uno de ellos es el ensilaje químico (adición de ácidos a la mezcla) y el otro es el ensilaje biológico (utilización de microorganismos capaces de producir sustancias ácidas).

Ensilaje químico

El proceso de ensilaje químico se realiza mediante la adición de ácidos de tipo mineral y/u orgánico a las materias primas (pescado o residuos de pescado), los ácidos empleados para la realización de este proceso son: Fórmico, sulfúrico, clorhídrico, propionico o mezclas de estos como: acético, Fórmico y Fosfórico; Fórmico y sulfúrico; propionico y sulfúrico. Para lograr óptimos resultados, es necesario triturar o moler la materia prima hasta que quede fina, luego se adiciona el o los ácidos a la mezcla y se incorporan

³ Es una ruta metabólica anaeróbica que ocurre en el citosol de la célula, en la cual se oxida parcialmente la glucosa para obtener energía y donde el producto de desecho es el ácido láctico.

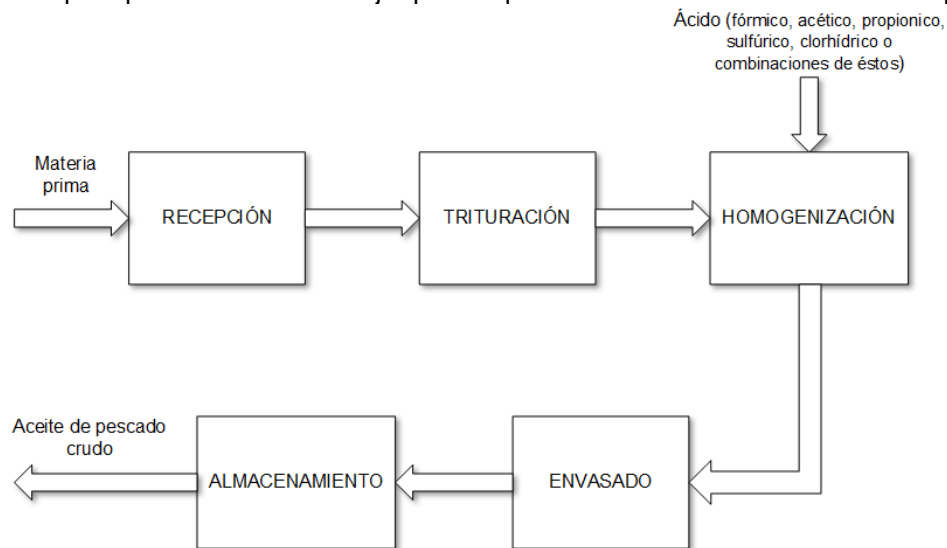
⁴ Son moléculas formadas por la unión de dos o más aminoácidos

⁵ Son compuestos orgánicos que se combinan para formar proteínas.

completamente, con el fin de lograr que las enzimas puedan asimilar el ácido en las condiciones favorables que el medio provee [35].

La preparación del ensilaje químico requiere equipos necesarios para realizar el proceso y cinco operaciones: triturado de vísceras y huesos, adicionamiento del ácido (bien sea, Fórmico, acético, propionico, sulfúrico, clorhídrico o combinaciones de estos) al material molido, mezclado del material molido con los ácidos (homogenización), envasado en recipientes que eviten el contacto del producto con oxígeno y finalmente se realiza el almacenamiento. A continuación, se presentan en el diagrama de flujo realizado por operaciones de proceso (ver Figura 2).

Figura 2: PFD por operaciones del ensilaje químico para la obtención de aceite crudo de pescado.



Fuente: elaboración propia, mayo de 2016.

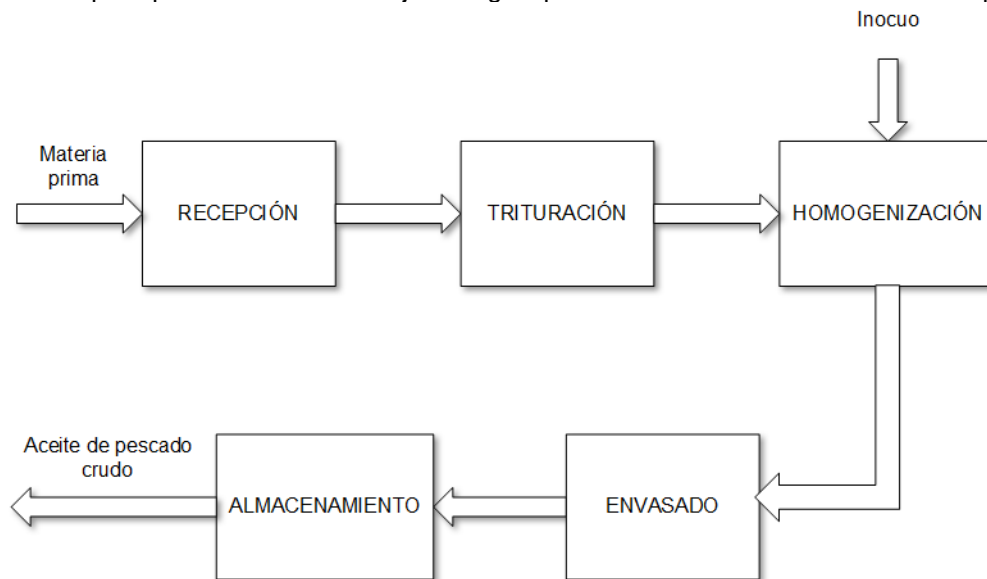
Ensilaje biológico

La importancia del ensilaje biológico está en que se formula a bajo costo y con alto nivel nutricional para el consumo humano y/o animal, para este proceso se utiliza un fermento biológico con base a vegetales ricos en bacterias lácticas (harinas de maíz, avena, cebada, malteada, arroz, yuca, azúcar, melaza, entre otras) las cuales fermentan los azúcares y así producen ácido láctico. Como consecuencia de esta reacción se presenta preservación de los residuos de pescado evitándose el deterioro y produciéndose la hidrólisis parcial de las proteínas, generando que el ensilado biológico de residuos de pescado presente un elevado valor nutricional [36].

El pH es una de las variables de proceso con mayor importancia, ya que debe ser controlada durante toda la operación de extracción y se debe tratar con mayor cuidado al momento de almacenar el ensilado, dado que refleja el desarrollo, la calidad y manifiesta cualquier cambio que pueda afectar el producto (aceite de pescado). El deterioro del ensilado de pescado, es detectado debido a los incrementos en la variable de proceso temperatura que resultan del metabolismo de carbohidratos residuales y productos de fermentación por parte de las bacterias aerobias, hongos y levaduras [37].

El ensilaje biológico está determinado por cinco operaciones: recepción de los insumos, triturado de vísceras y huesos, mezclado del material con el inocuo (homogenización), envasado y finalmente almacenamiento. A continuación, se presentan en el diagrama de flujo realizado por operaciones de proceso (ver Figura 3).

Figura 3: PFD por operaciones del ensilaje biológico para la obtención de aceite crudo de pescado.



Fuente: elaboración propia, mayo de 2016.

1.2.3. Refinación del aceite crudo

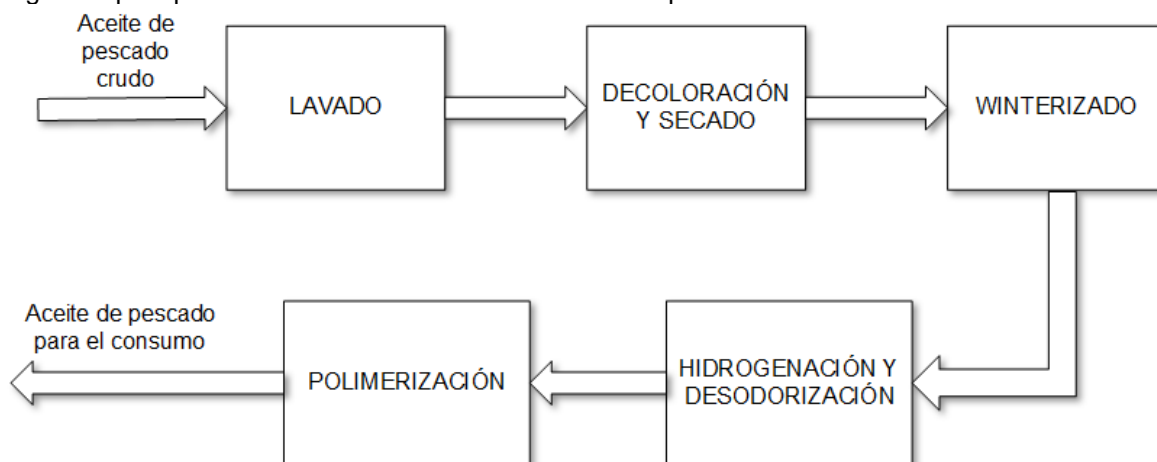
Dado que el aceite de pescado es un compuesto conformado básicamente por ácidos grasos saturados de Hidrógeno y poliinsaturados (tienen la capacidad de captar oxígeno a temperatura ambiente), este producto presenta alta estabilidad para oxidarse y a medida que se satura comienza a producir el olor típico de pescado cuando está comenzando a perder sus propiedades. Por ello, el aceite de pescado no es transformado tan simplemente en un producto comestible desodorizado estable, puesto que requiere de un proceso más complicado que el de los vegetales (hasta lograr su desodorización), debido a la constitución de sus ácidos grasos poliinsaturados por lo que demanda de métodos más sofisticados [38].

El aceite de pescado recién procesado se denomina aceite crudo, por tanto, para mejorar su valor se requiere llevarlo a una etapa de refinación compuesta por varias operaciones (ver Figura 4) que tiene por finalidad eliminar las principales impurezas, ácidos grasos libres y ciertos colorantes [20], las cuales se verán en detalle a continuación:

- **Lavado:** para eliminar el jabón en suspensión y disolución, es necesario lavar el aceite crudo con agua caliente, se deben tomar ciertas precauciones para evitar la emulsión del aceite con el agua, por lo cual un tipo de lavado de acción suave prolongado da buenos resultados.

- **Decoloración y secado:** la decoloración se efectúa por medio de tierras activadas, estas tierras son separadas por filtración a través de filtros prensas o filtros cerrados horizontales; con el fin de evitar la oxidación del aceite. El secado a altas temperaturas se hace al vacío, lo cual permite la eliminación total de la humedad proveniente del lavado.
- **Winterizado⁶:** Se trata de un enfriamiento lento del aceite que va de 5° a 10 °C, a estas temperaturas se forman correctamente los cristales de grasa que al filtrar queda la fracción sólida (ácidos grasos saturados sólidos) con un índice de Yodo bastante bajo, técnica que no es posible hacer con el aceite crudo.
- **Hidrogenación y desodorización:** se usan para evitar la oxidación del aceite fijando Hidrógeno sobre las moléculas de los ácidos grasos, acción que debe ser selectiva para el caso del aceite de pescado con el objeto de conseguir grasas para usos especiales y aceites comestibles.
- **Polimerización:** los aceites de pescado refinados, winterizados y desodorizados son útiles para usos industriales cuando se les aplica la polimerización, en donde gracias a un tratamiento térmico de altas temperaturas al vacío: se aumenta la viscosidad del aceite por reducción de la insaturación, el olor típico desaparece y el aceite se estabiliza (esta etapa del proceso en algunos países no se utiliza en aceites para consumo humano).

Figura 4: post proceso de obtención del aceite crudo de pescado.



Fuente: elaboración propia, mayo de 2016.

⁶ Es un proceso en el que se eliminan las grasas sólidas de aceites líquidos comestibles mediante el enfriamiento.

1.3. Plantas para la obtención de aceite de pescado

Uno de los temas importantes a tratar en este proyecto son las plantas piloto, donde se evaluaron las características funcionales y los parámetros de los equipos que permiten un buen rendimiento en el proceso de extracción de aceite.

Los resultados obtenidos por el estudio del 2010 realizado a una planta piloto para obtención de aceite por el método de temperatura, por lo cual se analizó la eficiencia operativa y la calidad del producto, demostrando que en este proceso, la calidad del producto solo se vio influenciada por los efectos de interacción de la velocidad y no por los efectos en las variaciones de la temperatura [39]; en 2014, se presentaron resultados favorables en los procesos de extracción a bajas temperaturas, en el cual se evaluaron los principales parámetros como son los solventes para alimentar la relación de flujo, temperatura y presión [40]. Por otro lado, en el 2009 se llevó a cabo un estudio de la planta de obtención de aceite por temperatura en estado estacionario, a una temperatura controlada logrando así un alto rendimiento [41]; para este mismo año, se realizó un estudio de eficiencia de una planta de extracción por destilación de vapor, para lo cual se planteó un enfoque de identificación del sistema obteniendo como resultado un modelo adecuado que permite describir la dinámica completa del proceso [42]. En el 2015, se presentó un estudio de una planta piloto de gran escala para extracción por el método de disolventes, se realizaron dos procesos de separación consecutivos que son cristalización fraccionada y evaporación, de los cuales se observó que el rendimiento en este proceso requería ajustes de diseño para aumentar la eficiencia de extracción, ya que el porcentaje de rendimiento del aceite se encontró afectado por la presión [43].

1.4. Simulación del POAP

El objetivo de la simulación, es determinar las condiciones óptimas de operación y especificaciones de los diferentes equipos que permitieran obtener un producto que cumpliera las especificaciones de calidad establecidas actualmente en normas internacionales.

Dada la necesidad de cumplir con parámetros y realizar ajustes a los diseños de las plantas piloto antes de su implementación, diversos estudios se han realizado con el fin de obtener las mejores condiciones operativas para diversas situaciones de operación. De este modo, en el 2001 se presenta un estudio realizado a una planta de extracción de aceite en la cual se consideraron una amplia gama de parámetros de funcionamiento, se operaron los balances de masa con el objetivo de encontrar los valores de ajuste más óptimos [44]. Por otro lado, en el 2010 se estudia el método de extracción supercrítica para obtención de aceite, en el que se evaluó la viabilidad económica del proyecto y se analizaron los costos tecnológicos para una planta piloto diseñada con base a la disponibilidad de la región [45]. Más adelante en el 2016, se presenta una propuesta de modelado matemático a fin de comparar la eficiencia de los procesos de extracción de aceite de una planta piloto arrojando resultados acordes a las condiciones investigadas [46].

Las secciones 1.2.1, 1.3 y 1.4 se realizaron teniendo en cuenta la metodología del mapeo sistemático que se encuentra soportada en el anexo A (mapeo sistemático).

1.5. Descripción del POAP y los equipos utilizados en el Laboratorio de Biotecnología de la FCA de la Universidad del Cauca

A continuación, se realiza una descripción del POAP – LAB⁷ el cual fue desarrollado en dos etapas por los investigadores Jhon Edison Bucheli, Alan Fernando Muñoz, Mónica Alejandra Díaz, Milton Fernando Cautín y Rocío Bonilla Méndez del grupo de investigación ASUBAGROIN en el Laboratorio de Biotecnología en octubre de 2015 ubicado en la FCA de la Universidad del Cauca y los equipos que se emplearon para llevar a cabo este proceso [47].

1.5.1. Descripción del POAP – LAB

La obtención de aceite a partir de subproductos de eviscerado de trucha realizado por el grupo de investigación, consistió en la separación de la fase lipídica mediante la aplicación de un proceso de ensilaje químico con ácido Fórmico a fin de reducir el pH (variable de proceso), inhibiendo el crecimiento de microorganismos contaminantes y favoreciendo la actividad de proteasas que permiten la liberación del aceite y la separación de la fracción proteica.

A continuación, se aborda una descripción referente a la obtención de la materia prima y al almacenamiento de la misma, no obstante, estas dos operaciones no se incluyen dentro del modelamiento.

Obtención de la materia prima

Para esta operación, APROPESCA suministró a los investigadores el faenado⁸ de trucha arcoíris (ver Figura 5). La recolección se llevó a cabo en la estación piscícola Siberia en el municipio de Silvia, departamento del Cauca, donde se recolectaron 80 kg de vísceras (ver Figura 6) obtenidas en una jornada de beneficio de animales en edad de engorde con pesos entre 350 y 400 g.

Almacenamiento de la materia prima

La muestra se depositó en tanques plásticos cerrados herméticamente con 80 kg del eviscerado de pescado y se trasladaron con refrigeración (temperatura de refrigeración 15 °C) hasta las instalaciones de la FCA de la Universidad del Cauca para su procesamiento.

⁷ POAP a nivel de laboratorio.

⁸ Matar un animal para consumo humano.

Figura 6: muestra de vísceras de trucha arcoíris



Fuente: tomadas de [47], junio de 2016.

El POAP – LAB se encuentra dividido en dos etapas de proceso: extracción de aceite crudo y refinación del aceite crudo.

Para esta etapa de proceso el grupo de investigación realizó dos operaciones: preparación del ensilado químico y extracción del aceite del ensilado, las cuales se describen a continuación:

Se procesaron 53 kg de vísceras de forma aleatoria repartidas en dos tanques plásticos (ver Figura 7) con capacidad de 35 kg, se adicionaron 2,5 % de ácido Fórmico (grado analítico marca Baker Analyzed con una pureza del 99 %) respecto al peso, luego se adicionaron 1000 ppm de antioxidante BHT (Butilhidroxitolueno, grado comercial marca Protoquímica), y se mezcló hasta que los componentes quedaron homogéneos, finalmente se cerraron los tanques herméticamente y se almacenaron en un cuarto con ambiente controlado para llevar la variable temperatura a un valor promedio de 15 °C durante 6 días (ver Figura 8).



Fuente: tomada de [47], junio de 2016



Fuente: elaboración propia, junio de 2016.

Inicialmente se destaparon los tanques (una vez pasados los 6 días de hidrólisis) de ahí el aceite se extrajo del ensilado por decantación con ayuda de un cucharón y una cubeta para depositar el aceite retirado. Se extrajo a la temperatura de almacenamiento para su

posterior centrifugación a 4500 rpm durante 10 minutos, con el fin de separar el hidrolizado del aceite, del cual es útil el 25 % de la masa total que son aproximadamente 15 litros de aceite crudo (ver Figura 9).

Figura 9: extracción del aceite crudo.



Fuente: tomada de [47], junio de 2016.

Etapas 2: refinación del aceite crudo

Para esta etapa de proceso el grupo de investigación realizó siete operaciones: desgomado del aceite crudo, neutralizado del aceite desgomado, lavado del aceite neutralizado, secado del aceite lavado, decolorado del aceite secado, winterizado del aceite decolorado y desodorizado del aceite winterizado, las cuales se describen a continuación:

Operación 1: desgomado

En esta operación el grupo de investigación utilizó ácido Fosfórico (H_3PO_4), se trabajó con muestras de 100 g de aceite pesadas en frascos de vidrio esmerilados de 250 mL (comúnmente conocidos como Matraz de Erlenmeyer), a las cuales se les adicionó entre 0,5 - 1 % del ácido (85 %) en relación a la masa del aceite. Los frascos de vidrio se conectaron a un rotaevaporador (ver Figura 21) con una presión de vacío de 450 mmHg, 80 °C y 210 rpm durante 30 minutos. Este material fue centrifugado durante 20 minutos a 4500 rpm para separar el aceite.

Operación 2: neutralizado

Para esta se trabajó con muestras de 100 g de aceite desgomado pesadas en frascos de vidrio esmerilados de 250 mL a las cuales se les adicionó 0,5 % de Hidróxido de Potasio (KOH) al 20 % (p/p) en relación a los grados de acidez después del desgomado. Los frascos de vidrio se conectaron a un rotaevaporador con una presión de vacío de 450 mmHg, 40 °C y 210 rpm durante 20 minutos. Este material fue centrifugado durante 15 minutos a 4500 rpm para separar el aceite del jabón producido.

Operación 3: lavado

Los investigadores aplicaron la metodología de Moráis, en la cual el lavado consiste en que al aceite neutralizado se le adiciona en una probeta 10 % de agua a 95 °C, respecto a la masa del aceite; luego se llevó al rotaevaporador manteniendo el aceite a 50 °C con agitación de 210 rpm y presión de vacío de 500 mmHg durante 10 minutos.

Posteriormente, se realizó la centrifugación a 4500 rpm por 20 minutos para retirar el agua de lavado.

Operación 4: secado

Para el secado, el aceite es calentado en un rotaevaporador a una temperatura entre 90 y 95 °C durante 20 minutos, con una presión de vacío de 500 mmHg y una velocidad de agitación de 210 rpm, esto se hace con el fin de extraer la mayor cantidad de agua aplicada en la operación de lavado.

Operación 5: decolorado

En esta operación se evaluó la cantidad de absorbente (1 y 5 %) y el tiempo de absorción (20 y 40 min) mediante un diseño factorial. Se trabajó con muestras de 200 g de aceite previamente lavado y secado, pesado en frascos de vidrio esmerilados de 250 mL a las cuales se les adicionó la tierra sílicea purificada y calcinada (QP marca Panreac), con tiempo de absorción de 20 minutos, los frascos de vidrio se conectaron a un rotaevaporador con una presión de vacío de 500 mmHg, 80 °C, 40 rpm y 20 minutos. Este material fue centrifugado durante 20 minutos a 4500 rpm para separar el material absorbente.

Operación 6: winterizado

Para esta, se optimizó el porcentaje de acetona y el tiempo de cristalización a - 4 °C, trabajando con muestras de 100 g de aceite previamente decolorado pesadas en frascos de vidrio esmerilados a las cuales se les adiciona 64,14 % (p/p) de acetona, estabilizando la temperatura de las muestras a 15 °C en un cuarto con ambiente controlado durante 15 minutos, se llevó a una centrifuga refrigerada a - 4 °C durante 56 minutos. Luego, las muestras se centrifugaron durante 10 minutos a 8000 rpm, después se filtró durante 30 minutos para retirar los cristales que se formaron durante la centrifugación, para esto se realizó un montaje de destilado que consta de una bomba de vacío y un filtro de papel (ver Figura 23) y finalmente se rotaevaporaron a 60 °C durante aproximadamente una hora para retirar todo el solvente.

Operación 7: desodorizado

Finalmente, se realizó el montaje de la Figura 24, que consta de una bomba de aire conectada a un frasco de vidrio con agua en ebullición y este a su vez se conecta a otro frasco de vidrio, cuya función es condensar el agua y así garantizar que el vapor de agua (alcanza una temperatura de 90 °C) ingrese al aceite con acetona y arrastre compuestos volátiles causantes del mal olor. El aceite se sometió a esta operación por 90 minutos, luego se centrifugó a 4500 rpm durante 15 minutos para eliminar cualquier exceso de agua o de solvente.

Después de realizar todas las etapas y sus respectivas operaciones se obtiene el aceite de pescado, pero este debe ser sometido a un proceso aparte, el cual es la caracterización del aceite, se hace con el fin de evaluar la calidad. A continuación, se detalla esta caracterización:

Caracterización del aceite crudo

Para la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del aceite crudo, se realizaron los análisis de: densidad, índice de refracción, humedad, índices de acidez, Yodo, peróxidos, saponificación y ácido Tiobarbitúrico (TBA); además, se hace una prueba de color y perfil lipídico. A continuación, se describen las características fisicoquímicas del aceite crudo:

- **Densidad:** se determinó de acuerdo con el método oficial de la AOAC 920.212, 2005, el cual consiste en establecer por medio de un picnómetro la relación de masa en un volumen de aceite a 25 °C.
- **Índice de refracción:** se estableció de acuerdo al método oficial de la AOAC 921.08, 2005, por medio de un refractómetro Abbé a 25 °C.
- **Humedad:** se determinó de acuerdo al método oficial de la AOAC 950.43, 2005, por deshidratación entre 100 - 105 °C en una estufa Binder.
- **Índice de ácidos grasos:** se estableció mediante el método oficial de la AOAC 940.28, 2005, el cual consiste en solubilizar el aceite (7 g) con Etanol (grado analítico 99,8 % de pureza marca Sigma Aldrich) previamente neutralizado con 2 mL de Fenolftaleína y 1 mL NaOH 0,1 N (grado analítico 99 % de pureza marca Emsure) para una posterior valoración con NaOH 0,25 N.
- **Índice de Yodo:** se determinó de acuerdo al método oficial de la AOAC 920.159, 2005 para Wijs modificado, el cual consiste en disolver la muestra de aceite (0,2 g) en una solución de ciclohexano (grado analítico 99,5 % de pureza, marca Emsure) y ácido acético (grado analítico 99,8 % de pureza, marca Honeywell) en proporciones 1:1, luego se adicionó el reactivo de Wijs (marca Panreac 0.1 mol/L), y tras 1 hora de reacción se añadió la solución Yoduro de Potasio (KI) al 15 % (grado analítico 99 % de pureza, marca Carlo Erba) la cual reacciona con el reactivo no consumido generando Diyodo (I_2) y finalmente es valorado con una solución estandarizada de Tiosulfato de Sodio ($Na_2S_2O_3$) 0,1 N (grado analítico 99,5 % de pureza marca Merck).
- **Índice de peróxidos:** se estableció mediante el método oficial de la AOAC 965.33, 2005, el cual consiste en solubilizar el aceite (5 g) con ácido acético (grado analítico 99,8 % de pureza, marca Honeywell) y cloroformo (grado analítico 99 % de pureza, marca Emsure) en proporciones 3:2 y posteriormente se adicionó una solución saturada de KI (grado analítico 99 % de pureza marca Carlo Erba), esta reacción se dejó en la oscuridad por 1 min para ser valorada con $Na_2S_2O_3$ 0,01 N estandarizado (grado analítico 99,5 % de pureza marca Merck).
- **Índice de saponificación:** se determinó de acuerdo con el método oficial de la AOAC 920.160, 2005, que consiste en saponificar el aceite (2,2 g) calentándolo con un exceso de KOH en solución Etanólica. La cantidad de KOH (grado analítico 85 % de pureza marca Emsure) consumida se calculó valorando una solución de

ácido Clorhídrico 0,5 N estandarizada (HCl, grado analítico, marca Emsure al 37 %).

- **Índice de ácido Tiobarbitúrico (TBA):** se determinó de acuerdo al método oficial de la AOCS Cd 19-90, 2005, este índice consiste en disolver la muestra de aceite (0,5 g) en ácido Tricloroacético (TCA) (grado analítico 99,5 % de pureza, marca Panreac) al 7 %, agitando y tomando una muestra de 3 mL; adicionando TBA (4,6Dihydroxy-2-mercaptopyrimidine marca Alfa Aesar 98 %) y posteriormente incubar a 90 °C en un baño termostático marca Polystat durante 40 min, luego, se procedió a enfriar y medir por espectrofotometría a 532 nm en un equipo de espectroscopia – UV marca Shimadzu referencia UV 1800.
- **Prueba de color:** esta se realizó mediante coordenadas CieLab tomando como patrón un aceite de pescado comercial, para ello se analizaron diferentes marcas de aceite de omega 3, el que presentó mejores resultados de calidad fue el de marca Pharnunt. La medición se realizó con un espectrofotómetro marca Konica Minolta referencia CM-700D.
- **Perfil lipídico:** la determinación y cuantificación de ácidos grasos fue realizada en el laboratorio Aval Químico S.A.S. de acuerdo al método oficial de la AOCS Ce 1b – 89, 2005. La muestra fue derivada para convertir los ácidos grasos a ésteres metílicos (FAME: Fatty Acid Methyl Ester), los cuales fueron analizados en un equipo Varian 3900 con detector FID (Detector de Ionización de Llama), los FAME se separaron en una columna con fase estacionaria de polietilenglicol (dimensiones: 30m * 250µm diámetro interno * 0,25 espesor de película).

Una vez determinadas las mejores condiciones para las etapas evaluadas, se aplicó la refinación de forma continua al aceite crudo, este se caracterizó fisicoquímicamente en cada una de las etapas, mediante las pruebas que se presentan en la Tabla 1, excepto el perfil lipídico, el cual se determinó al finalizar el proceso.

Tabla 1: pruebas para la caracterización fisicoquímicas del aceite refinado.

Prueba	Norma	Prueba	Norma
Densidad	AOAC 920.212	Humedad	AOAC 925.09
Índice de refracción	AOAC 921.08	Índice de saponificación	AOAC 920.160
Índice de ácidos grasos	AOAC 940.28	Índice de peróxidos	AOAC 965.33
Índice de yodo	AOAC 920.159	Prueba de colorimetría	Espectrómetro
Índice de ácido Tiobarbitúrico	AOCS Cd 19-20	Perfil lipídico	AOCS Ce 1b-89

Fuente: tomada de [47], junio de 2016.

1.5.2. Descripción de los equipos utilizados

A continuación, se describen los equipos utilizados en la elaboración de aceite de pescado a nivel de laboratorio.

Equipos involucrados en la extracción del aceite crudo

Los equipos involucrados en las operaciones de esta etapa son:

- **Preparación del ensilado:** tanques plásticos con capacidad de 35 kg (ver Figura 10), una báscula de piso DYP 6012 marca JCM (ver Figura 11), máscara antigás (ver Figura 12), una balanza de mesa KERN GAB-N (ver Figura 13), una probeta glassco (ver Figura 14), una espátula para mezclar componentes (ver Figura 15) y un equipo de aire acondicionado KALLEY (ver Figura 16).
- **Extracción del aceite del ensilado:** un cucharon de aluminio para retirar el aceite por decantación (ver Figura 17), una cubeta plástica (ver Figura 18) y una centrifuga universal HERMLE Z306 (velocidades entre 200 - 14000 rpm y capacidad máxima de 4 frascos de 100 mL) (ver Figura 19)

Figura 10: tanque plástico.



Figura 11: báscula de piso DYP 6012.



Figura 12: máscara antigás.



Figura 13: balanza de mesa KERN GAB-N.



Figura 14: probeta glassco.



Figura 15: espátula.



Figura 16: aire acondicionado.

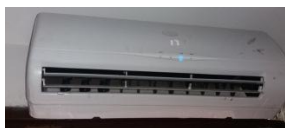


Figura 17: cucharon de aluminio.



Figura 18: cubeta plástica.



Figura 19: centrífuga Z306.



Fuente: elaboración propia, agosto de 2016.

Equipos involucrados en la refinación del aceite crudo

Los equipos involucrados en las operaciones de esta etapa son:

- **Desgomado, neutralizado y decolorado:** frascos de vidrio esmerilados de 250 mL (Matraz de Erlenmeyer) (ver Figura 20); rotaevaporador LABOROTA 4000, el cual tiene las siguientes características: temperatura de 20 - 100°C, motor de capacitor de regulación electrónica, velocidad de 20 - 270 rpm, potencia de calefacción 1300 W, tensión de conexión 230V/50/60Hz o 115V/50/60Hz, potencia de conexión 1400 W y potencia de vaporización ca.1000 mL $\text{h}_2\text{O}/\text{h}$ (ver Figura 21); centrífuga universal HERMLE Z306 (velocidades entre 200 - 14000 rpm y capacidad máxima de 4 frascos de 100 mL) (ver Figura 19).
- **Lavado:** una probeta (ver Figura 14), también se involucran el rotaevaporador (ver Figura 21) y la centrífuga Z306 (ver Figura 19).
- **Secado:** rotaevaporador (ver Figura 21).
- **Winterizado:** para esta operación se requieren los mismos equipos presentes en el desgomado, neutralizado y decolorado, además se añaden a esta lista una centrífuga refrigerada HERMLE Z326-K (temperatura de -20 a 40 °C, rango de revoluciones de 200 – 18000 rpm y potencia de 455 W) (ver Figura 22), el montaje de destilación (ver Figura 23) y el aire acondicionado de la etapa anterior (ver Figura 16).
- **Desodorizado:** para esta operación se requiere la centrífuga Z306 (ver Figura 19) y el montaje de desodorizado (ver Figura 24).

Figura 20: frascos de vidrio Erlenmeyer.



Figura 21: rotaevaporador LABOROTA,



Figura 22: centrífuga refrigerada Z326-K.



Figura 23: montaje de destilación.



Figura 24: montaje de desodorización.



Fuente: de la Figura 20 a la Figura 23 elaboración propia, la Figura 24 es tomada de [48], agosto de 2016.

2. INGENIERÍA CONCEPTUAL

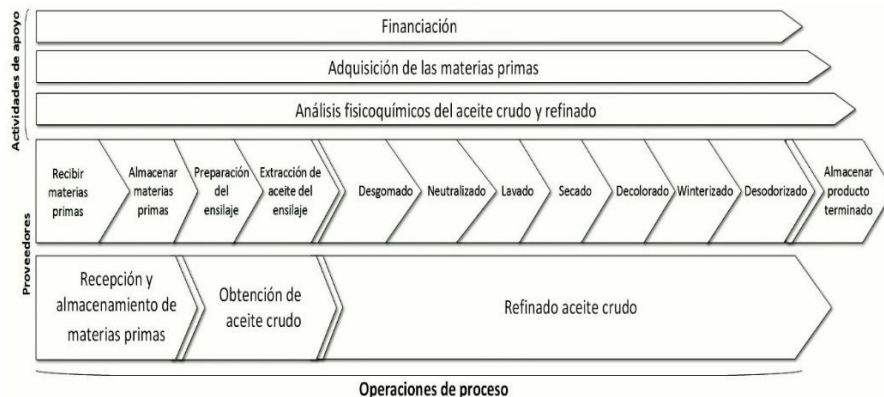
Realizar el diseño de un proyecto de automatización implica la documentación adecuada y ordenada de la información que tiene el proceso en cuestión. En ese sentido, se hace uso de la ingeniería conceptual, la cual permite recoger la información fundamental del proceso.

La ingeniería conceptual, resume la viabilidad técnica de un proyecto, en este capítulo se hará la descripción técnica del POAP – LAB, teniendo presente que este se realiza a nivel de laboratorio. Después de conocerlo en detalle, se realiza la cadena de valor, posteriormente se hace el PFD, paso a seguir se tiene en cuenta el estándar ISA 88.01 [49] para describir el proceso y la planta en términos de los modelos de: proceso, físico y control procedimental. Finalmente, se realiza un diagnóstico con las necesidades propias del proceso y se plantean sus requerimientos.

2.1. Cadena de valor del POAP – LAB

Mediante esta se representan las principales operaciones que generan valor en el POAP – LAB [50]. Para este se compone de nueve operaciones primarias, dos actividades secundarias como lo son la recepción y almacenamiento de materias primas y tres actividades de apoyo (ver Figura 25).

Figura 25: cadena de valor del POAP – LAB.



Fuente: elaboración propia, agosto de 2016.

La línea principal de operaciones comienza con la recepción y almacenamiento de las materias primas adquiridas de los diferentes proveedores, continuando con la operación de ensilaje químico de la cual se obtiene el aceite crudo de pescado, siguiendo con las operaciones de refinado del aceite crudo, las cuales son: desgomado, neutralizado, lavado, secado, decolorado, winterizado y desodorizado. Finalmente, el proceso de obtención de aceite de pescado para consumo humano culmina con el almacenamiento del aceite de pescado obtenido. Cabe aclarar que el proceso de obtención de aceite se encuentra dividido en dos etapas (extracción de aceite crudo y refinación de aceite crudo) debido a las condiciones de manejo que se requieren para los sub-productos resultantes de cada una de las operaciones que componen estas etapas.

Las actividades de apoyo se conforman de: financiación del proyecto de investigación y desarrollo (infraestructura de la empresa), compra y adquisición de los materiales e

insumos necesarios para el proceso (aprovisionamiento), finalmente, el análisis de propiedades fisicoquímicas del aceite de pescado obtenido para consumo humano (desarrollo de tecnología).

2.2. Diagrama de flujo del POAP – LAB

Un PFD representa esquemáticamente la transformación de las materias primas a lo largo de un proceso de producción, sin ahondar en detalles, son las variables de proceso con las que se producen dichas transformaciones. Este puede ser tan complejo o sencillo como la persona que modela el proceso lo requiera, por lo general, se busca que el PFD sea lo más sencillo posible reduciendo el nivel de detalle al mínimo con el fin de que sea fácilmente interpretado [48].

Para realizar el PFD es importante identificar las entradas y salidas de flujos de materiales de cada una de las operaciones del POAP – LAB (ver Tabla 2).

Con la descripción del POAP – LAB (ver sección 1.5.1) y de los materiales que entran y salen de cada etapa del proceso (ver Tabla 2), se diseña el PFD, con el fin de ilustrar el recorrido de la materia prima a través del proceso, en el cual se encuentra representado el flujo de materiales que ingresan en cada operación y los subproductos que salen de las mismas, de igual manera se detallan las transformaciones que sufren los materiales al interactuar con cada operación.

Tabla 2: listado de materias primas interactuantes en cada etapa del POAP – LAB.

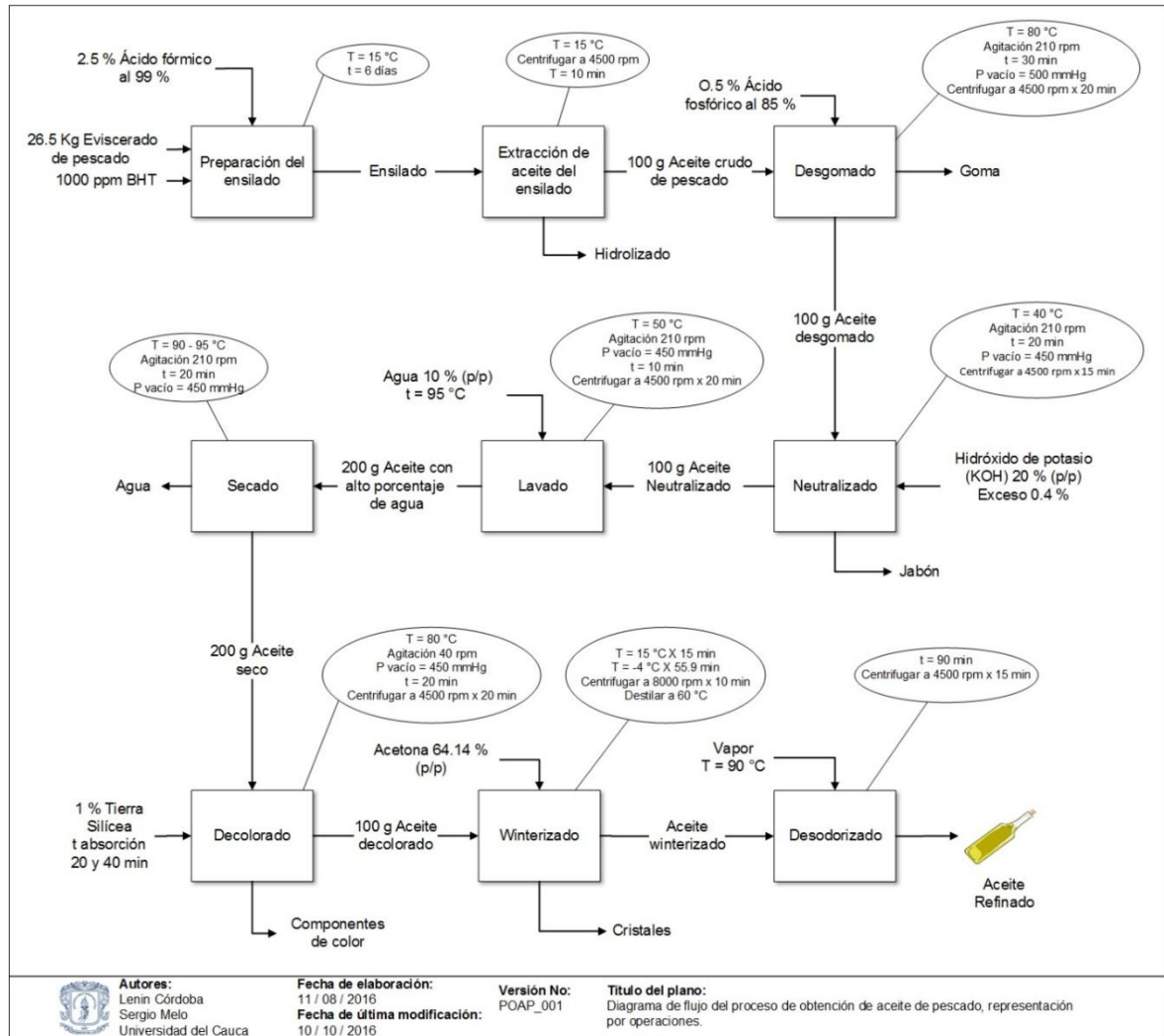
Entradas	Operaciones	Salidas
<ul style="list-style-type: none"> Eviscerado de pescado Ácido Fórmico BHT 	<ul style="list-style-type: none"> Preparación del ensilado 	<ul style="list-style-type: none"> Ensilado de pescado
<ul style="list-style-type: none"> Ensilado de pescado 	<ul style="list-style-type: none"> Extracción de aceite del ensilado 	<ul style="list-style-type: none"> Aceite crudo de pescado Hidrolizado
<ul style="list-style-type: none"> Aceite crudo de pescado Ácido Fosfórico 	<ul style="list-style-type: none"> Desgomado 	<ul style="list-style-type: none"> Gomas Aceite desgomado
<ul style="list-style-type: none"> Aceite desgomado Hidróxido de potasio 	<ul style="list-style-type: none"> Neutralizado 	<ul style="list-style-type: none"> Jabón Aceite neutralizado
<ul style="list-style-type: none"> Aceite neutralizado Agua 	<ul style="list-style-type: none"> Lavado 	<ul style="list-style-type: none"> Aceite con alto porcentaje de agua
<ul style="list-style-type: none"> Aceite con alto porcentaje de agua 	<ul style="list-style-type: none"> Secado 	<ul style="list-style-type: none"> Agua Aceite seco
<ul style="list-style-type: none"> Aceite seco Tierra silíceas 	<ul style="list-style-type: none"> Decolorado 	<ul style="list-style-type: none"> Componentes de color Aceite decolorado
<ul style="list-style-type: none"> Aceite decolorado Acetona 	<ul style="list-style-type: none"> Winterizado 	<ul style="list-style-type: none"> Aceite winterizado Cristales
<ul style="list-style-type: none"> Aceite winterizado Vapor 	<ul style="list-style-type: none"> Desodorizado 	<ul style="list-style-type: none"> Aceite refinado

Fuente: elaboración propia, agosto de 2016.

El PFD diseñado para el POAP – LAB (ver Figura 26), comienza con la operación de preparación del ensilado mezclando el eviscerado con el ácido Fórmico y el BHT durante un periodo de 6 días (tiempo de hidrólisis), en esta parte del proceso se produce el ensilado químico, luego el aceite es llevado a la operación de extracción, en la cual se obtiene el aceite crudo de pescado que posteriormente será refinado.

El refinado comienza con la operación de desgomado, en la cual entra el aceite crudo de pescado mezclado con ácido Fosfórico para separar la goma del aceite. Posteriormente, el aceite desgomado se lleva a la operación de neutralizado, en esta se mezcla con KOH con el fin de obtener el jabón y un aceite neutro que es llevado a las operaciones de lavado y secado para luego ingresarlo a la operación de blanqueado, en la cual se separa el aceite de los diferentes componentes de color, enseguida el aceite decolorado se ingresa a la operación de winterizado adicionándole acetona y bajándole la temperatura con el fin de cristalizar algunos de los componentes del aceite que pueden afectar su calidad, los cuales son removidos por filtración para después pasar el aceite por una centrifuga y finalmente, terminar el proceso de obtención del aceite de pescado con la operación de desodorizado, para extraer los olores característicos del aceite y así obtener una refinación adecuada.

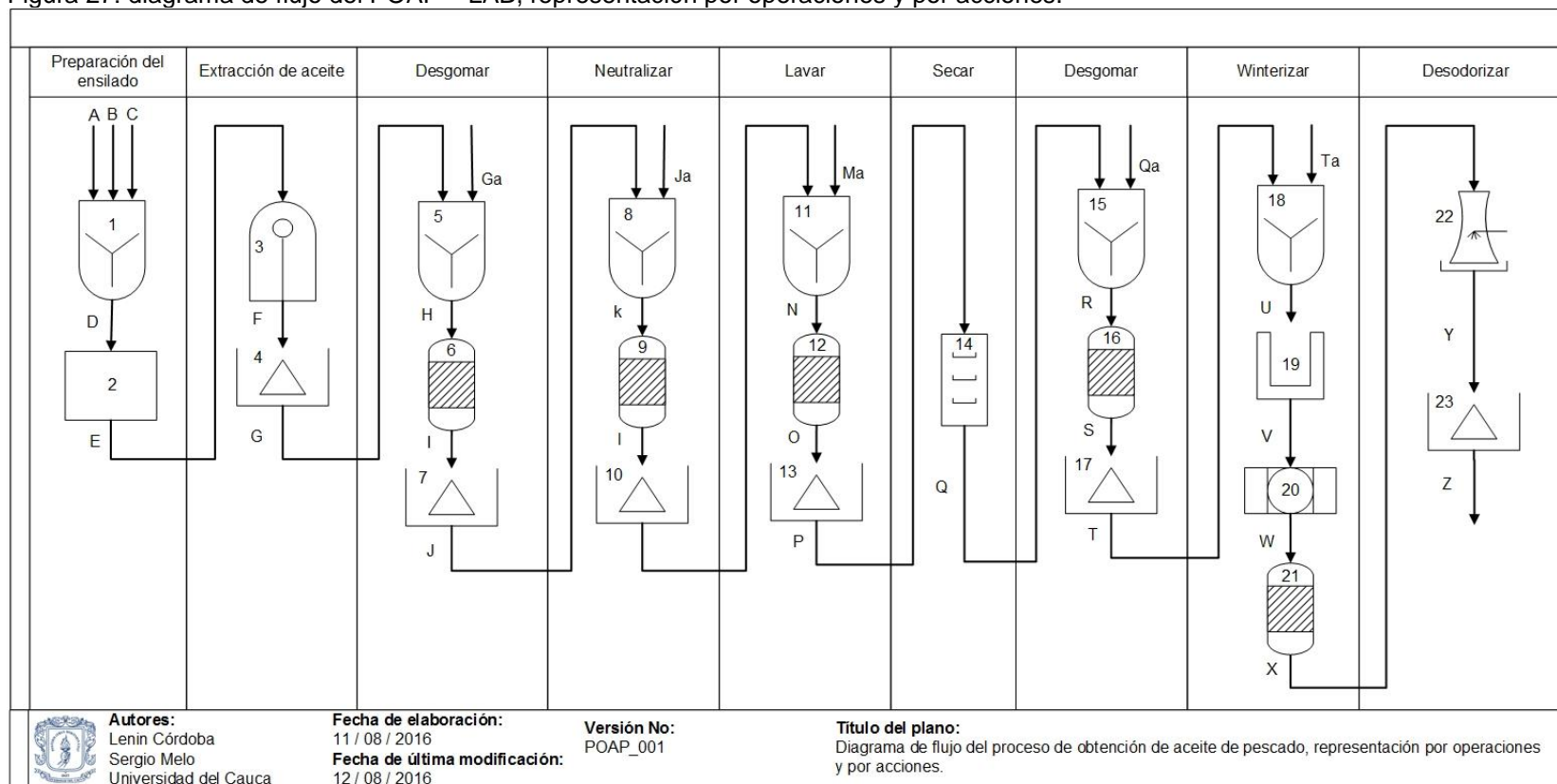
Figura 26: diagrama de flujo por operaciones del POAP – LAB.



Fuente: elaboración propia, agosto de 2016.

A continuación, se modela un PFD seccionado por operaciones y por acciones, en el que se muestra el flujo de los materiales dentro del proceso de obtención de aceite de pescado a través de los diferentes equipos, cabe aclarar que algunas de las acciones de proceso no se modelan en este diagrama, puesto que se realizan en el mismo equipo o simplemente no tienen una equivalencia gráfica de sí misma (ver Figura 27).

Figura 27: diagrama de flujo del POAP – LAB, representación por operaciones y por acciones.



Fuente: elaboración propia, agosto de 2016.

La descripción de las entradas y salidas durante el proceso se muestra en la Tabla 3 y Tabla 4:

Tabla 3: convenciones para la descripción del proceso.

Descripción de operación	
1	Mezclar eviscerado, ácido Fórmico, BTH
2	Hidrolizado
3	Extraer el aceite
4	Centrifugar aceite
5	mezclar aceite, ácido Fosfórico
6	Destilar mezcla
7	Centrifugar aceite
8	Mezclar aceite desgomado con KOH
9	Destilar mezcla
10	Centrifugar mezcla
11	Mezclar el aceite sin jabón con agua
12	Destilar mezcla
13	Centrifugar mezcla
14	Calentar el aceite lavado
15	Mezclar aceite seco con tierra silíceo
16	Destilar mezcla
17	Centrifugar mezcla
18	Mezclar aceite decolorado con acetona
19	Centrifugar mezcla con refrigeración
20	Filtrar cristales
21	Destilar aceite filtrado
22	Destilar aceite winterizado por arrastre de vapor
23	Centrifugar aceite

Tabla 4: convenciones de los materiales e insumos que ingresan y salen a través de las operaciones.

Productos	
A	Eviscerado de pescado
B	Ácido Fórmico
C	BHT
D	Mezcla de eviscerado ácido Fórmico y BHT
E	Hidrolizado
F	Aceite crudo de pescado
G	Aceite crudo de pescado
Ga	Ácido Fosfórico
H	Mezcla de aceite con ácido Fosfórico
I	Mezcla de aceite con ácido Fosfórico
J	Aceite desgomado
Ja	KOH
K	Mezcla aceite desgomado y KOH
L	Mezcla aceite desgomado y KOH
M	Aceite sin jabón
Ma	Agua
N	Aceite sin jabón con alto porcentaje de agua
O	Aceite sin jabón con alto porcentaje de agua
P	Aceite parcialmente seco
Q	Aceite seco
Qa	Tierra silíceo
R	Mezcla de aceite seco con tierra silíceo
S	Mezcla de aceite seco con tierra silíceo
T	Aceite decolorado
Ta	Acetona
U	Mezcla de aceite decolorado con acetona
V	Aceite con cristales
W	Aceite sin cristales
X	Aceite winterizado
Y	Aceite destilado
Z	Aceite desodorizado

Fuente: elaboración propia, agosto de 2016.

El diagrama de flujo del POAP – LAB, presenta una representación por operaciones y por acciones comenzando con la adición de eviscerado de pescado, ácido Fórmico y BHT a un tanque mezclándose de manera homogénea, esta pasa a un cuarto con ambiente controlado para ser hidrolizado con lo que se concluye la operación; para dar inicio a la extracción se retira el aceite suspendido que posteriormente pasa a una centrifuga culminando la operación; el desgomado comienza con la adición del aceite y ácido Fosfórico a los frascos de vidrio, luego este pasa a un rotaevaporador para ser desgomado y finaliza llevando esta mezcla a la centrifuga; el neutralizado empieza con la adición del aceite desgomado y el KOH a los frascos de vidrio, luego la mezcla pasa al rotaevaporador para ser neutralizada y se concluye llevándola a la centrifuga; para realizar la operación de lavado se inicia llenando con aceite neutro y agua los frascos de vidrio, que posteriormente se llevan al rotaevaporador para ser destilados y finalmente se lleva el aceite sin jabón a una centrifuga para retirar el exceso de agua; la operación de secado se realiza en el rotaevaporador en el cual entra el aceite parcialmente seco; después de obtener el aceite seco se pasa a la operación de desgomado que inicia mezclando este con tierra silíceas en los frascos de vidrio, posteriormente se llevan al rotaevaporador que más adelante pasa a la centrifuga; el proceso continua con la operación de winterizado mezclando el aceite desgomado con acetona, el cual se deja estabilizar y pasa a una centrifuga con refrigeración, luego de ser centrifugado a baja temperatura esta mezcla pasa a un filtro donde se retiran los cristales del aceite, este se lleva al rotaevaporador donde se retira el catalizador; finalmente, el proceso culmina con la operación de desodorizado, la cual inicia con un equipo de destilado por arrastre de vapor y finaliza llevando el aceite a una centrifuga (ver Figura 27).

2.3. Modelos ISA - S88.01 del proceso y la planta del POAP – LAB

El estándar ISA - 88.01 [49] brinda modelos estándar y terminología para detallar el proceso separadamente de la planta, lo que significa que toda la información que se tiene del proceso se organiza en los modelos y se documenta la planta en términos de la capacidad de los equipos. Además, la norma permite que el proceso se vuelva versátil y esto se debe a la elaboración de las recetas, así se pueden obtener diferentes tipos de productos tan solo variando parámetros en el proceso, esto da inicio a la manufactura múltiple.

El proceso y la planta de obtención de aceite de pescado se organiza en 3 modelos proporcionados por ISA - S88.01: el primero, el modelo de proceso que permite visualizar lo que se genera a partir de las acciones procedimentales; el segundo, el modelo físico que muestra dónde se ejecuta el proceso y por último el modelo de control procedimental que indica cómo se lleva a cabo proceso (ver anexo B, modelos ISA – S88.01 del POAP – LAB).

2.4. Diagnóstico del POAP

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

2.4.1. Nivel de dificultad en la realización del proceso

El grado de dificultad del POAP, se estableció cualitativamente de acuerdo a una entrevista realizada a los investigadores del grupo ASUBAGROIN encargados del proceso en cuestión. Las respuestas se tabularon cuantitativamente para determinar la dificultad resultante de cada una de las operaciones y fases respecto al proceso.

La encuesta fue realizada a una población de 4 ingenieros investigadores, quienes estuvieron involucrados directamente en el proceso, por lo tanto, tienen la experiencia y el conocimiento, de acuerdo a esto se formuló la pregunta “¿Cuál es la dificultad a la hora de llevar a cabo las siguientes fases?” enfocada a 39 fases. Estas se clasificaron cualitativamente según el nivel de dificultad (Bajo (B), Medio (M), Alto (A)), a su vez fueron evaluados según tres criterios: esfuerzo físico realizado por el operario al llevar a cabo las fases, conocimiento que debe tener el operario y riesgos que pueda correr el operario al momento de realizar las fases (ver Tabla 5).

Tabla 5: respuestas de dificultad en realización de las fases del POAP – LAB.

Operaciones	Fases	Nivel de dificultad según criterios								
		Esfuerzo físico			Conocimiento			Riesgos		
		B	M	A	B	M	A	B	M	A
Preparar ensilado	Llenar vísceras		3	1	4			4		
	Adicionar ácido Fórmico	3	1			3	1			4
	Adicionar BHT	4			1	3		4		
	Mezclar		4			4				4
	Hermetizar mezcla	4			4			4		
	Hidrolizar mezcla		1	3	4			1	3	
Extraer el aceite del ensilado	Destapar mezcla	3	1		1	3		4		
	Extraer el aceite suspendido		3	1		4		3	1	
	Centrifugar el aceite	3	1		2	2		3	1	
Desgomar	Llenar muestras	4			4			4		
	Adicionar ácido Fosfórico	4			3	1			1	3
	Conectar muestras	4			3	1			4	
	Desgomar la mezcla	4				1	3	1		3
	Centrifugar la mezcla	4				4		3	1	
Neutralizar	Llenar muestras	4			1	3		4		
	Adicionar KOH	4				4				4
	Conectar muestras	4			1	3		1	3	
	Neutralizar la mezcla	4				3	1	1		3
	Centrifugar la mezcla	4				4		3	1	
Lavar	Adicionar agua	4			4			3	1	
	Lavar la mezcla	4			1	3		1	3	
	Centrifugar la mezcla	4				4		3	1	

Secar	Calentar el aceite lavado	4				3	1	1		3
Decolorar	Llenar muestras	4			1	3		4		
	Adicionar tierra silíceá	4			1	3		4		
	Conectar muestras	4			1	3		1	3	
	Decolorar la mezcla	4				4		1		3
	Centrifugar la mezcla	4				4		4		
Winterizar	Llenar muestras	4				4		4		
	Adicionar acetona	4				4			3	1
	Estabilizar la mezcla	4				4		4		
	Centrifugar la mezcla con refrigeración	4				4		4		
	Filtrar los cristales	4				4		1	3	
Desodorizar	Destilar la mezcla	4				1	3		4	
	Desodorizar el aceite winterizado	4				1	3		3	1
	Centrifugar el aceite desodorizado	4				4		3		1

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

De acuerdo a las respuestas obtenidas de los 4 investigadores encuestados, se nota que existe una convergencia hacia el nivel de dificultad “bajo”, esto en cuanto a los criterios esfuerzo físico y riesgo, lo cual se debe a que no es un proceso complejo, pero solo si se hace una excepción con el criterio conocimiento, en el cual las respuestas convergen hacia un nivel de dificultad “medio”, debido a que en este proceso se manejan químicos para alterar las propiedades de las vísceras o del aceite crudo en cada una de las operaciones, lo que implica que para el manejo de los químicos se requiere un conocimiento previo para su manipulación, se aclara que en donde se manipulan químicos siempre se corren riesgos pero debido a que son pocos químicos (no más de 5) no afectan los resultados en el criterio de riesgos.

Análisis de resultados de las encuestas para determinar dificultad de las fases y operaciones

A continuación, se presenta el consolidado referente a la dificultad presentada a la hora de llevar a cabo las fases, en la cual se ha asignado el valor de dificultad (alto, medio, bajo) teniendo en cuenta la tendencia presentada por los resultados de la encuesta, dando más claridad al momento de analizar cada una de las fases (ver Tabla 6).

Tabla 6: nivel de dificultad promedio por criterio en la realización de las fases del POAP – LAB.

Operaciones	Fases	Nivel de dificultad según criterios		
		Esfuerzo físico	Conocimiento	Riesgos
Preparar ensilado	Llenar vísceras	Medio	Bajo	Bajo
	Adicionar ácido Fórmico	Bajo	Medio	Alto
	Adicionar BHT	Bajo	Medio	Bajo

	Mezclar	Bajo	Medio	Alto
	Hermetizar mezcla	Bajo	Bajo	Bajo
	Hidrolizar mezcla	Alto	Bajo	Medio
Extraer el aceite del ensilado	Destapar mezcla	Bajo	Medio	Bajo
	Extraer el aceite suspendido	Medio	Medio	Bajo
	Centrifugar el aceite	Bajo	Medio	Bajo
Desgomar	Llenar muestras	Bajo	Bajo	Bajo
	Adicionar ácido Fosfórico	Bajo	Bajo	Alto
	Conectar muestras	Bajo	Bajo	Medio
	Desgomar la mezcla	Bajo	Alto	Alto
	Centrifugar la mezcla	Bajo	Medio	Bajo
Neutralizar	Llenar muestras	Bajo	Medio	Bajo
	Adicionar KOH	Bajo	Medio	Alto
	Conectar muestras	Bajo	Medio	Medio
	Neutralizar la mezcla	Bajo	Medio	Alto
	Centrifugar la mezcla	Bajo	Medio	Bajo
Lavar	Adicionar agua	Bajo	Bajo	Bajo
	Lavar la mezcla	Bajo	Medio	Medio
	Centrifugar la mezcla	Bajo	Medio	Bajo
Secar	Calentar el aceite lavado	Bajo	Medio	Alto
Decolorar	Llenar muestras	Bajo	Medio	Bajo
	Adicionar tierra sílicea	Bajo	Medio	Bajo
	Conectar muestras	Bajo	Medio	Medio
	Decolorar la mezcla	Bajo	Medio	Alto
	Centrifugar la mezcla	Bajo	Medio	Bajo
Winterizar	Llenar muestras	Bajo	Medio	Bajo
	Adicionar acetona	Bajo	Medio	Medio
	Estabilizar mezcla	Bajo	Medio	Bajo
	Centrifugar la mezcla con refrigeración	Bajo	Medio	Bajo
	Filtrar los cristales	Bajo	Medio	Medio
	Destilar la mezcla	Bajo	Alto	Medio
Desodorizar	Desodorizar el aceite winterizado	Bajo	Alto	Medio
	Centrifugar el aceite desodorizado	Bajo	Medio	Bajo

Fuente: elaboración propia, septiembre del 2016.

De los resultados de la tabla anterior (ver Tabla 6) se obtuvo convergencia hacia la dificultad que implica la realización de las fases que conforman el POAP, dando valores cuantitativos a cada una de las dificultades para realizar la ponderación de las respuestas:

1 a “B”, 3 a “M” y 5 a “A”, de esta manera asignar el nivel de dificultad correspondiente a cada una de las fases (ver Tabla 7).

Tabla 7: nivel de dificultad promedio en la realización de las fases del POAP – LAB.

Operaciones	Fases	Dificultad
Preparar ensilado	Llenar vísceras	Medio
	Adicionar ácido Fórmico	Alto
	Adicionar BHT	Medio
	Mezclar	Alto
	Hermetizar mezcla	Bajo
	Hidrolizar mezcla	Alto
Extraer el aceite del ensilado	Destapar mezcla	Medio
	Extraer el aceite suspendido	Medio
	Centrifugar el aceite	Medio
Desgomar	Llenar muestras	Bajo
	Adicionar ácido Fosfórico	Alto
	Conectar muestras	Medio
	Desgomar la mezcla	Alto
	Centrifugar la mezcla	Medio
Neutralizar	Llenar muestras	Medio
	Adicionar KOH	Alto
	Conectar muestras	Medio
	Neutralizar mezcla	Alto
	Centrifugar la mezcla	Medio
Lavar	Adicionar agua	Bajo
	Lavar la mezcla	Medio
	Centrifugar la mezcla	Medio
Secar	Calentar el aceite lavado	Alto
Decolorar	Llenar muestras	Medio
	Adicionar tierra silíceas	Medio
	Conectar muestras	Medio
	Decolorar la mezcla	Alto
	Centrifugar la mezcla	Medio
Winterizar	Llenar muestras	Medio
	Adicionar acetona	Medio
	Estabilizar mezcla	Medio
	Centrifugar la mezcla con refrigeración	Medio
	Filtrar los cristales	Medio
	Destilar la mezcla	Alto
Desodorizar	Desodorizar el aceite winterizado	Alto
	Centrifugar el aceite desodorizado	Medio

Fuente: elaboración propia, septiembre del 2016.

Para el procedimiento de unidad “Preparar ensilado”, se tiene tres fases en nivel de dificultad bajo, dos fases con nivel de dificultad medio debido que para ellas se requiere tener conocimiento y exige esfuerzo físico a la hora de llenar el eviscerado y tres con nivel de dificultad alto dado que presenta un nivel de riesgo hacia el operario al momento de realizarlas debido a la manipulación de químicos, así mismo de un esfuerzo físico mas elevado; el procedimiento de unidad “extraer el aceite del ensilado” presenta un nivel medio en todas sus fases puesto que es primordial el conocimiento para llevar a cabo estas; “Desgomar” presenta una fase con nivel de dificultad bajo, dos con nivel de dificultad medio puesto que se requiere conocimiento por parte del operario aparte que presentan riesgo moderado y dos con nivel de dificultad alto debido a que estas fases son de riesgo mas elevado para el operario; “Neutralizar” presenta tres fases con nivel de dificultad medio que hacen referencia principalmente al nivel de conocimiento necesario y dos con nivel alto, razón dada a que el operario esta expuesto a riesgo debido al manejo de químicos; el procedimiento de unidad “Lavar” presenta una fase con nivel de dificultad bajo y dos con nivel medio, en este procedimiento se observa que para llevarlas a cabo el operario debe tener conocimiento y el riesgo es moderado; El procedimiento de unidad “Secar” requiere conocimiento por parte del operario y también un manejo de seguridad debido a que esta expuesto a riesgo por manejo de altas temperaturas; por otro lado, los procedimientos de unidad “Decolorar” y “Winterizar” tienen cuatro y cinco fases en nivel de dificultad medio respectivamente dado el nivel de conocimiento que se requiere por parte del operario, de igual manera estos presentan una fase con nivel de dificultad alto en riesgo y conocimiento por manejo de compuestos químicos; finalmente, el procedimiento “Desodorizar” presenta dos fases con nivel de dificultad medio, esto a causa de los requerimientos de riesgo y conocimiento que presentan sus fases respectivamente.

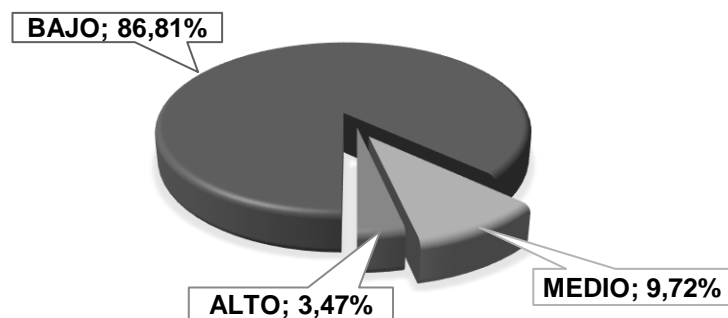
Todo lo planteado hasta el momento, permite ver que los procedimientos de unidad en cada una de sus fases llevadas a cabo en el POAP – LAB requieren un buen nivel de conocimiento por parte del operario para poder realizarlas satisfactoriamente, de igual manera en algunas de ellas (11 fases) presentan un nivel alto de dificultad, debido a los riesgos que se expone el operario y a la alta exigencia en el nivel de conocimiento que le permitan desarrollarlas eficientemente.

Desarrollo estadístico del nivel de dificultad

El nivel de dificultad del POAP – LAB en términos generales se clasificó de la siguiente manera:

Según el esfuerzo físico: 125 fases tienen un nivel de esfuerzo físico “bajo”, 14 tienen un nivel de esfuerzo físico “medio” y 5 fases un nivel de esfuerzo físico “alto”. En términos porcentuales se tiene que el 86,81 % de las fases del POAP – LAB se clasifican en un nivel de esfuerzo físico “bajo”, el 9,72 % se clasifican en un nivel de esfuerzo físico “medio” y el 3,47 % se clasifican en un nivel de esfuerzo físico “alto” (ver Figura 28).

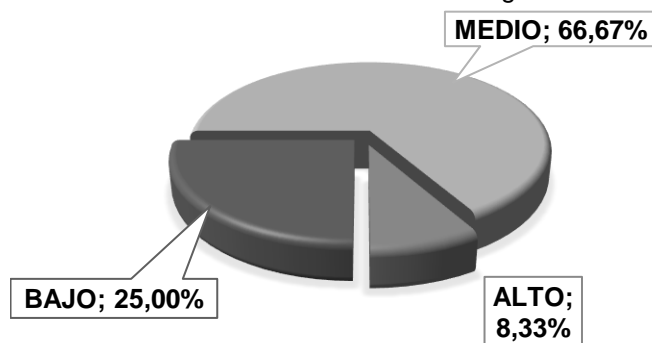
Figura 28: nivel de dificultad de las fases del POAP – LAB según esfuerzo físico.



Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

Según el conocimiento: 36 fases tienen un nivel de conocimiento “bajo”, 96 tienen un nivel de conocimiento “medio” y 12 fases tienen un nivel de conocimiento “alto”. En términos porcentuales se tiene que el 25 % de las fases del POAP – LAB se clasifican en un nivel de conocimiento “bajo”, el 66,67 % se clasifican en un nivel de conocimiento “medio” y el 8,33 % se clasifican en un nivel de conocimiento “alto” (ver Figura 29).

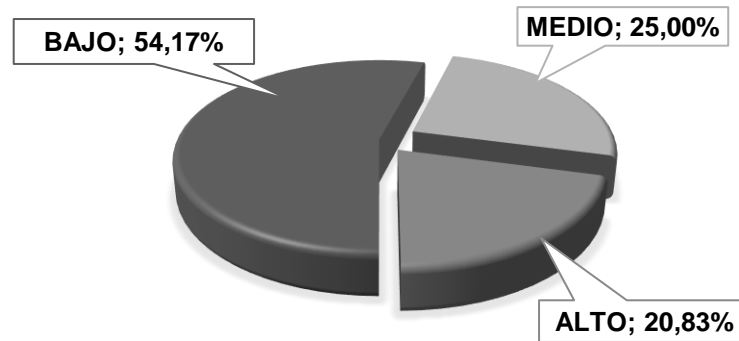
Figura 29: nivel de dificultad de las fases del POAP – LAB según conocimiento.



Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

Según el riesgo: 78 fases tienen un nivel de riesgo “bajo”, 36 tienen un nivel de riesgo “medio” y 30 fases tienen un nivel de riesgo “alto”. En términos porcentuales se tiene que el 54,17 % de las fases del POAP – LAB se clasifican en un nivel de riesgo “bajo”, el 25 % se clasifican en un nivel de riesgo “medio” y el 20,83 % se clasifican en un nivel de riesgo “alto” (ver Figura 30).

Figura 30: nivel de dificultad de las fases del POAP – LAB según riesgo.



Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

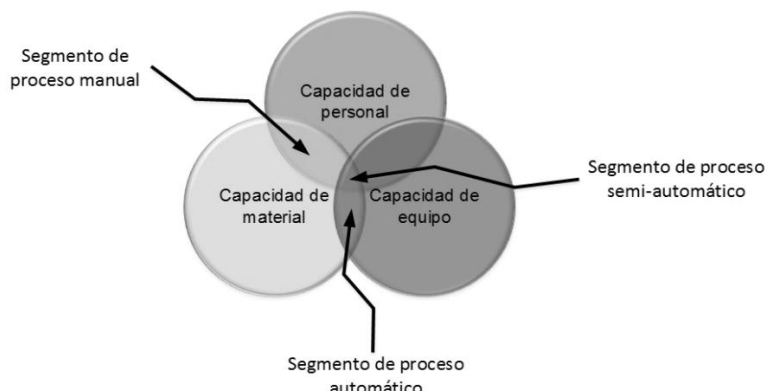
2.4.2. Nivel de automatización

Para comprender este criterio de evaluación en el que se pretende evaluar y determinar el nivel de automatización del POAP – LAB, se requiere en primera instancia traer a consideración algunos de los conceptos de automatización de procesos industriales. El concepto del académico y Miembro del Comité Automatización AIE. *Juan Herrera Quiroz de la Universidad de Chile* menciona que “la Automatización Industrial se puede entender como la facultad de autonomía o acción de operar por sí solo que poseen los procesos industriales y donde las actividades de producción son realizadas a través de acciones autónomas, y la participación de fuerza física humana es mínima y la de inteligencia artificial máxima” [51]. Por otro lado, el *PhD Jörgen Frohm* en su estudio “*Levels of Automation in Manufacturing*” define el nivel de automatización como “La asignación de tareas físicas y cognitivas entre los seres humanos y la tecnología, que se describe como un continuo que va desde totalmente manual hasta totalmente automático” [52].

De lo anterior, se logra concluir que el nivel de automatización se enfoca en la forma de interacción hombre-máquina presente a la hora de llevar a cabo las tareas, dividiéndose estas en: nivel manual, en este el operador ejecuta los procedimientos como se especifica y puede parar o forzar una transición; nivel semi-automático, el operador ejecuta las transiciones cuando se cumplen las condiciones establecidas, pero este no puede forzar su ejecución y nivel automático, cuando las transiciones de estados son ejecutadas de forma automática cumpliendo con las condiciones establecidas, el operador puede parar la transición pero no forzarla.

Para tener mayor claridad del nivel de automatización, es recomendable referirse a la relación establecida entre capacidad de material, personal y equipo, propuesta por el estándar ISA 95 parte 1, dado que según esta interacción se obtendría un segmento de proceso manual con material y personal, semi-automático con material, personal y equipo, y automático con material y equipo (ver Figura 31) [49].

Figura 31: nivel de automatización mediante la relación entre la capacidad de: material, personal y equipos.



Fuente: modificada de [53], septiembre de 2016.

Teniendo en cuenta la información anterior, se evaluaron las 36 fases del POAP, resultando 20 fases manuales, 16 semiautomáticas y ninguna automática (ver Tabla 8).

Tabla 8: nivel de automatización de las fases del POAP.

Operaciones	Fases	Nivel de automatización
Preparar ensilado	Llenar vísceras	Manual
	Adicionar ácido Fórmico	Manual
	Adicionar BHT	Manual
	Mezclar	Manual
	Hermetizar mezcla	Manual
	Hidrolizar mezcla	Manual
Extraer el aceite del ensilado	Destapar mezcla	Manual
	Extraer el aceite suspendido	Manual
	Centrifugar el aceite	Semi-automático
Desgomar	Llenar muestras	Manual
	Adicionar ácido Fosfórico	Manual
	Conectar muestras	Manual
	Desgomar la mezcla	Semi-automático
	Centrifugar la mezcla	Semi-automático
Neutralizar	Llenar muestras	Manual
	Adicionar KOH	Manual
	Conectar muestras	Manual
	Neutralizar la mezcla	Semi-automático
	Centrifugar la mezcla	Semi-automático
Lavar	Adicionar agua	Manual
	Lavar la mezcla	Semi-automático
	Centrifugar la mezcla	Semi-automático
Secar	Calentar el aceite lavado	Semi-automático
Decolorar	Llenar muestras	Manual
	Adicionar tierra silíceo	Manual
	Conectar muestras	Manual
	Decolorar la mezcla	Semi-automático
	Centrifugar la mezcla	Semi-automático

Winterizar	Llenar muestras	Manual
	Adicionar acetona	Manual
	Estabilizar la mezcla	Semi-automático
	Centrifugar la mezcla con refrigeración	Semi-automático
	Filtrar los cristales	Semi-automático
	Destilar la mezcla	Semi-automático
Desodorizar	Desodorizar el aceite winterizado	Semi-automático
	Centrifugar el aceite destilado	Semi-automático

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

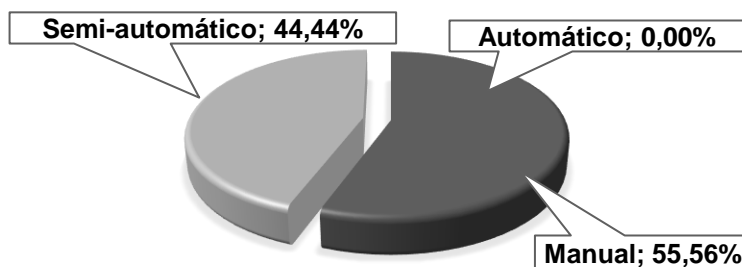
Es posible ubicar un proceso en la pirámide CIM (*Computer Integrated Manufacturing*) según su nivel de automatización. Puesto que la pirámide CIM se jerarquiza en cinco niveles respecto a las actividades realizadas en cada uno de ellos, por lo tanto se tiene: nivel cero, el cual define el proceso físico real (instrumentación); nivel 1 en el que se realiza la medición y la manipulación del proceso físico (control en campo); nivel dos que involucra monitoreo, supervisión y control del proceso físico (supervisión de la célula); nivel tres que especifica el flujo de trabajo para generar los productos deseados (planta de proceso) y por último el nivel cuatro, en el cual se ejecutan las actividades de negocio necesarias para la administración de manufactura dentro de toda la organización (fábrica) [49].

De lo anterior se concluye que el POAP – LAB se encuentra ubicado en el nivel uno de la pirámide CIM respecto a su nivel de automatización, puesto que en este se realizan tareas relacionadas a la manipulación de material (proceso físico real) y a la medición de parámetros; todo esto en una interacción hombre-máquina (semiautomático)

Desarrollo estadístico del nivel de automatización

Respecto a la información estadística obtenida con la cantidad de fases manuales, semi-automáticas y automáticas, muestra que el POAP – LAB tiene un nivel de automatización manual del 55,56 %, semi-automático del 44,44 % y no tiene ninguna fase que se ejecute completamente de forma automática (ver Figura 32: porcentaje del nivel de automatización general del POAP – LAB respecto a sus fases.).

Figura 32: porcentaje del nivel de automatización general del POAP – LAB respecto a sus fases.

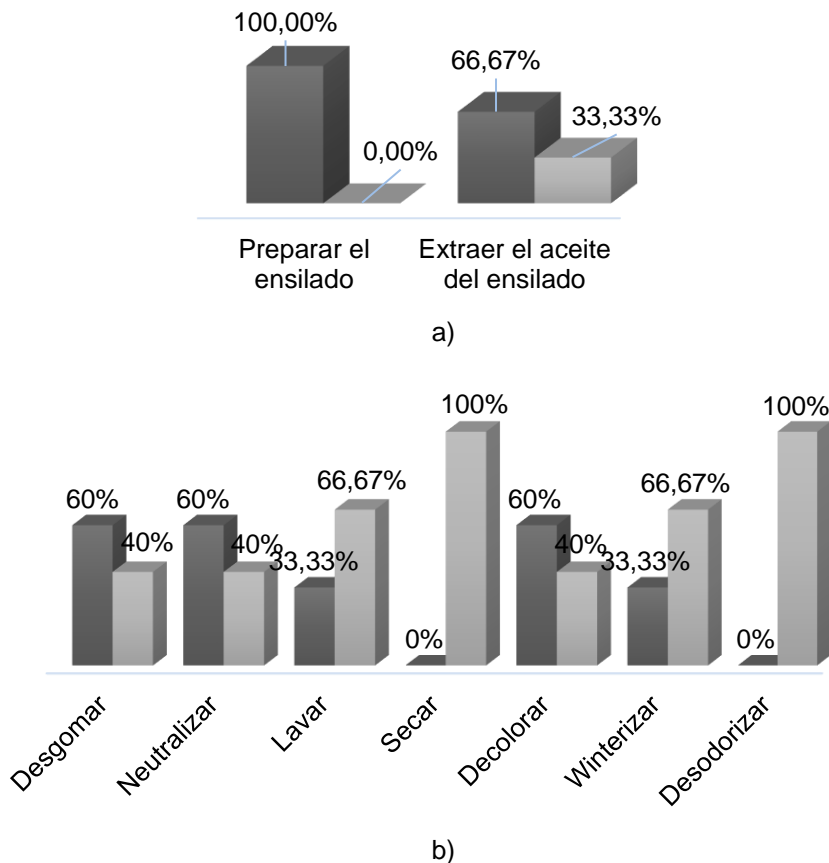


Fuente: elaboración propia,septiembre de 2016.

Realizando el mismo estudio, pero a cada uno de las operaciones del POAP – LAB se obtuvieron los siguientes resultados: en la operación preparar el ensilado el 100 % de sus fases son manuales, por lo tanto, este proceso no cuenta con ninguna fase semi-

automática; en la operación extraer el aceite del ensilado 66,67 % de sus fases son manuales y el 33,33 % son semi-automáticas; en las operaciones desgomar, neutralizar y decolorar el 60 % de sus fases se realizan de forma manual y el 40% restante de forma semi-automática; en las operaciones secar y winterizar el 33,33 % de sus fases son manuales y el 66,67 % son semi-automáticas y finalmente, en las operaciones secar y desodorizar sus fases son netamente semi-automáticas (ver Figura 33).

Figura 33: niveles de automatización para cada una de las operaciones del POAP – LAB. a) Operaciones del procedimiento de unidad: extraer aceite crudo. b) Operaciones del procedimiento de unidad: refinar el aceite crudo.



Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

2.4.3. Análisis de los modelos ISA - S88.01

El POAP – LAB es realizado a nivel de laboratorio por el grupo de investigación ASUBAGROIN en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca; su ejecución completa es para un lote de 53 kg de vísceras que son aproximadamente 15 litros de aceite de pescado crudo, el cual tarda alrededor de 10 - 15 días, debido a que se usan los equipos rotaevaporador y centrifugas, los cuales no cuentan con la capacidad suficiente para procesar todo el aceite crudo de una sola vez, al contrario, se debe dividir el lote de aceite crudo en pequeñas cantidades, lo que hace que el proceso tarde por cada etapa al menos 50 veces más.

A los modelos: de proceso, físico y de control procedimental de ISA 88.01 construidos anteriormente (ver anexo B), se les realizará un análisis general en el cual se mostrarán sus características principales.

Análisis general del modelo de proceso

El POAP – LAB es un proceso tipo *batch* porque en sus 2 etapas de proceso se tratan cantidades de materiales finitos, lo cuales se someten a tareas ordenadas de procesamiento, utilizando para esto uno o varios equipos durante un tiempo definido [49].

Operación de proceso “Preparado del ensilado”

Esta operación de proceso es 100 % manual, el cual requiere de gran esfuerzo físico por parte del operador para la realización de las acciones de proceso correspondientes a 26 kg de eviscerado de pescado y el traslado de estos tanques herméticamente sellados al cuarto de ambiente controlado para su hidrólisis; por otro lado, el riesgo al que se expone el operador es elevado en esta operación, puesto que este se encuentra en contacto con compuestos químicos.

Operación de proceso “Extracción de aceite del ensilado”

Esta se realiza en su mayoría de manera manual y no cuenta con el equipo adecuado para llevarla a cabo, además, requiere que el operador tenga conocimiento de las acciones de proceso que se realizan debido a que el aceite crudo es un producto delicado y de fácil oxidación.

Operaciones de proceso: “Desgomar”, “Neutralizar” y “Decolorar”

En estas operaciones, las acciones de proceso son en su mayoría manuales (60 %) y en igual porcentaje presentan un nivel de dificultad medio, haciendo referencia en gran parte al conocimiento requerido por el operario para llevar a cabo cada una de ellas, por otra parte, el 33,33 % de ellas presentan un nivel de dificultad elevado. El 40 % restante son semi-automáticas, puesto que estas cuentan con dispositivos tecnológicos que aportan al trabajo del operador a pesar de que estos dispositivos no son los más óptimos para realizar estas tareas, sino que estos fueron acondicionados dada la necesidad de los investigadores, por esta razón en las acciones de proceso centrifugar, el operador debe realizar una acción adicional que es un decantado dadas las condiciones de salida del producto, cabe aclarar que estas acciones no se encuentran registradas en la documentación expuesta por los investigadores, debido a que para ellos y a las características del equipo son acciones inherentes para cada acción de proceso.

Operación de proceso “Winterizado”

En esta se presenta un 83,33 % de las acciones de proceso en nivel medio de dificultad, las cuales hacen referencia al conocimiento que debe tener el operador para llevarlas a cabo, requiriendo habilidad y experiencia a la hora de manipular los componentes y los equipos. Es necesario mencionar que los rangos de temperatura y los equipos utilizados para cumplir con los requerimientos fueron encontrados mediante pruebas empíricas haciendo uso del cuarto de ambiente controlado, refrigerador casero y centrífuga

refrigerada; siendo esta última la que arrojó los mejores resultados acorde a los parámetros requeridos por el laboratorio. Por tal motivo, es posible deducir que para esta etapa del proceso no se cuenta en el laboratorio con un equipo acorde a la necesidad del producto.

Operación de proceso “Desodorizado”

Para esta operación de proceso el equipo del laboratorio realizó un montaje que les permitiera cumplir con los requerimientos establecidos para el producto, por tal razón sus acciones de proceso requieren un nivel de conocimiento elevado del proceso y de las condiciones fisicoquímicas del producto por parte del operador. Por lo cual, esta operación de proceso se encuentra clasificada en un nivel de automatización semi-automático.

Se concluye que el 72,22 % de las acciones requieren un buen nivel de conocimiento por parte del operador referente a las condiciones fisicoquímicas del subproducto que sale de cada una de las operaciones. El 22,22 % presentan un nivel de riesgo elevado referentes al manejo de componentes químicos que requieren cuidado en su manipulación, así como el manejo de altas y bajas temperaturas. Por otra parte, los requerimientos de esfuerzo físico se presentan en las dos primeras acciones de proceso siendo estas críticas bajo este criterio.

Análisis general del modelo físico

La planta del POAP – LAB cuenta con 11 equipos y elementos utilizados para ejecutar todas las tareas de proceso, para los cuales se requieren 27 módulos de control.

A pesar de que los investigadores ejecutan el proceso a nivel de laboratorio, no existen los equipos apropiados para la realización de cada una de las fases del POAP – LAB, ya que el 55,56% de este es manual. Por otra parte, el proceso se ubica en el nivel 1 de la pirámide de automatización, debido a que existen actividades de medición y manipulación de algunas fases en el proceso.

Por otro lado, es importante mencionar que, para el POAP – LAB se crearon y modelaron algunos módulos de equipo dada la necesidad y a las características del proceso, por ejemplo, el módulo de equipo “curato frio”, el cual consta de los módulos de control “aire acondicionado”, “calendario” y “operario”.

Análisis general del modelo de control procedimental

La ejecución del POAP – LAB se encuentra conformada por 36 fases, que representan cada una de las actividades necesarias para fabricar el aceite de pescado de consumo humano.

El 55,56 % del POAP – LAB se lleva a cabo manualmente, esto se debe a que la mayoría de las fases son de simple realización como mezclar, cerrar tanques o trasladar tanques, estas se ejecutan sin inconvenientes, pero es necesario que para la ejecución de algunas fases se tenga en cuenta el riesgo que se corre, debido a la manipulación de ácidos los cuales al entrar en contacto con las vísceras desprenden gases nocivos para la salud. Además, algunas operaciones pueden ser tan complejas como el Winterizado, siendo

esta delicada debido a que hay diversas variables de proceso a controlar (presión, temperatura y pH), por último, es importante mencionar que las cantidades de los ácidos que se agregan sean correctas, ya que una mala medición puede llevar a que todo el lote se pierda.

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

Después de realizar un análisis general del POAP, se obtuvieron necesidades de documentación, automatización y mantenimiento de los equipos involucrados en el proceso. Además de los análisis realizados (secciones 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3), se establecieron encuestas para determinar las necesidades mencionadas anteriormente.

Documentación

Se realizó una encuesta en donde se realizaron 6 preguntas con el objetivo de obtener información acerca de la documentación llevada en el proceso. Esta encuesta se realizó a cada uno de los 4 ingenieros investigadores del proceso (ver Tabla 9).

Tabla 9: respuestas sobre documentación del POAP.

Pregunta	Respuesta			Anotación
	Si	No	En proceso	
¿Se cuenta con un formato de seguimiento de parámetros?	1	3		Anotaciones en bitácoras.
¿Se cuenta con un formato de no conformidades del proceso?		4		
¿Se lleva documentación formal de la ejecución del proceso?		4		
¿Se cuenta con formatos de solicitud y órdenes de compra de materiales e insumos?	3	1		Formatos manejados por el área administrativa de la Universidad.
¿Se maneja documentación de inventario de insumos y materias primas?	1	3		Formatos manejados por el área administrativa de la Universidad.
¿Se lleva algún registro de la producción de aceite realizado?	2	2		Anotaciones en bitácoras.

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

En la ejecución del POAP – LAB por parte del grupo de investigadores ASUBAGROIN, se ve evidenciada la utilización de bitácoras para llevar registro de la mayoría de los datos de elaboración del lote; sin embargo, no se manejan formatos previamente establecidos, ya que cada persona que interviene en el proceso toma sus propias anotaciones según su criterio, lo cual no asegura que la reproducción de los datos sea confiable; debido a esto y a que no se tienen en cuenta el registro de datos previos por parte de los operarios del proceso, en algún momento se presentarán variaciones del producto final (producto defectuoso). También, es importante mencionar que no existe ningún documento formal para llevar registro de no conformes que se presenten en el POAP – LAB.

Por otra parte, existe un documento formal no detallado con la información del procedimiento requerido para realizar el proceso [12], lo que genera un problema para los futuros investigadores por la falta de información, además, no sigue un esquema estándar basado en modelos técnicos de proceso.

Respecto a las órdenes de compra y manejos de inventario, las personas encargadas llevan a cabo los registros correspondientes en los formatos del área administrativa de la Universidad del Cauca.

Necesidad en la automatización de operaciones

En el POAP – LAB no existe ninguna fase u operación que se realice de manera automática, es un proceso en el cual más de la mitad de su ejecución es de tipo manual (55,56%). Por tanto, surge la necesidad de automatización de las fases sugeridas por los 4 ingenieros investigadores del proceso, expresando esta necesidad en la encuesta realizada, en la cual se preguntó: “De las fases del proceso, ¿cuáles considera que necesitan ser automáticas?”, obtenido 121 respuestas afirmativas y 23 negativas (ver Tabla 10).

Tabla 10: respuestas sobre necesidad de automatización en algunas fases de POAP.

Operaciones	Fases	Respuesta		Anotaciones
		Si	No	
Preparar ensilado	Llenar vísceras		4	Dado que no todas las vísceras son útiles y necesitan monitoreo.
	Adicionar ácido Fórmico	3	1	En caso de que se utilicen cantidades mayores.
	Adicionar BHT		4	
	Mezclar		4	
	Hermetizar mezcla	2	2	Se requiere que efectivamente los tanques queden herméticos.
	Hidrolizar mezcla	1	3	
Extraer el aceite del ensilado	Destapar mezcla		4	
	Extraer el aceite suspendido	3	1	
	Centrifugar el aceite	4		
Desgomar	Llenar muestras	4		
	Adicionar ácido Fosfórico	4		
	Conectar muestras	4		
	Desgomar la mezcla	4		
	Centrifugar la mezcla	4		
Neutralizar	Llenar muestras	4		
	Adicionar KOH	4		
	Conectar muestras	4		
	Neutralizar la mezcla	4		

	Centrifugar la mezcla	4		
Lavar	Adicionar agua	4		
	Lavar la mezcla	4		
	Centrifugar la mezcla	4		
Secar	Calentar el aceite lavado	4		
Decolorar	Llenar muestras	4		
	Adicionar tierra silíceas	4		
	Conectar muestras	4		
	Decolorar la mezcla	4		
	Centrifugar la mezcla	4		
Winterizar	Llenar muestras	4		
	Adicionar acetona	4		
	Estabilizar la mezcla	4		
	Centrifugar la mezcla con refrigeración	4		
	Filtrar los cristales	4		
	Destilar la mezcla	4		
Desodorizar	Desodorizar el aceite winterizado	4		
	Centrifugar el aceite destilado	4		

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

De los resultados arrojados por la encuesta, se calculó que alrededor del 84 % del proceso debería ser automatizado. Además, en esta se obtuvieron algunas anotaciones importantes para el proceso de automatización de algunas operaciones, apuntando hacia el planteamiento de la propuesta de escalado, por ejemplo: se requiere que efectivamente los tanques queden herméticos y para la adición de ácidos en caso de que se realice a una escala mayor sí es importante su automatización.

Mantenimiento de equipos

Con base a la encuesta, se encontró que se realiza mantenimiento de las centrífugas y rotaevaporador, y calibración de la balanza (ver Tabla 11).

Tabla 11: respuestas sobre mantenimiento de equipos del POAP.

Pregunta	Respuesta			Anotación
	Si	No	En proceso	
¿Realiza mantenimiento a los equipos?	3	1		Centrífugas y rotaevaporador.
¿Realiza calibración de equipos?	2	2		Balanza.
¿Cuenta con manuales de los equipos?	4			Todos los equipos.
¿Manejan registro de mantenimientos y calibraciones realizadas?	2	2		Se registra en la hoja de vida de los equipos.
¿Cuentan con las herramientas necesarias para la realización adecuada del mantenimiento?	2	2		

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

A pesar de que se realiza el mantenimiento de algunos equipos, hay otros a los que no se les hace, aunque estos interactúen directamente con el proceso, tales como el aire acondicionado y las bombas de vacío.

2.5. Requerimientos del POAP

Después del respectivo modelado y análisis del POAP, surgen requerimientos generales, de automatización y hardware que permitirán la realización más eficiente de cada una de las fases del proceso.

Cabe aclarar que los requerimientos mencionados a continuación, surgen del análisis del proceso a nivel de laboratorio que posteriormente permitirán analizar las recomendaciones referentes al POAP – EI (POAP a escala industrial).

2.5.1. Requerimientos generales

A lo largo del análisis del POAP – LAB surgieron aspectos de ámbito general necesarios para obtener mejores resultados a la hora de realizar el POAP – EI. Estos requerimientos generales (RG) se basan en los problemas más significativos que tiene el proceso y se citan a continuación:

- **RG1.** Establecer un formato por consenso para apuntes del seguimiento de parámetros y anomalías durante la ejecución del proceso.
- **RG2.** Establecer un formato de registro de la producción y de las no conformidades.
- **RG3.** Realizar la documentación formal y completa de todo el proceso, asegurando la reproducción de la información.

2.5.2. Requerimientos de automatización

Después del análisis detallado del POAP y teniendo en cuenta los resultados arrojados acordes a la necesidad de los investigadores de automatizar el proceso; los requerimientos de automatización (RA) mostrados a continuación, serán enfocados en aspectos principales del POAP – EI:

- **RA1.** Diseñar la cadena de valor del proceso.
- **RA2.** Definir las variables interactuantes en el proceso, es decir, variables controladas, manipuladas y de disturbios.
- **RA3.** Documentar gráficamente el proceso mediante Diagramas de Flujo de Proceso (PFD por sus siglas en inglés) y Diagramas de Tuberías e Instrumentación (P&ID por sus siglas en inglés), apoyándose en la estándar ISA 5.1 [54].

- **RA4.** Organizar el proceso, modelándolo en términos de ISA - S88.01.
- **RA5.** Modelar la receta maestra y de control con base al estándar ISA 88.01.

2.5.3. Requerimientos hardware

Para el POAP – El se debe contar con equipos que permiten llevar a cabo cada una de las fases de proceso que lo conforman, por tanto, se plantean los siguientes requerimientos hardware (RH) necesarios en el proceso:

- **RH1.** Equipo o mecanismo que permita que la extracción del aceite del ensilado sea más eficiente.
- **RH2.** Equipo o contenedor que garantice hermeticidad al momento de tapar, esto para que no haya oxígeno dentro del recipiente conservando el ensilado, este a su vez debe contar con un dispositivo que permita un mezclado homogéneo.
- **RH3.** Equipo o dispositivo que permita mantener las condiciones de operación (temperatura, agitación, etc.), garantizando calidad y rendimiento.

3. ESCALAMIENTO INDUSTRIAL DE PROCESOS PRODUCTIVOS

En la literatura, el “escalamiento” es básicamente convertir un proceso o un equipo de una escala de investigación (a nivel de laboratorio o planta piloto) a una mayor, la cual puede ser industrial o de producción [55]; este escalamiento puede ser llevado a cabo de dos maneras: la primera, ascendente (*scale-up*) en la cual se pasa de un nivel de laboratorio a uno industrial; la segunda, descendente (*scale-down*) en el cual se realiza el proceso inverso. Por otra parte, se debe tener en cuenta que el escalamiento industrial está compuesto por 5 etapas: laboratorio, banco, planta piloto, planta semi-industrial e industrial (las últimas 2 etapas incluyen la comercialización del producto) [56].

Existen 3 metodologías o técnicas de escalamiento, en primer lugar, se tiene el principio de semejanza, que tiene que ver con las relaciones entre sistemas físicos de tamaños diferentes, siendo este fundamental para la ampliación o disminución de la escala en los procesos físicos y químicos [56]; en segundo lugar, el método basado en modelos en el cual se realiza un análisis matemático que representa el proceso para un escalado más preciso y confiable; sin embargo, realizar la validación del modelo y los regímenes de operación no es tarea fácil. Finalmente, el método basado en la experiencia (empírico), este recurre al registro histórico de datos del proceso en la escala existente o una posterior, generando así una relación matemática entre ellos, de tal manera que se produzcan correlaciones, aunque no es necesario contar con todas las variables del proceso o con todos los parámetros, es suficiente con tener algunos de estos [57].

Para el caso del POAP – LAB, se utilizará la técnica de escalado ascendente, ya que el propósito del grupo de investigación es alcanzar la producción industrial y comercial, teniendo en cuenta los logros alcanzados en las investigaciones a nivel de laboratorio.

En el desarrollo de este capítulo se presenta el Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos (PEIPP) [58], el cual es un procedimiento estructurado y ordenado para realizar un escalamiento industrial.

3.1. Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos (PEIPP)

En este trabajo, se plantea la implementación de cada uno de los pasos propuestos (6) por el PEIPP con el objetivo de obtener una propuesta del POAP – EI [58].

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

Este procedimiento propuesto por el ingeniero Edgardo Martínez Narváez, no especifica claramente cómo llevar a cabo cada uno de los pasos previamente mencionados, por tanto, los autores del presente trabajo especifican la forma de llevar a cabo cada uno de los pasos a medida que se van desarrollando.

3.1.1. Estudio del proceso a escala menor

Los proyectos industriales generalmente parten de una idea o concepción inicial, la cual se desarrolla por medio de una escala menor como es el caso del POAP – LAB, para llevar este a nivel industrial, el PEIPP recomienda estudiar detalladamente el proceso realizado en laboratorio, haciendo uso de los siguientes ítems.

Esquematización y documentación

Para lograr una esquematización detallada del POAP – LAB se realizan los diagramas de flujo por etapas y por acciones del proceso, teniendo en cuenta los distintos materiales que entran y salen en cada una de las operaciones (ver sección 2.2, Figura 26 y Figura 27).

En el caso del levantamiento de la documentación formal dentro del POAP – LAB, llevado a cabo en el Laboratorio de Biotecnología, se hizo uso de las recomendaciones propuestas por el estándar ISA - 88.01 [49], obteniendo los modelos físico, procedimental y de proceso (ver sección 2.3), en los cuales, se observa de manera clara los requerimientos físicos, así como, las actividades realizadas en cada una de las etapas necesarias para obtener el producto final.

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

Para la ejecución del POAP – LAB, es importante realizar un registro formal de todos los parámetros que son utilizados en este. Así mismo, existe la posibilidad que se presenten anomalías durante la ejecución del proceso, debido a que se están realizando mejoras en el producto final. Para cumplir con tal fin, se analizan de manera detallada las recetas maestra y de control (ver anexo B), proponiendo a partir de ellas el formato de seguimiento que consta de 61 parámetros, distribuidos en 33 fases principales (ver Tabla 12). Además, se agrega un espacio para anotaciones en caso de que surjan anomalías durante la ejecución de las operaciones.

Tabla 12: formato de seguimiento de parámetros del POAP – LAB.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE PESCADO A PARTIR DEL EVISCERADO DE TRUCHA				
Nombre del operario				
Fecha				
Hora de inicio				
Hora de finalización				
Operaciones	Fases	Parámetro		Anomalías
Preparar el ensilado	Llenar vísceras	Cantidad (g)		
	Adicionar acido Fórmico	Cantidad (L)		
	Adicionar BHT	Cantidad (g)		
	Mezclar	Tiempo (min)		

	Hidrolizar mezcla	Temperatura del hidrolizado (°C)		
		Tiempo de hidrólisis (días)		
Extraer el aceite del ensilado	Extraer el aceite suspendido	Cantidad (L)		
	Centrifugar el aceite	Tiempo de centrifugado (min)		
		Velocidad (min ⁻¹)		
Desgomar	Llenar muestras	Cantidad (mL)		
	Adicionar ácido Fosfórico	Cantidad (g)		
	Desgomar la mezcla	Temperatura de desgomado (°C)		
		Tiempo de desgomado (min)		
		Presión de desgomado (mmHg)		
		Velocidad de desgomado (min ⁻¹)		
	Centrifugar la mezcla	Tiempo de centrifugado (min)		
		Velocidad de centrifugado (min ⁻¹)		
Neutralizar	Llenar muestras	Cantidad (mL)		
	Adicionar KOH	Cantidad (g)		
	Neutralizar la mezcla	Temperatura de neutralizado (°C)		
		Tiempo de neutralizado (min)		
		Presión de neutralizado (mmHg)		
		Velocidad de neutralizado (min ⁻¹)		
	Centrifugar la mezcla	Tiempo de centrifugado (min)		
		Velocidad de centrifugado (min ⁻¹)		
Lavar	Adicionar agua	Cantidad (L)		
		Temperatura del agua (°C)		
	Lavar la mezcla	Temperatura (°C)		
		Tiempo (min)		
		Presión (mmHg)		
		Velocidad (min ⁻¹)		
	Centrifugar la mezcla	Tiempo de centrifugado (min)		

		Velocidad (min^{-1})		
Secar	Llenar muestras	Cantidad (g)		
	Calentar el aceite lavado	Temperatura de secado ($^{\circ}\text{C}$)		
		Tiempo de secado (min)		
		Presión de secado (mmHg)		
		Velocidad de secado (min^{-1})		
Decolorar	Llenar muestras	Cantidad (mL)		
	Adicionar tierra sílicea	Cantidad (g)		
	Decolorar la mezcla	Temperatura de decolorado ($^{\circ}\text{C}$)		
		Tiempo de decolorado (min)		
		Presión de decolorado (mmHg)		
		Velocidad de decolorado (min^{-1})		
	Centrifugar la mezcla	Tiempo de centrifugado (min)		
		Velocidad de centrifugado (min^{-1})		
Winterizar	Llenar muestras	Cantidad (mL)		
	Adicionar acetona	Cantidad (g)		
	Estabilizar la mezcla	Temperatura de estabilización ($^{\circ}\text{C}$)		
		Tiempo de estabilización (min)		
	Centrifugar la mezcla con refrigeración	Temperatura de refrigeración ($^{\circ}\text{C}$)		
		Tiempo de refrigeración (min)		
		Tiempo de centrifugado (min)		
		Velocidad de centrifugado (min^{-1})		
	Filtrar los cristales	Tiempo de filtrado (min)		
	Destilar la mezcla	Temperatura de destilado ($^{\circ}\text{C}$)		
		Tiempo de destilado (min)		
Desodorizar	Desodorizar el aceite winterizado	Tiempo de desodorizado (min)		

		Temperatura del vapor de agua (°C)	
		Tiempo de centrifugado (min)	
		Velocidad de centrifugado (min ⁻¹)	

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

Cálculo de densidades aparentes

Para determinar los volúmenes de producción requeridos a una escala industrial, es importante conocer el valor de las densidades correspondientes de cada uno de los materiales e insumos que ingresan a cada operación del proceso, esta información está consignada en la Tabla 13.

Tabla 13: densidades de los insumos presentes en cada operación del POAP – LAB.

Operación	Insumos	Densidad	
		Valor	Unidad
Preparar ensilado	Vísceras de pescado	1,09	g/cm ³
	Ácido Fórmico	1,22	g/cm ³
	BHT	1,05	g/cm ³
Extraer el aceite del ensilado	Aceite crudo	0,915	g/cm ³
Desgomar	Ácido Fosfórico	1,88	g/cm ³
	Aceite desgomado	0,915	g/cm ³
Neutralizar	Hidróxido de Potasio	2,12	g/cm ³
	Aceite neutralizado	0,915	g/cm ³
Lavar	Agua	1	g/cm ³
	Aceite lavado	0,916	g/cm ³
Secar	Aceite secado	0,916	g/cm ³
Decolorar	Tierra silíceas	0,317	g/cm ³
	Aceite decolorado	0,915	g/cm ³
Winterizar	Acetona	0,791	g/cm ³
	Aceite winterizado	0,916	g/cm ³
Desodorizar	Vapor de agua	0,862	g/cm ³
	Aceite desodorizado	0,918	g/cm ³

Fuente: elaboración propia, octubre de 2016.

Para determinar de manera sencilla las densidades aparentes de los materiales e insumos, se recomienda el uso de la relación densidad, masa y volumen, ver ecuación (1):

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

Donde, la masa (m) se mide usando una balanza y el volumen (v) se calcula en un recipiente con esta medida previamente definida, por ejemplo, se depositan las vísceras de pescado en un recipiente de 1000 cm³ hasta que se alcance dicho valor, luego se mide la masa de vísceras y se hace la relación correspondiente mediante la ecuación (1).

Debido a que requieren datos de la densidad del ensilado y su viscosidad, se ha organizado toda la experimentación correspondiente en el anexo C (cálculo de la densidad y la viscosidad del eviscerado).

Estudio de mercado, unidad productiva

La importancia del estudio de mercado, se enfoca en analizar de manera detallada aquello que permite la obtención de buenas perspectivas económicas a futuro para el proyecto, así mismo, se enfatiza en encontrar la determinación de la unidad productiva real [59]. En ese sentido, se establece cuantitativamente la población a la que irá dirigido el producto fabricado, a fin de lograr éxito en el mercado.

Para esto, el grupo de investigación ASUBAGROIN, ha desarrollado un estudio detallado de los diferentes entornos (económico, social, político, ambiental y tecnológico), de igual manera han analizado en detalle el sector al cual va dirigido el proyecto. Cabe aclarar que este se enfoca principalmente en la producción de alimentos concentrados, el cual no ahonda en detalle la producción de aceite [60]. Concluyendo así, que este tipo de producción se encuentra en un sector productivo auto-protégido, dado por economías de escala e infraestructura de gran magnitud, forzando a los diversos competidores a realizar investigaciones relacionadas con el desarrollo de mercados y canales que permitan la permanencia en el sector. Por otra parte, estas empresas obtienen sus utilidades gracias a su propio objeto de negocio, demostrando así un mercado rentable, sostenible y atractivo para los inversionistas; alcanzando altas demandas de producción, convirtiendo a la planta en una empresa de interés para la región.

Primer estudio de factibilidad

Para todo proyecto industrial, es importante conocer la viabilidad de escalar el proceso para comercialización, haciendo un estudio de los entornos y la articulación de este con el sector productivo, enfocándose en dar una evaluación subjetiva y argumentada de los logros y dificultades (fortalezas, debilidades, oportunidades, amenazas) durante la ejecución del proceso a nivel de laboratorio; sin embargo, el desarrollo del estudio de factibilidad no es competencia de los autores de este trabajo, se debe realizar por parte de los integrantes directos del proyecto quienes conocen a profundidad el proceso y además, se debe realizar con ayuda de personal capacitado para desarrollar estudios de esta magnitud.

El equipo de investigación ASUBAGROIN, ha desarrollado un estudio de factibilidad referente a la obtención de alimentos concentrados a partir de productos derivados piscícolas [60]. Como bien se sabe, el aceite de pescado es un subproducto derivado de este tipo de producción, el cual se ha dejado únicamente en etapa de laboratorio, por ende, los investigadores no abordaron lo relacionado a esta producción. No obstante, cabe la posibilidad de que se realice a futuro el estudio correspondiente.

3.1.2. Estudio del proceso a escala mínimamente aumentada

En ocasiones, es necesario proyectar o aumentar la producción inicial, llegando a lo que se conoce normalmente como escala de planta prototipo, la cual se orienta a la configuración de las unidades experimentales con características geométricas y operacionales similares a los equipos de planta piloto o industriales disponibles o recomendables, a diferencia de la etapa de laboratorio, en el cual el equipamiento utilizado difiere considerablemente del industrial. Los objetivos de este proceso de escalamiento son: revelar la esencia de los fenómenos que ocurren en el proceso, evidenciar las variables de proceso en las operaciones, inferir hipótesis de modelos matemáticos y aportar información para cálculos y diseños de ingeniería [56]. Se debe agregar que la determinación del factor de escala dependerá del juicio y experiencia que han conseguido los investigadores del proceso en cuestión, considerando la capacidad real de incremento con la que se cuenta hasta el momento.

Los investigadores del grupo ASUBAGROIN, ejecutaron un escalamiento de planta piloto de 1:4, basado en la experiencia para la etapa de refinación del aceite crudo en las operaciones de: desgomado, neutralizado, decolorado, winterizado y desodorizado. Para este escalamiento se utilizó un equipo biorreactor Centricol con capacidad de 20 L, disponible en el laboratorio de Biotecnología [61]. Las descripciones de las operaciones de proceso anteriormente mencionadas se describen a continuación:

- **Desgomado:** se emplearon aproximadamente 4,6 L de aceite crudo que fueron llevados al biorreactor para ser calentados hasta que alcanzaran una temperatura de 80 °C, luego se adicionó 0,5 % de ácido Fosfórico (p/p) con agitación constante de 50 rpm en atmósfera de nitrógeno durante 30 minutos. Finalmente, el aceite fue centrifugado en un separador centrífugo CINC a una frecuencia de 90 Hz.
- **Neutralizado:** el aceite desgomado se calentó a 40 °C en el biorreactor, después se adicionó 20 % de KOH respecto al índice de acidez, en atmósfera de nitrógeno y con agitación constante de 50 rpm durante 20 minutos. Los jabones fueron separados por decantación durante 60 minutos y posteriormente el aceite se centrifugó en el separador centrífugo a 90 Hz hasta eliminar completamente los residuos de jabón, debido a esto no fueron necesarias las operaciones de lavado y secado.
- **Decolorado:** para esta, el aceite neutralizado se llevó a una temperatura de 80 °C en el biorreactor, seguido a esto, se adicionó 1 % de tierra silíceas con agitación constante de 50 rpm durante 20 minutos, después de este tiempo la tierra silíceas fue separada por un medio filtrante, el cual se acopló a la válvula de salida del biorreactor.
- **Winterizado:** primero se llenó un recipiente con aceite decolorado, que se llevó a 15 °C y posteriormente se dejó en reposo hasta llegar a una temperatura de - 4 °C durante 56 minutos en un equipo refrigerador, luego los cristales se retiraron por filtración durante 30 minutos.

- **Desodorizado:** el aceite fue llevado al biorreactor para ser desodorizado mediante una corriente de nitrógeno durante 30 minutos.

Estudio de variables principales de proceso

En todo proceso industrial, es absolutamente necesario controlar y mantener constantes algunas variables de proceso, tales como presión, caudal, nivel, temperatura, pH, entre otras, debido a que estas hacen referencia a las variables físicas y medibles que permiten conocer el comportamiento del proceso en el tiempo. Por otra parte, dentro del campo de control de procesos, dichas variables se pueden clasificar de dos maneras: en primer lugar, las variables controladas, las cuales tienen como finalidad seguir un comportamiento deseado a lo largo del proceso; en segundo lugar, las variables manipuladas, que son aquellas que influyen de manera directa en el comportamiento de las variables controladas [62], [63].

Para llevar a cabo la clasificación, se establecen y organizan las variables que interactúan directamente en cada operación del proceso, para lo cual se realiza un estudio de los modelos ISA - S88.01 (ver anexo D, modelos ISA - S88.01 del POAP – EM). Dentro del POAP a escala mínimamente aumentada (POAP – EM) se encuentran diferentes variables de proceso, las cuales están distribuidas de acuerdo a las etapas y operaciones, logrando así observar de una mejor manera cada una de estas (ver Tabla 14).

Tabla 14: variables interactuantes del POAP - EM.

Etapa de proceso	Operaciones de proceso	Variable controlada	Variable manipulada
Extracción de aceite crudo	Preparado del ensilado	Masa de vísceras	Masa de vísceras
		Volumen de A. Fórmico	Volumen de A. Fórmico
		Masa de BHT	Masa de BHT
	Extracción del aceite del ensilado	Volumen de CO_1	Volumen de CO_1
Refinado del aceite crudo	Desgomado	Volumen de CO_2	Volumen de CO_2
		Calentar CO_2	Corriente eléctrica
		Volumen de A. Fosfórico	Volumen de A. Fosfórico
		Presión de nitrógeno	Caudal de entrada de nitrógeno
		Velocidad de agitación de mezcla	Corriente eléctrica
		Frecuencia de centrifugación del D_O	Corriente eléctrica
	Neutralizado	Volumen de D_O	Volumen de D_O
		Presión de nitrógeno	Caudal de entrada de nitrógeno
		Calentar D_O	Corriente eléctrica

		Masa de KOH	Masa de KOH
		Velocidad de agitación de mezcla	Corriente eléctrica
		Decantar mezcla	Corriente eléctrica
		Frecuencia de centrifugación del N_O	Corriente eléctrica
	Decolorado	Volumen de N_O	Volumen de N_O
		Calentar N_O	Corriente eléctrica
		Masa de T_S	Masa de T_S
		Velocidad de agitación de mezcla	Corriente eléctrica
	Winterizado	Calentar B_O	Corriente eléctrica
		Temperatura de estabilización	Corriente eléctrica
	Desodorizado	Presión de nitrógeno	Caudal de entrada de nitrógeno

Fuente: elaboracion propia, octubre de 2016.

Para tener una visión más detallada en cuanto a los parámetros de la Tabla 14, se realizó la correspondiente asignación de un código alfanumérico (*tag number*) utilizando representación en inglés o español para distinguir cada una de ellas, por ejemplo: a Crude Oil (aceite crudo) se le asigna la tag CO_1 o 2, a Degummed Oil (aceite desgomado) la tag D_O, a Neutralized Oil (aceite neutralizado) la tag N_O, a Tierra Silíceas T_S y a Bleached Oil (aceite decolorado) la tag B_O.

Rendimiento obtenido

Es importante saber, que el concepto de rendimiento está en estrecha vinculación con conceptos de eficiencia y efectividad, siendo para este caso, la relación de la cantidad de producto resultante respecto a la cantidad de materias primas que entran al proceso productivo, esto en cantidades porcentuales.

Para el POAP – EM, el rendimiento hace referencia a la cantidad de aceite obtenida a partir de la cantidad de eviscerado utilizado en el proceso, también es importante conocer el rendimiento específico, es decir, aquel que involucra la relación de las cantidades de material en cada una de las operaciones que conforman todo el proceso, permitiendo obtener información concreta basada en cada subproceso (ver Tabla 15).

Tabla 15: rendimiento obtenido de todos los insumos que interactúan en el POAP – EM.

Operación	Insumos	Entrada	Desperdicio	Unidad	Rendimiento
Preparar ensilado	Vísceras de pescado	200	140	kg	30,00%
	Ácido Fórmico	38	0	mL	100%
	BHT	200	200	g	0%
Extraer el aceite del ensilado	Aceite crudo	60	0	L	100%

Desgomar	Agua	25	0	L	100%
	Ácido Fosfórico	15	0	mL	100%
	Aceite desgomado	60	6,00	L	90,00%
Neutralizar	Hidróxido de Potasio	99	0	g	100%
	Aceite neutralizado	54	5,40	L	90,00%
Decolorar	Tierra silícea	445	0	G	100%
	Aceite decolorado	48,60	4,86	L	90,00%
Winterizar	Aceite winterizado	43,74	4,37	L	90,00%
Desodorizar	Nitrógeno	5	5	L	0%
	Aceite desodorizado	43,64	4,36	L	90,00%

Fuente: elaboración propia, octubre de 2016.

El análisis de rendimiento específico obtenido en el POAP - EM, muestra que cada uno de los químicos necesarios durante todo el proceso son recuperados en su totalidad dando un rendimiento del 100%, con excepción de la base BHT el cual forma parte del aceite final, logrando así, el aumento en la calidad del aceite refinado evitando su fácil oxidación. Por otra parte, se observa que el rendimiento más bajo dentro del proceso se encuentra en la operación preparar ensilado, puesto que de 200 kg de eviscerado se obtiene un rendimiento del 30 % dejando como desperdicio 140 kg, cabe aclarar que el índice de aceite presente en las vísceras de pescado es del 88 %; pero, dadas las condiciones de los equipos utilizados por el grupo de investigación solo logro obtener el 69 % de este, dando como resultado la obtención del aceite total presente en el eviscerado en un 60 %; sin embargo, este índice de rendimiento puede ser mejorado mediante el uso de operaciones mecánicas. Para las operaciones de refinado (desgomar, neutralizar, decolorar, winterizar y desodorizar), el rendimiento es del 90 % en cada una de ellas, mostrando que el proceso presenta un alto índice de eficiencia dadas las condiciones de operación (65,46 %), obteniendo una producción de 39,28 L de aceite refinado para consumo humano, generando como resultado que el POAP – EM presenta un índice de rendimiento alto.

Con todo lo anterior, se observa que a pesar del alto rendimiento del POAP – EM este tardó en su ejecución el mismo tiempo que el POAP – LAB, con la diferencia que en este caso se procesó aproximadamente 5 veces más aceite (60 L) que en la escala de laboratorio, obteniéndose en esta 13 L.

Consumo energético y de materiales

En este estudio, se requiere conocer el consumo de energía necesario para la puesta en marcha de la planta piloto, haciendo un análisis detallado del POAP – EM; este consumo se clasifica en 3 grupos: energía eléctrica, insumo para combustión y tomas de aire, usados generalmente en procesos productivos. La siguiente tabla (ver Tabla 16), consigna los valores de consumo de potencia y el tiempo de funcionamiento de cada uno de los equipos principales empleados para llevar a cabo las operaciones de proceso.

Tabla 16: consumo energético de los equipos involucrado en el POAP – EM.

Equipo	Potencia [W]	Tiempo de uso [h]
Aire acondicionado	1034	24
Biorreactor	150	16,67
Separador centrífugo	180	11,67
Refrigerador horizontal	165,6	0,93
Varios	200	8

Fuente: elaboración propia, enero de 2017.

Teniendo la potencia total consumida en el POAP – EM, se estimará el valor de potencia consumida en un mes (ver ecuación (2)), una vez obtenido esto, se hará el producto con la tarifa que se maneja en el sector donde está ubicada la FCA.

$$kWh = \frac{Potencia * Horas * Días * F_U * F_P}{1000} \quad (2)$$

Dónde:

Potencia: hace referencia a la potencia total consumida por los equipos en el POAP – EM.

Horas: se refiere a las horas que han estado en funcionamiento los equipos en el POAP – EM

Días: generalmente este valor es 30, ya que son los días en un mes, así al final se puede estimar el costo de producción de una cantidad finita de aceite en este periodo.

Fu (factor de utilización): relación entre el tiempo de operación de un equipo y su tiempo disponible, para zonas residenciales en la ciudad de Popayán está fijado en 0,3 y para zonas no residenciales (caso FCA) está en 0,5.

Fp (factor de potencia): relación entre la potencia activa y la potencia aparente, fijado en 0,9.

La tarifa fijada por la Compañía Energética de Occidente para zonas no residenciales es de \$ 560,8143 COP/kWh [64]. Ahora, reemplazando los valores en (2) se obtendrá el valor de potencia (ver ecuación (3)) consumida en un mes:

$$kWh = \frac{1730 W \times 61,27 h \times 30 \text{ días} \times 0,5 \times 0,9}{1000} = 1430,55 kWh \quad (3)$$

Posteriormente, se multiplica la potencia obtenida en (3) por el valor de la tarifa y así se obtendrá el costo mensual para producir el aceite de pescado (ver ecuación (4)) en el POAP – EM:

$$C_{Aceite} = 1430,55 kWh \times 560,8143 \frac{COP}{kWh} = 802.274,11 COP \quad (4)$$

Lo que significa que producir un lote de aceite en el POAP – EM, cuesta aproximadamente \$ 802.300 COP.

Respecto al consumo de materiales, se organizó toda la información sobre la materia prima que se necesitó en el proceso, incluyendo aditivos o materiales secundarios. Para lo cual, se tiene en cuenta los modelos de receta maestra y de control que propone el estándar ISA - 88.01 [49] permitiendo organizar dicha información.

En primer lugar, se encuentra la receta orientada a la célula de proceso o al subconjunto de equipos de esta [49]. Por tanto, las entradas, productos, parámetros y salidas del POAP – EM se organizaron de acuerdo a las operaciones. Además, se tiene en cuenta los requerimientos de equipos para la puesta en marcha del proceso (ver Tabla 17).

Tabla 17: modelo de receta maestra del POAP - EM.

RECETA MAESTRA

PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE PESCADO A PARTIR DEL EVISCERADO DE TRUCHA

VERSIÓN: 1.0

AUTOR (ES): Lenin Córdoba Eraso, Sergio Guillermo Melo C.

REVISÓ: Ingeniera Rocío Bonilla.

FECHA: Popayán, 27 de octubre de 2016.

FÓRMULA		
Entrada de proceso	Vísceras de pescado	
	Ácido Fórmico	
	BHT	
	Ácido Fosfórico	
	Hidróxido de Potasio	
	Agua	
	Tierra silíceas	
	Nitrógeno	
	Alimentación eléctrica	
Producto en proceso	Eviscerado de pescado y aceite crudo	
Parámetro de proceso por operación	Operación	Parámetro
	Preparado del ensilaje	Tiempo de mezclado
		Tiempo de hidrólisis
		Temperatura de hidrólisis
	Extracción del aceite del ensilaje	Volumen de CO_1
	Desgomado	Volumen de CO_2
		Calentar el CO_2
		Tiempo de calentado del CO_2
		Presión de nitrógeno

		Velocidad de agitación de la mezcla
		Tiempo de agitación de la mezcla
		Frecuencia de centrifugación del D_O
	Neutralizado	Calentar el D_O
		Tiempo de calentado del D_O
		Presión de nitrógeno
		Velocidad de agitación de la mezcla
		Tiempo de agitación de la mezcla
		Tiempo de decantación
		Frecuencia de centrifugación del N_O
	Decolorado	Calentar el N_O
		Tiempo de calentado del N_O
		Velocidad de agitación de la mezcla
		Tiempo de agitación de la mezcla
	Winterizado	Calentar el B_O
		Tiempo de estabilización de la mezcla
		Temperatura de estabilización
Tiempo de filtrado		
Desodorizado	Presión de nitrógeno	
	Tiempo de desodorizado	
Salida de proceso	Aceite refinado	
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO		
Tanques plásticos		
Báscula		
Balanza		
Probeta		
Espátula		
Aire acondicionado		
Cubeta		
Biorreactor		
Separador centrífugo		
Refrigerador horizontal		

Fuente: elaboración propia, octubre de 2016.

Para detallar la asignación de los nombres de las operaciones y parámetros de la Tabla 17 se usaron *tags* y siglas con el fin de caracterizar los materiales y/o procesos. Por

ejemplo, en la operación “extracción del aceite del ensilado”, se tiene el parámetro “Masa CO_1” que hace referencia a la extracción de aceite crudo después del tiempo de hidrólisis y la cantidad extraída en esta, respectivamente.

En segundo lugar, se tiene la receta de control, la cual, durante el procesamiento de un lote se verá modificada, puesto que estos cambios pueden realizarse en un periodo de tiempo basado en la programación, equipo o información del operador, por ejemplo esta puede ser modificada debido a: un evento inesperado, definir el equipo que será realmente utilizado una vez se inicia el lote o se tenga conocimiento del mismo y agregar o ajustar parámetros basados en la calidad de las materias primas o en el análisis del lote [49].

En el POAP - EM se presentan: materiales, productos procesados, parámetros y requerimientos de equipos que, junto a cantidades, valores y especificaciones, conforman la receta maestra del mismo. Así, se cuenta con la información específica para obtener aceite de consumo humano (ver Tabla 18).

Tabla 18: modelo de receta de control del POAP – EM.

RECETA DE CONTROL

PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE PESCADO A PARTIR DEL EVISCERADO DE TRUCHA

VERSIÓN: 1.0

AUTOR (ES): Lenin Córdoba Eraso, Sergio Guillermo Melo C.

REVISÓ: Ingeniera Rocío Bonilla.

FECHA: Popayán, 27 de octubre de 2016.

FÓRMULA			
Entrada de proceso	Material	Cantidad	Unidad
	Vísceras de pescado	200	kg
	Ácido Fórmico	38	mL
	BHT	200	g
	Ácido Fosfórico	15	mL
	Hidróxido de Potasio	99	g
	Agua	10	L
	Tierra silícea	445	g
	Nitrógeno	5	L
Producto en proceso	Alimentación eléctrica	110 – 220	VAC
	Eviscerado de pescado y aceite crudo		
Parámetro de proceso por operación	Parámetro	Valor	Unidad
	Tiempo de mezclado	7	min
	Tiempo de hidrólisis	6	días
	Temperatura de hidrólisis	15	°C
	Volumen de CO_1	50	L
	Volumen de CO_2	4,6	L
	Calentar el CO_2	80	°C

	Tiempo de calentado del CO_2	30	min
	Presión de nitrógeno	20	psi
	Velocidad de agitación de la mezcla	50	min ⁻¹
	Tiempo de agitación de la mezcla	30	min
	Frecuencia de centrifugación del D_O	90	Hz
	Calentar el D_O	40	°C
	Tiempo de calentado del D_O	20	min
	Presión de nitrógeno	20	psi
	Velocidad de agitación de la mezcla	50	min ⁻¹
	Tiempo de agitación de la mezcla	20	min
	Tiempo de decantación	60	min
	Frecuencia de centrifugación del N_O	90	Hz
	Calentar el N_O	80	°C
	Tiempo de calentado del N_O	20	min
	Velocidad de agitación de la mezcla	50	min ⁻¹
	Tiempo de agitación de la mezcla	20	min
	Calentar el B_O	15	°C
	Tiempo de estabilización de la mezcla	56	min
	Temperatura de estabilización	- 4	°C
	Tiempo de filtrado	30	min
	Presión de nitrógeno	20	psi
	Tiempo de desodorizado	30	min
Salida de proceso	Aceite refinado de consumo humano		
REQUERIMIENTOS DE EQUIPO			
Equipo	Especificación		
Tanques plásticos	Capacidad: 70 L; material: Polietileno de alta densidad; tapa: aro de fleje y cierre metálico; resiste temperaturas: 20 a 80 °C; resiste numerosos ácidos y gases.		
Báscula	Modelo: DYP6012; marca: JCM; diseño: estructura tubular en acero al carbón; capacidad: de 150 kg - 1000 kg.		
Balanza	Modelo: GAB - N; marca: KERN; rango de medida: 0,2 g a 30 kg.		
Probeta	Modelo: DBB010; marca GLASSCO; capacidad: 250 mL; clase A; material: vidrio.		
Espátula	Material: aluminio.		
Aire acondicionado	Modelo: AC12BTU; marca: KALLEY; voltaje: 220 VA;		

	corriente: 4,7 A.
Cubeta	Material: plástico; capacidad interior: 15 L.
Biorreactor	Marca: Centricol; material: acero inoxidable; capacidad: 20 L.
Separador centrífugo	Marca: CINC; modelo: V02; revolución máxima: 6000 rpm; flujo máximo de salida: 1,9 gal/min; presión máxima: 44 psi; rango de temperatura: - 30 a 100 °C; frecuencia: 50/60 Hz; potencia del motor: 0,13 hp.
Refrigerador horizontal	Marca: CHALLENGER; modelo: CH 393; capacidad: 535 L; rango de temperatura del refrigerador: - 1 a 5 °C; rango de temperatura del congelador: - 15 a - 18; capacidad frigorífica: 881 BTU/hora; potencia del compresor: 152 W; corriente: 1,44 A; voltaje: 115V/60Hz.

Fuente: elaboración propia, octubre de 2015.

Por otra parte, en el establecimiento del consumo de materiales, se recomienda realizar un estudio detallado en el cual se incluyan los servicios públicos: agua, alcantarillado, iluminación y demás, así mismo este puede ser soportado por el segundo estudio de factibilidad.

Estudio del manejo de residuos

Debido a que en el POAP - EM se generan residuos mayormente biológicos (proteína de pescado) y químicos utilizados en el proceso (ácido Fórmico, ácido Fosfórico, BHT, KOH, entre otros), por ende, surge la necesidad de mencionar las normas que rigen en Colombia para el tratamiento o disposición final de dichos residuos.

Dado el estudio de manejo de residuos realizado por el grupo de investigación ASUBAGROIN, la ejecución de este tipo de proyecto no implica impactos ambientales considerables. No obstante, se resalta la generación de efluentes con contenidos de espumas y materia orgánica por las actividades inherentes a la planta piloto y el módulo de ensilajes, por tal motivo, para el manejo de este impacto es recomendable establecer la construcción de una Planta de Tratamiento de Agua Residuales (PTAR), puesto que esta mitigaría y reduciría el bajo impacto sobre el recurso hídrico. En cuanto al tema de calidad de aire, se estima que su afectación es baja y se caracteriza por la generación puntual de partículas y olores, para este último se estima un bajo impacto, debido al manejo de residuos sólidos mediante compostaje con aditivos y microorganismos que permiten acelerar y estabilizar la fase de maduración de manera más rápida.

Es necesario mencionar que la generación de impactos socioeconómicos por parte de este tipo de proyectos es positiva, debido a la: generación de ingresos, activación y diversificación del sector piscícola y utilización de subproductos que anteriormente tenían como disposición final cuerpos de agua y suelos de la zona.

La mayoría de impactos ambientales se presentan en la fase de construcción por los movimientos de tierra y a la alteración del paisaje, pero dentro de las medidas ambientales se contemplan la restitución de cobertura vegetal y disposición final de escombros, logrando así mitigar y restablecer los efectos de esta fase. En el anexo E (viabilidad ambiental), se encuentran estipulados las diferentes normas y decretos ambientales que rigen en Colombia para el manejo de estos recursos, permisos

requeridos para el funcionamiento de la actividad industrial y parámetros ambientales que se deben cumplir en cuestión de contaminación y vertimientos.

Segundo estudio de factibilidad

Dado que el PEIPP propuesto por el ingeniero Edgardo Martínez Narváez, propone el levantamiento de un segundo estudio de factibilidad, este no hace parte de las competencias de los autores de este trabajo, por tal motivo se recomienda que sea realizado por los investigadores del grupo ASUBAGROIN con ayuda de personal que cuente con el perfil profesional necesario para desarrollar este tipo de estudios.

Con la información obtenida anteriormente y la experiencia adquirida por el grupo de investigación, se sugiere la elaboración del estudio de factibilidad, considerando la evaluación y análisis de los integrantes del proyecto, la información objetiva y cuantificada que se ha logrado del rendimiento, consumo energético y de materiales. Además, es necesaria la formulación de un estudio estadístico a pequeña escala, segmentando el mercado y por medio de encuestas, determinar el grado de satisfacción y aceptación del producto obtenido.

3.1.3. Establecimiento y cálculo de parámetros de escalamiento

En este punto se desarrolla el cálculo de los parámetros aproximados que se esperarían en la escala industrial propuesta. No obstante, para poder abordar los ítems siguientes, es necesario el apoyo interdisciplinario por parte de los investigadores involucrados en este proceso, puesto que en ocasiones pueden llegar a omitir o a catalogar de baja importancia cierta información del proceso, que para los autores de este trabajo podría ser de valor para llevar a cabo la propuesta de escalamiento.

Cálculo de factor de escalamiento

El factor de escalamiento (k) es el parámetro que ayuda con la aproximación de valores en la nueva escala, representando la magnitud en la que se aumenta la dimensión de la planta, este factor se representa de acuerdo a la relación entre producción actual y deseada (ver ecuación (5)). Es importante aclarar que con la escala del POAP – EM se logró un factor de escala de aproximadamente 4 respecto al POAP – LAB.

$$k = \frac{m'}{m} \quad (5)$$

Donde, m' es la unidad productiva real y m es la cantidad lograda en la escala mínimamente aumentada. Para este caso, es importante aclarar que en Silvia – Cauca, se producen alrededor de 428 kg/día de vísceras de pescado, valor arrojado por el estudio de factibilidad desarrollado por el grupo de investigación ASUBAGROIN, en el cual se presenta una proyección en la demanda piscícola desarrollada desde 2013 hasta 2019 [60], por lo tanto, no se debe exceder esa barrera de producción. Dicho lo anterior, con esa cantidad de vísceras se producen alrededor de 62 L de aceite de pescado refinado, lo que representa un factor de escala de aproximadamente 13 con respecto a la escala mínimamente aumentada, esto considerando que en el laboratorio se refinaron 200 kg de

vísceras repartidas en lotes de aproximadamente 5 L de aceite crudo por día y en la nueva escala, se requiere la refinación de 84 L de aceite crudo en un lote por día.

Cálculo de volúmenes de producción

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

Simplificando el volumen de la ecuación (1), se obtiene la relación de volumen, masa y densidad (ver ecuación (6)).

$$v = \frac{m}{\rho} \quad (6)$$

Donde, la masa (m) se obtuvo del estudio entregado por los investigadores, es decir, la unidad productiva real y la densidad aparente (ρ) para algunas materias primas se calculó de manera experimental en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad del Cauca (ver anexo C).

Dado que previamente se realizó la segmentación de la información de la planta física y la relación de las operaciones de proceso con los módulos de equipo por medio del estándar ISA - 88.01 (ver anexo D), se determinarán los volúmenes de producción teniendo en cuenta las operaciones, ya que de esta manera se obtendrán los parámetros necesarios para dimensionar la planta de acuerdo a los módulos de equipo.

Puede agregarse que, al obtener los volúmenes de producción respecto a cada operación y módulo de equipo, se considera un factor offset de desviación del 10 % para dichos volúmenes. Por ejemplo, un tanque debe cumplir con una capacidad de almacenamiento de 1000 L, pero agregando el factor de seguridad, el volumen de producción sería 1100 L, además se debe considerar un valor de cabeza de aire en los tanques de almacenamiento del 20 % (ver anexo F, cálculo de volúmenes de producción para el POAP – EI).

Modificación cuantificada de variables principales del proceso

Para el POAP – EI, esta modificación se realizó a las variables de tiempo y velocidad de agitación en cada reactor (ver anexo G, dimensionamiento del POAP – EI), debido a que las demás variables se mantienen constantes; no obstante, dentro de la velocidad es necesario calcular la potencia del motor de agitación, para la selección del equipo. Para el caso de la variable presión se asigna un valor de 30 psi, ya que una presión mayor a los 50 psi podría causar daños en el equipo e incluso poner en riesgo al personal [65]. Finalmente, la documentación que mostrará en su totalidad la modificación de las variables, serán las recetas tanto maestra como de control, en estas se resumen todos los parámetros del proceso y se incluyen los equipos que intervienen en la línea de producción propuesta (ver anexo I, actualización de modelos ISA - S88.01 para el POAP – EI).

3.1.4. Ajuste comparativo según procesos que ya operan industrialmente

En este paso se propone recolectar información de procesos que actualmente ya se ejecutan, para el caso de la obtención de aceite de pescado en Colombia actualmente no se cuenta con una industria encargada de la fabricación, comercialización y distribución de aceites derivados de pescado, por tal motivo el ajuste comparativo con este tipo de industrias no es posible llevarlo a cabo.

3.1.5. Determinación de la planta física en la escala industrial

Para realizar una correcta determinación de los parámetros necesarios en el diseño de la planta, es importante tener en cuenta la información referente a los parámetros de escalamiento, correspondiente a la escogencia adecuada de equipos, flujos de proceso, entre otros.

Por otra parte, la alcaldía municipal de Silvia y el Cabildo Indígena de Guambia, han puesto a disposición del proyecto un total de cinco lotes candidatos para la construcción de la planta piloto. Sin embargo, el grupo de investigación ASUBAGROIN en el estudio de factibilidad [60], presentan los resultados correspondientes al proceso de acopio y análisis de la información necesaria para la aplicación del método de localización por factores ponderados para la planta piloto según los factores sociales, técnicos, económicos y ambientales para cada uno de los lotes.

De lo anterior, el lote candidato que cuenta con las mejores condiciones de viabilidad técnica para la construcción de la planta piloto es el “lote 3” llamado así en el estudio de factibilidad. Este lote se encuentra ubicado a 100 m de la planta de sacrificio del municipio de Silvia sobre la vía que conecta la vereda Santa Clara con la arteria principal que conduce hacia el municipio de Totoró, este lugar cuenta con un área aproximada de 2,050 m² y alejada a más de 200 m de la fuente de agua más cercana. Este territorio hace parte de la zona industrial del municipio según lo estipula el Plan de Ordenamiento Territorial.

Figura 34: toma general del lote 3.



Fuente: tomada de [60], noviembre de 2016.

Antes de comenzar con el modelado estructural de la planta de producción, se requiere tener en cuenta la normatividad colombiana vigente y regulada por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) la cual estipula la siguiente normatividad: Decreto 3075 de 1997 en el artículo 8 las condiciones generales que deben cumplir los establecimientos destinados a: fabricación, procesamiento, envase,

almacenamiento y expendio de alimentos [66]; Resolución 2674 de 2013 que en el artículo 6 menciona las condiciones generales de la planta y en el artículo 7 especifica las condiciones en las áreas de producción [67]; finalmente, Resolución 1160 del 2016 que enlista las características de construcción que deben cumplir las plantas de producción de medicamentos para consumo humano [68].

Escogencia de equipos

Lograr una adecuada escogencia de los equipos es una tarea compleja, no obstante, para ello se cuenta con los parámetros que permiten una segmentación específica orientada a las necesidades del proceso que facilitan esta labor, tales como: volúmenes de producción, balances de materiales y valores de las variables principales del proceso.

Para la escogencia de los equipos se hará uso de la metodología propuesta en el trabajo de grado “*Diseño de un proceso de obtención de alimento para peces a nivel industrial en el marco del proyecto de regalías ID VRI 3883 – SGR*”, realizado por los ingenieros Carlos Andrés Erazo Pino y Cesar Airle Sánchez Belalcázar bajo la dirección del Ing. Juan Fernando Flórez Marulanda de la Universidad del Cauca [48]. En el anexo H (selección de equipos para el POAP – EI) se encuentra el desarrollo de la metodología implementada para la escogencia de cada uno de los equipos involucrados en el PAOP – EI.

En la Tabla 19 se presenta la descripción de los equipos principales del PAOP – EI, los cuales son requeridos en el proceso para desarrollar la mayoría de las acciones del proceso de forma semiautomática; sin embargo, cabe aclarar que los equipos secundarios son aquellos que pertenecen a la indumentaria de la empresa, tales como: balanza analítica, probetas, básculas, entre otros.

Tabla 19: equipos principales del POAP – EI.

Equipo	Operaciones asociadas	Cant.	Descripción	Costo total (COP)
Tanque de almacenamiento	Preparado del ensilado	6	Fabricante: Shanghai, you can beverage machine Co Ltd; capacidad: 600 L; revoluciones del agitador: 60 RPM; potencia del agitador: 1,5 kW; voltaje 380 V / 50 Hz. Uso: equipo para almacenamiento de ensilado; control de nivel por interruptores (ON/OFF) por corriente eléctrica.	\$ 30.476.376
Motobomba	Preparado del ensilado	3	Fabricante: RZR bombas positivas; voltaje: 100 V/ 60 Hz; potencia: ¾ HP; presión de admisión: 0,5 a 10 kg-f/m ² ; presión de descarga: 400 psi; viscosidades: 5 a 40000 cP; temperatura: - 10 a 240 °C; tipo de fluido: grasas y aceites. Uso: llevará el ensilado o vísceras desde la cisterna hasta el tanque de	\$ 13.445.460

			almacenamiento	
Separador centrífugo	Extracción del aceite del ensilado	2	Fabricante: Sinoped; voltaje: 220 V/ 380 V; potencia: 7,5 W/ 18,5 W; material: acero inoxidable; capacidad: 2 – 10 m ³ /h; revoluciones alcanzadas: 5400 RPM. Uso: industria farmacéutica, química y alimenticia. Separa sólidos (tamaño mayor a 10 micras) de líquidos, y los líquidos los separa en aceites y agua.	\$ 302.971.032 ⁹
Reactor	Desgomado, neutralizado, decolorado y desodorizado	2	Fabricante: Wanda Chemical Co Ltd; capacidad: 200 L; material: SS304; potencia del mezclador: 0,75 kW; presión de trabajo: 30 psi; calefacción: por chaqueta calefactora por corriente. Uso: calentar el aceite para activar las propiedades fisicoquímicas de este y de manera más simple retirar impurezas; control de temperatura por termocupla en pozuelo.	\$ 19.228.501
Total global (COP)				\$ 366.121.370

Fuente: elaboración propia, febrero 2017.

De lo anterior se observa que el equipo separador centrífugo tiene un costo 6 veces por encima de los demás equipos, por tal motivo se recomienda realizar cotizaciones futuras enfocadas a la industria en Colombia. No obstante, de no lograrse estas cotizaciones y es requerido adquirir el equipo propuesto en este trabajo, se recomienda para reducción de costos comprar un solo equipo tanto para la etapa de extracción como en la de refinación, considerando los cambios (no críticos) que este puede generar tanto a nivel de flujo de proceso como en el escenario de automatización.

El costo que se estimó según las cotizaciones (ver anexo H, Tablas 20 - 31), es de \$ 366.121.370 COP, el cual se calculó con el precio del dólar en \$ 2.987,88 COP.

⁹ Se aprecia en el ejercicio de los equipos seleccionados: reactor, tanque y motobomba que estos presentan un costo total global 6 veces menor que al del separador centrífugo, siendo este requerido para la extracción de aceite crudo y refinado. Siendo esta cotización perteneciente a la industria China; por tal motivo se recomienda realizar las cotizaciones de este equipo en la industria colombiana.

Distribución de la planta

Teniendo en cuenta el dimensionamiento real de los equipos para le POAP – EI, se debe considerar la disposición física requerida para montar la planta, al igual que el espacio provisto para servicios personales (baños), almacenamiento, mantenimiento – limpieza y administración – control del proceso.

Por otra parte, en cuanto a la disposición física para las áreas de producción, actualmente se diseñan enfocándose a la manufactura de productos y servicios cumpliendo con las necesidades de los clientes, indicando de esta manera que la planta productiva debe ser capaz de producir sus productos con rapidez y entregarlos a tiempo, minimizando el costo de procesamiento, transporte y almacenamiento, adicional a esto se es necesario tener en cuenta en el diseño de las instalaciones el manejo de materiales a fin de asegurar su manejo eficiente. Adicional a esto, dadas las características del proceso y los requerimientos para la producción de aceite de pescado para consumo humano, la disposición física del POAP – EI cuenta o está conformada por dos módulos los cuales obedecen a una disposición física por producto, en las cuales se obtendrán el aceite crudo de pescado (área de preparación) y el aceite refinado (área de refinación) permitiendo un flujo directo de materiales a través de las instalaciones [69].

Con todo lo anterior, la disposición física para la producción se diseña con un cuarto donde está ubicada la cisterna en la cual se realizara la recepción del eviscerado proveniente de las piscifactorías del municipio de Silvia – Cauca (428 kg), el cual se encuentra ubicado junto al área de preparación del ensilado diseñado con capacidad para 6 tanques de almacenamiento, con el fin de mantener un flujo continuo de material para la producción de un lote diario de aceite de pescado, seguida a esta área se encuentra la refinación de aceite, con capacidad suficiente para la distribución de los equipos de acuerdo al PFD. Por otra parte, se agregó un área de acondicionamiento ubicada junto al área de refinación, esto debido a que se requiere un lugar para el empaque del aceite una vez la planta entre en funcionamiento.

Finalmente, se construyen planos en los que se especifica la distribución del espacio para la planta, según los aspectos normativos y los que, a consideración de los integrantes del proyecto se agregó (ver Plano 1 de la siguiente página), dando como resultado un diseño de planta con varias áreas tales como: almacenamiento de materia prima (Fórmico, KOH, BHT, entre otros), administrativa, control de calidad y producción, bodegas de despacho y almacenamiento de producto terminado.

3.1.6. Organización del escalamiento industrial logrado

En este último paso del método de escalamiento, es necesario estructurar la información que se tiene respecto al POAP – EI, con el fin de obtener documentación detallada del proceso productivo en relación a la propuesta de la planta piloto, para lo cual se desarrolla la ingeniería básica del proceso en la que se realizan los diagramas de flujo por operaciones respecto a la escala industrial lograda, incluyendo datos de balance de materiales y actualización final de los modelos ISA - S88.01 (ver anexo I, secciones 9.1 – 9.4). Sin embargo, estos siempre van a estar sujetos a futuras actualizaciones conforme crece la organización. Una vez más, se recalca la importancia de los modelos ISA - S88.01, ya que proporcionan una visión completa del proceso que, entre otras cosas, será útil para los nuevos integrantes que irán sumándose a la empresa. Por último, se actualizan y/o construyen los modelos de receta maestra y de control (ver anexo I, sección 9.5), mostrando la información detallada de materiales, cantidades, parámetros y equipos en la nueva escala. Cabe mencionar que en este punto no se ha puesto en marcha la escala industrial, por lo que estos modelos de receta no se relacionarán en torno a un producto ya obtenido, sino que pretenden organizar y mostrar toda la información que se obtuvo para la escala industrial.

Además, se recomienda el planteamiento de la misión y la visión de la empresa, que muestre el enfoque e importancia de la organización y las metas que se desean conseguir a futuro. En cuanto a los demás aspectos empresariales, se tiene presente que la puesta en marcha de la planta a nivel industrial conlleva a trámites administrativos empresariales (registro de la empresa y del producto, compra de materiales en las nuevas cantidades, entre otros), lo que debe tomarse en consideración por parte de los integrantes del proyecto encargados para lo cual se deben apoyar en el segundo estudio de factibilidad. Es necesario esclarecer que este estudio administrativo esta por fuera de la propuesta de escalamiento industrial de este trabajo.

4. INGENIERÍA BÁSICA

Esta es la segunda etapa del diseño de proyectos de ingeniería, la cual define los lineamientos generales e ideas básicas del proyecto que son pilares para la ingeniería de detalle, reflejando soluciones a problemas específicos de la ingeniería conceptual [58].

Mediante la aplicación de ingeniería básica, se pretende mostrar los requerimientos del usuario, desarrollar en detalle el alcance y los planes de ejecución para permitir la obtención de fondos o el financiamiento requerido para ejecución del proyecto y contratación. Sin embargo, este capítulo se enfocará en el desarrollo de la especificación funcional del POAP – EI logrando que las soluciones planteadas cumplan los requerimientos previstos.

4.1. Cumplimiento de requerimientos generales del POAP – EI

Se presentan las propuestas de solución relacionadas con los requerimientos generales (ver sección 2.5.1) establecidos según las necesidades identificadas en la ingeniería conceptual.

4.1.1. Formato de seguimiento de parámetros y documentación formal

Para la ejecución del POAP – EI es importante realizar un registro formal de todos los parámetros que son utilizados en este. Para ello, el formato de seguimiento de parámetros propuesto (ver Tabla 35 del anexo I) tiene en cuenta los parámetros distribuidos en cada una de las fases del proceso. Además, se agrega un espacio para anotaciones en caso de que surjan anomalías durante la ejecución de las operaciones.

Con el formato de seguimiento se da el cumplimiento al RG1.

4.1.2. Formato de registro de producción y no conformidades

Para la ejecución del POAP – EI es importante llevar un registro formal de la producción total que se realiza en un lote, familiarizando a los profesionales con las herramientas utilizadas para monitorear la producción y así solucionar eventuales problemas como: pérdida de producción, no conformes y cuellos de botella.

En el formato de registro de producción y no conformidades (ver Tabla 20), el operador llevará un consolidado de la cantidad de aceite resultante de un lote de producción, en el cual podrá realizar las respectivas anotaciones de los no conformes que puedan surgir durante la jornada de trabajo.

Tabla 20: formato de producción y no conformidades del POAP – EI.

PROCESO DE OBTENCIÓN DE ACEITE DE PESCADO A PARTIR DEL EVISCERADO DE TRUCHA					
N° Lote	Operario a cargo	Unidades x caja	Cantidad Cajas	Tiempo producción	No conformes
Observaciones:					

Fuente: elaboración propia, septiembre de 2016.

Este formato de registro permitirá realizar en detalle los informes mensuales con el fin de mejorar y volver más eficiente la línea de producción, dando cumplimiento al requerimiento RG2.

4.1.3. Documento formal y detallado del POAP – EI

Con respecto a la documentación formal, se desarrolla en el capítulo 3 y en el anexo I, en estos se describe y se modela textual y explícitamente la ejecución del proceso y la planta con una representación sencilla. Con lo que se da cumplimiento del requerimiento RG3.

4.2. Cumplimiento de requerimientos de automatización del proceso POAP – EI

Para dar cumplimiento a los requerimientos de automatización establecidos en el capítulo anterior (ver sección 2.5.2), se procede a desarrollar las siguientes secciones.

4.2.1. Cadena de valor

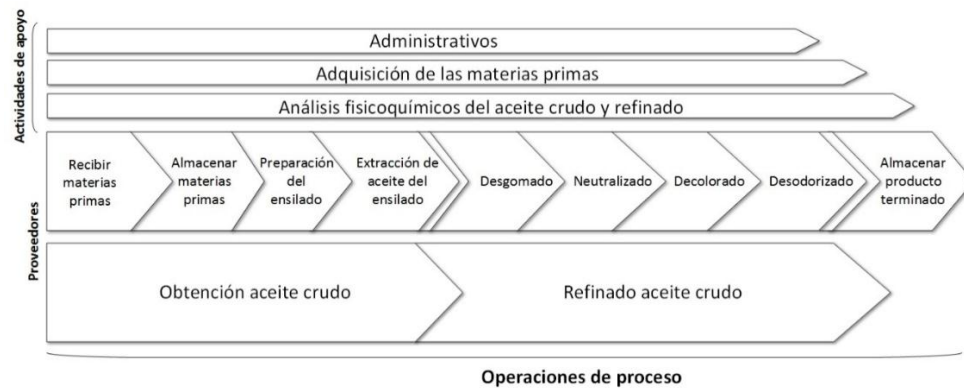
Es importante definir que la cadena de valor, es un modelo que clasifica y organiza los procesos o actividades de una empresa u organización para generar valor a un cliente final y a la misma empresa, esta a su vez se divide en dos grupos: primarias y de apoyo; las primeras se relacionan con la creación física del producto, su venta y el servicio de posventa, estas se dividen en 5 actividades: logística interna, logística externa, operaciones de producción, mercadeo, ventas y servicio post-venta o mantenimiento; mientras que las actividades de apoyo son las que están enfocadas en: la infraestructura de la empresa (financiación, planificación, entre otros), dirección de recursos humanos (contratación, búsqueda de personal, entre otros), desarrollo de tecnología e innovación (diseño de productos, investigación de mercado, entre otros) y compras [50], [70], [71]

Teniendo en cuenta lo anterior, en el POAP – EI no es posible presentar algunas de las actividades primarias: logística exterior, mercadeo, ventas y servicio post-venta. Esto debido a que estas actividades se enfocan directamente en los clientes y no son

competencia de los desarrolladores de este trabajo, sin embargo, se propone que se tengan en cuenta en estudios de mercado que se realicen a futuro.

El desarrollo concreto de la cadena de valor que representa el POAP - EI se realizó haciendo modificación a la cadena de valor propuesta previamente en la ingeniería conceptual (ver sección 2.1), con lo que se da cumplimiento al RA1 (ver Figura 35).

Figura 35: cadena de valor del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, enero de 2017.

4.2.2. Diagramas para documentación gráfica del proceso

Un proyecto de ingeniería dispone de estándares para representar gráficamente los procesos productivos, en el caso de instrumentación industrial y control se representan con: Diagrama de Flujo de Proceso (PFD, *Process Flow Diagram*), Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID, *Piping and Instrumentation Drawing*), Diagramas de Lazo y Diagramas SAMA (*Scientific Apparatus Maker Association*) [72].

Los PFD representan una imagen general de cómo interactúan los flujos del proceso con los equipos, este tipo de diagrama no muestra detalles [73]. En cambio, los diagramas de lazo son detallados, debido a que estos muestran las conexiones desde un punto al sistema de control. Además, los P&ID se encuentran en un nivel intermedio de detalle, debido a que muestran el flujo del proceso y los datos entre los instrumentos que miden y controlan. Por otra parte, los diagramas SAMA se utilizan para documentar la estrategia de control del sistema, sin embargo, son utilizados en la industria energética [63].

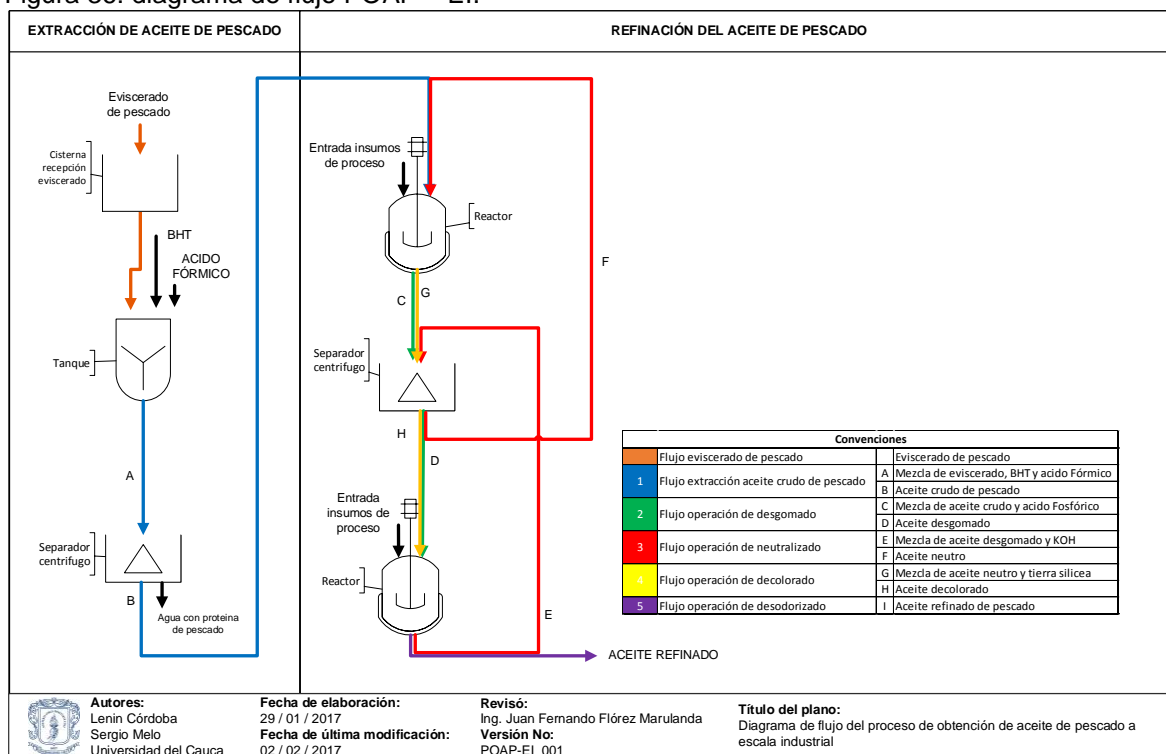
Para el POAP - EI se hace necesario la representación gráfica de los PFD y P&ID. Debe agregarse que para un correcto diseño de dichos diagramas, se usó el estándar ISA - 5, específicamente las secciones 1, 2 y 3 para la normalización de la instrumentación medición y control, simbologías de operaciones binarias de proceso y para microprocesadores de control compartido [54], [74], [75].

El PFD fue realizado con el objetivo de mostrar el flujo completo de los materiales a través de todo el proceso, teniendo en cuenta las modificaciones realizadas en los modelos de proceso.

El flujo de proceso inicia con el ingreso de las materias primas a la cisterna de donde es transportada por medio de una motobomba al tanque de almacenamiento, en el cual se

lleva a cabo la preparación del ensilado de pescado; después del tiempo de hidrólisis, el ensilado es llevado por medio de tubería al separador centrífugo, equipo en el que se separa el aceite del hidrolizado; después, este es transportado al primer reactor para adicionar los componentes químicos requeridos en la operación de desgomado y posteriormente será sometido a cambios químicos; luego de esto, se lleva la mezcla al segundo separador centrífugo donde se retira la goma del aceite; enseguida este se lleva al segundo reactor para realizar la adición de los componentes químicos necesarios para la operación de neutralizado y será sometido a cambios químicos; después se transporta la mezcla al segundo separador centrífugo, en el cual se obtendrá el aceite neutro de pescado; terminada esta operación de proceso, el aceite neutro se transporta al primer reactor para adicionar la tierra silícea y se someterá a cambios químicos, una vez culminado el tiempo se pasa la mezcla por el segundo separador centrífugo para retirar algunos componentes del aceite; por último, este pasa al segundo reactor sometiéndolo a flujo de nitrógeno para ser desodorizado y así completar con la etapa de refinación (ver sección 2.2.1 y Figura 36).

Figura 36: diagrama de flujo POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, enero de 2017.

De la Figura 36, se aprecia que en la operación de obtención de aceite del ensilado se genera un subproducto de proceso, el cual debe ser aprovechado para otro tipo de producción por los altos contenidos proteínicos que presenta. Por tal motivo, en el anexo J (recomendación de equipo (s) para el tratamiento de la hidrólisis de proteína de pescado, HPP) se realiza el estudio de los sistemas de secado más adecuados que permitirán el máximo aprovechamiento de este.

Descripción de las variables del POAP – EI

Para describir las variables involucradas en el proceso, se ejecuta por 2 etapas:

- Extracción de aceite crudo, etapa en la que se encuentran involucrados los equipos como tanque de almacenamiento en la operación de preparado del ensilado y separador centrífugo en la operación de extracción del aceite del ensilado.
- Refinación del aceite crudo, en esta intervienen los equipos reactor y separador centrífugo para las siguientes operaciones: desgomado, neutralizado, decolorado y desodorizado.

Del estudio del POAP – EI (ver capítulo 3), se tiene que las variables que gobiernan el proceso son: nivel del tanque, velocidad de agitación (tanto en el tanque de almacenamiento como en el reactor), velocidad de centrifugado, temperatura y tiempos (mezclado y centrifugado); las anteriores variables se generan debido a la naturaleza del proceso propuesto (proceso semi-automático). Para ello, se tienen equipos e instrumentación que requieren el uso de un sistema de control, tal es el caso de motobomba (en la etapa de extracción de aceite crudo) y electroválvulas (tanto en la etapa de extracción como en la de refinación). En la Tabla 21, se listan las etapas de proceso, los equipos principales asociados indicando la cantidad requerida de estos y las variables (controladas, manipuladas y disturbio) relacionadas a estas, las cuales se clasifican en no existente (NE) y no crítico (NC). Para el caso de los equipos secundarios e instrumentación (motobombas y electroválvulas) se aclara que estos requieren el control de encendido y apagado.

Tabla 21: descripción conceptual por etapas del POAP – EI.

Etapas de proceso	Equipo	Variable controlada	Variable manipulada	Variable de disturbio
Extracción de aceite crudo	Tanque (6)	Velocidad de agitación	Frecuencia	Pérdida de tensión eléctrica (NE), obstrucción de las aspas por material no adecuado (NE)
		Tiempo mezclado	Tiempo mezclado	Pérdida de tensión eléctrica (NE).
		Nivel del tanque	Corriente	Pérdida de tensión eléctrica (NE)
Refinación aceite crudo	Separador centrífugo (2)	Velocidad de centrifugación	Frecuencia	Pérdida de tensión eléctrica (NE)
		Tiempo centrifugado	Tiempo centrifugado	No aplica
	Reactor (2)	Velocidad de agitación	Frecuencia	Pérdida de tensión eléctrica (NE)
		Tiempo mezclado 2	Tiempo mezclado 2	Pérdida de tensión eléctrica (NE).
		Temperatura	Corriente	Temperatura entrada del material (NC), pérdida de tensión eléctrica (NE)

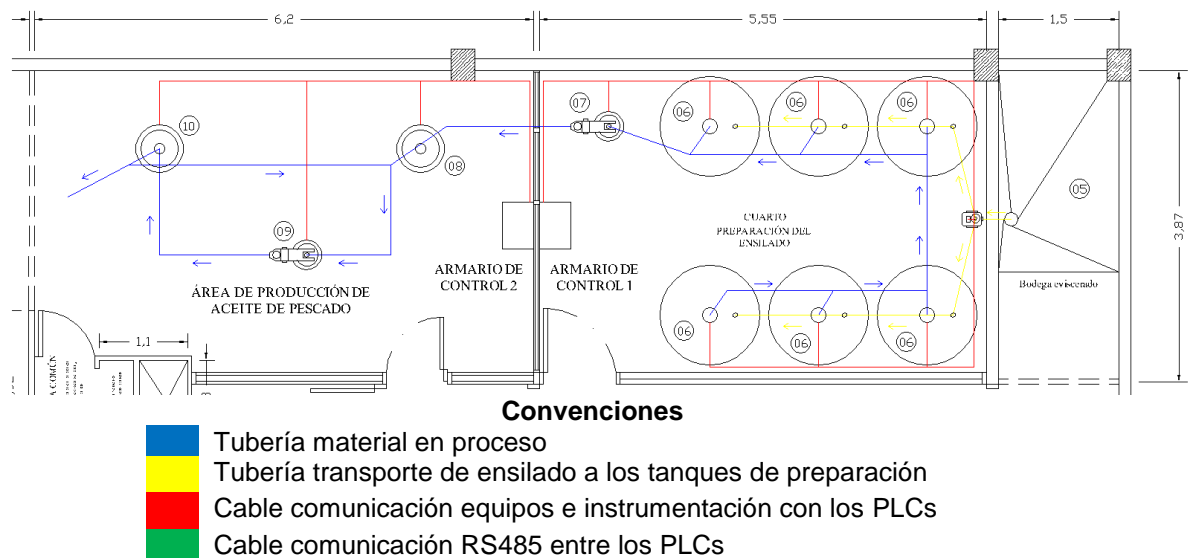
Fuente: elaboración propia, marzo de 2017.

De la tabla anterior, se observa que la mayoría de los disturbios son NE; sin embargo, para el caso de los disturbios NC (los cuales se pueden propagar por el sistema), se plantea un sistema de control *feedback*, tanto para la variable temperatura en los reactores que debe mantenerse constante a 80 °C y para las velocidades del separador centrífugo y agitación (tanto de los reactores como de los tanques de almacenamiento), las cuales se deben mantener constantes durante todo el proceso. En cuanto a la apertura y cierre de las electroválvulas, encendido y apagado de las motobombas se plantea un sistema de control ON/OFF.

Escenario de automatización del POAP – EI

Analizando la distribución geográfica de la planta y debido a las condiciones de manejo en cuanto a las áreas de producción y almacenamiento de materia prima (ver capítulo 3 sección 3.1.5) se requieren 2 armarios de control, uno por cada área. En los cuales se propone que un primer PLC se encargará del control de electroválvulas asociadas a la etapa de extracción, motobomba y variables de proceso (velocidad de agitación y monitoreo de nivel por medio de los interruptores de alto y bajo) en el área de almacenamiento; un segundo PLC que se encargará del control de electroválvulas asociadas a la etapa de refinación, motobombas y variables de proceso (velocidad de agitación y temperatura) en el área de producción. La distribución geográfica se aprecia en la Figura 37.

Figura 37: plano distribución de planta, tubería y cableado.



Fuente: elaboración propia, marzo de 2017.

Para el escenario de automatización, se requiere de 2 equipos PLCs interconectados entre sí por medio de un bus de campo RS485, de tal manera que se permita el intercambio de información entre ellos. A la entrada del PLC del área de almacenamiento (PLCA, ubicado en el armario de control 1, ver Figura 37) se conectan los siguientes instrumentos: 7 interruptores para nivel alto y 7 para nivel bajo; a la salida se conectan 13 electroválvulas de compuerta para tubería de 2" y una motobomba. A la entrada del PLC del área de producción (PLCP, ubicado en el armario de control 2, ver Figura 37) se

conectan los siguientes instrumentos; una Panelview por medio de un protocolo de comunicación RS232 la cual tendrá montado un sistema HMI (por sus siglas en inglés: *Human – Machine Interface*) para el control y supervisión del proceso, 2 encoders incrementales, 2 variadores de frecuencia (VFD), 2 interruptores para bajo nivel, 2 termocuplas encapsuladas en pozuelo y este a su vez conectado a un cabezal el cual tendrá un transmisor de temperatura de tipo disco; a la salida se conectan 7 electroválvulas de compuerta para tubería de 2" y 2 motobombas. A continuación, se presentan los diagramas PI&D elaborados (ver Figura 38 a Figura 41) para cada uno de los equipos que intervienen en el POAP – EI divididos en las etapas de proceso de extracción y refinación de aceite crudo.

Dicho lo anterior, se plantea la implementación de dos PLCs uno por cada área (almacenamiento y producción), de tal manera que dada la distribución de la planta el PLCA se encargará del control de nivel de llenado de la cisterna, la cual cuenta con 2 sensores (para nivel alto y nivel bajo) indicando al PLCA el momento en que debe encender la motobomba y las electroválvulas correspondientes para llenar el tanque; para el apagado de la primera motobomba se ejecuta cuando el tanque esté lleno o cuando la cisterna se encuentre en el nivel más bajo. Una vez el tanque se encuentre lleno el operario deberá adicionar los químicos de la operación (ácido Fórmico y BHT), luego de esto deberá por medio de la PanelView indicar al PLCA que inicie la acción de mezclado durante el tiempo correspondiente, después de este tiempo dejar la mezcla durante 6 días para la hidrólisis.

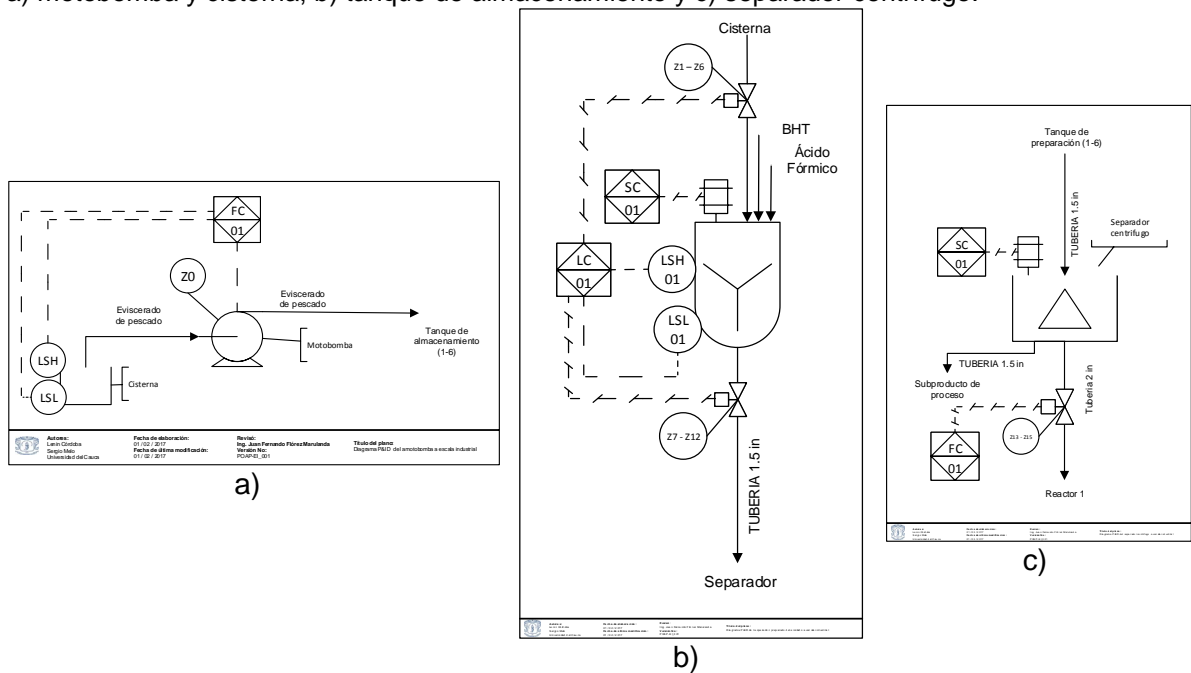
Para la refinación del lote¹⁰, el operario debe indicar al PLCA que active la electroválvula asociada al tanque que ya cumplió el tiempo de hidrólisis, al mismo tiempo que encienda el primer separador centrífugo y comunique al PLCP que active la segunda motobomba; una vez el tanque esté vacío, por medio de la información del sensor de nivel bajo en el reactor 1, el PLCA deberá apagar el separador centrífugo, a su vez informa al PLCP que ya se ha terminado la acción para que apague la segunda motobomba y muestre al operario en la PanelView que debe adicionar el componente químico correspondiente.

Una vez el operario termine la acción de adicionar, deberá por medio de la PanelView indicar al PLCP que inicie la operación correspondiente, realizando: presurización, calentamiento y agitación constante durante el tiempo requerido; cuando el tiempo de la operación haya transcurrido, el PLCP deberá accionar las electroválvulas, encender el segundo separador centrífugo y la tercera motobomba para permitir el paso del aceite de un reactor a otro; por medio de un sensor de nivel bajo en el reactor, el PLCP sabrá el momento en el que deberá apagar instrumentos y equipos como: el separador centrífugo, la tercera motobomba, desactivar la electroválvulas e indicar al operario en la PanelView que debe agregar el componente químico. Estas acciones del PLCP se repiten por cada una de las operaciones (desgomado, neutralizado, decolorado y desodorizado), teniendo en cuenta que en la operación de desodorizado el PLC solo debe controlar la presurización.

¹⁰ Un lote equivale al volumen total del tanque de almacenamiento, que a su vez es la cantidad volumétrica total de aceite para la refinación

En la Figura 38 se presentan los diagramas P&ID correspondientes a los equipos de la etapa de extracción de aceite crudo. En primer lugar se presenta la motobomba, que es controlada por el PLCA (encendido y apagado de esta) por medio de la señal tomada de los interruptores de nivel de la cisterna; en segundo lugar, el tanque de almacenamiento (6 tanques para proceso) en el cual el PLCA controla el encendido y el apagado de los motores de agitación; en tercer lugar, el separador centrífugo, al cual el PLCA controla el encendido; por otra parte en estos diagramas se incluye el control de encendido y apagado de las electroválvulas acopladas a cada equipo.

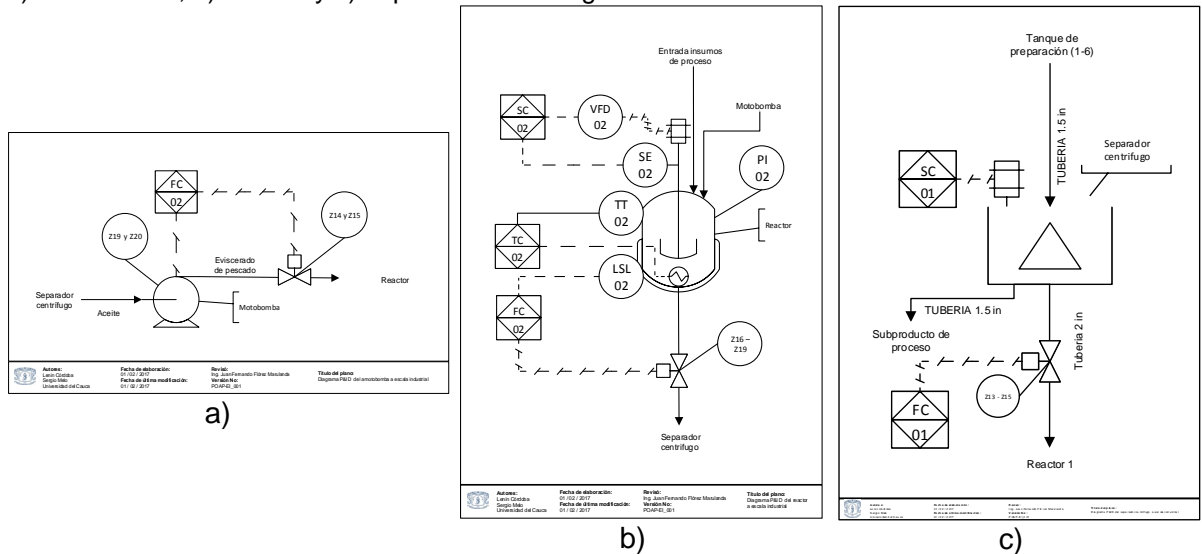
Figura 38: diagramas P&ID de los 3 equipos de la etapa de extracción de aceite crudo, POAP – EI, a) motobomba y cisterna, b) tanque de almacenamiento y c) separador centrífugo.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 39, se muestra el diagrama P&ID correspondiente a la etapa de refinación de aceite crudo, en la cual se encuentra representada la instrumentación y los equipos necesarios para el control de las variables asociadas a esta. Para el caso del reactor, el PLCP realiza el control de las revoluciones de agitación por medio del VFD, para ello realiza la lectura de la medición tomada por el encoder incremental; el control de la variable temperatura la realiza mediante la lectura tomada del transmisor de temperatura, el cual entrega una señal de 4 – 20 mA, este a su vez toma la señal de medición realizada por la termocupla la cual se encuentra encapsulada en el pozuelo; en el caso del separador centrífugo y la motobomba, la representación de control es la misma que en la etapa de extracción de aceite curdo. Además, en el diagrama se encuentra la representación del control de apertura y cierre de las electroválvulas asociadas a esta etapa.

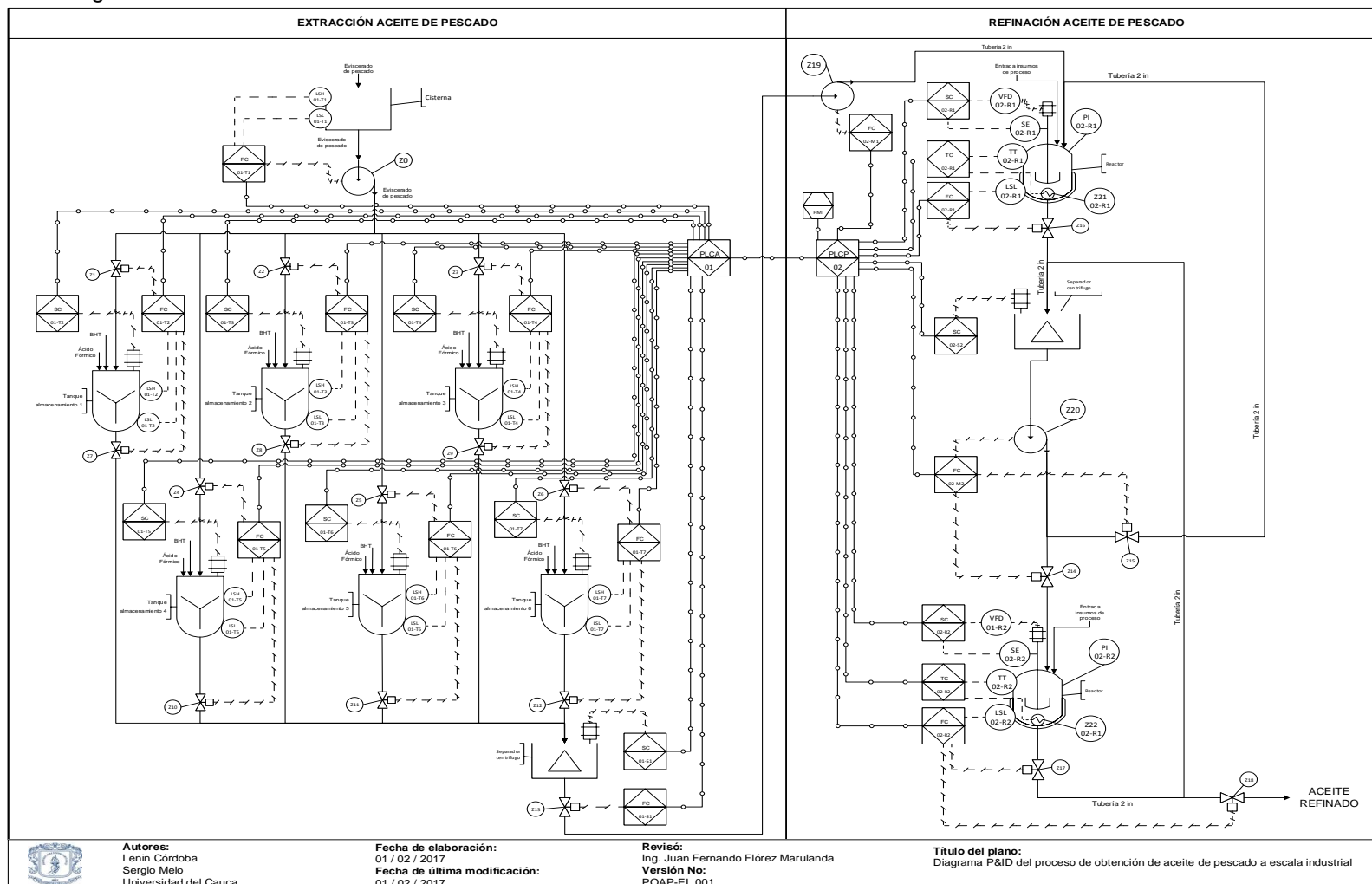
Figura 39: diagramas P&ID de los 3 equipos de la etapa de refinación del aceite crudo, POAP – EI, a) motobomba, b) reactor y c) separador centrífugo.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 40 se representa el P&ID completo del POAP – EI, el cual cuenta con la instrumentación y equipos necesarios para el escenario de automatización propuesto, en este se aprecia el flujo de proceso y las conexiones de la instrumentación y los equipos de control (PLCA y PLCP). Se observa que la PanelView, se encuentra conectada al PLCP, y despliega el HMI del proceso donde se muestran los parámetros de las variables controladas en el tiempo, esto debido a que tanto los sensores, controladores y transmisores de temperatura son de tipo ciego y dado que es necesario el monitoreo continuo del comportamiento de estas variables se propone la implementación de este equipo. Por otro lado, se observa la conexión de los PLCs entre sí, los cuales están ubicados de acuerdo a la distribución geográfica de las áreas de producción y almacenamiento en la planta (ver Figura 37).

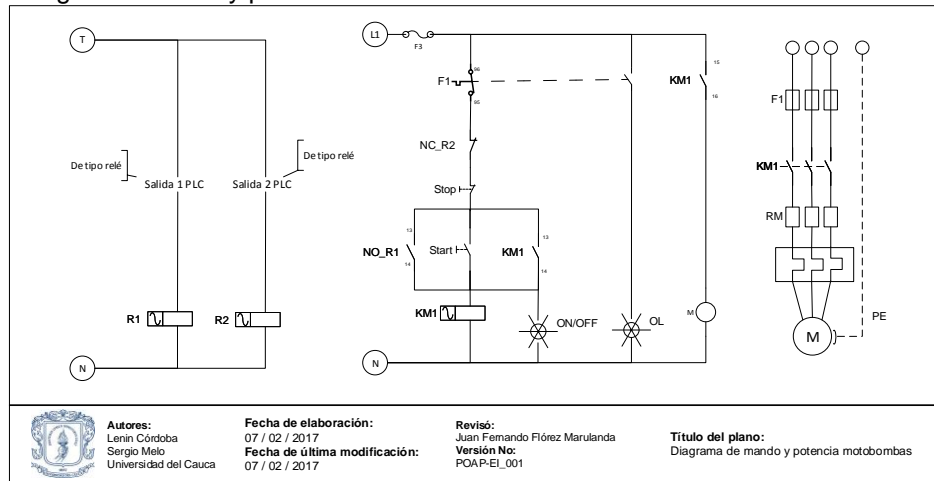
Figura 40: diagrama P&ID del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 41 se encuentra la esquematización del diagrama de mando y potencia de las 3 motobombas requeridas para el POAP – EI.

Figura 41: diagrama mando y potencia de las motobombas POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, enero de 2017.

En la Tabla 22, se encuentra el resumen de los equipos e instrumentación principales requeridos en la propuesta del escenario de automatización, los equipos e instrumentos secundarios se describen en el anexo H, Tabla 32.

Tabla 22: resumen de equipos e instrumentación necesaria para el escenario de automatización.

Equipo	Cant.	Tag	Descripción	Rango de trabajo
Electroválvula	18	Z1 - Z18	Electroválvula de compuerta para tubería de 2".	0 – 103 psi -5 - 180 °C
Encoder	2	SE	De tipo incremental, el cual indican la medida de la distancia angular y lineal recorrida. Debido al desplazamiento de fase entre las señales A y B.	3 canales de salida, tipo de señal push-pull max 1024 pulsos por vuelta
Interruptores de alta	6	LSH	Utilizados para medir el nivel en los tanques de almacenamiento.	ON/OFF 0/5 v
Interruptores de baja	6	LSL		
Transmisor de temperatura	2	TT	Transmisor de disco ciego.	4 -20 mA
Termocupla	2		Termocupla PT100 encapsulada en pozuelo.	20 - 100 °C
Variador de frecuencia	2	VFD	Permite variar la frecuencia para el control de velocidad.	0,2... 22 kW / 0.25... 30 hp
PLC	2	C	Autómata programable para el control de variables de proceso.	26 salidas discretas, 16 entradas discretas, 2 entradas de alta velocidad.

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Con el planteamiento de estos diagramas (ver Figura 38 a Figura 41) y sus descripciones, se da cumplimiento a los requerimientos RA2 y RA3.

4.2.3. Organización del proceso mediante modelos ISA - S88.01

Mediante el estándar ISA 88.01 [49], se especifican los modelos de proceso, físico y de control procedimental, con los cuales se tiene una visión organizada de todo el proceso. Previamente se construyeron los 3 modelos alusivos al POAP (ver sección 2.3); por consiguiente, para dar cumplimiento del RA4 (ver sección 2.5.1.), dichos modelos se verán modificados teniendo en cuenta la distribución de planta y el escenario de automatización propuesto en la sección 4.2.2.

En cuanto al modelo de proceso, en la etapa de refinación del aceite crudo se eliminan las operaciones lavado, secado y winterizado; debido a que en la propuesta de escalamiento se utilizan equipos industriales como el reactor y el separador centrífugo; dadas las características de automatización propuesta, en las operaciones de desgomado, neutralizado, decolorado y desodorizado se reducen las acciones de proceso (ver Figura 51 - 53 del anexo I).

Respecto al modelo físico, en la unidad extracción de aceite se agregan los módulos de equipo tales como, separador centrífugo, cisterna y motobomba; se eliminan los módulos de equipo centrífuga, mixer y extractor y se modificaron los módulos de control de acuerdo al escenario de automatización propuesto (ver capítulo 4 sección 4.2.3.); por último, en la unidad refinación del aceite crudo se eliminan los módulos de equipo rota evaporador, centrífuga, centrífuga refrigerada y destilador; se agregan los módulos de equipo reactor, separador centrífugo y motobomba, de igual manera se modificaron los módulos de control de acuerdo al escenario de automatización (ver Figuras 54 - 56 del anexo I).

En lo concerniente al modelo de control procedimental, se presentan varias fases que se deben ejecutar al mismo tiempo tales como: mezclar, calentar y presurizar, las cuales hacen parte de las operaciones de desgomado, neutralizado y decolorado, esto es debido a las características de la propuesta de automatización (ver Figuras 60, 61 del anexo I).

Teniendo en cuenta los modelos ISA - S88.01 presentados en la ingeniería conceptual y los cambios mostrados en esta sección, se da cumplimiento al RA4, para mayores detalles revisar el anexo I.

4.2.4. Modelos de receta maestra y de control de ISA - S88.01

Para dar claridad de los parámetros de operación, se reúne toda la información respecto al planteamiento del PEIPP, esquematizándola en tablas (recetas: maestra y de control) que concretan cada uno de los procesos, subproceso, decisiones, datos y documentos que conforman el procedimiento propuesto, estas se encuentran consignadas en el anexo I. No obstante, a continuación, se realiza una breve descripción de cada una de ellas.

Modelo de receta maestra

Las entradas, productos, parámetros y salidas del POAP – EI se organizaron de acuerdo a las operaciones. Además, se tiene en cuenta los requerimientos de equipos para la

puesta en marcha del proceso. La receta maestra del POAP – EI se encuentra en la Tabla 35 del anexo I.

Modelo de receta de control

Esta comienza como una copia de una versión específica de la receta maestra (ver Tabla 35 del anexo I) y se ve modificada de acuerdo a la programación e información operacional para la fabricación de un lote particular. Es decir, contiene información de proceso con la especificación de producto necesaria para su manufactura.

Durante el procesamiento de un lote de producción, la receta de control podría verse modificada por cambios que pueden realizarse en un periodo de tiempo basado en la programación, equipo o información del operador. La receta de control del POAP – EI se encuentra en la Tabla 36 del anexo I.

Con la construcción de los modelos de receta maestra y de control del POAP – EI, se da cumplimiento al requerimiento RA5.

4.3. Cumplimiento de requerimientos hardware del POAP – EI

Para dar cumplimiento a los requerimientos hardware se realizó la metodología de selección planteada en [48]. En el anexo H se encuentran todos los equipos que satisfacen los requerimientos, además de esto se encuentra la Tabla 19 de la sección 3.1.5, que da cumplimiento a los RH de la sección 2.5.3.

5. SIMULACIÓN DEL POAP – EI

5.1. Simulación del POAP – EI

En este capítulo se efectúa la simulación de la planta POAP - EI, haciendo uso de la herramienta computacional SuperPro Designer, al igual que la información, modelos, tablas y parámetros obtenidos durante la aplicación del PEIPP y los modelos ISA - S88.01.

El desarrollo del capítulo se realizó en dos etapas: la primera establece los requerimientos para simulación y en la segunda se ejecutó el diseño de la planta en la herramienta.

5.1.1. Requerimientos para simulación

En los capítulos 3 y 4 del presente trabajo, se establecieron condiciones de operación y parámetros específicos para la puesta en marcha de POAP - EI. Así mismo, se aplicó el estándar ISA - 88.01 para estructurar y extraer la información relevante del proceso (ver anexo I). Por lo tanto, para caracterizar la simulación de este, es necesario establecer requerimientos agrupándolos de la siguiente manera: en primer lugar, se encuentran los de proceso, referentes a materias primas, productos intermedios y demás (ver sección 3.1.3. y anexo F); en segundo lugar, los de control, concernientes a los valores que se espera tengan las diferentes variables de proceso (ver sección 3.1.3. y anexo G); por último, los de equipos, relacionados con los dispositivos, unidades y demás que permiten desarrollar el proceso (ver sección 3.1.5. y anexo H). Además, se incluyen como requerimientos, la información obtenida acerca de los modos de operación y distribución de tiempos (ver anexo G, sección 7.2.1.).

5.1.2. Simulación de la planta en SuperPro Designer

Para realizar la simulación de manera estructurada, es necesario el uso de los modelos propuestos por el estándar ISA - 88.01 para el POAP – EI; sin embargo, antes de comenzar es importante conocer los conceptos que maneja la herramienta computacional para poder aplicar adecuadamente los modelos [76].

Para SuperPro Designer 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 la acción más pequeña 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. Con lo anterior, se plantea una tabla comparativa con el fin de facilitar el desarrollo de la simulación y poder continuar hablando en términos del estándar (ver Tabla 23).

Tabla 23: relación entre SuperPro Designer y los modelos de proceso y procedimental del estándar ISA - 88.01.

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: elaboración propia, febrero de 2017.

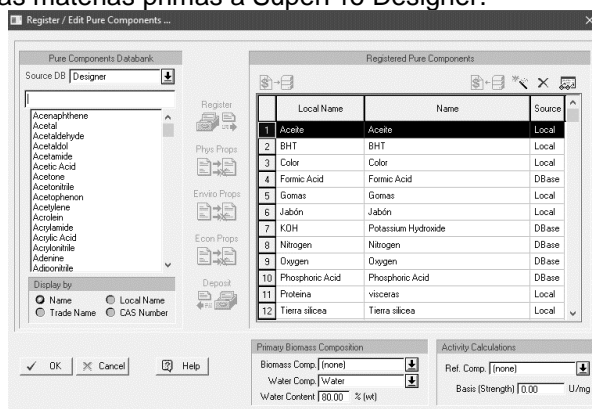
5.2. Validación del POAP – EI en SuperPro Designer

Para realizar la validación del proceso, es necesario analizar la producción y refinación del aceite de pescado. Esta propuesta a nivel teórico utilizando relaciones empíricas y análisis basado en la experiencia, genera cerca de 80 L de aceite crudo de pescado que una vez termina su ciclo de refinación se obtienen 61 L de aceite listo para consumo. Para ello, el proceso se divide en 6 operaciones: preparado del ensilado (verde), extracción de aceite del ensilado (azul claro), desgomado (morado), neutralizado (verde), decolorado (naranja) y desodorizado (morado). El propósito y las acciones relacionadas a estas operaciones se encuentran descritas en el capítulo 3 y en el anexo I de este trabajo, se debe tener en cuenta que este proceso a pesar de presentar características de modo continuo se configura en modo Batch con el fin de obtener un lote de producción por día.

5.2.1. Implementación de la planta piloto en SuperPro Designer

Después del estudio detallado del funcionamiento de la herramienta [76] y del ejemplo planteado por INTELLIGEN INC para el proceso de obtención de aceite de algas [77], se procedió a realizar la implementación del POAP – EI. Para esto fue necesario analizar el comportamiento del proceso, primeramente, se ingresó a la herramienta computacional las materias primas requeridas, algunas de ellas como el ácido fórmico y el ácido fosfórico se encuentran en la base de datos del simulador, por tanto, no es necesario configurar sus parámetros de densidad y peso molecular, a pesar de lo anterior, fue necesario ingresar sus precios de adquisición en el mercado, ver Figura 42.

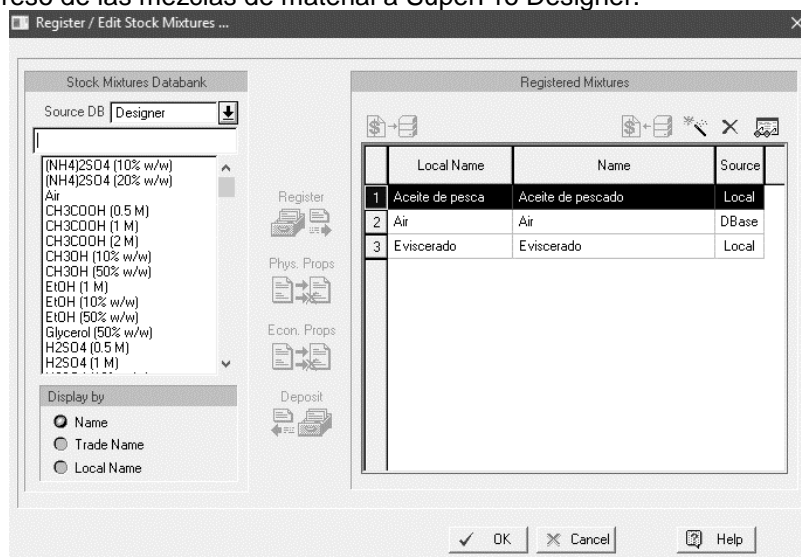
Figura 42: ingreso de las materias primas a SuperPro Designer.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Como se observa en la Figura 42, se crean componentes que formaran parte de las mezclas del proceso, esto debido a que hay materias primas como el eviscerado de pescado el cual para poder simular su comportamiento en la herramienta fue necesario ingresarlo como una mezcla de aceite, proteína y agua. De igual manera, el aceite de pescado el cual está conformado para cuestiones de simulación y estudio de los equipos por gomas, jabón y color. Por lo anterior, se ingresó al simulador estas mezclas involucradas en el proceso, ver Figura 43.

Figura 43: ingreso de las mezclas de material a SuperPro Designer.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Una vez configuradas todas las materias primas del proceso, se configuró los precios de las materias primas, costo mano de obra y costo por watt como se muestran en la Figura 44 a Figura 46.

Figura 44: configuración costos de materia prima en SuperPro Designer.

	Ingredient	Price (\$)	Basis for Cost	Demand (per batch)	Demand (%)	Total Cost (\$/batch)
1	BHT	1500.000000	kg	0.43	0.10	642.00
2	Eviscerado	100.000000	kg	428.00	99.66	42800.00
3	Formic Acid	12.800000	kg	0.10	0.02	1.26
4	KOH	2500.000000				
5	Nitrogen	0000.000000				
6	Phosphoric Acid	167.340000				
7	Tierra silicea	5000.000000				

Material: Eviscerado	
Properties	Locations Availability Limits Inventory Data
Price	
<input checked="" type="radio"/> Set by User	100.000000 \$/kg
<input type="radio"/> Calculated from Ingredients	

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 44 se evidencia el ingreso de los precios de adquisición de las materias primas, como es el caso del eviscerado al cual se le asigna un precio aproximado por kg de \$ 100 COP (valor asignado por el grupo de investigación ASUBAGROIN para el año 2016), dado que este se adquiere directamente de las piscifactorías.

Figura 45: ingreso del costo de potencia en SuperPro Designer.

Power	Unit Cost (\$)
High Voltage	20.6034
Std Power	560.8100

Power Type: Std Power

Properties | Locations, Consumption | Availability Limits | Comments

Name: Std Power

Voltage: 110 V

Price

Purchasing Price: 560.8100 \$/kW-h

Selling Price: 0.0000 \$/kW-h

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 45 se observa la asignación del precio por kW/h, el cual para el departamento del Cauca se encuentra en \$ 560,81 COP [64].

Figura 46: ingreso costo mano de obra en SuperPro Designer

Labor	Adj. Basic Rate (\$/hr)	Lumped Rate (\$/hr)	Direct Demand (labor-hrs/yr)	Total Demand (labor-hrs/yr)	Demand (%)	Total Cost (\$/yr)	Cost (%)
1 Operator	7130.00	1.00	1927.80	3213.00	100.0	22908690.00	100.0
2 Supervisor	6510.00	100.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0

Labor Type: Operator

Properties | Locations | Availability Limits | Comments

Type Name: Operator

Cost Data

Detailed Estimate

Labor Cost = (Basic Rate) x (1 + Benefits + Supervision + Supplies + Administration) x (Labor Hours)

Basic Rate: 3100.00 \$/h

Benefits Factor: 0.40

Operating Supplies Factor: 0.10

Supervision Factor: 0.20

Administration Factor: 0.60

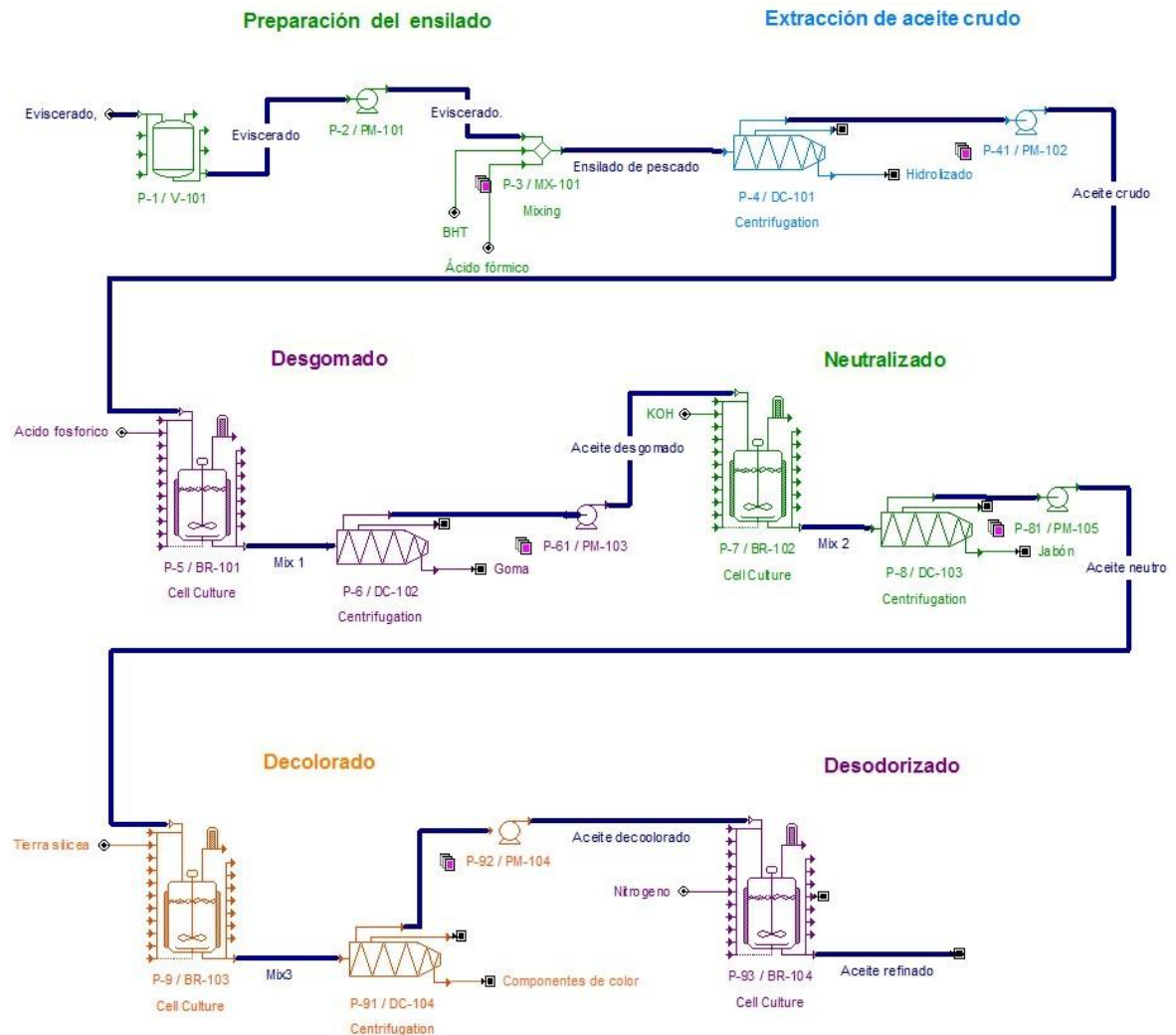
Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 46, se aprecia la asignación del costo de mano de obra por hora, este valor se fija teniendo en cuenta la fijación del salario mínimo legal vigente estipulado por el ministerio del trabajo (MINTRABAJO) para el año 2017 el cual está en \$ 737.717 COP [78] que da un costo aproximado por hora de \$ 3.100 COP.

Una vez configurados los anteriores parámetros de trabajo, se procedió a realizar el diseño del PFD en la herramienta computacional; pero, dado que el software no permite la simulación de realimentación de proceso tal como se planteó en el modelamiento (ver capítulo 4 sección 4.2.3.), se implementó la simulación de manera secuencial (sin realimentación).

La esquematización completa del proceso en la herramienta computacional se muestra en la Figura 47, con la cual se realizaron las simulaciones correspondientes para la generación de los reportes utilizados en el análisis de resultados. La simulación de cada una de las operaciones, así como la configuración de parámetros de equipo y funcionamiento para cada una de ellas se encuentran consignadas en el anexo K (simulación en SuperPro Designer).

Figura 47: esquema de simulación completo del POAP – EI en SuperPro Designer.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 47, se observa cada operación de proceso y como se interconectan entre si conformando la línea de producción de aceite de pescado para consumo humano, de igual manera se encuentran especificados los subproductos de proceso, productos intermedios, ingresos de materias primas a cada una de las operaciones y la salida de producto terminado.

5.3. Análisis de resultados

5.3.1. Capacidad de producción

En este análisis se observó paso a paso como cambió la materia prima a lo largo de la línea de producción, enfocándose en las cantidades de aceite que se generan después de cada operación y comparando los resultados con las cantidades analizadas teóricamente en el anexo H.

A continuación (ver Figura 48), se muestra que luego de la operación de extracción de aceite de pescado, se obtuvieron 92,237 L de aceite crudo, en comparación con el cálculo teórico se obtuvo una producción aproximada de 84 L de aceite de pescado, lo que muestra que hubo un error del 8% para esta operación.

Figura 48: cantidad de aceite crudo de pescado obtenido en simulación con SuperPro Designer.

Total Flowrates		
Mass Flow	92.191	kg/batch
Volumetric Flow	92.237	L/batch

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 49, se observa que en simulación se obtuvieron aproximadamente 83,1 L de aceite desgomado luego de la operación de desgomado, a nivel teórico se obtuvo una producción aproximada de 77 L, lo que generó un error del 7 % para esta operación.

Figura 49: cantidad de aceite desgomado obtenido en simulación SuperPro Designer.

Total Flowrates		
Mass Flow	83.015	kg/batch
Volumetric Flow	83.071	L/batch

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

La Figura 50, se presenta que luego de la operación de neutralizado se obtuvo en simulación una producción aproximada de 73,9 L de aceite neutro, en comparación con la producción teórica para esta operación se obtuvo una producción aproximada de 68 L, lo que se presentó un error del 8%.

Figura 50: producción de aceite neutro en simulación con SuperPro Designer.

Total Flowrates		
Mass Flow	73.839	kg/batch
Volumetric Flow	73.881	L/batch

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

La Figura 51, presenta que para la producción de aceite se adquirieron aproximadamente 64,7 L de aceite decolorado, lo que generó un error del 6% en comparación con la producción teórica que fue aproximadamente de 61 L de aceite decolorado.

Figura 51: producción de aceite decolorado en simulación con SuperPro Designer.

Total Flowrates		
Mass Flow	64.662	kg/batch
Volumetric Flow	64.662	L/batch

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Después de realizar la simulación completa del proceso, se observó que en un lote de producción donde se ingresaron 428 kg de eviscerado de pescado para la producción de

aceite se obtuvo al final del Batch 64,6 L de aceite refinado listo para consumo (ver Figura 52), a nivel teórico se obtuvo 61 L de aceite refinado con un error del 6%, lo que demostró que la simulación y el análisis matemático realizado para el cálculo de los volúmenes de producción y estos arrojaron valores muy cercanos, mostrando así la confiabilidad de la planta propuesta.

Figura 52: producción de aceite refinado para consumo humano obtenida en simulación con SuperPro Designer.

Total Flowrates		
Mass Flow	64.598	kg/batch
Volumetric Flow	64.598	L/batch

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

5.3.2. Mano de obra

En este punto, se analizó el costo de mano de obra operativa requerida para las dos funciones principales en la planta de producción, para lo cual se estipuló que solo es requerido un trabajador durante todo el proceso, esto debido a que el POAP – EI, está en un nivel de automatización semi-automático, razón por la que las acciones de tipo manual dentro de la planta son pocas, ver Figura 53.

Figura 53: valor por hora mano de obra obtenido en simulación con SuperPro Designer.

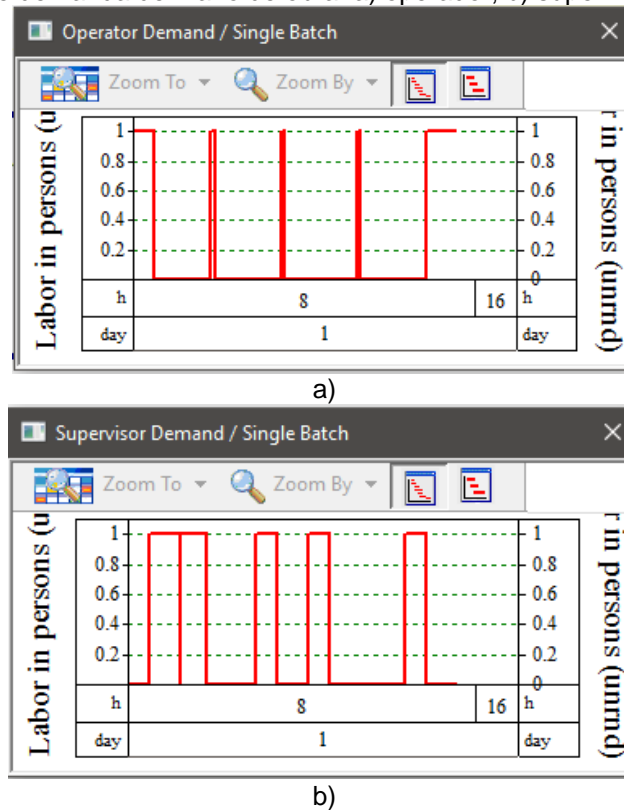
	Labor	Adj. Basic Rate (\$/hr)	Lumped Rate (\$/hr)	Direct Demand (labor-hrs/batch)	Total Demand (labor-hrs/batch)	Demand (%)	Total cost (\$/batch)	Cost (%)
1	Operator	3100.00	1.00	1.42	1.57	33.7	4879.63	33.7
2	Supervisor	3100.00	1.00	2.78	3.09	66.3	9587.04	66.3

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

De acuerdo a la Figura 53, el costo por hora de mano de obra es de \$ 3.100 COP, lo que generó un costo anual de \$ 5'280.335 COP para un total de horas trabajadas al año de 1.701 h, correspondientes a las horas en las que el proceso requiera la intervención directa del operario como lo indican los gráficos de la Figura 54, sin embargo, se aclara que este deberá ser contratado con el salario mínimo mensual vigente.

En la Figura 54, se muestra la gráfica equivalente a la demanda de mano de obra requerida en el POAP – EI, en esta se observa que el proceso requiere la intervención del operario al inicio del proceso y después del tiempo de hidrólisis; además en la etapa de refinación se observó algunos intervalos de tiempo en los cuales el proceso no requirió la intervención del trabajador (ver Figura 54, a). Por otra parte, es necesario aclarar que en los intervalos que no fue necesaria la intervención del trabajador, este deberá durante este tiempo realizar operaciones de supervisión del proceso y funciones correspondientes a su cargo (ver Figura 54, b). Cabe aclarar, que estos tiempos son requeridos debido a la naturaleza del flujo de proceso propuesta para el POAP – EI (ver Figura 37, capítulo 4).

Figura 54: diagrama de demanda de mano de obra. a) operador, b) supervisor.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

5.3.3. Costo de potencia

La herramienta incluye en los reportes de evaluación económica, el consumo energético de los equipos involucrados en el proceso, para esto fue necesario proporcionar el valor de la potencia instalada de cada equipo en la simulación (valores que se asignaron en la configuración de cada equipo), y la asignación de costo del W/h en el departamento del Cauca por la Compañía Energética de Occidente [64]. Este costo fue asignado en la configuración de la herramienta.

Proporcionándole a la herramienta los datos de potencia y el precio del watt/h, se obtuvo el reporte de consumo energético (ver Figura 55) en el que se demuestra que, en un mes de operación, la planta habrá consumido aproximadamente 5.227 kW/h que equivalen a \$ 2'930.972 COP. Es importante dejar claro 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 55: consumo de potencia del POAP – EI.

	Power	Unit Cost (\$)	Demand (per batch)	Basis for Cost/Demand	Demand (%)	Total Cost (\$/batch)	Cost (%)
1	Std Power	560.8100	14.32	kW-h	82.7	8030.06	99.2

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

5.3.4. Diagramas de Gantt

Para el análisis de tiempos en la simulación, se tomaron los datos de tiempo de la Tabla 24. A continuación, en la Figura 56 se observa el tiempo de operación del proceso productivo el cual equivale a 7,57 h/Batch que son aproximadamente 7,91923 h anuales; sin embargo, en la estimación de tiempos teórica dio como resultado 7,75 h/Batch, por lo que se estimó un error aproximado del 2%.

Figura 56: estimación de tiempos del POAP – EI en simulación con SuperPro Designer.

Annual Operating Time	7,919.23h
Recipe Batch Time	7.57h

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Tabla 24: distribución de tiempos del POAP – EI.

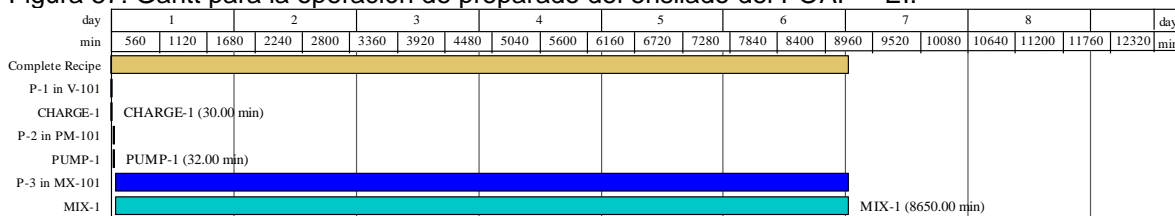
Operación	Variable asociada	Duración [min]	Inicio [min]	Fin [min]
Preparado del ensilado	Llenar vísceras	32	0	32
	Llenar insumos	5	32	37
	Mezclar componentes	10	37	47
	Tiempo de hidrólisis	8640	47	8687
Extracción del aceite del ensilado	Vaciar ensilado	35	0	35
	Extraer aceite crudo del ensilado	35	1	36
Desgomado	Llenar aceite crudo	35	2	37
	Agregar ácido Fosfórico	5	37	42
	Desgomar aceite crudo	60	42	102
	Vaciar mezcla de desgomado	30	102	132
	Extraer aceite desgomado	30	132	162
Neutralizado	Llenar aceite desgomado	30	133	163
	Agregar KOH	5	163	168
	Neutralizar el aceite desgomado	40	168	208
	Vaciar mezcla de neutralizado	30	208	238
	Extraer aceite neutralizado	30	238	268
Decolorado	Llenar aceite neutralizado	30	239	269
	Agregar tierra silícea	5	269	274
	Descolorar aceite neutralizado	40	274	314
	Vaciar mezcla de decolorado	30	314	344
	Extraer aceite decolorado	30	344	374
Desodorizado	Llenar aceite decolorado	30	345	375

Desodorizar aceite decolorado	60	375	435
Vaciar aceite desodorizado	30	435	465

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 57 a Figura 62, se presentan los diagramas de Gantt, los cuales se generaron en la herramienta computacional SuperPro Designer para cada una de las operaciones de proceso, en las que se muestra el tiempo requerido para ejecutar cada acción de proceso.

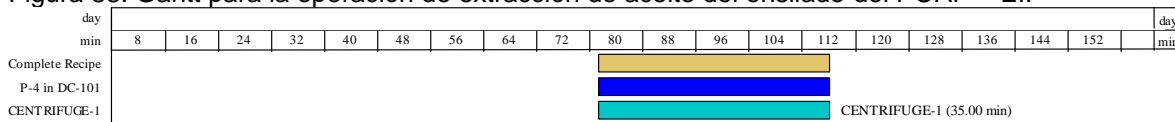
Figura 57: Gantt para la operación de preparado del ensilado del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Como se observa en la Figura 57, los tiempos para la operación de preparado del ensilado son equivalentes a los tiempos estimados teóricamente.

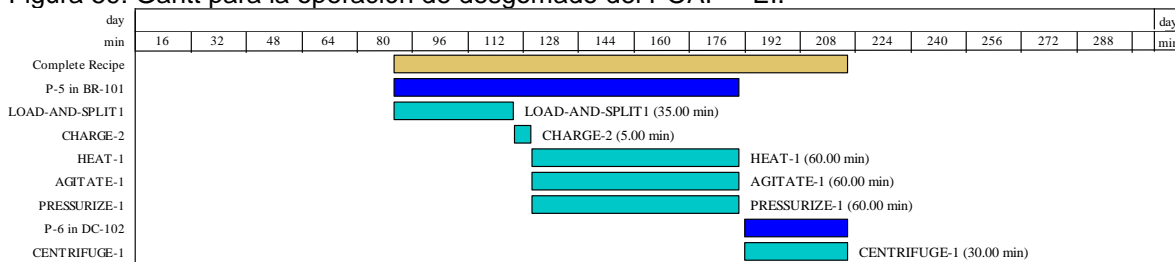
Figura 58: Gantt para la operación de extracción de aceite del ensilado del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 58 se observa que la operación de extracción del ensilado tardó 32 minutos tal como se estipuló en el cálculo teórico, no obstante, se debe tener en cuenta que esta operación inicia después del tiempo de hidrólisis (6 días).

Figura 59: Gantt para la operación de desgomado del POAP – EI.

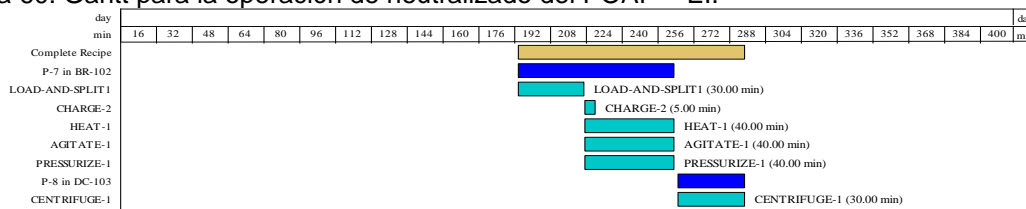


Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 59, se presentan los tiempos que tardaron cada una de las acciones correspondientes a la operación de desgomado, en donde la acción de llenado del reactor tardó 35 minutos, la adición del ácido Fosfórico tardó 5 minutos, las acciones de:

calentamiento, agitación y presión se ejecutan al tiempo y tardaron 60 minutos; luego de esta se ejecutó la acción de extracción del aceite desgomado que demoró 30 minutos.

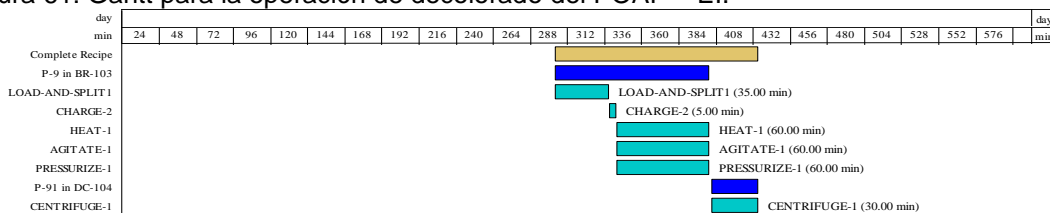
Figura 60: Gantt para la operación de neutralizado del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Como se observa en la Figura 60, la operación de neutralizado inició en simultaneo con la acción de extracción de aceite desgomado, puesto que este aceite va saliendo del equipo separador e ingresa al reactor y duró 30 minutos que es el tiempo de llenado del reactor, la adición del KOH demoró 5 minutos, las acciones de calentamiento, agitación y presión tardaron 60 minutos y se ejecutaron en simultaneo; seguido de estas se ejecutó la acción de extracción de aceite neutro la cual duró 30 minutos.

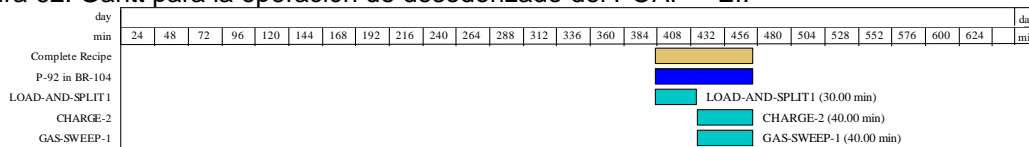
Figura 61: Gantt para la operación de decolorado del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

Como se evidencia en la Figura 61, esta operación presentó un comportamiento similar al de la operación de desgomado, en la cual cada acción de proceso presentó un tiempo de ejecución equivalente a esta.

Figura 62: Gantt para la operación de desodorizado del POAP – EI.



Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 62, se observa que al igual que en las operaciones anteriores, la acción de llenado del reactor inició en simultaneo con la acción final de la operación anterior (extracción de aceite decolorado) durando 30 minutos en su ejecución, posteriormente se ejecutaron las acciones de carga de nitrógeno al reactor y arrastre por nitrógeno que se realizaron en simultaneo con una duración de 40 minutos, terminando así la producción de un lote de aceite refinado de pescado para consumo humano.

5.3.5. Costo materiales e insumos

A continuación, se realizó el estudio de costos requeridos de inversión en materia prima para realizar un lote de aceite de pescado para consumo humano, ver Figura 63.

Figura 63: costo de insumos de proceso obtenidos en simulación con SuperPro Designer.

Bulk Material	Unit Cost (\$)	Annual Amount		Annual Cost (\$)
BHT	1,500.00	262	kg	393,546
Eviscerado	100.00	262,364	kg	26,236,400
Formic Acid	12.80	60	kg	771
KOH	2,500.00	85	kg	213,018
Nitrogen	50,000.00	156	kg	7,798,868
Phosphoric Acid	167.34	23	kg	3,921
Tierra silicea	25,000.00	381	kg	9,535,215
TOTAL				44,181,739

Fuente: elaboración propia, febrero de 2017.

En la Figura 63, se encuentran los costos de materia prima necesarios para generar un lote de aceite de pescado, los cuales están de acuerdo al valor que se encuentran en el mercado, lo que genera un costo anual de \$ 44'181.739 COP equivalentes a un costo por lote de \$121.045,86 COP, lo que representa un costo aproximado por litro de aceite de \$1.891 COP.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

En este trabajo, se realizó la descripción y modelado del POAP desarrollado por los investigadores a nivel de laboratorio a través del diagrama de flujo de proceso, además de los modelos propuestos por el estándar ISA - 88.01 (modelo de control de proceso, físico y de control procedimental). Teniendo como resultado documentación formal y detallada del POAP que permitió evidenciar falencias en la documentación y procedimientos desarrollados a nivel de laboratorio.

Se realizó un diagnóstico del POAP a nivel de laboratorio con el fin de determinar el nivel de dificultad de las fases de proceso y del nivel de automatización; además del análisis de los modelos ISA (control de procesos, físico y procedimental), así mismo, el análisis general del proceso en cuanto a la documentación, mantenimiento y mejoras de algunas fases. Lo que arrojó como resultado datos estadísticos que permiten proponer requerimientos generales, de automatización y hardware para el POAP – EI.

Se documentó el proceso a escala mínimamente aumentada realizada por el equipo de laboratorio ASUBAGROIN, lo que permitió realizar las respectivas comparaciones y análisis del comportamiento de las variables involucradas en el proceso ante cambios del factor de escala, de esta manera se logró una comprensión más clara de lo que sucede intrínsecamente en el proceso y cómo se ve afectado el producto final, de igual manera, por medio de este estudio se generó la propuesta del POAP – EI.

Con las recomendaciones del estándar ISA – 88.01 se modeló el POAP – EI, de igual manera se realizaron los diagramas PFD y P&ID relacionados al flujo de proceso propuesto, con esta documentación se ejecutó el estudio de las variables de proceso, tiempos de proceso y capacidad de producción.

El escogimiento de los equipos involucrados en el proceso se efectuó por medio de una metodología que permitió a través de las cotizaciones realizadas, seleccionar los equipos más adecuados para el proyecto.

Para el modelado en SuperPro Designer del POAP – EI, se validó la propuesta, arrojando como resultado viabilidad del proceso y que por medio de relaciones empíricas y el método de escalado basado en la experiencia, es factible llevar un proceso productivo a nivel de laboratorio a escala industrial.

La implementación del Procedimiento de Escalamiento Industrial de Procesos Productivos (PEIPP) propuesta por el ingeniero Edgardo Martínez Narváez, con las modificaciones planteadas por los autores de este trabajo, facilitó y permitió desarrollar una propuesta a escala industrial del POAP – EI de manera estructurada y detallada.

Finalmente, se entrega una propuesta que contiene el estudio del proceso de obtención de aceite de pescado en las escalas de laboratorio y mínimamente aumentada, además, contiene información detallada como son: modelos ISA – S88.01 (modelo procedimental, físico y de proceso), diagrama de flujo de proceso (PFD), diagramas P&ID que satisfacen el escenario de automatización propuesto, plano de distribución de planta bajo la

normatividad colombiana y por último la simulación del proceso en la herramienta computacional SuperPro Designer; lo anterior diseñado para la propuesta a escala industrial con capacidad de producción de 64 L/batch de aceite de pescado para consumo humano.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda a los investigadores, utilizar los formatos diseñados por los autores de esta monografía, que les permitirán llevar una documentación detallada del proceso sin pérdidas de información, así mismo, estructurar el proceso permitiendo la reproducción de información y llevar el registro de cada uno de los lotes de aceite de pescado.

Se sugiere realizar los estudios de factibilidad y económico alrededor del proceso de obtención de aceite de pescado, lo que permitirá abordar desde otro frente la viabilidad del proceso productivo.

En este trabajo se realizó el estudio de los equipos y sus respectivas cotizaciones, sin embargo, aquellas realizadas a fabricantes en Colombia no obtuvieron respuesta, por lo tanto, se recomienda a los investigadores seguir realizando cotizaciones con lo cual pueden encontrar equipos con las características requeridas a menor costo a los escogidos.

Se ejecutó la descripción conceptual y el modelado con ISA S5.1 para los equipos principales del proceso con información contrastada del laboratorio y la planta a escala mínimamente aumentada, además de información y manuales de los equipos suministrados por los proveedores. Sin embargo, esta información no es suficiente para modelar a detalle los equipos. Por lo tanto, se aconseja, realizar de ser posible una comparación con un proceso productivo real y una vez instalados los equipos, verificar y realizar la descripción conceptual y levantar nuevos modelos, especialmente los diagramas P&ID y de lazo.

Dado que el POAP - EI se encuentra en una primera etapa de diseño, el nivel de detalle de los modelos planteados siguiendo el estándar ISA 88.01 no es alto. Por lo tanto, se sugiere que luego de poner en marcha el proceso de obtención de aceite de pescado para consumo humano a nivel industrial, se verifiquen los modelos en general, en especial las acciones de proceso del modelo de control de proceso y las fases del modelo de control procedimental.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Merino, S. Bonilla, and F. Bages, *Diagnóstico del estado de la Acuicultura en Colombia*. 2013.
- [2] ASUBAGROIN, “Alternativas para el uso de subproductos derivados de la agroindustria piscícola.” pp. 1–58, 2012.
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), *El estado mundial de la pesca y la acuicultura*. Roma, 2014.
- [4] A. Bocek, “Acuicultura.” Argentina, pp. 1–5, 2007.
- [5] O. Navarrete, “Acuicultura.” Perú, pp. 1–11, 2006.
- [6] A. Oberdieck, C. Hildmann, T. Bardócz, L. Váradi, D. Gál, É. Kerepeczki, T. Kosáros, R. Hegedûs, and F. Pekár, “Manual de acuicultura sostenible.” p. 122, 2009.
- [7] J. Lopes, *Piscicultura*. Rio de Janeiro: e-Tec Brasil, 2012.
- [8] M. Novoa, C. Palacios, and E. De León, *Manual de técnicas para laboratorio de nutrición de peces y crustáceos*. 1993.
- [9] G. Salazar Ariza, “Visión general del sector acuícola nacional - Colombia.,” *Dep. Pesca y Acuic. la FAO*, 2005.
- [10] Y. A. Parrado, “Historia de la Acuicultura en Colombia,” *Rev. Aquat.*, no. 37, pp. 60–77, 2012.
- [11] A. Osorio, A. Wills, and A. P. Muñoz, “Characterization of byproducts from the filleting of Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in Colombia,” *Rev. la Fac. Med. Vet. y Zootec.*, vol. 60, no. 3, pp. 1–7, 2013.
- [12] Grupo de investigación ASUBAGROIN, “OBTENCIÓN DE ACEITE DE PESCADO A PARTIR DE SUBPRODUCTOS DE EVISCERADO DE TRUCHA (*Oncorhynchus mykiss*),” Colombia, 2015.
- [13] Sistema General de Regalias, “Piscicultura, sinónimo de progreso en el Cauca,” *Comunicado de prensa*. p. 2, 2014.
- [14] M. A. Grompone, “Aceites de pescados de interés nacional.” pp. 14–19.
- [15] A. Nasiff-Hadad and E. Meriño-Lbarra, “Ácidos Grasos Omega-3: Pescados De Carne Azul Y Concentrados De Aceites De Pescado. Lo Bueno Y Lo Malo,” *Rev. Cubana Med.*, vol. 42, no. 2, pp. 49–55, 2003.
- [16] Z. Francisco, “Las harinas y aceites de pescado en la alimentación acuicola.” pp. 516–526, 2002.
- [17] A. Valenzuela, J. Sanhueza, and F. de la Barra, “El aceite de pescado: Ayer un desecho industrial, hoy un producto de alto valor nutricional,” *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 39, no. 2, pp. 201–209, 2012.
- [18] R. Grimaldi, R. T. Nassu, L. A. Guaraldo Gonçalves, and R. Nogueira Cavaletti Moreira, “Characterization of hydrogenated fats for margarine manufacturing

- purposes.,” *Grasas y Aceites*, vol. 49, no. 1, pp. 1–8, 1998.
- [19] A. Valenzuela, “Consumption pattern of dietary fats in Chile: n-6 and n-3 fatty acids,” *Int. J. Food Sci. Nutr.*, vol. 50, no. 2, pp. 127–133, 1999.
 - [20] D. Roldan Acero, “Extracción y refinación de aceite crudo de pescado.” .
 - [21] O. D. Adeniyi and A. A. Bawa, “Mackerel (*Scomber Scrombrus*) Oil Extraction and Evaluation as Raw Materials for Industrial Utilization,” *Leonardo Journal of Sciences*, vol. 5, no. 8. pp. 33–42, 2016.
 - [22] S. Maqsood, S. Benjakul, and A. Kamal-Eldin, “Extraction, Processing, and Stabilization of Health-Promoting Fish Oils,” *Recent Pat. Food. Nutr. Agric.*, vol. 4, no. 2, pp. 141–147, 2012.
 - [23] N. Rubio-Rodriguez, S. M. de Diego, S. Beltran, I. Jaime, M. T. Sanz, and J. Rovira, “Supercritical fluid extraction of the omega-3 rich oil contained in hake (*Merluccius capensis*-*Merluccius paradoxus*) by-products: Study of the influence of process parameters on the extraction yield and oil quality,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 47, no. 2, pp. 215–226, 2008.
 - [24] M. Z. I. Sarker, J. Selamat, A. S. M. A. Habib, S. Ferdosh, M. J. H. Akanda, and J. M. Jaffri, “Optimization of supercritical CO₂ extraction of fish oil from viscera of African Catfish (*Clarias gariepinus*),” *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 13, no. 9, pp. 11312–11322, 2012.
 - [25] N. Rubio-Rodriguez, S. M. De Diego, S. Beltran, I. Jaime, M. T. Sanz, and J. Rovira, “Supercritical fluid extraction of fish oil from fish by-products: A comparison with other extraction methods,” *J. Food Eng.*, vol. 109, no. 2, pp. 238–248, 2011.
 - [26] C. T. Toro, J. L. Londoño, S. H. Ávila, and C. A. D. Ruales, “Extracción y caracterización de aceite de pescado derivado de subproductos de trucha arco iris (*oncorhynchus mykiss*),” *J. Agric. Anim. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 34–41, 2013.
 - [27] F. Sahena, I. S. M. Zaidul, S. Jinap, M. H. A. Jahurul, A. Khatib, and N. A. N. Norulaini, “Extraction of fish oil from the skin of Indian mackerel using supercritical fluids,” *J. Food Eng.*, vol. 99, no. 1, pp. 63–69, 2010.
 - [28] M. Abdulkadir, G. Abubakar, and A. Mohammed, “Production and characterization of oil from fishes,” *J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 1–5, 2010.
 - [29] V. Lúcia, V. Maura, S. Bermúdez, A. Luis, L. De Oliveira, M. N. Kleinberg, R. De Tasso, M. Ribeiro, R. Ferreira, and A. De Abreu, “Characterization of a hydrolyzed oil obtained from fish waste for nutraceutical application,” *Food Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, pp. 321–325, 2015.
 - [30] M. H. Norziah, J. Nuraini, and K. Y. Lee, “Studies on the extraction and characterization of fish oil from wastes of seafood processing industry,” *Asian J. Food Agro-Industry*, vol. 2, no. 4, pp. 959–973, 2009.
 - [31] Miniambiente, “Guía para el aprovechamiento de los subproductos de pescad para la obtención de productos funcionales y bioactivos,” pp. 1–44, 2012.
 - [32] A. K. Carvajal and R. Mozuraityte, “Fish Oils: Production and Properties,” *Encycl. Food Heal.*, pp. 693–698, 2016.

- [33] M. Spanopoulos-Hernandez, J. T. Ponce-Palafox, G. Barba-Quintero, J. R. Ruelas-Inzunza, M. R. Tiznado-Contreras, C. Hernández-González, and K. Shirai, "Production of biological silage from fish waste, the smoked yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and fillet of tilapia (*Oreochromis* sp), for feeding aquaculture species ," *Rev. Mex. Ing. Qum.*, vol. 9, no. 2, pp. 167–178, 2010.
- [34] M. D. P. B. Balsinde Ruano, I. Fraga Castro, and J. Galindo López, "Inclusión de ensilado de pescado como alternativa en la elaboración de alimento extruido para el camarón de cultivo (*Litopenaeus schmitti*)," *II Congr. Iberoam. Virtual Acuic.*, no. 1, pp. 303–309, 2003.
- [35] V. & S. M. Figueroa, *Tratamiento y utilización de residuos de origen animal, pesquero y alimenticio en la alimentación animal*. 1997.
- [36] R. Martinez P., "Producción de un ensilado biológico a partir de vísceras de pescado de las especies *Prochilodus mariae* (coporo), *Pseudoplatystoma fasciatum* (bagre rayado) y *Phractocephalus hemiliopterus* (cajaro)." p. 80, 2003.
- [37] J. E. Belli, "Estabilidad Aeróbica Y Dia Óptimo De Uso Del Ensilado Biológico De Pescado Para La Alimentacion Animal." p. 53, 2009.
- [38] E. P. Rodríguez, "ACEITE DE PESCADO, USOS Y PROPIEDADES INCREIBLES DE SUS ÁCIDOS GRASOS POLIINSATURADOS DEL GRUPO OMEGA - 3." 2003.
- [39] I. Aidos, N. Kreb, M. Boonman, J. B. Luten, R. M. Boom, and A. Van Der Padt, "Influence of Production Process Parameters on Fish Oil Quality in a Pilot Plant," *J. Food Sci.*, vol. 68, no. 2, pp. 581–586, 2003.
- [40] L. Fiori, M. Manfrini, and D. Castello, "Supercritical CO₂ fractionation of omega-3 lipids from fish by-products: Plant and process design, modeling, economic feasibility," *Food Bioprod. Process.*, vol. 92, no. 2, pp. 120–132, Apr. 2014.
- [41] V. R. Wiggers, A. Wisniewski, L. A. S. Madureira, A. A. C. Barros, and H. F. Meier, "Biofuels from waste fish oil pyrolysis: Continuous production in a pilot plant," *Fuel*, vol. 88, no. 11, pp. 2135–2141, Nov. 2009.
- [42] N. Ismail, N. Tajjudin, M. H. F. Rahiman, and M. N. Taib, "Modeling of dynamic response of essential oil extraction process," *5th Int. Colloq. Signal Process. Its Appl.*, pp. 298–301, 2009.
- [43] M. Abdul, N. Azian, N. Nabila, T. Okayama, and R. Kose, "Residual Oil Recovery Using Bio-Ethanol from Spent Bleaching Clay and Its Characterization," *Control Conf.*, pp. 0–4, 2015.
- [44] E. Reverchon and C. Marrone, "Modeling and simulation of the supercritical CO₂ extraction of vegetable oils," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 19, no. 2, pp. 161–175, Feb. 2001.
- [45] L. Fiori, "Supercritical extraction of grape seed oil at industrial-scale: Plant and process design, modeling, economic feasibility," *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, vol. 49, no. 8, pp. 866–872, Aug. 2010.
- [46] A. D. P. do Nascimento, L. A. L. Soares, L. Stragevitch, and L. Danielski, "Extraction of *Acrocomia intumescens* Drude Oil with Supercritical Carbon Dioxide: Process

- Modeling and Comparison with Organic Solvent Extractions,” *J. Supercrit. Fluids*, vol. 111, pp. 1–7, Jan. 2016.
- [47] M. A. Diaz, “Evaluación de un procedimiento para la refinación de aceite crudo extraído de ensilaje químico de los subproductos de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) provenientes del municipio de Silvia-Cauca,” Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, 2015.
 - [48] C. A. Erazo and C. A. Sanchez, “DISEÑO DE UN PROCESO DE OBTENCIÓN DE ALIMENTO PARA PECES A NIVEL INDUSTRIAL EN EL MARCO DE REGALÍAS ID VRI 3883 - SGR,” Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, 2015.
 - [49] International Society of Automation, *ANSI/ISA-88.01-1995, Batch Control, Part 1: Models and Terminology*. 1995.
 - [50] Crece Negocios, “La cadena de valor de Porter,” *Crece Negocios*, 2014. [Online]. Available: <http://www.crecenegocios.com/la-cadena-de-valor-de-porter/>. [Accessed: 10-Aug-2016].
 - [51] J. Herrera, “Control Industrial Hacia un concepto moderno de la Automatización Industrial,” *Revista Electroindustria*, 2004. [Online]. Available: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=81>. [Accessed: 20-Sep-2016].
 - [52] J. Frohm, V. Lindstrom, J. Stahre, and M. Winroth, “Levels of Automation in Manufacturing,” *Int. J. Ergon. Hum. Factors*, vol. 30, no. 3, p. 28, 2008.
 - [53] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-95.00.01-2000, Enterprise-Control System Integration, Part 1: Models and Terminology*. North Carolina: Instrument Society of America, 2000.
 - [54] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992), Instrumentation Symbols and Identification*. North Carolina: Instrument Society of America, 1992.
 - [55] A. Anaya-Durand and H. Pedroza-Flores, “Scaling-up, the art of chemical engineering: Pilot plants, the step between the egg and the hen,” *Tecnol. Ciencia, Educ.*, vol. 23, no. 1, pp. 31–39, 2008.
 - [56] R. González Castellanos, *Principios Básicos de Escalado*. Universidad de Matanzas, 2000.
 - [57] A. A. Ruiz Colorado, “Factores de Escala para la Producción Biotecnológica de Etanol Carburante,” Universidad Nacional de Colombia, 2009.
 - [58] E. Martínez, “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, 2015.
 - [59] CEEI Ciudad Real Creación y Desarrollo de Empresas, “Guía para la elaboración de un estudio de mercado.” pp. 1–80, 2013.
 - [60] L. Molina, R. Luna, M. Sotelo, S. Rebolledo, F. Figueroa, C. A. De La Cruz, and Á. Cajas, “Estudio de factibilidad planta piloto procesadora de concentrado para peces y módulos de ensilaje Municipio de Silvia y Salvajina,” Popayán, Cauca, 2015.
 - [61] Grupo de investigación ASUBAGROIN, “Escalamiento del proceso de refinación a

- nivel piloto.” Popayán, Cauca, p. 1, 2015.
- [62] A. Creus, *Instrumentación Industrial*, Octava. México, 2010.
 - [63] J. F. Flórez Marulanda, “Capítulo I,” in *Instrumentación Industrial: Generalidades y Últimas Tendencias*, 2012.
 - [64] Compañía Energetica de Occidente, “Contrato de Condiciones Uniformes Para la Prestación del Servicio Público Domiliario de Energía Eléctrica.” Popayán, Cauca, pp. 1–55, 2001.
 - [65] F. D. Gunstone, *VEGETABLE OILS IN FOOD TECHNOLOGY: composition, properties and uses*. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2002.
 - [66] Presidente de la República de Colombia, “Decreto 3075 de 1997.” Bogotá, Colombia, pp. 1–54, 1997.
 - [67] Ministro de salud y protección social, “Resolución 2674 de 2013.” Bogotá, Colombia, pp. 1–37, 2013.
 - [68] Ministro de salud y protección social, “Resolución 1160 de 2016.” Bogotá, Colombia, pp. 1–128, 2016.
 - [69] N. Gaither and G. Fraizer, “Administración de producción y operaciones.” p. 738, 2000.
 - [70] M. Riquelme, “Web y empresas,” *La cadena de valor de Michel Porter*, 2012. [Online]. Available: <http://www.webyempresas.com/la-cadena-de-valor-de-michael-porter/>. [Accessed: 21-Sep-2016].
 - [71] L. Arimany, “Luis Arimany,” *La cadena de valor*, 2010. [Online]. Available: <http://www.luisarimany.com/la-cadena-de-valor/>. [Accessed: 21-Sep-2016].
 - [72] G. Reyes, “Diagramas Analógicos con Simbología ISA y SAMA.” pp. 1–96, 2010.
 - [73] R. Electronics, “RFFlow,” *Process Flow Diagram (PFD) Process and Instrument Drawing (P&ID)*, 2010. [Online]. Available: <http://www.rff.com/process-flow-diagrams.htm>. [Accessed: 21-Sep-2016].
 - [74] Instrument Society of America, *ANSI/ISA-5.2-1976 (R1992), Binary Logic Diagrams for Process Opetations*. North Carolina: Instrument Society of America, 1992.
 - [75] Instrument Society of America, *ISA-5.3-1983, Graphic Symbols for Distributed Control/Shared Display Instrumentation, Logic and Computer Systems*. North Carolina: Instrument Society of America, 1982.
 - [76] Intelligen Inc, *El programa computacional SuperPro Designer®*. 2005.
 - [77] Intelligen Inc, “Algal Oil Production Modeling and Evaluation using SuperPro Designer.” pp. 1–26, 2015.
 - [78] Presidente de la República de Colombia and Ministerio del Trabajo, “Decreto número 2209 de 2016.” p. 6, 2016.